

5

Temel Parçacıklar ve Doğadaki Kuvvetler

Aristoteles evrendeki maddelerin hepsinin dört temel elementten oluştuğuna inanırdı: Toprak, hava, ateş ve su. Bu elementleri de iki kuvvet etkiliyordu: Ağırlık toprağın ve suyun batma eğilimi, hafiflikse havanın ve ateşin yükselme eğilimiydi. Evrenin içeriğinin madde ve kuvvetler olarak ikiye ayrılması günümüzde de yaygınlığını koruyor.

Aristoteles maddenin sürekliliği inancındaydı. Ona göre bir parça maddeyi herhangi bir sınır olmaksızın durmadan daha küçük parçalara ayırabilirdiniz: Asla daha fazla bölünmesi olanaksız olacak bir madde tanesine ulaşamazdınız. Öte yandan Demokritos gibi bazı Yunanlılar maddenin doğası gereği taneli olduğunu ve her şeyin çok sayıda farklı çeşitten atomların birleşmesinden oluştuğunu öne sürerlerdi. (*Atom* kelimesi Yunancada "bölünmez" anlamına gelir.) Tartışma yüzyıllar boyunca iki taraf da gerçek kanıta sahip olmaksızın sürdü. 1803 yılında İngiliz kimyacı ve fizikçi John Dalton kimyasal bileşiklerin her zaman belirli ölçülerde birleşmesi olgusunun atom-

ların bir araya toplanarak moleküller dediğimiz birimleri oluşturmalarıyla açıklanabileceğini gösterdi. İki düşünce okulu arasındaki tartışmanın nihayet atomcuların lehine sonuçlanması ancak 20. yüzyılın ilk yıllarında oldu. Bu alanda fiziksel kanıtın önemli bir bölümünü Einstein'a borçluyuz. 1905 yılında özel görelilik üzerine ünlü makalesini kaleme almadan birkaç hafta önce yazdığı bir makalede Einstein, Brown hareketi dediğimiz olgunun (bir sıvıda asılı olarak gözlediğimiz küçük toz parçacıklarının düzensiz ve rastgele hareketinin) sıvının toz parçacıklarıyla çarpışan atomlarının etkisi üzerinden açıklanabileceğini gösterdi.

Bu dönemde zaten atomların bölünemezlikleri konusunda şüphe duyulmaya başlanmıştı. Birkaç yıl öncesinde Trinity College, Cambridge'ten bir meslektaşımız J. J. Thomson elektron adı verilen, en hafif atomun kütlesinin binde birinden daha düşük kütleli bir madde parçacığının varlığını göstermişti. Thomson modern televizyon tüplerine benzeyen bir düzenek kullandı: Kızgın bir metal tel elektron yayıyor ve elektronlar eksi elektrik yüküne sahip olduklarından fosfor kaplı ekrana doğru hızlandırılmaları için bir elektrik alanı kullanılabiliyordu. Ekranı çarptıklarında ışık parıltıları oluşuyordu. Aradan fazla zaman geçmeden bu elektronların doğrudan atomların içerisinden geliyor olmaları gerektiği anlaşıldı ve 1911 yılında İngiliz fizikçi Ernest Rutherford sonunda madde atomlarının birer iç yapıya sahip olduğunu gösterdi: Atomlar olağanüstü küçüklükte artı yüklü bir çekirdekten ve onun etrafında dönen elektronlardan oluşmaktaydı. Bu çıkarıma, radyoaktif atomlardan yayılan artı yüklü parçacıklar olan alfa parçacıklarının atomlarla çarpıştıklarında uğradıkları sapmaları çözümleyerek ulaşılmıştı.

Başlangıçta atom çekirdeğinin elektronların yanı sıra farklı sayılardaki artı yüklü parçacıklardan oluştuğu düşünülürdü. Bu parçacıklara Yunancada "birinci" anlamına gelen proton adı verildi, çünkü protonların maddenin temel birimi olduğuna inanılıyordu. Ancak 1932 yılında Rutherford'un Cambridge'ten çalışma arkadaşı olan James Chadwick çekirdeğin nötron adı verilen bir başka parçacık daha içerdiğini keşfetti. Nötronlar protonlarla hemen hemen aynı kütleye sahip ancak elektriksel olarak yüksüzdüler. Chadwick bu keşfinden dolayı Nobel ödülü aldı ve Cambridge'te Gonville and Caius College'a üstat olarak seçildi (ben de şu an bu okulun bir üyesiyim). Daha sonra üyelerle düştüğü anlaşmazlıklar nedeniyle bu yöneticilik görevinden istifa etti. Bu okulda geçmişte savaştan dönmüş, genç üyeler grubunun oylarını uzun süreler boyunca görevde kalmış eski üyelerin çoğunun görevden ayrılması yönünde kullanmalarından bu yana tatsız kavgalar olmuştur. Bunlar benim dönemimden önceydi; ben okula 1965'te tatsızlıkların sona ermeye yüz tuttuğu dönemde katıldım, bu son dönemde de benzer uyuşmazlıklar başka bir Nobel ödüllü üstat olan Sir Nevill Mott'u istifaya sürüklemişti.

Bundan otuz yıl öncesine kadar proton ve nötronların "temel" parçacıklar olduğu düşünülürdü, ama protonların yüksek hızlarda başka protonlar veya elektronlarla çarpıştırıldığı deneyler bize bunların da daha küçük parçacıklardan oluştuğunu gösterdi. Bu parçacıklara Caltech fizikçisi Murray Gell-Mann'ın önerisiyle kuarklar adı verildi, Gell-Mann da bu konudaki çalışması sayesinde 1969'ta Nobel ödülünü almıştır. Kuark isminin kökeni James Joyce'tan zor anlaşılır bir alıntıya dayanır: "Muster Mark için üç kuark!" Aslında metinde anlam bakımından İngilizcede *quark* değil *quart* [sıvı ölçümünde yaklaşık bir litre] kelimesinin kullanılması gerekirdi, ama *lark*

[tarlakuşu] kelimesiyle uyak sağlama gereği sonundaki *t* harfi *k*'ye dönüştürülmüştür.*

Kuarkların farklı çeşitleri vardır: Altı “çeşni” var, bunlara yukarı, aşağı, acayıp, tılsım, alt ve üst diyoruz. İlk üç çeşninin varlığı 1960'lardan beri biliniyordu, tılsım kuark 1974'te, alt kuark 1977'de, üst kuark 1995'te keşfedildi. Her çeşni üç “renk”le tanımlıdır, bunlar da kırmızı, yeşil ve mavidir. (Bu son terimlerin sadece bizim verdiğimiz isimler olduğu vurgulanmalı: Kuarklar görünür ışığın dalga boyundan çok daha küçüktür, dolayısıyla kelimenin normal anlamıyla herhangi bir renge sahip değildir. Böyle adlandırılmalarının tek nedeni modern fizikçilerin yeni parçacık ve olguları isimlendirmekte daha yaratıcı olmaya çalışmaları olsa gerek, artık kendilerini Yunancayla kısıtlamıyorlar!) Bir proton veya nötron her biri ayrı renkte üç kuarktan oluşur. Bir protonda iki yukarı kuark ve bir aşağı kuark vardır, bir nötrondaysa iki aşağı kuark ve bir yukarı kuark vardır. Başka kuarklardan (acayıp, tılsım, alt ve üst) oluşan parçacıklar da yaratabiliriz ama bunların hepsinin kütlesi çok daha büyüktür ve çok hızlı bir biçimde protonlara ve nötronlara bozunurlar.

Artık atomların da, onların içindeki protonların ve nötronların da bölünemez olmadığını biliyoruz. O zaman soru şu: Gerçek temel parçacıklar nelerdir, her şeyin üzerinde yükseldiği temel yapıtaşları nedir? Işığın dalga boyu bir atomun boyutlarından çok daha büyük olduğu için atomun içerisindeki bölümlere bildiğimiz anlamda “bakmayı” ümit edemeyiz. Dalga boyu çok daha küçük

* *Finnegans Wake*'de James Joyce tarafından Tristan efsanesindeki aldatılmış koca Kral Mark'a ithafen kaleme alınan 13 dizelik şiirin modern fizikte iz bıraktığı görülüyor. Söz konusu dizeler ve serbest çevirisi şöyle:

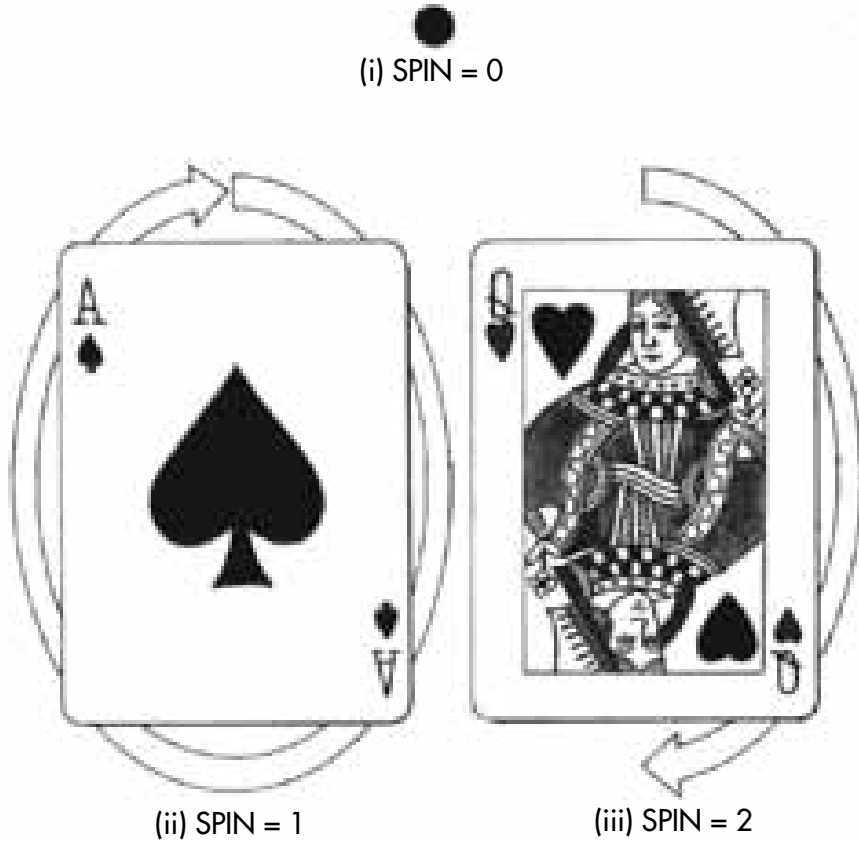
Three quarks for Muster Mark!/Sure he hasn't got much of a bark/
And sure any he has it's all beside the mark.

Şişinen Mark'a üç şişe!/ Bağırıp çağırmasın boş yere/Zaten hiçbir yaptığı dokunmaz dişe -çn.

olacak bir şey kullanmamız gerekir. Bir önceki bölümde gördüğümüz gibi, kuantum mekaniği bize tüm parçacıkların aslında dalga olduğunu ve bir parçacığın enerjisi ne kadar fazlaysa onun dalgasının dalga boyunun o derece küçük olduğunu söyler. Öyleyse soruya iyi bir cevap vermemiz elimizdeki parçacık enerjisinin ne kadar yüksek olduğuna bağlıdır, çünkü bu bakabileceğimiz uzunluk ölçeğinin ne kadar küçük olacağını belirler. Bu parçacık enerjileri genellikle elektron volt dediğimiz birimlerle ölçülür. (Thomson'un elektron deneylerinde elektronları hızlandırmak için bir elektriksel alan kullandığını görmüştük. Bir elektronun bir voltluk bir elektriksel alandan kazandığı enerjiye elektron volt diyoruz.) On dokuzuncu yüzyılda, insanların kullanmayı bildiği tek parçacık enerjisinin yanma gibi kimyasal tepkimeler sonucunda ortaya çıkan birkaç elektron voltluk düşük enerjiler olduğu dönemde atomların en küçük birimler olduğu düşünülürdü. Rutherford'un deneyindeyse alfa parçacıkları milyonlarca elektron voltluk enerjilere sahipti. Daha yakın bir geçmişte de elektromanyetik alanların parçacıklara önce milyonlarca, ardından milyarlarca elektron voltluk enerjiler vermek için nasıl kullanılabilirdiğini öğrendik. Şimdi artık otuz yıl önce "temel" olduğu düşünülen parçacıkların aslında daha küçük parçacıklardan oluştuğunu biliyoruz. Sürekli daha yüksek enerjilere doğru ilerlediğimiz için yarın öbür gün bunların da daha küçük parçacıklardan oluştukları sonucuna ulaşabilir miyiz? Elbette bu mümkün, ancak doğanın nihai yapı taşlarının bilgisine ulaşmış veya ulaşmaya çok yakın olduğumuza inanmamız için bazı kuramsal nedenlere de sahibiz.

Bir önceki bölümde bahsi geçen dalga/parçacık ikiliği kullanılarak –ışık ve kütleçekim dahil– evrendeki her şey parçacıklar cinsinden ifade edilebilir. Bu parçacıkların spin adını verdiğimiz bir özelliği vardır. Spini kafamızda

canlandırmanın bir yolu, parçacıkları bir eksen etrafında dönen küçük topaçlar olarak düşünmektir. Ancak bu akıl karıştırıcı olabilir, çünkü kuantum mekaniği bize parçacıkların iyi tanımlı bir eksene sahip olmadıklarını söyler. Bir parçacığın spini aslında bize parçacığın farklı yönlerden nasıl görüldüğünü anlatır. 0 spinli bir parçacık bir noktaya benzer: Her yönden aynı görünür (Şekil 5.1-i). Öte yandan 1 spinli bir parçacık ok gibidir: Farklı yönlerden farklı görünür (Şekil 5.1-ii). Sadece tam bir dönme (360 derece) boyunca çevrilirse parçacık aynı görünür. 2 spinli bir parçacık çift başlı bir oka benzer (Şekil 5.1-iii): Yarım dönme boyunca (180 derece) çevrilirse aynı görünecektir. Aynı şekilde daha yüksek spinli parçacıklar tam bir dönmenin daha küçük kesirleri kadar çevrildiklerinde aynı görünürler. Her şey oldukça basit görünüyor ama şaşırtıcı-



Şekil 5.1

cı gerçek şudur ki, sadece bir dönme boyunca çevrildiklerinde aynı görünmeyen parçacıklar da vardır: Onları iki tam dönme boyunca çevirmeniz gerekir! Bu parçacıklara $\frac{1}{2}$ spinli parçacıklar diyoruz.

Evrende bilinen bütün parçacıkları iki gruba ayırmamız mümkündür: Evrendeki maddeyi oluşturan $\frac{1}{2}$ spinli parçacıklar ve madde parçacıkları arasındaki kuvvetlere sebep olan 0, 1 ve 2 spinli parçacıklar. Madde parçacıkları Pauli'nin dışarlama ilkesine uyar. Bu ilkeyi Avusturyalı fizikçi Wolfgang Pauli 1925 yılında buldu ve bu sayede 1945 yılında Nobel ödülüne layık görüldü. Kendisinin kuramsal fizikçi dediğimiz türün mükemmel bir örneği olduğunu söylemeliyiz: Onun aynı kentteki varlığının bile deneylerin ters gitmesine neden olduğu rivayet edilir! Pauli'nin dışarlama ilkesi iki benzer parçacığın aynı durumda olamayacağını söyler, bu demek oluyor ki belirsizlik ilkesinin belirlediği sınırlar içerisinde iki parçacık hem aynı konuma hem de aynı hıza sahip olamaz. Dışarlama ilkesi hayati bir önem taşır, çünkü madde parçacıklarının niçin 0, 1 ve 2 spinli parçacıkların ürettiği kuvvetlerin etkisi altında çok yüksek yoğunlukta bir duruma doğru çökmediklerine açıklık getirmektedir: Madde parçacıkları hemen hemen aynı konumdaysa, bu durumda hızları farklı olmak zorundadır; bu da uzun süre aynı konumda kalamayacakları anlamına gelir. Dünya dışarlama ilkesi olmadan yaratılmış olsaydı, kuarklar birbirlerinden ayrı ve iyi tanımlı proton ve nötronlara biçim veremezdi. Hepsi birden genel hatlarıyla düzgün, yoğun bir "çorba" oluşturacak şekilde çökerdi.

Elektron ve diğer $\frac{1}{2}$ spinli parçacıklar konusunda muntazam bir kavrayış sağlanması ancak 1928 yılında, daha sonra Cambridge'te Lucas Matematik Profesörlüğü kürsüsüne seçilecek olan Paul Dirac'ın bir kuramsal önerisiyle mümkün oldu (Newton'un zamanında sahip olduğu

ve şu an bana layık görülen aynı kürsüdür). Dirac'ın kuramı hem kuantum mekaniği hem de özel görelilik kuramıyla uyumlu olması açısından türünün ilkiydi. Elektronun neden $\frac{1}{2}$ spine sahip olduğunu, diğer bir deyişle neden sadece tek bir tam dönme çevrildiğinde aynı gözükmeyip iki dönme sonrası aynı gözüktüğünü matematiksel olarak açıklıyordu. Kuram elektronun bir ortağının, bir karşı-elektron veya pozitronun var olması gerektiğini de öngörmüştü. Pozitronun varlığının 1932 yılında keşfedilmesi Dirac'ın kuramını doğruladı ve 1933 yılında Nobel fizik ödülünü almasını sağladı. Bugün her parçacığın imha olmasını mümkün kılan bir karşı-parçacığa sahip olduğunu biliyoruz. (Kuvvet taşıyıcı parçacıklardaysa parçacıklar karşı-parçacıklarıyla özdeştir.) Kim bilir belki de karşı-parçacıklardan yapılmış tamamen karşı-dünyalar ve karşı-insanlar vardır. Ama sakın ola kendi karşınızla veya karşı-benliğinizle rastlaştığınızda tokalaşmaya kalkmayın! Büyük bir ışık parlamasıyla birlikte ikiniz de yok olursunuz. Neden çevremizde karşı-parçacıklara göre çok daha fazla sayıda parçacığın var gibi görüldüğü çok önemlidir ve bu bölümün devamında bu soruya tekrar döneceğim.

Kuantum mekaniğinde madde parçacıkları arasındaki kuvvetler veya etkileşimlerin hepsinin tamsayı spinli (0, 1 veya 2) parçacıklarla taşınması gerekir. Elektron veya kuark gibi bir madde parçacığı, kuvvet taşıyıcı bir parçacık yayar. Bu yayının aksisi tesiri madde parçacığının hızını değiştirir. Ardından kuvvet taşıyıcı parçacık başka bir madde parçacığıyla çarpışır ve soğurulur. Bu çarpışma, sanki iki madde parçacığı arasında bir kuvvet varmış gibi, ikinci parçacığın hızını değiştirir. Dışarlama ilkesine uymamaları kuvvet taşıyıcı parçacıkların önemli bir özelliğidir. Bu, değişim sayısında bir sınır olmadığı anlamına gelir ve dolayısıyla da yeğin bir kuvvetin oluşu-

muna sebep olur. Ancak kuvvet taşıyıcı parçacıklar büyük bir kütleyle sahiplerse, üretilmeleri ve uzak mesafelerden değiş tokuş edilmeleri zor olur. Bu yüzden taşıdıkları kuvvetler kısa bir erime sahiptir. Öte yandan kuvvet taşıyıcı parçacıklar kendi başlarına bir kütleyle sahip değillerse, kuvvetler uzun erimli olacaktır. Madde parçacıkları arasında değiş tokuş edilen kuvvet taşıyıcı parçacıklara sanal parçacıklar adı verilir, çünkü "gerçek" parçacıkların aksine parçacık algılayıcıları tarafından doğrudan tespit edilemezler. Ama ölçülebilir bir etkiye sahip oldukları için var olduklarından da eminiz: Madde parçacıkları arasındaki kuvvetlere onlar sebep oluyorlar. 0, 1 veya 2 spinli parçacıklar da bazı koşullar altında doğrudan tespit edilebildiklerinde gerçek parçacıklar olarak var oluyorlar. Bu durumda bize ışık dalgaları veya kütleçekim dalgalarına benzer, bir klasik fizikçinin dalga olarak adlandıracağı bir şekilde görünüyorlar. Kimi zaman madde parçacıkları, birbirleriyle sanal kuvvet taşıyıcı parçacıklar değiştirecek şekilde etkileştikleri durumlarda da yayınımına uğruyorlar. (Örneğin iki elektron arasındaki itici elektrik kuvvetinin nedeni sanal fotonların değişimidir ve bu hiçbir zaman doğrudan tespit edilemez, ama bir elektron bir başka elektronun yanından geçerse dışarıya gerçek fotonlar verilebilir ve bunları ışık dalgaları olarak tespit ederiz.)

Kuvvet taşıyıcı parçacıklar taşıdıkları kuvvetin etkinliğine ve etkileşime geçtikleri parçacıklara göre dört gruba ayrılabilir. Bu bölümlendirmenin tamamen insan eseri olduğunu vurgulamalıyız; kısmi kuramların oluşturulmasında fayda sağlamaktadır ama bunun ötesinde daha derin bir mana atfedilmesi doğru olmaz. Günün birinde fizikçilerin çoğu bu dört kuvveti tek bir kuvvetin farklı yönleri olarak açıklayacak bir birleşik kuram bulabilme umudunu taşımaktadır. Hatta çok sayıda kişi bunun gü-

nümüz fiziğinin temel amacı olduğunu da söyler. Son dönemde kuvvetin bu dört kategorisinin üçünü birleştirme yönünde başarılı girişimler oldu ve bu bölümde bunlardan da bahsedeceğim. Geriye kalan kategori olan kütleçekim kuvvetinin de birleştirilmesi konusunu ise daha sonra ele alacağız.

İlk kategorimiz kütleçekim kuvveti. Bu kuvvet evrenseldir, diğer bir deyişle her parçacık kütlesi veya enerjisi ölçüsünde kütleçekim kuvvetini hisseder. Kütleçekim bu dört kuvvet içerisinde uzak ara en zayıf olanıdır; öyle zayıftır ki sahip olduğu iki özgün özellik olmasa onu hiç fark etmezdik bile: Uzak mesafeler aşarak etkiyebilir ve her zaman çekicidir. Bu dünya ve güneş gibi iki büyük cismin tek tek parçacıkları arasındaki çok zayıf kütleçekim kuvvetlerinin hepsinin birleşerek önemli bir kuvvet üretebildiği anlamına gelir. Diğer üç kuvvet ya kısa erimli ya da bazen çekici bazen iticidirler, dolayısıyla birbirlerini götürme eğilimindedirler. Kütleçekim alanına kuantum mekanik yönden yaklaşımda iki madde parçacığı arasındaki kuvvet, graviton adı verilen 2 spinli bir parçacık tarafından taşınacak şekilde resmedilir. Gravitonun kendisine ait bir kütlesi yoktur, dolayısıyla taşıdığı kuvvet uzun erimlidir. Güneş ile dünya arasındaki kütleçekim kuvvetinin varlığı, bu iki cisim oluşturan parçacıklar arasındaki gravitonların değişimine atfedilir. Değiştirilen parçacıklar sanal olsa da ölçülebilir bir etki doğurdıkları kesindir, dünyanın güneş etrafında dönmesini sağlamaktadırlar! Gerçek gravitonlar klasik fizikçilerin ifadesiyle kütleçekim dalgaları oluştururlar, ama bunlar oldukça zayıftır ve tespit edilmeleri o kadar zordur ki henüz gözlenmemişlerdir.

Sıradaki kategorimiz olan elektromanyetik kuvvet ise, elektronlar ve kuarklar gibi elektrik yüklü parçacıklarla etkileşime girer, ancak gravitonlar gibi yüksüz parçacık-

larla etkileşime girmez. Kütleçekim kuvvetine göre çok daha yeğindir: İki elektron arasındaki elektromanyetik kuvvet, kütleçekim kuvvetinden yaklaşık bir milyon milyon milyon milyon milyon (1'in ardından kırk iki sıfır) kat büyüktür. Ancak iki çeşit elektrik yükü vardır, artı ve eksi yük. İki artı yük arasındaki kuvvet, tıpkı iki eksi yük arasındaki kuvvet gibi iticiyken, bir artı yük ile bir eksi yük arasındaki kuvvet çekicidir. Dünya veya güneş gibi büyük bir cisim hemen hemen birbirine yakın sayıda artı ve eksi yük içerir. Bu yüzden tek tek parçacıklar arasındaki itici ve çekici kuvvetler birbirlerini hemen hemen tümüyle yok ederler ve sonuçta çok az miktarda bir elektromanyetik kuvvet kalır. Öte yandan elektromanyetik kuvvetler atomların ve moleküllerin küçük ölçeğinde baskındırlar. Tıpkı kütleçekim kuvvetinin dünyanın güneşin yörüngesinde dönmesini sağlaması gibi, çekirdekdeki eksi yüklü elektronlar ile artı yüklü protonlar arasındaki elektromanyetik çekim, elektronların atomun çekirdeği etrafında dönmesine neden olur. Fotonlar adı verilen 1 spinli çok sayıdaki sanal kütlelessiz parçacığın değişimi, elektromanyetik çekimin nedeni olarak görülür. Burada değiştirilen fotonlar da yine sanal parçacıklardır. Ancak bir elektron konumunu izinli bir yörüngeden çekirdeğe daha yakın başka bir yörüngeneye değiştirdiğinde enerji açığa çıkar ve gerçek bir foton yayılır; bu foton uygun bir dalga boyuna sahipse ışık formunda insan gözü tarafından veya fotoğraf filmi gibi bir foton algılayıcısı tarafından gözlemlenebilir. Benzer biçimde gerçek bir foton bir atomla çarpışırsa, bir elektronu çekirdeğe yakın bir yörüngeden daha uzak bir yörüngeneye hareket ettirebilir. Böylece fotonun enerjisi kullanılmış olur, dolayısıyla foton soğurulur.

Üçüncü kategoride ışınım etkinliğine sebep olan ve $\frac{1}{2}$ spinli tüm madde parçacıklarına etkiyen, ancak fotonlar

veya gravitonlar gibi 0, 1 veya 2 spinli parçacıklara etkimeyen zayıf nükleer kuvvet yer alıyor. Maxwell'in elektrik ve manyetizmayı birleştirmesinden yaklaşık yüz yıl sonra 1967 yılında Londra'daki Imperial College'tan Abdus Salam ve Harvard'dan Steven Weinberg bu etkileşimi elektromanyetik kuvvetle birleştiren kuramlarını beraberce ortaya atana dek zayıf nükleer kuvvet hakkında fazla bilgiye sahip olduğumuz söylenemez. Salam ve Weinberg fotona ek olarak, zayıf kuvvet taşıyan ve hepsi toplu olarak kütleli vektör bozonları olarak adlandırılan üç adet 1 spinli parçacık daha olduğunu söylediler. Bunlara W^+ (W artı okunur), W^- (W eksi okunur) ve Z^0 (Z sıfır okunur) adı verildi ve her biri 100 GeV (GeV giga elektron volt demektir ve bir milyar elektron volta eşittir) civarında bir kütleye sahipti. Weinberg-Salam kuramı kendiliğinden simetri kırınımı adı verilen bir özelliğe sahiptir. Bu, düşük enerjilerde birbirlerinden tamamıyla farklı olarak görünen parçacıkların aslında hepsinin aynı türde, sadece farklı durumlardaki parçacıklar olduğunun bulunmasıdır. Yüksek enerjilerde bu parçacıkların hepsi benzer davranmaktadır. Bunu rulet masasındaki rulet topunun hareketine benzetebiliriz. Yüksek enerjilerde (ruletteki teker hızla döndürüldüğünde) top esasen tek bir biçimde hareket eder, sürekli döner. Ama tekerlek yavaşladığında topun enerjisi azalır ve en nihayetinde top tekerlekteki otuz yedi yuvadan birisine düşer. Başka bir ifadeyle, düşük enerjilerde topun var olabileceği birbirinden farklı otuz yedi durum vardır. Eğer herhangi bir nedenden dolayı topu sadece düşük enerjilerde gözleyebiliyorsa olsaydı, bu durumda otuz yedi farklı türde top olduğunu düşünürdük!

Weinberg-Salam kuramında 100 GeV'den çok daha yüksek enerjilerde bu yeni üç parçacık ve foton, hepsi benzer biçimde hareket eder. Ama normalde karşılaştığımız daha düşük parçacık enerjilerinde parçacıklar ara-

sındaki bu simetri kırılır. W^+ , W^- ve Z^0 çok büyük kütleler edinirler ve taşıdıkları kuvvetlerin erimlerini olağanüstü kısaltırlar. Salam ve Weinberg kuramlarını ortaya attıkları dönemde onlara inanan çok az kişi oldu, keza parçacık hızlandırıcıları da gerçek W^+ , W^- ve Z^0 parçacıklarının üretimi için gereken 100 GeV'lik enerjilere ulaşacak ölçüde güçlü değildiler. Yine de aradan on yılı aşkın bir süre geçtiğinde kuramın düşük enerjilere ilişkin diğer öngörülerinin deneylerle doğrulandığı görüldü ve 1979 yılında Salam ve Weinberg, yine Harvard'da çalışan ve elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvetler alanında benzer birleşik kuramlarda imzası bulunan Sheldon Glashow'la beraber Nobel fizik ödülüne layık görüldüler. 1983 yılında CERN'de (Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi) fotonun bu üç kütleli partnerinin varlığı, tam da öngörülen kütleler ve diğer özellikleriyle birlikte keşfedildiğinde Nobel komitesi hata yapmış olmanın utancını hâlâ üzerinden atamamıştı. 1984 yılındaki Nobel ödülünü bu keşfi yapan birkaç yüz fizikçiden oluşan ekibi yöneten Carlo Rubbia, kullanılan karşı-madde depolama sistemini geliştiren CERN mühendisi Simon van der Meer'le paylaştı. (Bugünlerde zaten en tepede yer almıyorsanız deneysel fizikte iz bırakmak çok zordur!)

Dördüncü kategorideki yeşin nükleer kuvvet, proton ve nötronun içerisindeki kuarkları ve atom çekirdeğindeki protonları ve nötronları bir arada tutmaktadır. Bu kuvvetin gluon adı verilen ve sadece kendisiyle ve kuarklarla etkileşen başka bir 1 spinli parçacık tarafından taşındığına inanılmaktadır. Yeşin nükleer kuvvetin kuark hapsi adı verilen garip bir özelliği vardır: Birbirine bağladığı parçacıkları her zaman renksiz bileşimlerde birleştirir. Kendi başına bir kuark var olmaz, çünkü bunun bir rengi olur (kırmızı, yeşil veya mavi). Bunun yerine kırmızı bir kuarkın gluonlardan oluşmuş bir "sicim" aracılığıyla yeşil

bir kuark ve mavi bir kuarkla birleşmesi gerekir (kırmızı + yeşil + mavi = beyaz). Bu tip bir üçlü, bir proton veya bir nötronu oluşturur. Bir diğer olasılık bir kuark ve bir karşı-kuarktan oluşan bir çifttir (kırmızı + karşı-kırmızı veya yeşil + karşı-yeşil veya mavi + karşı-mavi = beyaz). Bu tür bileşimler mezonlar olarak adlandırılan parçacıkları oluştururlar. Mezonlar kararsızdır, çünkü kuark ile karşı-kuark birbirlerini yok edebilir, bunun sonucunda da elektronlar veya başka parçacıklar oluşabilir. Hapsedilme benzer biçimde tek bir gluonun da kendi başına var olmasını önler, çünkü gluonların da rengi vardır. Bu yüzden elimizde renkleri toplamda beyaz eden bir gluon derlemesi olması gerekir. Bu derleme, gluon topu adını verdiğimiz kararsız parçacığı meydana getirir.

Hapsedilmenin bir kuarkın veya gluonun yalnız gözlemlenmesini engellemesi olgusunun, parçacıklar dünyasında kuarkların ve gluonların varlığını biraz metafiziğe taşıdığı düşünülebilir. Ancak yeğin nükleer kuvvetin asimptotik özgürlük dediğimiz başka bir özelliğinin olması kuark ve gluon kavramlarını iyi tanımlı hale getirir. Normal enerjilerde yeğin nükleer kuvvet gayet güçlüdür ve kuarkları sıkıca birbirine bağlar. Öte yandan büyük parçacık hızlandırıcılarıyla yapılan deneyler yüksek enerjilerde yeğin kuvvetin çok daha zayıfladığını ve kuarklar ve gluonların neredeyse özgür parçacıklar gibi hareket ettiklerini göstermektedir. Şekil 5.2 yüksek enerjili bir proton ile karşı-proton arasındaki çarpışmanın fotoğrafını göstermektedir. Elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvetlerin birleştirilmesinde sağlanan başarı, bu iki kuvveti yeğin nükleer kuvvetle birleştirerek bir büyük birleşik kuram (GUT) elde edilmesi yönünde bir dizi girişime neden olmuştur. Bu isim bir miktar abartılıdır: Sonuçta elde edilen kuramlar kütleçekim kuvvetini içermediği için ne o kadar büyük ne de tam manasıyla bir-



Şekil 5.2 Bir proton ile bir karşı-proton çok yüksek enerjide çarpışarak bir çift neredeyse serbest kuark üretiliyorlar.

leşiktir. Aslında tamamlanmış kuramlar da sayılmazlar, çünkü deneye uyacak şekilde seçilmek zorunda olan ve kuramdan yola çıkarak değerleri öngörülemeyen bir dizi parametreye sahiptirler. Her şeye rağmen tam birleşik bir bütünsel kurama doğru ilerleyişimizde ileriye doğru bir adım sayılabilirler. Büyük birleşik kuramlardaki ortak fikir şudur: Yukarıda bahsettiğimiz üzere yeğin nükleer kuvvet yüksek enerjilerde zayıflamaktadır. Öte yandan asimptotik olarak özgür olmayan elektromanyetik ve zayıf kuvvetler yüksek enerjilerde yeğinleşir. Büyük birleştirme enerjisi adı verilen çok yüksek bir enerjide bu üç kuvvetin hepsi aynı etkinliğe sahip olarak böylelikle tek bir kuvvetin farklı halleri haline gelebilirler. Ayrıca büyük birleşik kuramlar, bu enerjide kuarklar ve elektronlar gibi farklı $\frac{1}{2}$ spinli madde parçacıklarının hepsinin esasen aynı hale gelebileceğini ve bu sayede başka bir birleştirme daha elde edilebileceğini öngörmektedir.

Büyük birleştirme enerjisinin değeri tam olarak bilinmiyor, ama tahminen en az bir milyar çarpı milyon GeV

olsa gerek. Parçacık hızlandırıcılarının bugünkü nesli yaklaşık yüz GeV düzeyindeki enerjilerde parçacıkları çarpıştırabiliyor ve bunu birkaç bin GeV'e çıkartacak makinelerin yapımı planlanıyor. Ancak parçacıkları büyük birleştirme enerjisi düzeyinde hızlandırmaya yetecek güçteki bir makinenin en az güneş sistemi büyüklüğünde olması lazım; zaten mevcut ekonomik iklimde bu yönde yatırımlar yapılması da pek olası gözüküyor. Dolayısıyla büyük birleşik kuramları doğrudan laboratuvarlarda test etmemiz olanaksız. Ancak elektromanyetik ve zayıf birleşik kuramda olduğu gibi, kuramın test edilebilecek düşük enerji vargıları söz konusu.

Bunların arasında en ilginç, bildiğimiz maddenin kütlesinin çoğunu oluşturan protonların karşı-elektronlar gibi daha hafif parçacıklara kendiliğinden bozunumunun öngörülmesidir. Bunun mümkün olmasının sebebiyse büyük birleştirme enerjisinde bir kuark ile bir karşı-elektron arasında temelde bir fark olmamasıdır. Bir protonun içerisinde yer alan üç kuarkın hiçbiri normalde karşı-elektronlara dönüşmek için yeterli enerjiye sahip değildir, ama çok nadiren içlerinden biri geçişi yapmaya yeterli enerjiyi elde edebilir. Bunun nedeni belirsizlik ilkesinin, protonun içerisindeki kuarkların enerjisinin tam olarak sabitlenemeyeceği anlamına gelmesidir. Bu durumda proton bozunur. Bir kuarkın yeterli enerjiyi kazanması olasılığı o kadar düşüktür ki, bunun için bir kuarkın en az bir milyon milyon milyon milyon (1'in ardından otuz sıfır) yıl beklemesi gerekir. Bu kabaca on milyar (1'in ardından on sıfır) yıl önce gerçekleşen Büyük Patlamadan bu yana geçen süreden çok daha uzundur. Bu yüzden kendiliğinden proton bozunumu olasılığının deneysel olarak test edilemeyeceği düşünülebilir. Ancak bozunum tespit etme şansımızı çok büyük sayılarda proton içeren çok fazla miktarda maddeyi gözlemleyerek arttırabiliriz. (Ör-

neğin sayısı 1'in ardından otuz sıfır olan adette protonu bir yıllık bir zaman aralığında gözlersek, en basit büyük birleşik kurama göre birden fazla protonun bozunduğunu gözlememiz beklenir.)

Bu tip bir dizi deney gerçekleştirilmiş, ama hiçbirinde proton bozunumu kanıtına ulaşılammıştır. Bu deneylerden birinde sekiz bin ton su kullanılmış ve deney (proton bozunumuyla karıştırılabilecek kozmik ışınların neden olabileceği başka olayların gerçekleşmesinden kaçınmak için) Ohio'daki Morton tuz madeninde gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında kendiliğinden proton bozunumu gözlenmediği için, protonun muhtemel ömrünün on milyon milyon milyon (1'in ardından otuz bir sıfır) yıldan daha büyük olması gerektiği hesaplanmıştır. Bu en basit büyük birleşik kuramda öngörülen yaşam süresinden daha uzundur, ama tahmini yaşam süresinin daha uzun olduğu daha özenli ve karmaşık kuramlar da vardır. Yine de bunları test etmek için çok daha büyük madde miktarlarının kullanılacağı daha duyarlı deneylerin yapılması gerekecektir.

Kendiliğinden proton bozunumunu gözlemlemek çok zor olsa da, bizim varoluşumuzun ters çevrilmiş sürecin, protonların veya daha basiti kuarkların üretiminin bir sonucu olması mümkündür. Buna göre başlangıç durumunda kuarklar karşı-kuarklardan daha fazla sayıda değildi; zaten evrenin başlangıcını bu şekilde hayal etmemiz de gayet doğaldır. Dünyadaki madde esasen protonlar ve nötronlardan, bunlar da kuarklardan oluşmuştur. Fizikçilerin büyük parçacık hızlandırıcılarında ürettikleri birkaç tanesinin haricinde, karşı-kuarklardan oluşan karşı-protonlar ve karşı-nötronlar yoktur. Aynısının galaksideki bütün maddeler için geçerli olduğuna dair kanıtları kozmik ışınlardan elde etmiş durumdayız: Yüksek enerji çarpıştırmalarında parçacık/karşı-parçacık çiftleri

olarak üretilmiş az sayıdaki örnek haricinde, karşı-proton veya karşı-nötron yoktur. Galaksimizde geniş karşı-madde bölgeleri olsaydı, madde ve karşı-madde bölgeleri arasındaki sınırlarda, buralarda çok sayıda parçacık karşı-parçacıklarıyla çarpıştığı, birbirlerini yok ettiği ve sonuç olarak dışarıya yüksek enerji ışınması yayıldığı için, bizim de büyük miktarlarda radyasyonun varlığını gözlemlememiz beklenirdi.

Diğer galaksilerdeki maddenin proton ve nötronlardan mı yoksa karşı-proton ve karşı-nötronlardan mı oluştuğuna dair doğrudan kanıtlara sahip değiliz, ama bunlardan ya biri ya diğeri olmak zorundadır: Bir galaksi karışım durumunda olamaz, çünkü bu durumda yine birbirini yok etmelerden kaynaklı çok büyük bir ışınma gözlerdik. Bu yüzden bütün galaksilerin karşı-kuarklardan ziyade kuarklardan oluşmuş olduğu düşüncesindeyiz; bazı galaksilerin maddeden bazılarının karşı-maddeden oluşması mantıksız görünüyor.

Neden kuarkların sayısının karşı-kuarklara göre çok daha fazla olması gerek? Neden her ikisinden de eşit sayıda yok? Sayıların eşit olmaması kesinlikle bizim talihi-miz sayılmalı, çünkü aynı olsalardı erken evrende hemen hemen bütün kuarklar ve karşı-kuarklar birbirlerini yok eder ve evreni ışımayla dolu, ama neredeyse hiç maddenin olmadığı bir halde bırakırlardı. Bu durumda insan yaşamının gelişebileceği gezegen, yıldız ve galaksiler olmazdı. Şansımıza büyük birleşik kuramlar başlangıçta her ikisinden eşit sayıda da olsa, evrenin niçin bugün karşı-kuarklara oranla daha fazla kuark içermesi gerektiğinin açıklamasını sunabiliyorlar. Daha önce bahsettiğimiz gibi, büyük birleşik kuramlarda kuarkların yüksek enerjide karşı-elektronlara dönüşmesine izin veriliyor. Ters çevrilmiş süreçler, karşı-kuarkların elektronlara dönüşümü ve elektronlar ile karşı-elektronların karşı-ku-

arklara ve kuarklara dönüşümü de mümkün. Çok erken evrende, ortamın parçacık enerjilerinin büyüklüğünün bu dönüşümlerin gerçekleşmesi için yeterli olacağı ölçüde sıcak olduğu bir zaman vardı. Peki ama bu neden karşı-kuarklardan daha çok sayıda kuarkın oluşumuna sebep olsun? Bunun nedeni fizik kurallarının parçacıklar ve karşı-parçacıklarda tamamen aynı işlememesidir.

1956 yılına dek fizik kurallarının C, P ve T adında her biri birbirinden farklı üç simetriye birden uyduğu düşünülürdü. C simetrisi parçacık ve karşı-parçacıkların yasalarının aynı olduğu anlamına gelir. P simetrisi her durumda ve bunların ayna görüntüsünde yasaların aynı olduğu anlamına gelir (Sağ el yönünde spine sahip bir parçacığın ayna resmi sol el yönlüdür). T simetrisi tüm parçacıkların ve karşı-parçacıkların hareket yönünü ters çevirirseniz sistemin daha önceki zamanda olduğu duruma geri dönmesi gerektiği anlamına gelir; başka bir deyişle zamanın ileri ve geri yönlerinde yasalar aynıdır. 1956 yılında Tsung-Dao Lee ve Chen Ning Yang adlı iki Amerikalı fizikçi zayıf kuvvetin gerçekte P simetrisine uymadığını öne sürdüler. Başka bir ifadeyle zayıf kuvvet evrenin, evrenin ayna görüntüsünün gelişmesinden daha farklı bir biçimde gelişmesini sağlıyordu. Aynı yıl Chien-Shiung Wu adlı meslektaşımız bu öngörünün doğruluğunu kanıtladı. Bunu radyoaktif atomların çekirdeklerini manyetik bir alanda hepsi aynı yönde dönecek şekilde düzenleyerek ve bu durumda bir yönde diğerine göre daha fazla elektron saçıldığını göstererek başardı. Ertesi yıl Lee ve Yang bu fikirlerinden dolayı Nobel ödülüne layık görüldüler. Zayıf kuvvetin ayrıca C simetrisine de uymadığı bulundu. Bu karşı-parçacıklardan oluşmuş bir evrenin bizim evrenimizden daha farklı hareket etmesi demektir. Zayıf kuvvetin her şeye karşın halen CP birleşik simetrisine uyduğu görülüyordu. Bunun anlamı eğer her bir parçacık

karşı-parçacığıyla değiştirilirse, evrenin ayna görüntüsüyle aynı biçimde geliyeceğiydi! Ancak 1964'te yine iki Amerikalı, J. W. Cronin ve Val Fitch, K-mezonlar adı verilen bazı parçacıkların bozunumunda CP simetrisine bile uyulmadığını keşfettiler. Cronin ve Fitch 1980 yılında bu çalışmaları için Nobel ödülü aldılar. (Birçok ödül evrenin bizim düşündüğümüz kadar basit olmadığını gösterenlere verilmiştir!)

Kuantum mekaniğine ve göreliliğe uyan bir kuramın her zaman birleşik CPT simetrisine de uyması gerektiğini söyleyen bir matematik teoremi vardır. Başka bir ifadeyle parçacıkları karşı-parçacıklarla değiştirip, bunun ayna görüntüsünü alıp, üstüne bir de zamanın yönünü tersine çevirirsek evren yine aynı şekilde hareket ediyor olmalıydı. Ancak Cronin ve Fitch parçacıklar karşı-parçacıklarla değiştirilip ayna görüntüsü alınır, ama zamanın yönü ters çevrilmezse evrenin aynı *olmadığını* gösterdiler. Bu yüzden zamanın yönü ters çevrilirse fizik yasaları değişmek zorundadır; T simetrisine uyulmamaktadır.

Erken evrenin T simetrisine uymadığı açıktır: Zaman ilerledikçe evren genişlemektedir; geriye gitseydi evren büzüşürdü. T simetrisine uymayan kuvvetler olduğu için de buradan çıkan sonuç, evren genişledikçe bu kuvvetlerin (elektronların karşı-kuarklara çevrilmesiyle karşılaştırıldığında) daha fazla karşı-elektronun kuarka çevrilmesine sebep olmalarıdır. Ardından evren genişledikçe ve soğudukça karşı-kuarklarla kuarklar birbirlerini yok edecek, ancak kuarklar karşı-kuarklara göre daha fazla olduğu için geriye bir miktar daha fazla kuark kalacaktır. Bugün gördüğümüz ve bizleri de meydana getiren maddeyi oluşturanlar işte bunlardır. Bu yüzden bizim nacizane varlığımız büyük birleşik kuramların (sadece niteliksel de olsa) bir doğrulamasıdır; belirsizlikler yok olmanın ardından geriye kalan kuarkların sayısının veya geriye

kalacak olanların kuarklar mı karşı-kuarklar mı olup olmadığının öngörülemediği ölçüdedir. (Öte yandan fazla olanlar karşı-kuarklar olsaydı, bu durumda karşı-kuarklara kuark, kuarklara da karşı-kuark adını veriyor olurduk.)

Büyük birleşik kuramlar kütleçekim kuvvetini içermezler. Bu çok da bir şey fark ettirmez, çünkü kütleçekim o kadar zayıf bir kuvvettir ki, temel parçacıklar veya atomlarla uğraşırken etkileri genellikle göz ardı edilebilir. Ancak hem uzun erimli hem de her zaman çekici olması etkilerinin birikerek toplandığı anlamına gelir. Dolayısıyla madde parçacıklarının sayısının yeterli büyüklükte olduğu koşullarda kütleçekim kuvvetleri tüm diğer kuvvetlere baskın çıkabilir. Evrenin evrimini belirleyen kütleçekim olmasının nedeni budur. Kütleçekimin çekici kuvveti, bir yıldız boyutundaki cisimlerde bile tüm diğer kuvvetlere üstün gelerek yıldızın çökmesine sebep olabilir. 1970'li yıllardaki çalışmalarım bu tip yıldız çökmelelerinin ve onların çevresindeki yoğun kütleçekim alanlarının sonucunda ortaya çıkabilecek kara delikler konusuna odaklanmıştı. Kuantum mekaniği ve genel görelilik kuramlarının birbirlerini nasıl etkileyebileceklerinin, dolaşısıyla ileride oluşabilecek bir kuantum kütleçekim kuramının gelişiminin ilk ipuçlarına bizi götüren de bu oldu.

6

Kara Delikler

Kara delik terimi oldukça yenidir. 1969 yılında Amerikalı bilim insanı John Wheeler bu terimi kökleri bundan en az iki yüz yıl öncesine, ışık hakkında iki kuramın bulunduğu döneme kadar uzanan bir fikrin görsel betimlemesi için ortaya attı: Bu kuramlardan biri Newton'un savunduğu ışığın parçacıklardan oluştuğunu, diğeriye dalgalardan oluştuğunu savlıyordu. Bugün aslında iki kuramın da doğru olduğunu biliyoruz. Kuantum mekaniğinin dalga/parçacık ikiliği uyarınca ışık hem dalga hem de parçacık olarak nitelendirilebilir. Dalga kuramında kütleçekimin ışığı nasıl etkilediği belirsizdi. Öte yandan ışık eğer parçacıklardan oluşuyorsa, parçacıkların da kütleçekimden top mermileri, roketler ve gezegenler nasıl etkileniyorsa aynı şekilde etkilenmesi beklenirdi. Başlangıçta ışık parçacıklarının sonsuz hızla hareket ettikleri düşünülürdü, kütleçekimin parçacıkları yavaşlatamamasının nedeni bu olsa gerekti; ama Roemer'in ışığın sonlu bir hızda hareket ettiğini keşfetmesi kütleçekimin önemli bir etkisi olabileceği anlamına geliyordu.