Çeviren: Fatih Şekerci

Gerçekliğin Sınırına Yolculuk

EVRENE BİR DE BÖYLE BAKIN

MICHAEL DINE

SAY

EVRENE BİR DE BÖYLE BAKIN

MICHAEL DINE

Michael Dine, Santa Cruz'daki Kaliforniya Üniversitesi, Parçacık Fiziği Enstitüsü'nde Ayrıcalıklı Fizik Profesörü olarak kariyerini sürdürüyor. Sloan, Guggenheim ve Amerikan Fizik Birliği üyeliklerine sahip olan Dine, 2010'da Amerikan Sanat ve Bilim Akademisi üyeliğine seçildi. Parçacık fiziği teorisinde yaptığı çalışmalar nedeniyle J.J. Sakurai Ödülü'ne layık görüldü. Ulusal Bilim Akademisi üyeliğine seçildi ve Amerikan Fizik Birliği'nin Teorik Parçacık Fiziğinin Geleceği Komitesi'nin başkanlığını yaptı.

FATİH ŞEKERCİ

1996'da İstanbul'da doğdu. 2018 yılında İTÜ Moleküler Biyoloji ve Genetik bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini 2021 yılında İTÜ Jeoloji Mühendisliği bölümünde tamamladı. İTÜ bünyesinde bulunan Jeomikrobiyoloji ve Biyojeokimya Laboratuvarı'nda bakteri-mineral ilişkileri, bu ilişkilerin doğaya olan etkileri ve astrobiyoloji alanındaki yorumlamaları konularında akademik çalışmalarını sürdürüyor.

EVRENE BİR DE BÖYLE BAKIN

Gerçekliğin Sınırına Yolculuk

Michael Dine

Çeviren: Fatih Şekerci

SAY

Say Yayınları
Popüler Bilim

Evrene Bir De Böyle Bakın / Michael Dine
Özgün adı: *This Way to the Universe*

© 2022 Michael Dine
Bu edisyon Penguin Random House LLC'ye bağlı Penguin Publishing Group'un bir markası olan Dutton ile yapılan anlaşma sonucu yayımlanmıştır.

Türkçe yayın hakları Akcalı Ajans aracılığıyla © 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 978-605-02-0934-1
Sertifika no: 10962

İngilizceden çeviren: Fatih Şekerci
Yayın Koordinatörü: Sinan Köseoğlu
Editör: Selin Aktuyun

Baskı: Dörtel Matbaacılık
Zafer mah. 147. Sk. 9-13A
Esenyurt/İstanbul
Tel.: (0212) 565 11 66
Matbaa sertifika no: 40970

1. Baskı: Say Yayınları, 2023

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/sayyayinlari

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

BİRİNCİ ADIM 7

1. Evreni Gözlemlemek 9
2. Uzay ve Zamanı Gerçekten Anlayabilir miyiz? 21
3. *Evren*den Kastımız Ne? 37

İKİNCİ ADIM 61

4. Kuantum Mekaniği Geleceği Tahmin Edebilir mi? 63
5. Nükleer Çağın Meyveleri 86
6. En Küçük Şeylerin Kütlesi 109
7. Yıldızlar 128

ÜÇÜNCÜ ADIM 137

8. Neden Hiçlik Yerine Bir Şeyler Var? 139
9. "Büyük Sayı Problemi" 155
10. Evreni Meydana Getiren Nedir? 170
11. Karanlık Enerji 192

KARARSIZA ATILAN ADIM 203

12. Her Şeyin Başlangıcı 205
13. Koltuğumuzdan Kalkmadan Bir Final Teorisi Oluşturabilir miyiz? 217
14. Gerçeklik Manzarası 255
15. Teorik Fizik Zarını Atmak 275

NOTLAR 281
TEŞEKKÜRLER 285
DİZİN 287

Melanie, Aviva, Jeremy, Shifrah, Matt ve Oren'e…

BİRİNCİ ADIM

BÖLÜM 1
EVRENİ GÖZLEMLEMEK

Benzersiz bir zamandaymışız gibi görünüyor. Bir yandan iklim değişimi, küresel pandemi, nükleer savaş tehdidi gibi göz korkutucu zorluklarla karşı karşıyayken, diğer yandan dünyamız ve bizi saran evren hakkında tür olarak sahip olduğumuz bilgi sadece bir asır önce yaşamış bir insanın hayal edebileceğinin bile ötesine geçti. Ne olursa olsun, günlük deneyimlerimizin çok minik bir köşesini oluşturan doğamız hakkında eşsiz bilgilere sahibiz. Hayatlarımız santimetre, metre, kilometre, belki de binlerce kilometre ölçeğinde geçip gidiyor. Fakat biz doğa hakkında çok daha küçük ölçeği, bir atomun çekirdeğinden çok daha küçük şeyleri biliyoruz. Aynı zamanda evren hakkında hayal etmenin bile zor olduğu yüksek mesafelere ilişkin de bilgi sahibiyiz. Daha da mükemmel olanı ise milyarlarca yıl önce gerçekleşmiş olaylarla ilgili bildiklerimiz –ki gerçekten biliyoruz– ve bu şekilde milyarlarca yıl sonra evrende nelerin olacağını da yakın bir şekilde tahmin edebiliyor oluşumuz. Gerçekten eşsiz bir zamandayız.

Çoğumuz uzaktaki yıldız ve galaksilerin, evrenin milyarlarca yıl önceki büyük patlama ile oluştuğuna dair ipucu sağ-

ladığını duymuşuzdur. Fakat evren tam olarak ne kadar büyük ve kaç yaşında? Kaynağı ne? Sonu ne olacak? Bu sorulara nasıl cevap bulabiliriz?

Atomları ve atomlardan daha küçük olan parçacıkları biliyoruz. En güçlü mikroskoplarla bile gözlemlenemeyecek kadar küçük olan atom çekirdekleri hakkında nasıl bilgi sahibi olabiliyoruz? Bu kadar küçük şeyler evren kadar büyük bir şeyin hareketini, nasıl oluyor da sandviç yapımını, kredi kartı kullanımını veya araba sürmeyi etkilediği gibi kontrol edebiliyor? Evrenimiz en yüksek ölçekten en küçük ölçeğe dek son derece gizemli görünebilir. Kozmosun yapısı ve onu meydana getiren maddeler hakkında daha fazlasını söyleyebilir miyiz? Son derece büyük ölçekteki gerçeklik hakkındaki sorularımızı cevaplayacak deneyler kurabilir miyiz?

Bunları yazdığım sırada halen Covid-19 pandemisi ile uğraşıyoruz. Başımızdaki bu beladan dolayı 10'un üslerinin ne kadar önemli olduğunun farkına varmış olduk. Salgının başlarında vaka sayısı her hafta neredeyse 10 kat büyüyordu. Aynı şekilde devam etmesinin Birleşik Devletler'de meydana gelecek vaka sayısı hakkında ne anlama geldiğine bakalım.

2 Mart 2020	100
10 Mart 2020	1.000
18 Mart 2020	10.000
25 Mart 2020	100.000
3 Nisan 2020	1.000.000
7 Nisan 2020	10.000.000

Beş hafta içerisinde hasta insan sayısı 100'den 10 milyona çıkıyor. Fakat virüs bir noktadan sonra enfekte olmayan insan bulamayacağı için büyüme zaten yavaşlardı. Neyse ki eyaletler ve yerel birimler üssel büyümenin başlamasından

sonra iki hafta geçmeden, 11 Mart 2020'de, birkaç gün içinde kapanmaya yönelik önlemler almaya başladılar. İki hafta sonra –virüsün semptomlarının görülmeye başlandığı süre– yarı kapanmanın etkileri hissedilmeye başlandı. 10 Mart'ta 994 vaka vardı, 1.000 beklentimizin hemen altındaydı, 18 Mart'ta 9.307 vaka vardı, 10.000 beklentimizin daha da altındaydı. Fakat sonrasında 25 Mart'ta 68.905 vaka ile sosyal mesafenin etkileri görüldü. 3 Nisan'da 250.000, 11 Nisan'da 509.000 vaka vardı ki, en kötü senaryomuzdan yaklaşık 200 kat daha düşüktü. Aldığımız sert önlemler milyonlarca hayatın kurtulmasını sağladı. Önlemleri daha önceden almış olsaydık daha fazla hayat kurtarabilirdik, ya da geç kalsaydık felaketin boyutu katlanabilirdi. Sonuç olarak daha çabuk önlem alan eyalet ve yerel bilimler daha iyi iş çıkardı. Tüm dünyada da benzer hikâyeler yaşandı. Takip eden aylarda insanların davranışlarındaki değişime, gelişen tedavi yöntemlerine ve yeni çıkan aşılara bağlı olarak virüsün artan etkileri azaldı.

Fakat 10'un üsleri her zaman bu kadar korkunç hikâyeler anlatmak zorunda değil. Doğa hakkında düşünürken son derece değerli araçlardır. Biz insanlar, devasa evrendeki küçücük bir gezegende yaşıyoruz. Aynı zamanda çok daha küçük şeylerin dünyası da var, moleküller, atomlar, protonlar, nötronlar ve elektronlar. 10'un üsleri bu mutlu yolculuklarda da çok kullanışlılar. 1977'de, bir lisans öğrencisiyken kardeşimle Smithsonian Enstitüsü'nü ziyaret ettiğimde endüstriyel tasarımdaki işleriyle tanınan Charles ve Ray Eames'in *Powers of Ten* isimli kısa filmini seyretmiştim. Bu güzel film o zamanlar doğanın en büyük ve en küçük ölçekleri hakkındaki bilgimizi özetliyordu. Uzunluk ve genişlik olarak ortalama iki metre yer kaplayan bir çiftin baharın keyfini çıkardıkları bir anla başlıyor, sonrasında ölçek 10'un üsleri şeklinde büyüyor ve parkları, şehirleri, eyaletleri, ülkeleri, gezegeni, güneş sis-

temini, galaksileri ve galaksi kümelerini gösteriyordu. Sonrasında aynı şekilde küçülmeye başlıyor, insan anatomisinin parçaları, hücreler, atomlar ve atom çekirdekleri şeklinde ilerliyordu. O zamana kadar öğrendiğim şeyleri çok iyi özetlemişti. Dürüst olmak gerekirse filmin anlattığı kadarını da bilmiyordum.

Takip eden yıllarda birçok gelişme yaşandı. Doğayı onlarca kat küçük ve büyük ölçekte anlayabiliyoruz ve iki yönde de onlarca kat daha anlama yolunda ipuçlarına sahibiz. Bu gelişmelerin çoğuna şahit oldum ve bir kısmına katkı sağladım. Doğanın hikâyesini devasa ölçeklerde anlatmak bu kitabın ana konusunu oluşturuyor. Hikâye fizik, astrofizik ve kozmoloji olarak ilerliyor. Bazı bölümlerde geçtiğimiz yüzyılda biyoloji, tıp, bilgisayar ve bilişim bilimlerinde ve diğer alanlarda meydana gelen çarpıcı buluşlardan da bahsedeceğim.

Bu gelişmeler teorik çalışanların ve deneycilerin kendilerini işlerine adamalarının ürünü. Bahsettiğim ikililik/dikotomi kafanızı karıştırabilir fakat önümüzdeki sayfalarda bu karışıklığı giderebileceğimi umuyorum. Kariyerimi temel olarak deneysel fizik üzerine inşa etsem de öğrencilik yıllarımda teorik fiziğe âşık olmuştum. Profesyonel kariyerim için riskli bir seçimdi ve mentorlarımdan bazıları çok sıkı bir rekabet olacağına dair beni uyarmıştı. Onlara inanmış, kendimi teoriye dair yeterince çalıştığıma ve aslında alanın kendisine âşık olduğuma inandırmıştım. Lisansüstü öğrencilik yıllarımı o zamanlardaki en küçük ölçekle, atom çekirdeğinin yaklaşık üçte birine tekabül eden 10^{-14} santimetre ölçeğinde (bir santimetrenin yüz trilyonda biri) çalışarak geçirdim. O zamanlar çok da parlak bir öğrenci olmadığımı itiraf etmeliyim, fakat hocalarım bana inanıyordu. Doktora sonrası çalışmalarıma Menlo Park, Kaliforniya'da bulunan Stanford Doğrusal

Hızlandırıcı Merkezi'nde başladım. Burada, daha da küçük ölçeği anlamak adına yapılan deneylere katkıda bulundum. Danışmanlarımdan Sidney Drell nükleer silahların kontrolü konusunda söz sahibiydi, atılgan bir genç teorisyen olan Leonard Susskind de Stanford'a yeni gelmişti. Yine de o dönemde yolumu bulma konusunda epey zorlandım. Üzerinde çalıştığım problemler beni tam anlamıyla motive etmiyordu.

Stanford'da geçirdiğim iki yılın ardından Princeton'da bulunan İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne benzer bir pozisyonda transfer oldum. Yalnızca teorik çalışmaların var olduğu bir enstitüydü ve özellikle ilk zamanlarından ötürü oldukça meşhurdu. En bilinen isim Albert Einstein olsa da J. Robert Oppenheimer (İkinci Dünya Savaşı sırasında Los Alamos'ta yapılan atom bombası çalışmasının yöneticisi), John von Neumann (bilgisayar biliminin öncüsü) ve George Kennan (Soğuk Savaş'ın ilk zamanlarında Birleşik Devletler'in Sovyetler Birliği'ne karşı politikasını şekillendiren diplomat) gibi isimlerin yolu buradan geçmişti. Bugün yine Edward Witten, Nathan Seiberg, Juan Maldacena ve Nima Arkani-Hamed gibi dünyada teorik fiziğin öncüsü olan isimler fakültenin kadrosunda bulunuyor. Bu ortamda kendi bilimsel merakımı bulmuş ve o zamanki bilgimizin ötesine dair sorular sormaya başlamıştım. Oradan, oldukça verimli geçecek olan beş yıllık bir dönem için New York Şehir Koleji'ne geçtim. Ardından ailevi sebeplerle Batı Yakası'na döndüm ve Santa Cruz'daki Kaliforniya Üniversitesi'ne transfer oldum. Sonraki otuz senemi burada geçirdim.

UC* Santa Cruz, Monterey Körfezi'ne bakan yüksek kızılçamların ortasına inşa edilmiş. 1965'te kurulurken, okulun 1960'ların eğitim ve etkinlik vizyonuna radikal bir yaklaşım

* UC (University of California): Kaliforniya Üniversitesi. (Çev.)

getirmesi amaçlanmıştı. Resmî olmayan sloganı "Biz Berkeley* değiliz" şeklindeydi, fakültenin ve akademik kadronun sadece araştırmayla değil, öğrencilerle de sorumlu olacağı anlamında kullanılıyordu. Bu vizyon bugün hâlâ devam ediyor, fakat UCSC (UC Santa Cruz) şans eseri önde gelen araştırma merkezlerinden biri haline geldi. Üniversitenin astronomi alanındaki girişimi Lick Gözlemevi, merkezini Mount Hamilton'dan Santa Cruz'daki kampüse taşıdı. Kampüs büyük fay sistemlerine olan yakınlığı sebebiyle yer bilimcilerini ve körfezin zengin ekolojisinden ötürü deniz biyologlarını kendine çekerken; biyologlar, kimyacılar ve matematikçiler de bu doğal güzelliğin içinde çalışma fırsatını yakalamak istiyorlardı. Ayrıca yakın mesafede bulunan Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'ndeki parçacık fiziğinde kullanılabilen yeni devrimsel enstrümandan dolayı UCSC parçacık fizikçileri için de bir merkez haline geldi.

Bense çok sonra, 1990'da, hayalini kurduğum orman içindeki bu hippi enstitüye katılma fırsatı buldum. Gerçekten hayal ettiğim gibiydi, aynı zamanda son derece zengin bir entelektüel ve bilimsel bir ortamla da karşılaşmıştım. Yine beni Santa Cruz'a getiren kişisel sebeplerden ötürü Santa Cruz Dağları'nın diğer tarafında, Silikon Vadisi'nin de bir parçası olan "yaşlı şehir" San Jose'de yaşadım. Neyse ki gittiğim ilk günden beri, meslektaşlarımla bir arabada işe gitme şansım oldu. O zamanlar grupta Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nde, Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı'nda (Chicago yakınlarındaki Fermilab) ve Cenevre'deki büyük Avrupa laboratuvarı CERN'de deneyler yapan dört yüksek enerji fizikçisi bulunuyordu. Ayrıca iki de gökbilimci vardı. Deneycilerden ikisi Dallas, Teksas'ta yapılması planlanan ve inşasının

* Kaliforniya Üniversitesi'nin Berkeley'de bulunan kampüsüne göndermede bulunuluyor. (Çev.)

ilk aşamalarında olan dünyanın en büyük parçacık hızlandırıcısı Süper İletken Süper Çarpıştırıcı (SSC: *Superconducting Super Collider*) projesinde yönetici konumunda bulunuyordu. İki protonun devasa enerjilerle hızlandırılıp çarpıştırılması ve çarpışma sonucu oluşacak maddelerin incelenmesi amaçlanıyordu. Binlerce bilim insanının çalıştığı multimilyar dolarlık bu projede, yol arkadaşlarım çarpışmada oluşacak parçacıkların tespit ve takibinde baş sorumlu kişilerdi. Gökbilimcilerden biri gezegenleri anlamak üzerine çalışıyordu. O zamanlar güneş sistemimizin dışındaki gezegenlerin varlığı birer spekülasyon konusuydu. Her şey 1995'te ilk ötegezegenin keşfiyle başladı. Santa Cruz'daki gökbilimciler çığır açan bu teknolojiye ve altında yatan gezegen teorisine önemli katkıda bulundular. Diğer gökbilimci kozmologdu ve karanlık maddenin yıldızlar ve galaksilerin oluşumuna olan etkisine dair teorinin yaratıcılarından biriydi.

1993'te Başkan Bill Clinton SSC'nin maliyetinin arttığının ve inişli çıkışlı olan hükümet harcama politikalarını zayıflattığının farkına vardı. Bir sonbahar günü meclis projeyi sonlandırma kararı aldı. Ben meslektaşlarımın birkaç gün yas tutmasını beklerken onlar sonraki sabah arabada, inşasının ilk aşamalarında olan ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC: *Large Hadron Collider*) olarak bilinen projeye katılmaları için Cenevre, İsviçre'den aldıkları davet üzerine tartışıyorlardı. Anlaşmaya vardılar ve küçük parçacıkları tespit edecek olan büyük detektörün, ATLAS'ın üzerinde derhal çalışmaya başladılar. Makinenin faaliyete geçmesine 15 sene vardı. Bu süre boyunca bilim, teknoloji ve fonlama konusunda hem birçok başarı elde edildi hem de aksilikler yaşandı. En yıkıcı olanıysa 2008'de makinenin büyük bir hasar görmesine sebep olan mıknatıs problemiydi. Tamir etmeleri iki yıllarını aldı, fakat 2010'da hızlandırıcıyı iyi çalışır hâle getirdiler.

2012'de LHC'deki deney ekipleri Higgs bozonunu keşfetmeyi başardılar.

Benim işimse bir teorik fizikçi olarak deneylerin sonuçlarını anlamaya çalışmak ve gelecekte yapılacak olan yeni deneylerin sonuçlarını tahmin etmek. Deneycilerle olan yakın bağlantılarım beni deneylerle cevaplarını bulabileceğimiz –ya da en azından bulup bulamayacağımızı anlayacağımız– sorulara tarafsız bir şekilde odaklanabilmemi sağladı. Çalışmalarım çoğunlukla bu konuları çözümleme üzerine odaklı. Higgs bozonunun kütlesi ne kadar olabilir? Karanlık maddenin içeriği nedir ve kendisini hangi koşullarla tespit edebiliriz? Sicim teorisi bir deneye konu edilebilir mi? Arabada çocuklarımız, restoranlar, spor ve politika (gerçek ve akademik) üzerine muhabbet etsek de çoğunlukla bilim konuşurduk. Yol arkadaşlarım bana yüksek seviyede radyasyon salınımlarına dayanabilecek elektronik cihaz üretmenin zorluklarını anlatmaya çalışırken benim de son teorik çalışmalara, bu çalışmaların vaat ettiklerine ve sınırlamalarına dair açıklamalarımla uğraşıyorlardı.

UCSC'deki öğrencilerim de bilimin heyecanına odaklı kalmamı sağladı. "Modern Fizik" isimli bir ders veriyorum. Einstein ve görelilikle başlıyor, kuantum mekaniğindeki gelişmeler anlatılıyor, yirminci yüzyıl ve yirmi birinci yüzyılın başındaki önemli gelişmelerle devam ediyor. Bu kitap ise çok daha geniş bir fikir havuzunu kapsayacak, amacım, sizde anlamış olduklarımıza dair heyecan ve önümüzdeki gizemlere yönelik bir merak uyandırmak.

Higgs parçacığının, karanlık maddenin ve karanlık enerjinin keşfi büyük patlama üzerine yapılan hassas çalışmalarla birleşince, evrendeki yerimize dair anlayışımızı insanlığın bildiği her şeyin ötesine taşıdı. Öte yandan cevabını merakla beklediğimiz sorular var. Bazılarını cevaplamak için önümüz

açıkken diğerleri için yolumuz uzun. Bu bilimin aynı fikirleri ve soruları paylaşmadığımız hayatlarımızdaki sıradan olaylardan çok uzaklaşmadığını düşünüyorum. Ben daha çok deneylerle ve yeni teorilerle çözülmesi muhtemel –örneğin önümüzdeki on yılda– ya da bunun mümkün görünmediği soruları çözmeye çalışıyorum.

Kitap 10 sayısının, *Powers of Ten*'in yapımcılarının hayal edebileceklerinin de ötesindeki üslerini keşfe çıkacak. Hem devasa ölçeklerde hem de mikrominyatür boyutlarda gezeceğiz. Öte yandan, zamanda da yolculuk yapacağız. Saatlerimiz t=0'dan, büyük patlamadan başlayacak. Bu saate göre şu an 13 milyar yıl sonrasında, başka bir deyişle 13×10^9 yılında yaşıyoruz. Bulunduğumuz zamandan büyük patlamadan bir milyar yıl sonrasına, yıldızların ve galaksilerin oluşmaya başladığı zamana; ardından neler olduğunu anlamaya başladığımız en eski zamanlara, hidrojen ve helyum atomlarının sıcak ve kozmik bir çorba içerisinde üretilmeye başladığı büyük patlamadan üç dakika sonrasına gideceğiz. Fakat daha da başlangıca, neler olduğuna dair kısıtlı kanıtlara sahip olduğumuz, evren belki de milyarda bir saniye yaşındayken maddenin ilk üretildiği zamana bakacağız. Son olarak büyük patlama perdesinin arkasını gözetleyecek, daha öncesinde nelerin olabileceğini sorgulayacak, *çoklu evren* gibi tartışmalı konuları inceleyeceğiz. Bu fikir doğanın en büyük gizemlerinden birine –belki de birden fazlasına– ilginç bir açıklama getiriyor. Gözlemsel bir kanıt bulmamız durumunda bu garip seçenek akla daha yatkın hâle gelebilir.

Deney ve Teori

Fizik, belki de tüm bilimler arasında en parçalanmış olanı. Bu tabir kulağa kötü gelebilir, fakat bu sayede başlangıçta tamamen tuhaf görünen şeyler belli prensip ve disiplinlere bağlı

bir şekilde incelenebiliyor. Fizikçiler ikiye ayrılıyor: Zamanlarının büyük bir kısmını deney tasarlama ve kurma, deneyi yapma ve deneyden çıkan verileri analiz etmeye adayanlar ve zamanlarının *tamamını* teoriler üretmeye, yapılması muhtemel deneylerin sonuçlarını tahmin etmeye ve deney sonuçlarını teorilerle karşılaştırmaya adayanlar. Bu teorilerin bir kısmı gerçekleştirilmiş deneyleri değerlendirirken diğerleri de doğanın henüz anlaşılamamış, gizemli yasalarını açıklamaya çalışıyor. Fakat bu her zaman için geçerli değildi. Modern fiziğin büyük bir kısmının şekillenmesini sağlayan Newton hem bir deneyci hem de teorisyendi. Işığın özelliği gibi konularda (sonuçlarının yanlış olduğu bilinse de) önemli çalışmalar ve ölçümler yaptı. Modern teorisyenlerin ve deneycilerin kullandığı en önemli araçlardan biri olan kalkülüsü icat etti, temel hareket yasalarını yazdı ve kendisinin kütleçekim yasası neredeyse iki yüz yıl boyunca hiç değişmeden kullanıldı. Fakat on dokuzuncu yüzyılın sonlarında teori ayrılmaya başladı ve daha küçük bir grup tarafından yapılır hâle geldi. Sebebi, en azından kısmen, deneylerin teknolojik açıdan gelişmesi ve teorik analizlerin benzer bir şekilde matematiksel açıdan özelleşmesiydi. Yine de o zamanlarda, 1860'larda elektrik ve manyetizma yasalarını son haline getiren İskoç fizikçi James Clerk Maxwell, kariyerinin sonraki zamanlarında renkle ilgili deneyler yaptı ve Cambridge Üniversitesi'nde Cavendish Laboratuvarı'nı kurdu. Göze çarpan ilk saf teorisyen, diğer tüm çalışmalarına ek olarak, Einstein'ın görelilik teorisinin bir öncülünü yazan ve ilksel elektron teorisini geliştiren Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz'di.

Modern teorisyenlerin paradigması tabii ki de Albert Einstein. Einstein 1905'te dikkate değer üç çalışmasıyla sahneye çıktı. En meşhur olan ikisi ona Nobel Ödülü kazandıran özel görelilik ve fotoelektrik etki teorisiydi. Sıradan bir fizik öğren-

cisi Brown hareketi üzerine olan çalışmasından haberdar olmayabilir. Fakat bu çalışma atomların gerçekliğini göstermekten daha fazlasını yaptı, bir santimetre küp sudaki atom sayısını (Avogadro sayısı) oldukça iyi bir şekilde tahmin etti ve sadece fizik alanında değil, kimya ve biyoloji alanlarında da derin bir etki yaptı. Tüm bu çıktılar salt düşüncenin ve daha önceden yapılmış deney verilerinin analizlerinin birleşmesinden kaynaklanmıştı. Kendisine teorik fizikçi deyip deney yapmaya çalışan kimseler eskide kaldı. Fakat Einstein hem deneysel hem teorik fizik yapma arzusunu kendi ifade etmişti. Newton üzerine şöyle yazmıştı: "Onun için doğayı çözmek çok kolaydı... Bir kişide deneyciyi, teorisyeni, mekanikçiyi ve sanatçıyı bir araya getirmişti... O önümüzde kendinden emin ve yalnız bir şekilde duruyor: Her kelime ve figürde, onun üretme hazzı ve keskin tahminleri bir kez daha kanıtlanıyor."

Yirminci yüzyılın teorisyen/deneyci ayrılığının bir istisnası Enrico Fermi'dir. 1901'de İtalya'da dünyaya geldi ve ilk olarak kuantum mekaniğinde yaptığı teorik çalışmaları kimyacıların periyodik tabloyu anlamalarına ve nötrino fiziğine büyük katkı sağladı. Ayrıca nükleer fizik alanında da kendisine 1938'de Nobel Ödülü'nü getiren önemli deneysel çalışmalar gerçekleştirdi.

Eşi Laura Fermi ile birlikte ödülü almak için Stockholm'e gitmelerinin ardından İtalya'ya dönmediler. Laura Yahudi olduğu için o dönemdeki faşist İtalya'da zulüm görmesinden korktular ve Enrico'nun Columbia Üniversitesi'nden aldığı pozisyonla hayatlarına ABD'de devam ettiler. Columbia'da ve sonrasında Chicago Üniversitesi'nde yaptığı deneyler nükleer silahların ve nükleer enerjinin geliştirilmesi konusunda öncü oldu. Öğrencileri İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemde önemli teorisyen ve deneyciler oldular fakat hiçbiri iki alanı kendisinde birleştirmedi.

Yol arkadaşlarım beni deneysel çalışmalar hakkında bilgilendirmekle kalmayıp ayrıca deney sonucu ortaya çıkan veya ileride deneylerle çözülebilecek sorulara da objektif bir şekilde odaklanabilmemi sağladılar. Arabada birlikte bulunma zorunluluğumuz birbirimize neler yaptığımızı anlatabilmemize olanak sağladı.

Yolculuğumuz boyunca hem tarihî hem de bugün aktif birçok teorik ve deneysel fizikçiyle bir araya geleceğiz. Farklı ülkelerden erkek ve kadınlarla karşılaşacağız, fakat alanın birkaç ülkenin *erkekleri* tarafından domine edildiği gerçeğini inkâr etmek güç. Aktörlerimizden bazıları ırkçı, etnik ayrımcı ve cinsiyetçi saldırılarla savaştı. Yine de karşılaşacağımız soruların kimi zaman bizi farklı alanlara ayıracağına dair güçlü kanıtlar olduğuna inansam da paylaşmanın bizi bir arada tutabileceğini umuyorum.

BÖLÜM 2

UZAY VE ZAMANI GERÇEKTEN ANLAYABİLİR MİYİZ?

Günlük hayatımızı –ve çok büyük ve çok küçük dünyaları araştırmamızı– uzay ve zaman terimleriyle tanımlıyoruz. "Üzgünüm, geç kalıyorum" şeklinde mesaj yazıyoruz. "Los Angeles ile New York arasında üç saat var, değil mi?" ya da "Everest Dağı 8 km gibi bir yüksekliğe sahip, değil mi?" diye sorabiliriz. Uzay ve zamana dair bir içgüdümüz var. Fakat doğa yasaları, uzay ve zamana daha net tanımlamalar getiriyor.

Isaac Newton (1643-1727) karmaşık biriydi ve bilimsel yolculuğu da aynı derecede karmaşıktı. Babası doğumundan kısa bir süre önce öldü ve çocukken annesi tarafından terk edildi. Zor biriydi, az kişiyle anlaşabiliyordu ve çabuk sinirlenen bir kişiliğe sahipti. Dindar bir görüşteydi ve hayatının birkaç farklı döneminde simyayla uğraştı. İlerleyen yaşlarında Londra'ya taşınmak için Cambridge'den ayrıldı ve Darphane Müdürü olmak için bilimsel araştırmalarını çoğunlukla bıraktı. Son işini arkadaşları sayesinde elde etmişti. Kolay ve iyi para kazandıran bu iş onun tutkusu haline gelmişti. Yeni ve standart olacak bir para üzerine çalıştı fakat enerjisini ço-

günlukla (genellikle gizli bir şekilde) kalpazanların sorgulanması, tutuklanması ve asılma, sürüklenme ve parçalanma yöntemiyle* idamına harcadı.

Doğa fenomenlerinin *yasalar*la yönetildiği ve bu yasaların net, matematiksel terimlerle ifade edilebileceği fikrini, öncüllerinin ya da çok önemli çağdaşlarının aksine Newton sayesinde edinebildik. Sorularını çağının dünya görüşüyle şekillendirdi. Muhakkak Galileo'dan ilham aldı, ayrıca çağdaşlarıyla, özellikle İngiliz bilim insanı Robert Hooke ile olan rekabetinden de etkilendi. Aralarındaki rekabet son derece şiddetliydi. Hooke, Newton'un kütleçekim yasasını kendisinden çaldığını düşünüyordu. Newton ise tüm imaları reddetmişti. Başarılarını Hooke'a yazdığı bir mektuptaki meşhur sözüyle ifade etmişti: "Eğer ki diğerlerinden ötesini gördüysem, devlerin omuzlarında yükseldiğimdendir." Bu öykü bugün bilimsel tevazuu göstermek için anlatılsa da gökbilimci meslektaşlarımdan biri Hooke'un son derece saygısız biri olduğunu söylemişti (hatta kendisine cüce demişti fakat öyle görünmüyor). Meslektaşlarımın bir kısmı bencil düşüncelere sahip olsalar da sayıları az, çoğunluk egoist davranmıyor.

Newton kariyerinin farklı dönemlerinde kimya ve ışık fenomeni üzerine çalıştı. Beyaz ışığın farklı renkteki ışıkların birleşiminden oluştuğunu doğru bir şekilde gözlemledi fakat parçacıklardan ya da "zerreciklerden" oluştuğuna dair teorisi yanlıştı. Bizim konumuzun merkezinde, Newton'un gezegenlerin ve Ay'ın hareketini anlamaya yönelik çalışmaları yer alıyor.

---

* İngiltere'de vatana ihanet suçu işleyenlere verilen bir idam cezası türüdür. Bu idam türünde mahkûmlar ölene kadar farklı işkence yöntemleri kullanılır. Ölmelerinin ardından cesetleri parçalanır ve vatandaşlara ibret olması amacıyla ülkenin farklı bölgelerine gönderilir. (Çev.)

Newton ve Fiziksel Yasanın Karakteri

Bu bölüm başlığını –özürlerimle– Richard Feynman'ın 1964'te verdiği bir dizi dersten alıyor. Genellikle fiziksel yasalar ya da doğa yasaları hakkında tartışırdık fakat Feynman şöyle sormuştu: Yasa derken neyi kastediyoruz? Fiziksel yasaya dair modern bilimsel paradigma, Newton'un hareket yasaları ve kütleçekim yasasından geliyor. Newton'un kendi kural ve tekniklerini güneş sistemindeki cisimlerin hareketine başarılı bir şekilde uygulaması bu görüşün ilk büyük zaferiydi.

Newton'ı kendisinin tanımladığı şekilde, bir bahçede oturmuş, elmanın düşüşünü izlerken tasvir ediyoruz. Güncel bakış açısıyla Newton'un yasalarını iki kategoriye ayırabiliriz. İlki kendisinin hareket yasaları, geniş fiziksel fenomen türlerine uygulanabilecek bir dizi basit kural. İlk hareket yasası bir cismin hareketinin kendisine bir kuvvet uygulanmadığı sürece aynı hareket özelliklerine bağlı kalacağını (aynı hızda veya süratte hareket edeceğini) söylüyor. Kulağa mantıklı gelebilir fakat bir soruya daha yol açıyor: Kuvvet nedir? Newton ikinci yasasıyla bir tanım öne sürüyor: Bir kuvvet *ivmelenme*ye, hızda değişime neden olan şeydir. Bu yasaya göre kuvvet büyüdükçe belirli kütleye sahip bir cismin, örneğin bir arabanın, ivmesi de artacaktır. Belirli bir kuvvet uygulandığında ise kütle arttıkça ivme *azalır*. Başka bir deyişle, aynı miktarda kuvvet benim Prius C otomobilimin büyük bir kamyona göre daha kısa sürede hızlanmasını sağlar. Benzer şekilde gaza basıp motor kuvvetini ikiye katlarsam, parçacık iki kat hızlanacaktır. Bu iki kural tenis topu, kurşun ya da füze gibi insan hayatındaki nesnelerin hareketini olduğu kadar gezegenler, yıldızlar ve galaksiler gibi devasa cisimlerin hareketini de açıklıyor.

Newton bu yapıyı uzay ve zamandaki harekete (*kinematik* olarak adlandırılıyor) uyguladığında yerçekimi kuvvetini bu-

larak önemli bir adım daha attı. İnsanlık, gezegenlerin hareketini antik zamanlardan beri gözlemliyor. Newton'dan önceki yüzyılda gezegensel hareket üzerine net bir düşünce geliştirilmişti. On altıncı yüzyılda Danimarkalı gökbilimci Tycho Brahe (1546-1601), Danimarka Kralı tarafından desteklenen bir rasathanede gezegenlerin yörüngeleri üzerine dikkatli ve hassas ölçümler yaptı. Ölçümlerini teleskoba sahip olmadan yapabilmesi özellikle etkileyici, onun yerine sekstant ve kuadrant gibi antik kökenli aletler kullanarak gezegenler ve yıldızların gökyüzündeki yerlerini belirledi. Brahe'nin asistanı Johannes Kepler (1571-1630) verileri inceledi ve üç "yasa"yla özetledi. İlki yörüngelerin şeklini tanımlıyordu. İkincisi gezegenlerin yörünge üzerindeki hareketleri boyunca değişen hızlarını belirliyordu. Üçüncüsüyse bir yılın uzunluğuyla, gezegenlerin yıldızlarına uzaklıklarına göre yörüngelerini bir tur dolanma süreleriyle alakalıydı. Bu kuralların önemli bir yanı beklentileri karşılamaması, Kepler'in projenin başındaki önyargılarının tersine çıkmışlardı. Ayrıca görünümleri bakımından da son derece etkileyiciler. Kepler yörüngelerin daire şeklinde olduğunu söyleyebilirdi ki, zaten tüm gezegenlerin yörüngeleri daireye *çok yakın*, fakat aslında tam dairesel değiller, elips şeklindeler. Plüton'un gezegen statüsünden cüce gezegen statüsüne indirilmesinden önce öğrencilerime yörüngesinin dairesellikten uzak olan tek gezegen olduğunu söylerdim.

Yukarıda *yasalar* kelimesini tırnak içinde yazdım, çünkü Kepler'in açıklamaları Tycho Brahe'nin gözlemlerini anlamlandırmak üzerineydi ve Newton'un ortaya koyduğu yasalar cinsinden değillerdi. Arada küçük ve güzel bir farklılık var. Bu farklılığın ilk öğesi Newton'un yasalarının geniş bir uygulama alanına sahip olması.

Newton ve elma arasındaki hikâye –hurafe olsun ya da olmasın– Newton'un cisimlerin yere düştüğünü fark etmesin-

den ibaret değil. Fark ettiği şey yerçekimi kuvvetinin *evrensel* olduğuydu, elmanın Dünya'ya düşmesiyle aynı nedenden ötürü Ay Dünya'ya çekiliyor, Dünya da aynı nedenle Güneş'e çekiliyor. Bu tespitini kuvvetin, örneğin güneş ve bir gezegeni ele alalım, güneş ve gezegenin kütlelerinin çarpımının, aradaki mesafenin *karesi*ne bölümüne eşit olduğu şeklinde formüle etti. Örneğin Venüs Dünya ile benzer bir kütleye sahip fakat Güneş'e daha yakın –Venüs 108 milyon km, Dünya 150 milyon km uzaklıkta– Güneş Venüs'ü kabaca iki kat kuvvetle çekiyor. Buna bağlı olarak daha uzaktaki gezegenler daha yavaşken Venüs kendi yörüngesinde çok daha hızlı hareket ediyor. Dünya, elmanın kütlesi çok daha küçük olduğu için Ay'a uyguladığından daha küçük bir çekim kuvveti uyguluyor fakat elma Ay'la karşılaştırıldığında Dünya'nın merkezine çok yakın olduğu için böyle bir fark gözlemlenemiyor. Bu kütleçekim yasasıyla Newton Kepler'in yasalarının üçünü de açıklayabildi. Fakat Newton'un yasaları çok daha hassas tahminler yapabildiğinden Kepler'inkilerden daha güçlü oldu. Newton, yörüngelerin *tam olarak* elips olmadıklarını fark etti. Gezegenler sadece yıldızları tarafından değil, diğer gezegenler ve uyduları tarafından da çekiliyor. Gezegenler Güneş'ten daha küçük olduğundan etkileri de küçük olsa da, Newton'un çalışması gezegensel hareket üzerine daha detaylı çalışılabilmesinin yolunu açtı. İki asır sonra Einstein geliştirdiği genel görelilik teorisiyle yasadaki küçük hataları tahmin edene kadar –sonrasında deneylerle de kanıtlandı– kullanılmaya devam etti.

Kepler ile Newton arasındaki ayrıma dönecek olursak, Kepler'in yasaları gözlem verilerinin sonuçlarını özetliyordu. Kesin değillerdi (muhtemelen kendisi de inanmakta zorlanıyordu) ve daha önemlisi Kepler, yasalarının kesinliğini deney olmadan söyleyemezdi. Newton ise Kepler'in yasalarındaki

küçük hataları *açıklayabiliyordu*. Einstein'ın görelilik teorisi Newton'un hem hareket yasalarının hem de kütleçekim yasasının kapsamını büyüttü ve genişletti, *Newton*'un yasalarının ne zaman uygulanıp uygulanamayacağını da belirledi.

Tüm bu konular bir kenara, Newton'un kinematik sistemi birçok teknoloji alanına temel oldu. Güneş ve gezegenler arasındaki kütleçekim kuvveti gibi basit bir şekilde olmasa da inşaat mühendisliğinden eğik atış (topçu mermileri, füzeler) hareketine, hava durumundan çok daha fazlasına birçok problem halen Newton'un hareket yasalarıyla açıklanabiliyor.

Newton, Uzay ve Zaman

Çoğumuzun etrafı zamanı ve uzayda bulunduğumuz yeri net olarak veren cihazlarla çevrilmiş durumda. Saatlerimizin bir ya da iki dakikalık hata payıyla çalıştığı günler artık geride kaldı. Telefonlarımız saati saniyeden daha küçük bir hassasiyetle takip ediyor. Navigasyon uygulamalarımız gideceğimiz yere varacağımız süreyi arabayla, bisikletle veya yürüyerek gitmemize göre, hatta trafiğin durumuna, sürüş stilimize veya yürüme hızımıza göre tahmin ediyor. Newton uzay ve zamanın standartlarının günlük hayatımızdaki etkinliklere uygulanabilmesi konusunda doğa yasalarını kullanarak önemli bir rol oynadı.

Tarihte uzunluk birimleri ilk olarak insan anatomisiyle – ayak (tabii ki ayaktan geliyor) ve kübit (dirsekten orta parmağa olan uzunluk)– ilişkilendirildi. Bir mil bir roma askerinin 1000 adımlık mesafesine eşitti. Standardize olmamak sorun yaratıyordu. Miller askerlerin ne kadar uzun boylu veya ne kadar iyi beslenmiş ve dinlenmiş olduklarına göre farklı mesafelere denk geliyordu. Çok sonrasında metre terimi kuzey kutbundan ekvatora olan mesafenin 10 milyonda biri olarak

tanımlandı. Bu ölçü her ne kadar keyfî belirlenmiş olsa da herkesin bir uzunluğun, daha küçük hata payıyla, neye eşit olduğu konusunda hemfikir olabilmesini sağladı.

Zaman dilimlerine bir standart ölçü getirmenin başka zorlukları da vardı. Günün takip edebileceğimiz net bir başlangıç noktası var ve bugün kullandığımız saat, dakika ve saniye gibi birimleri Babillilere borçluyuz. Fakat bir günün uzunluğu yıl içerisinde büyük farklılıklar gösteriyor. Yine de ortalama bir gün düşüncesi bu birimlerin standartlaşmasına olanak sağladı. Ay ayı kullanışlı, fakat ay aylarının sayısı da bir güneş yılına eşit olamıyor. Dünya'nın Güneş'in çevresindeki yörüngesini bir tur döndüğü süreye eşitlenen yıl oldukça sabit, bir yıldan diğerine ancak saniyeler fark ediyor (gelişigüzel "artık saniye" eklenmesiyle ayarlanıyor). Tabii Dünya'nın yörüngedeki yerinin güvenilir bir şekilde ölçülmesi insanlık tarihinin ancak son kısımlarında mümkün oldu.

Galileo zaman ölçümüne sarkaçların hareketini çalışarak yeni bir seviye getirdi ve hafif bir şekilde ittiğinizde bir sarkacın bir salınım yapma süresinin sarkacın uzunluk ve büyüklüğüyle ilişkili olduğunu keşfetti. Bu "yasa" kullanılarak sarkacın salınım sayısıyla zaman ölçülebilirdi. Süre tutan iki kişi sarkaçlarının uzunluğunu karşılaştırarak ne kadar zaman geçtiği konusunda anlaşabilirdi.

Newton zaman kavramında büyük bir ilerleme yapılmasını sağladı. Zaman ve uzay, hareket ve diğer yasalarını uyguladığı *ortamı* oluşturuyordu, fakat yasaların uygulanışı zamanın kendisine de bir tanım sağlıyordu. Galileo'nun sarkaç gözlemlerinden etkileyici bir tümevarım sağlanmıştı.

Doğa yasası fikrini Newton'la özdeşleştirmemiz pek şaşırtıcı değil. Yasa kavramı oldukça sert olan karakteriyle de uyuşuyor. Düşündüğü şeyleri kendinden emin bir şekilde söylerdi, eleştiriye ve tartışmaya tahammülü yoktu. Farklı fi-

kirlere olan tahammülsüzlüğü zaman tanımında kendini belli ediyor. Newton için zaman mutlak bir şeydi, kendi kendini tanımlayan ve soruya açık olmayan bir kavramdı. Zaman ya da uzayın kendisi ve tanımlarıyla ilgili tartışmaları kapatmaya çalıştığı görüşünü şu şekilde yazmıştı:

> Mutlak, hakikat ve matematiksel zaman, kendinden ve doğasından ötürü herhangi bir dışsal kaynağa bağlı olmadan dengeli bir şekilde ilerler. Mutlak uzay doğasından ötürü, sabit hiçbir şeyle bağlantısı olmadan, her daim aynı ve değişmez kalır.

Newton her ihtimale karşı Tanrı'nın kudretini de kullandı:

> Mutlak zaman bir algı nesnesi değildir. Tanrı sonsuza dek yaşar ve her yerdedir, her zaman ve her yerde bulunmasıyla zaman ve uzayı oluşturur.

Newton burada muhtemelen mütevazı davranıyor. Eğer "Newton'un yasaları" kalıbını "Tanrı" ile değiştirirsek bu açıklamalar bazı hakikatleri içerecektir. Newton'un hareket yasaları, zaman ve uzayın doğasına bağlılar ve aynı şekilde onlara tanım sağlıyorlar. Newton yasalarını Galileo'nun sarkaç "yasa"sını anlamak için kullanabilir ve bunu diğer saat tiplerine genelleyebilirdi. Kuvveti bilen biri, eski tip bir saatteki yayı veya cep telefonunuzun saatinin içindeki atomların davranışını göz önüne alırsak, yayın ya da atomların ileri geri salınımlarını sayarak zamanı ölçebilir. Zaman ya da uzayın mutlaklığı bir yana, Newton'un yasaları kapsamında *mutlak doğru ve kesinler*, bir zaman tanımı öne sürüyorlar.

Tanrı'yı bir kenara bırakırsak, zamanın her yerde ve her zaman aynı şekilde ilerlediğini ne kanıtlayabilir? Aslında bu soru, on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında Avusturya'da

yaşayan fizikçi ve filozof Ernst Mach tarafından dile getirilmişti. Einstein'ın düşünsel kahramanlarından biri olan Mach, Newton'un mutlak zaman ısrarı üzerine şu şekilde yazmıştı: "Mutlak zaman işe yaramaz bir metafiziksel kavramdır ve deneyle kanıtlanamaz. Newton açıkladığı tasarılarına sadece gerçek doğruları araştırmak için karşı geldi." Eğer Newton'un yasaları mutlak zamanı tanımlıyorsa ve yasalarda yanlış bir nokta yoksa, mutlak zaman doğru olsa gerek. Newton'un hareket ve kütleçekim yasaları iki asra yakın bir süre tahtta kalmaya devam etti. İlk karşıt görüşler James Clerk Maxwell'in sistemleştirdiği ve Albert Einstein'ın deşifre ettiği elektromanyetizma yasasında saklıydı.

Daha Fazla Doğa Yasası: James Clerk Maxwell

Yerçekimi, bizi Dünya'ya sabitlemesinden, Dünya'nın Güneş'in yörüngesinde ve Ay'ın Dünya'nın yörüngesinde tutulmasına dek hayatlarımızın birçok noktasında önemli bir yer tutuyor. Yerçekiminin fiziksel bir yasayla tanımlanabilen ilk doğa fenomeni olması sürpriz değil. Fakat en az aynı derecede önemli bir fenomen sınıfı daha var: Elektrik ve manyetizma. Newton'dan sonra doğa bilimcileri bu fenomenlere yerçekimi yasasına benzer bir sistem kurmaya çalıştılar. Fakat tam bir tablo tanımlamak iki asra yakın bir zaman aldı.

Bana göre sürecin önündeki bir engel elektrik ve manyetizmanın günlük hayatlarımızda baskın bir şekilde yer alması. Evet öyle, fakat bugün çoğumuz için anlamak güç, yirminci yüzyılın başı içinse daha da güç. Elektriksel kuvvetler elektronları atomların çekirdeklerine çekiyorlar ve maddenin yapısından ve tüm kimya süreçlerinden sorumlular. Elektrik sinyalleri vücut hareketlerimizi kontrol ediyor, sürtünme kuvveti de (günlük yaşamımızı kontrol eden bir diğer element) nötr atomların arasındaki küçük elektriksel kuvvetler-

den kaynaklanıyor. Çoğumuzun çocukluğumuzdan bildiği mıknatıslar, demir gibi özel maddelerin elektronlarının sebep olduğu oldukça karmaşık bir etkileşimin ürünü. Daha sonrasında, 1920'lere gelinirken çalışılacak olan kuantum mekaniğine dek yeterince anlaşılamadı. Radyo dalgaları, yemeğimizi ısıttığımız mikro dalgalar, doktor ve dişçilerin kullandığı X ışınları ve bazı açılardan ışık, elektrik ve manyetizmanın birlikte çalışmasının, yani *elektromanyetizma*nın ürünleri.

Yapbozun parçaları yavaş yavaş tamamlandı. Benjamin Franklin, elektrik akımının elektrik yüklerinin hareketinin sonucunda oluştuğunu deneyle gösteren kişiydi. Fransız mühendis ve bilim insanı Charles-Augustin de Coulomb, 1700'lerin sonunda yüklü cisimlerin birbirlerini Newton'un kütleçekim yasasına benzer bir şekilde çektiğini veya ittiğini belirledi. Coulomb'un ve Newton'un yasalarının arasındaki temel farklar kuvvetin gücü ve Newton'un teorisinde kütleye sahip tüm cisimler birbirini çekiyorken Coulomb'un teorisinde farklı yüke sahip cisimlerin birbirini çekip aynı yüke sahip olanların itmesiydi. Yerçekimsel ve elektriksel kuvvetlerin arasındaki bu ayrım bilimkurguda anti-yerçekimi (*anti-gravity*) fikrinin gelişmesine ilham verdi.

Coulomb'dan kısa bir süre sonra, 1800'lerin başında, elektik akımı ve manyetizma arasındaki ilişkiyi keşfeden kişi İngiliz bilim insanı Michael Faraday oldu. Faraday elektrik ve manyetik *alanlar* kavramını formülleştirdi. Temel fikir elektrik yükünün bir *elektrik alanı* ile çevrelendiğiydi. Böyle bir alandan geçen yüklü bir parçacığa etkiyen kuvvet, alanın büyüyüp küçülmesine göre artar veya azalır. Uzayda ilerleyen yüklü bir parçacık ise bir *manyetik* alan yaratır. Sonuç olarak elektrik akımı taşıyan bir kablo bu tarz bir alan oluşturur. Manyetik alan içerisinden geçen elektron gibi yüklü bir parçacık da bir kuvvete maruz kalır fakat bu kuvvet biraz daha

karmaşıktır (birçok lisans öğrencisinin başına bela olmuştur), sadece alanın gücüne değil, hareket eden parçacığın hızına da bağlıdır.

Alanlar Faraday için elektrik yüklerin etkisini tasvir etmek açısından kullanışlıydı fakat tamamen yükler ve akımlarla tanımlanıyordu, onlardan bağımsız bir varlıkları yoktu. 1865'te İskoç fizikçi James Clerk Maxwell'in çalışmasıyla bu durum değişti. Einstein şöyle diyor:

> Fizikte yeni bir kavram doğmuştu ve Newton'un zamanından beri en önemli icattı: Alan. Yüklerin ya da parçacıkların değil, yükler ve parçacıklar arasındaki boşlukta bulunan alanın bu fiziksel fenomenin tanımlanmasında önemli olduğunu fark etmek büyük bir bilimsel hayal gücü gerektiriyordu. Maxwell'in denklemleri elektromanyetik alanın yapısını tanımlayacak şekilde formülleştirildiğinde alan kavramının başarılı olduğu kanıtlandı.

Maxwell, Coulomb ve Faraday'ın (ve aynı zamanda ampere adını veren André-Marie Ampère'in) denklemlerini almıştı, fakat birleşimlerinin bir anlama gelmediğini fark etti. Bir terim daha ekledi ve bu şekilde elektik ve manyetizmanın elektromanyetik radyasyona sebep olduğunu keşfetti. Işığı da *açıklamış* oldu –ışık Newton'un "zerrecikler"inin aksine elektrik ve manyetik alan dalgalarıyla taşınıyordu. İçeriği oldukça etkileyiciydi, Maxwell'in teorisi böyle bir radyasyonun farklı formlarda olabileceğini tahmin etti. Heinrich Hertz (radyoda duyduğumuz frekans birimine ismini veren bilim insanı) tarafından keşfedilecek olan radyo dalgalarının varlığını özellikle tahmin edebildi. Nihayet elektriğin, manyetizmanın ve alan kavramının bütün bir resmi oluşmuş ve önemli bir bileşen olmuştu.

Einstein ve Mutlak Zamanın Düşüşü

Mach'ın da dediği gibi Newton'un uzay ve zamanın mutlak doğası üzerine olan ısrarı sallantılı bir temele dayanıyordu. Fakat en azından Newton'un hareket ve kütleçekim yasaları felsefi itirazlara karşı durabilmişti. Maxwell'in denklemleriyse Newton'un mutlak zaman ve uzay kavramlarını yıkacak öğeler içeriyordu.

Maxwell'in teorisinin yarattığı sorun ışığın hızıyla alakalıydı. Teorinin büyük başarılarından biri hızın başka değişkenlere bağlı olarak ölçülebilmesiydi. Fakat denklemlere göre ışığın *ne olursa olsun* hep aynı hızda ilerleyeceğine dair bir sorun doğmuştu. On dokuzuncu yüzyılın sonunda çalışan fizikçilere göre anlamsızdı. Işık dalgalarının su dalgaları gibi ilerlediğini düşünüyorlardı. Eğer suya bir taş atarsanız düştüğü yerin çevresine doğru açılan, belirli hıza sahip dalgalar yaratır. Taşı hareket halindeki bir tekneden atarsanız dalgalar teknenin hızına eşit bir hızda sizden uzaklaşmaya başlarlar. Deniz kenarından izleyen biri içinse bu dalgalar daha da hızlı hareket eder. Fakat Maxwell'in denklemleri böyle bir şeye izin veriyormuş gibi görünmüyordu. Elinizdeki lambadan çıkan ışık dalgalarının hızıyla sizden uzaklaşan bir rokette bulunan lambadan çıkan ışık dalgalarının hızı aynıydı.

Maxwell ve çağdaşları bu konu üzerine pek düşünmediler. Işık dalgalarının kendine has bir fenomen olabileceğini hayal edemediler. Bunun yerine sıvı üzerinde ilerleyen bozunum şeklinde tanımladıkları su dalgaları gibi, ışığın da buna benzer *esir* (*aether*) dedikleri bir ortamdaki bozunum olduğuna inandılar. Esir tüm uzayı dolduruyordu. Maxwell'in denklemlerindeki ışık hızının esirin hızına orantılı olduğunu düşünüyorlardı. Fakat esir hipotezi (Einstein'ın teoriyi daha ileri taşımasından önce) 1887'de sarsılmaya başlamıştı. Cleveland'daki Case Western Reserve Üniversitesi'nden Albert

A. Michelson ve Edward W. Morley Dünya'nın esire göre hareket ettiğine dair bir kanıt aramaya çalıştılar. Meşhur deneylerinde esir hipotezini destekleyecek herhangi bir sonuç elde edemediler. Bu deneyin Einstein'ı ne ölçüde etkilediğini bilmiyoruz, muhtemelen ne kadar etkilediği de zaten çok önemli değil.

Einstein, Maxwell'in "muhteşem bilimsel hayal gücü"nden bahsediyor görünse de bu muhtemelen kendisini tanımlamak için daha uygundu. Einstein esir kurnazlığına son verdi ve alanların kendine has özellikleri olduğunu kabul etti. Işık hızının alanlara özgü bir büyüklük olduğunu açıkladı. Bu durum Maxwell'in denklemleri ve esir arasındaki ikilemin çözülmesini sağladı fakat mutlak uzay ve zaman fikrinin de yıkılmasına sebep oldu. Bu sonucu Michelson-Morley deneyinin sonuçlarını esir kavramıyla bağdaştırmaya çalışan Fransız matematikçi Henri Poincaré de bekliyordu, "Denklemin direkt kanıtını iki kere görmek bir yana, iki olaydan birinin farklı yerlerde aynı şekilde meydana geldiğini bile görmedik" diye yazmıştı. Poincaré Einstein'ın göreliliğini *neredeyse* bulacaktı, fakat o da son adımda esir kavramına bağlı kalmıştı.

Einstein'ın Muhteşem Yılı

1905'te, Einstein 26 yaşında ve Bern'deki İsviçre patent ofisinde yarı zamanlı çalışıyorken, üç büyük adımını attı. İlki özel görelilik teorisini geliştirmesiydi. Eğer birkaç yıldır fizik dersi almıyorsanız Einstein'ın görelilik teorisinden bahsedildiğinde kafanızın karışması oldukça doğal. Bu karışıklığın ilk sebebi Einstein'ın görelilik teorisi olarak bilinen iki teorinin bulunması, *özel görelilik teorisi* ve *genel görelilik teorisi*. İsimlendirmedeki mantık biraz karışık, aslında oldukça farklı tipte teoriler ve genel teori özel teorinin genelleştirilmiş halinden ibaret değil. Özel teori iyi anlaşılmış ve bir asırdan uzun sü-

redir deneylerle test edilmiş durumda. Genel teoriyi kanıtlamaksa çok daha zorlu, bugün bile teoriyi destekleyen kanıtlar biraz zorlama. Bizim bir sonraki bölümümüzün konusu olacak. Şimdi ise özel teoriyle ilgileneceğiz.

Özel görelilik teorisi Newton'un mutlak zaman ve uzay kavrayışında büyük değişiklikler yapılmasını gerektirdi. Einstein, Maxwell'in denklemlerini uyguladı ve ışık hızının mutlak olduğunu belirtti: Herhangi bir gözlemci ister hareketli ister sabit halde olsun, ışığın *c* ile ifade edilen, saniyede 186.000 millik (300.000 kilometre) hızla ilerlediğini ölçecekti. Fakat burada bir sorun çıkıyor. Bir tren vagonunda seyahat eden üç yolcu düşünün, biri ortada, biri önde ve diğeri arkada. Ortadaki yolcu bir lambayı açıp kapatıyor. İki taraftaki yolcular saatlerine bakıp lambanın ışığını aynı anda aldıklarını ölçüyorlar. Yerde bulunan bir gözlemcinin bakış açısında ise problem açığa çıkıyor, yolcular hareket halinde olduklarından ışığın öndeki yolcuya ulaşmak için arkadaki yolcudan daha fazla mesafe kat etmesi gerekiyor. Yerdeki gözlemci ışığın aynı hızla ilerlediğini görse de öndeki yolcuya daha çabuk ulaştığını görüyor. İşte bu *tam da* Poincaré'nin sorusu. Trendeki yolcular için eş zamanlı gerçekleşen olay yerdeki gözlemci için aynı şekilde olmuyor. Bu durum eş zamanlılık kavramını *göreli* hâle getiriyor. Fakat her şey göreli değil, herkes ışığın hızı konusunda hemfikir.

Einstein tüm bu çıkarımları gözlemcileri bir diğerine göre hareket ettirerek oluşturduğu zaman ve uzay farklarını denklemlere ekleyerek yaptı. Özellikle çarpıcı olan şeyse, Einstein'ın uzay ve zamanı göreli olarak birleştirme anlayışı. Zamandan bahsederken nasıl hareket ettiğimiz ve nerede olduğumuzu kastediyoruz. Bu da uzay ve zamanı tek bir kavramda, uzay-zamanda toplamamızı gerektiriyor. Yaşamlarımızı üç boyutta anlatmak yerine, *dördüncü* bir şeyi ekleyerek,

zamanı dördüncü boyut haline getirerek bahsetmek zorunda kalıyoruz. Artık zaman mutlak değil, farklı gözlemcilere göre farklı geçiyor. Eğer çok hızlı giden bir uzay gemisindeysem, zaman benim için yerde hızlı bir şekilde gidişimi izleyen gözlemciden daha yavaş ilerliyor. Özetlemek gerekirse iki olayın eş zamanlı gerçekleşmesi göreli bir durum.

Enerji ve momentum gibi kavramlar da göreli. Bu prensibi tamamlamak adına, Einstein'ın özel göreliliği hareketsiz bir parçanın, $E=mc^2$ formülüne, bilimdeki en ünlü formüllerden birine göre, enerjiye sahip olduğunu söylüyor. Genel anlamda Newton'un kinematiğinin yeni bir versiyonu üzerine çalıştı. Bu kurallar deneysel olarak da olağanüstü hassaslıkta test edildi.

Öte yandan, Newton'un kurallarının ışık hızına nazaran daha küçük hızlara sahip cisimlerin hareketlerini doğru bir şekilde açıklayabildiğini belirtmekte yarar var. Işık hızında hareket edildiğinde Dünya'nın etrafında bir tur atmak saniyenin sekizde biri, ya da Ay'a gitmek bir buçuk saniye sürüyor. Hiçbirimiz böyle hızları deneyimlemedik. En hızlı roketin bile ışığın bir saniyede gittiği yolu gitmesi bir saatten fazla sürüyor.

Muhtemelen daha ilginciyse bir atomun elektronunun hızının ışık hızının yaklaşık yüzde biri olması. Atomların içinde görelilik etkisi oldukça düşük, fakat iyi bir şekilde ölçülmüş durumda ve Einstein'ın teorisiyle uyumlu. Modern parçacık çarpıştırıcılarında parçacıklar neredeyse ışık hızında hareket ediyor ve aynısı kozmosta gözlemlediğimiz cisimler için de geçerli. Görelilik gözlemlerimizin büyük bir çoğunluğunu açıklıyor.

Özel görelilik Newton'un uzay ve zaman tasvirindeki ilk önemli değişikliğe sebep oldu. İkincisi on sene sonra, Einstein'ın uzay ve zamanın yıldız, galaksi ya da kara delik gibi

büyük kütleye sahip cisimler tarafından değiştirilebildiğini gösterdiği genel görelilik ile geldi. Einstein'ın özel göreliliği Newton'un kinematiğine büyük bir yenilik getirirken, temel Newton fiziğini değiştirmedi. Aynı şey genel görelilik için de geçerli, fakat değişimler çok daha dramatik, ileride göreceğiz. Newton ve Einstein'ın bugün bize bıraktıkları mirası *klasik fizik* olarak adlandırıyoruz. Sonrasında yine Einstein'ın bu muhteşem yılında geliştirdiği kuantum mekaniği ile çok daha büyük değişiklikler de yaşandı. Fakat bu devrim biraz daha zaman aldı. Şimdi biz ilk olarak bu dâhinin genel göreliliğine bakalım.

BÖLÜM 3

EVRENDEN KASTIMIZ NE?

1905'te fizikçiler iki tip kuvvetin kontrol ettiği yasaları anlamışlardı: Elektik ile manyetizma ve kütleçekim. Maxwell'in denklemleriyle tanımlanan elektrik ile manyetizma yasalarının uzay ve zaman kavramlarının temelinin tekrar düşünülmesini gerektirdiğini gördük. Peki ya Newton'un kütleçekim yasası? Mutlak uzay ve mutlak zaman mefhumlarından nasıl vazgeçilmiş olabilir?

1907'de, özel görelilik teorisini öne sürmesinden iki sene sonra, Einstein'dan konu hakkında bir derleme yazması istendi. Bu proje kapsamında yeni bir soruyla karşı karşıya kaldı: Newton'un kütleçekim teorisi kendi prensiplerine nasıl uyuyordu? Cevap basit: Uymuyor. Aslında bu durum kütleçekim teorisinde Newton ilk ortaya koyduğundan beri açık bir şekilde var olan bir eksiklikten kaynaklanıyor. Newton –ve daha önemlisi onu eleştiren kişiler– teorisinin *uzaktan etkileşim* adı verilen özelliğinden dolayı yanılgıya uğradılar. Newton'un yasalarına göre, Güneş birden "zıpla"sa (bir anlığına inanılmaz bir şekilde uzay korsanlarının altına roket taktığını düşünün), sistemdeki tüm gezegenler ne kadar uzakta

olursa olsun anında reaksiyon gösterecekti. Örneğin, Neptün güneş ışınlarının gelmesinin dört saat sürecek kadar uzakta bulunmasına rağmen Güneş'in anlık hareketine aniden tepki gösterecekti. Newton bunun için eleştirilmişti, yıldızlar ve gezegenleri bir arada tutan daha büyük bir gücün varlığını mı öne sürüyordu? Fakat teorisi neredeyse iki asır boyunca son derece başarılı oldu ve bu soru bir kenara bırakıldı. Ancak yirminci yüzyılın başlarında bu durumu ciddi bir şekilde sorgulamak mümkün oldu.

Özel görelilikle bu durumu gözden kaçırma imkânı kalmamıştı. Bu prensibin elektromanyetizmaya uygulanıp kütleçekim kuvvetine uygulanamaması anlamsızdı. Einstein'ın bir yer ve zamanda meydana gelen bir olayın ancak ışığın hareket edebileceği bir mesafede meydana gelen olayları etkileyebileceğine dair düşüncesinin bir doğa yasasına nasıl uymadığını anlamak zor. Bu deneysel veya gözlemsel bir sorun değildi. Newton'un teorisinin çok iyi çalışmasının sebebi ışığın hızının çok yüksek olması. Işık gökbilimcilerin Newton'un yasasını ortaya koymasından iki asır sonraya dek karşılaştıkları durumlar için, bilginin ve etkileşimin yayılmasının sonlu bir hıza (sonsuzun aksine!) sahip olduğu göz önüne alındığında fazla hızlıydı. Einstein, Newton'un teorisini nasıl hem görelilik prensibine uydurup hem de devasa başarısını koruyarak değiştirebileceğini düşünmeye başlamıştı. Başka bir deyişle yeni yasalar, çalışılan cisimlerin hızının ışık hızından çok daha düşük olduğu ya da kütleçekim kuvvetinin *çok* güçlü olmadığı durumlar için Newton'un yasalarına indirgenebilmeliydi.

Einstein'ın genel görelilik teorisine ulaşma süreci bilimsel sezgilerini ağır çalışma yüküyle birleştirmesiyle sekiz yıllık çabanın ardından sonuçlandı. Yol boyunca birçok yanlış adım vardı. Fakat bu teori Einstein'ın dâhiliğini 1905'te elde etti-

ği başarılardan bile daha yukarıya çıkardı. Einstein problemi Newton'un kütleçekim kuvveti yasasının Coulomb'un yüklü parçacıklar yasasıyla neredeyse aynı olduğunu gözlemleyerek de ele alabilirdi. Elektrik yüklerini kütleyle değiştirdiğinizde benzer oluyorlardı. Elektrik kuvveti Maxwell'in denklemleriyle tanımlanmıştı; yani Maxwell'inki gibi denklemleri kütleçekim kuvveti için yazmayı deneyebilirdi.

Ben olsam böyle yapardım ve sonuç yanlış olurdu. Fakat Einstein çalışmasına başlamadan önce çok daha derin düşünmüştü. Gezegenlerin, yıldızların ve diğer gök cisimlerinin tamamının birbirini çektiği gerçeğinden etkilenmişti, birbirlerini kesinlikle itmiyorlardı. Bir protonun başka bir elektronu iten elektronu çektiği ya da iki protonun birbirini ittiği elektriksel kuvvetlerden farklıydı. Kütleçekim kuvveti itici yönde değil, her zaman çekici yönde oluyordu. Coulomb yasasını taklit etmek zordu. Einstein bunun yerine Newton'dan daha eski gözlemlerden aldığı ipucunu kullandı.

Galileo'nun en meşhur deneyleri düşen cisimlerle ilgili olanlardı. Antik Yunan filozofu Arkhimedes ağır cisimlerin hafif olanlardan daha hızlı düştüğünü söylemişti. Makul bir tahmindi fakat hassas gözlemlere dayalı bir çıkarım değildi. Galileo ise kuşkucuydu ve bu soruyu deneyle çalışmıştı. O zamanlar bilimsel tartışmada olan Pisa Kulesi'nden farklı kütleye sahip cisimler atmaktansa, havanın yavaşlatma etkisini ihmal ederek farklı kütleye sahip cisimlerin Dünya yüzeyine düşmelerini inceledi. (Bir kâğıt parçasının Dünya yüzeyine düşmesi hava sürtünmesinden dolayı bir tuğlanınkinden daha uzun sürer, fakat bu etkiyi farklı kütlede iki ağır cismin aynı yükseklikten düşmesini deneyerek test edebilirsiniz.) Bu gözlemler sonraki yüzyıllarda Newton'un da dahil olduğu birçok araştırmacının katkısıyla geliştirildi. On dokuzuncu yüzyılın sonunda Macar fizikçi Baron Loránd Eötvös,

farklı bir strateji kullanarak bir çubuğa farklı cisimler bağladı ve hassas deneyler yürüttü. Alet cisimlerin yerçekimine farklı tepki göstermeleri halinde hareket edecek, aksi halde hareketsiz kalacak şekilde tasarlanmıştı. Eötvös birçok örnek kullandığı bu deneyde cisimlerin tepkisinin milyonda bir oranında aynı olduğunu gösterdi ve binlerce kat daha iyi sonuca sahip deney sonuçları sundu.

Newton'un yasalarında kütle eylemsizlikle, cisimlerin uygulanan kuvvet sonucu kazandıkları ivme oranıyla ilişkiliydi. Ama aynı zamanda iki cismin arasındaki kütleçekim kuvvetiyle de ilişkiliydi. Newton muhtemelen Galileo'nun da etkisiyle bu iki kütlenin aynı olduğunu varsaydı. Fakat Newton'un ilgilendiği bu konudaki gerçek basitti, bu ilişkiyi zorlayan bir prensip yoktu. Eötvös (ve diğerleri) *eylemsizlik kütlesi* ile *kütleçekimsel kütle*nin büyük oranda aynı olduğunu gösterdiler. Einstein bu gözlemle yola çıktı ve iki kütlenin *mutlak eşit* olduğunu varsaydı. Sonrasında hayatımızın içinden bir örnekle çok basit fakat ustaca bir düşünce deneyi yürüttü. Einstein özel göreliliği geliştirirken zamanının önemli bir teknolojisiyle, demir yollarıyla benzerlik kurarak akıl yürütmüştü. Bu kez daha yeni bir teknolojiyi, asansörleri kullanarak akıl yürüttü. Bir asansörün kablosunun kesildiğini ve asansörün (korkutucu bir şekilde) serbest düşüşe geçtiğini hayal etti. Eylemsizlik ve kütleçekimsel kütlelerin eşit olduğunu varsayarsak asansörün içindeki gözlemcilerin ağırlıksızlık dediğimiz serbest düşüşü deneyimleyeceklerini yazdı. Örneğin, asansörün içinde havada süzülebilir veya yerçekimi olmadığından aşağı yukarı top gibi sekebilirlerdi. Asansörün içindeki cisimler yerçekimsiz bir ortamda gibi olacaklardı. Maalesef yolcular için bu durum ancak asansör boşluğunun sonuna dek sürecekti. Fakat bugünlerde uzay seyahatleri sayesinde ağırlıksızlık rutin bir hale geldi. Uluslararası Uzay

İstasyonu gezegenin yörüngesindeyken *serbest düşüş* halindedir. Dünya'nın çekiminden dolayı düşer. Başlangıçtaki fırlatılışının etkisiyle sahip olduğu hareket enerjisi ise çekim kuvvetiyle ters etki eder ve istasyonun gezegenin etrafında sabit bir şekilde dönmesini sağlar. Serbest düşüşün etkisi bir uçağın bir süreliğine motorunu kapatmasıyla da hissedilebilir. Astronot eğitimlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bilindiği üzere, yerçekiminin büyük teorisyenlerinden biri olan Stephen Hawking, 2007'de bu tarz bir uçuşu deneyimleme şansı bulmuştu.

Einstein bu deneyimi yaşama şansını bulamadı, yaşadığı zamanın en uzun binası bunu ancak 4 veya 5 saniyeliğine sağlayabilirdi. Fakat ağırlıksızlık fenomeninin Galileo ve Eötvös'ün gözlemlerini takip ettiğini fark etti. Einstein farkına vardığı bu durumu "hayatımın en mutlu düşüncesi" diye adlandırdı ve sonrasında bir prensibe dönüştürdü: Hiçbir deney yerçekimsel alanda sabit bir ivmeyle serbest düşüşte (asansörde olduğu gibi) bulunmayı ayırt edemeyecekti. Hipotezini bir adım ileri götürdü, doğanın tüm yasalarına, kütleçekim, elektromanyetizma ve henüz keşfedilmemiş diğer yasalara uyacak bir hale getirerek "Eşdeğerlik İlkesi" haline getirdi.

Bunları matematiksel denklemler halinde ifade etmek uzun bir çaba gerektirdi. Einstein neyi aradığını az çok biliyordu, fakat işe başladığında elinde uygun bir matematik yoktu. Zamanının en büyük matematikçilerinden biri olan, Almanya, Göttingen'den Profesör David Hilbert de yerçekimi teorisi üzerine çalışıyordu ve gereken matematiği yapabilmişti, fiziksel konuları ise iyi anlamış olması muhtemeldi. Genel görelilik teorisini ilk bulan kişi olma ihtimali vardı ki, zaten neredeyse başarmak üzereydi. Yine de Einstein 1915'te genel görelilik teorisini tamamlamış ve yayımlamıştı. Teori

temel gereksinimleri karşılıyordu. İlk olarak, özel göreliliğin prensipleriyle uyumluydu. Örneğin yerçekimsel etkileşim ışık hızında gerçekleşiyordu ve uzaktan etkileşim yoktu. İkinci olarak, eşdeğerlik ilkesini kapsıyordu. Son olarak, son derece istisnai koşullar dışında Newton'un yasalarına indirgenebiliyordu. Sıradan yıldızlar ve gezegenlerde yapılan düzeltmeler oldukça küçüktü.

Einstein'ın teorisi uzay ve zamana kökten yeni kavramlar getirdi. Artık sonsuza dek sabit değillerdi, maddenin varlığına göre değişiklik gösteriyorlardı. Uzay bükülebilir, zamansa yüksek veya düşük yoğunluktaki maddelerin yakınında daha hızlı veya yavaş akabilirdi. Fizikçiler ve matematikçilerin çoğu güzel olarak tanımlanabilecek bu teoriye aşinaydı, fakat prensipler her ne kadar basit olsa da karmaşık bir matematiği bulunuyor ve hesaplamalar zorlu olabiliyordu. Öte yandan Einstein sadece büyük prensipler ve güzel matematiğe değil, teorinin gözlemsel sonuçlarına da odaklandı. Çoğu durumda Newton'un yasalarına yapılması gereken düzeltmeler çok küçük olduğundan, bu etkilerin küçük ama tespit edilebilecek kadar büyük olduğu durumlara bakmak zorunda kaldı. Gelecekteki teknolojiyle test edilebileceğini umduğu üç farklı durum tahmini yaptı.

Bu tahminlerden biri, aslında bugüne bakarak geçmişe yönelik yapılan bir tahmindi ve Merkür'ün hareketindeki o zamanlar da bilinen gizemle alakalıydı. Güneş, gezegenlere etkiyen kuvvetlerden en büyüğü, gezegenler de birbirini çekiyor fakat etkileri görece daha düşük. Newton eğer sadece Güneş'ten kaynaklanan kuvvetler olursa gezegenlerin Kepler'in de gösterdiği gibi eliptik yörüngelerde hareket ettiğini göstermişti. Newton'a göre bu yörüngelerin diğer gezegenlerin çekimlerinden ayrı olarak şekillerini ve doğrultularını her zaman koruması gerekiyordu.

Newton'un zamanında bile gökbilimciler gezegenlerin hareketini hassas bir şekilde çalışıyorlardı. Yörüngeleri kâğıt üzerinde dikkatli bir şekilde hesaplıyor, gezegenlerin birbirine uyguladığı çekim kuvveti gibi küçük etkilerin düzeltmelerini yapıyorlardı. Bu hesaplamaları aynı şekilde dikkatli yaptıkları gözlemlerle kıyaslıyorlardı. Diğer gezegenlerden ve başka etkilerden kaynaklanan bu küçük düzeltmelerin Newton'un sonuçlarından yavaş bir sapmaya, elips yörüngenin zamanla dönmesine yol açacağına karar vermişlerdi. Bu durum günberinin devinimi olarak adlandırılıyor (benimkinden daha iyi hafızaya sahip olanlar lisedeki analitik geometri dersinden hatırlayacaktır). 1850'lerde bile gökbilimciler Merkür'ün hareket hızının Newton'un yasalarının tahmin ettiğiyle *tam aynı* olmadığını, küçük bir farklılık olduğunu belirtmişlerdi. Küçük, görünmeyen bir gezegen ya da toz bulutu gibi birçok açıklama getirmeye çalıştılar, fakat hiçbiri ikna edici olmadı.

Einstein Merkür'ün hareketindeki çelişkinin farkındaydı. Merkür'ün Güneş'e en yakın ve kütleçekim kuvvetini en güçlü şekilde hisseden gezegen olduğunu biliyordu ve bundan dolayı teorisini test etmek için uygun bir aday olduğunu fark etmişti. Einstein, Newton'un sonuçlarını düzeltecek hesaplamalar yapmaya başladı. Gözlemlenen hareketi açıklamak için gerekli olan şeyi bulmuştu. Nasıl hissettiğini ancak hayal edebiliyorum. Bir fizikçi için yeni bir doğa yasasını keşfetmek en yüksek başarıdır. Ben de birkaç kere denedim, fakat pek de başarılı olmadılar. Einstein Merkür'ün günberi durumu için doğru sonuca vardığında çok heyecanlanmıştı (çarpıntısı olduğunu söylemişti), sonunda teorisinin doğru olduğuna ikna olmuştu.

Fakat muhtemel gözlemsel farklılıkları açıklayacak teoriler oluşturmak hâlâ "rutin" bilim dahilinde. Daha da iyisi gelmek üzereydi. Einstein'ın ikinci tahmini ise henüz gerçek-

leştirilmeyen bir ölçümün sonucu üzerineydi. Newton'un teorisinde yerçekimi kuvveti kütle üzerine olan etkisiyle tanımlanır. Güneş'in yakınından geçen bir uydunun yörüngesi Güneş'in çekim kuvveti nedeniyle bükülecektir. Fakat özel görelilikte kütle sadece bir enerji formudur ve genel görelilikte kütleçekim tüm enerji formlarına etki eder. Işığın kütlesi yoktur fakat enerji taşır. Başka bir deyişle, ışınların yolu da güçlü bir kütleçekime sahip bir nesnenin yakınından geçtiğinde düz bir doğrudan sapmak zorundadır. Einstein 1911'de teorisini son haline getirmeden önce etkiyi hesaplamaya çalıştı. Güneş tutulması sırasında Güneş ile hizalanmış olan yıldızların pozisyonlarında küçük farklılıklar görülmesi gerektiğini fark etti.

Einstein dâhi olduğu kadar şanslıydı da. Dediğim gibi genel göreliliğin matematiği karmaşık ve o zamanlar alışılmadıktı. Einstein teorisini son haline getirmeden önce Güneş tarafından ışın eğrisine yönelik ilk hesaplamasını yaptı fakat hata yapmıştı. Aslında $E=mc^2$ formülünü kullanarak Newton'un ışığa kütle gibi davrandığı durumda bulacağı değeri bulmuştu. 1912 ve 1914'te tutulmalardaki ışın eğrisini izlemek için planlanan seferler başarısız olmuştu, ilkini yağmur yağışı engellerken ikincisi Birinci Dünya Savaşı'nın çıkması yüzünden iptal edilmişti. Genel görelilik teorisinin son halini yayımladığı 1915'te, Newton'un değerinin iki katını bularak ışın eğrisi için doğru sonucu elde etmeyi başardı. Savaş 1919'da yapılacak olan sonraki ölçümlere de engel oldu. O yıl İngiliz gökbilimci Arthur Eddington'ın Príncipe Adası'na, Greenwich Rasathanesi'nden Andrew Crommelin'in de Brezilya'ya yaptığı seferler sapmanın gözlemlenmesi açısından başarılı oldu. Sonuçlar Royal Society ve Royal Astronomical Society'nin birlikte düzenlediği etkinlikte açıklandı: Einstein'ın tahminleri onaylanmıştı. O zamanlarda Einstein zaten

bilimsel camiada tanınan bir isimdi ve yazdığı makaleler popüler dergilerde yayımlanıyordu, şimdiyse ismini herkes bilir olmuştu. *London Times* gazetesinin 17 Kasım 1919 tarihli başlığı şu şekildeydi: "Bilimde Devrim. Evrenin Yeni Teorisi. Newtoncu Fikirler Yıkıldı."

Öğrencilik zamanlarımda Einstein'ın genel görelilik teorisi bir cazibe merkeziydi; kendini teorik fizikçi olarak tanımlayan herkesin hakkında bir şeyler bilmesi gerekiyordu. Hele de üstünde *çalıştığınızı* söylüyorsanız insanların gözleri sonuna kadar açılıyordu. O zamanlarda teorinin doğruluğuna yönelik kanıtlar sınırlıydı –günberi ve ışın eğrisine ek olarak sadece *kızıla kayma* vardı– ve sadece hayal gücü yüksek insanlar yeni testlerin olabileceğini tasavvur edebiliyordu. Daha da kötüsü, teori bir dahaki bölümün konusu olan kuantum mekaniği ile birleştirildiğinde anlamsız görünüyordu. *Bu* problemle uğraşmak sizi daha da uç bir noktaya götürüyordu. Richard Feynman ve Lev Landau (yirminci yüzyılın en büyük Rus teorik fizikçilerinden biri) gibi çağın en büyük teorisyenleri bile bu konuda bir şeyler yapmayı denediler. 1980'lerde Stephen Hawking (belki de aralarından en meşhur olanı) genel görelilikle kuantum mekaniği kavramlarının *bir arada* ifade edilebileceğini ve kuantum mekaniğinin tekrar formülleştirilmesinin gerektiğini öne sürdü.

Kariyerim süresince her şey ciddi manada değişti. Einstein'ın teorisi artık test edilmiş bir teori konumunda. Genel görelilik anlayışımız, evreni keşfimiz konusunda önemli bir araç oldu. Kara delikleri gözlemlemek bir rutin haline geldi. Genel görelilik, evrenin şu anki bileşimini belirlememizde ve ileride de göreceğimiz gibi büyük patlamayı anlamamızda gerekli bir yöntem oldu. Bir asır önceki bir teori tarafından varlığı öngörülen yerçekimsel dalgaların keşfi astrofizikte yeni bir pencere açtı. Genel göreliliğin navigasyon uygulama-

larımızın (GPS: *Global Positioning System*) çalışmasında bile etkisi bulunuyor. Yakın bir zamanda deneysel ispatı (ve daha bilmediğimiz ipuçları) mümkün görünmese de kuantum mekaniği hakkında da pek çok şey öğrendik.

Genel Görelilikte Zamana Tutunmak

Einstein'ın 1915'teki yayınında ortaya koyduğu iki testi anlatmıştık: Merkür'ün yörüngesindeki değişim ve ışığın Güneş tarafından bükülmesi. Üçüncüsü ise direkt zamanla ilgili olmalıydı. Özel göreliliğe göre, birbirlerine doğru hareket eden iki gözlemci sadece zamanın ne olduğu konusunda değil, iki şeyin aynı anda olup olmadığında da hemfikir olamıyordu. Einstein'ın genel göreliliğinde ise durum daha da uç bir hale geliyor. Örneğin, büyük bir yıldızın yakınındaki yerçekimsel bölgede zaman daha yavaş ilerliyor. *Yerçekimsel kızıla kayma* olarak bilinen bu etki ilk olarak Robert Pound ve Glen Rebka'nın 1959'da yaptığı deneyle test edildi. Yeryüzündeki etki son derece küçük. Pound ile Rebka, atomik bir süreçteki frekansın (saniyedeki atış sayısı) kütleçekimin etkisiyle değişimini ölçtüler. 10 milyonda birlik bir değişim olmuştu! Bir atom saatinin saniyede 2×10^{19} kere vurduğunu ya da 5×10^{-20} saniyede bir (bir saniyenin trilyonda birinin 20 milyonda biri) vurduğunu düşünün. Pound ve Rebka Harvard Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri bu dâhice deneyde saniyede 10^{12}'lik bir değişim olduğunu belirlediler. Bu, atışların zamanlamasında 10^{-26} saniyelik bir değişim anlamına geliyordu! Güneş'in yüzeyindeki yerçekiminin Dünya'dakinden 3000 kat fazla olacağını göz önüne aldığımızda zamanın yavaşlaması Güneş'te binde bir civarında olacaktı.

Bir nötron yıldızının çevresindeki yerçekimsel alanda ise bu etki çok daha büyük olmalı. Nötron yıldızları, kozmosta meydana gelen en dramatik olaylardan biri olan süpernova patla-

malarının kalıntılarını oluşturuyorlar. Genellikle bizim yıldızımız olan Güneş'le benzer bir kütleye sahipler fakat Güneş'in yarıçapı yaklaşık 700.000 km iken nötron yıldızları yaklaşık bir kilometrelik bir yarıçapa sahipler. Diğer bir ifadeyle, bir nötron yıldızı Güneş'ten 10^{18} kat daha yoğun. Nötron yıldızı denmesinin sebebi de temelde bir araya sıkıştırılmış nötronlardan meydana gelmeleri. Bir nötron yıldızının yüzeyinde bir gramlık su (yaklaşık bir çay kaşığı) 10.000 ton ağırlığa sahip (Dünya'nın yüzeyindekinin bir milyar katı). Bu koşullar altında zamanın yavaşlaması çok daha büyük oluyor. Burada geçen bir saat orada iki saate tekabül ediyor. Hatta nötron yıldızının net kütlesine bağlı olarak bu süre *çok daha* uzun da olabilir.

Fakat daha yeni başlıyoruz. Bir nötron yıldızının geleceği, çevresindeki uzay ve zamanın tam bir karmaşa olduğu bir kara delik olmaktır. Zaten Güneş'in kütlesine sahip bir kara delik muhtemelen nötron yıldızlarında olduğu gibi bir yıldızın kütleçekimsel çökmesiyle oluşmuş olmalıdır.

Bir nötron yıldızının yakınında hayatta kalmanız gerçekten çok zor. Sadece Dünya'da olduğunuzdan milyarlarca kat ağır olmayacaksınız, aynı zamanda size etkiyen yerçekimi de çok daha büyük olacak. Milyonlarca tonluk bir kuvvete maruz kalacağınız için muhtemelen parçalara ayrılırsınız.

Endişelenmenize gerek yok. Yakın bir zamanda nötron yıldızlarına seyahat etmeyi planlamıyoruz. Çevresinden geçecek olsak bile çok yakınına girmemek için büyük ihtimalle gerekli önlemleri almış oluruz. Fakat bilimkurgu hikâyelerini bir kenara bırakırsak, bu örnek kütleçekimin etkilerinin ne kadar büyük olabileceğini göstermeye yetiyor. Güneş'in, çevresinden geçen ışığa olan bükme etkisi aslında küçük ve gözlemlemek amacıyla etkisi artırıldı. Bir nötron yıldızından çıkan ışık ise o kadar büyük bir kütleçekime maruz kalır ki, ancak yola çıkabilir.

Bir kara delik ise bir nötron yıldızından çok daha uç bir ortamdır. Kara delikler ilk olarak 1939 yılında, Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesi'nden Robert Oppenheimer ve öğrencisi Hartland Snyder tarafından öngörüldü. Yıldız çökmesinin sadece nötron yıldızlarını değil, çok daha yoğun cisimleri de oluşturabileceğini fark ettiler. O kadar yoğun cisimler ki, *ışık kütleçekim kuvvetine karşı koyamayacak ve kaçamayacaktı.* Oppenheimer kısa bir süre sonra kendisini Manhattan Projesi'ne (İkinci Dünya Savaşı sırasında nükleer silah üretmeyi amaçlayan ABD projesi) ve sonrasında bilim yönetim ve politikasına attı. Salt bilimdeki en büyük başarısı sayılabilecek olan gözlemineyse bir daha dönmedi. Oppenheimer-Snyder çalışmasının sonuçlarını analiz eden kişi ise Princeton'lı fizikçi John Archibald Wheeler oldu. Ayrıca bu cisimlere *kara delik* adını veren kişi de Wheeler'dı. Wheeler ve onu takip eden araştırmacılar bir yıldızın patlamasının ardından kalan bu materyal birikiminin uzay ve zamanı, Dünya'nın yuvarlaklığından dolayı ufku geçen bir gemiyi göremediğimiz gibi (okyanusa eğer 100 metrelik bir yükseklikten bakarsak ufuk yaklaşık 35 km ötemizde bulunur) göremeyeceğimiz şekilde bükecek kadar ağır olabildiğini anladılar. Kara delik sadece birkaç özelliğiyle; kütlesi, varsa elektrik yükü ve kendi çevresindeki dönüş süresiyle (Dünya'nın kendi çevresinde dönmesi süresi yaklaşık 24 saattir) tanımlanabilir. Kara deliği oluşturan yıldıza dair tüm diğer bilgiler yok olur.

Kara delik ufku –genellikle olay ufku olarak adlandırılır– garip bir yerdir. Kara deliğin yüzeyi olarak düşünülebilir. Merkezinden bu noktaya kadar olan mesafede uzay ve zaman birbirine karışır. Uzay zaman gibi, zaman ise uzay gibi davranır. İçine düşen cisimler için dönüşün olmadığı noktadır ve ışığın gidebildiği en uzak mesafe başlangıç noktasıdır. Newton'un mutlak zaman kavramı daha da zayıflamıştı.

Yine de bir roket içerisinde kara deliğin ufkundan geçen yolcular bir şey fark etmeyecektir. Sadece görev kontrolle iletişim sorunu yaşadıklarına dair bir uyarı alacaklardır. Asıl felaket kara deliğin merkezine yaklaştıklarında olacak ve nötron yıldızına giden yolcuda olduğu gibi parçalarına ayrılacaklardır. Bu noktada uzay ve zaman kavramlarımız net olmamaya başlıyor (maalesef yolcularımız bunu fark edemeyecek). Fizikçiler ve matematikçiler kara deliğin merkezini *tekillik* olarak adlandırmayı tercih ediyor. Yine bu noktada (ve çok yakınında) Einstein'ın denklemleri anlamsız hale geliyor. Peki, merkezde gerçekten ne oluyor?

Lisansüstü öğrencisi olduğum zamanlarda kara delikler halen bir spekülasyon konusuydu. Dünya'dan 6000 ışık yılı uzaklıkta bulunan, görünür bir yıldız ile birlikte birbirlerinin etrafında döndükleri bir sistem oluşturan Cygnus X-1 cismi gökbilimcilerin kara delik adayıydı. Cisim yeterince büyüktü ve yıldıza olan etkisi sayesinde tespit edilebiliyordu. Sistem aynı zamanda X-ışınları yayıyordu. Zamanla bu çiftten yayılan radyasyon çalışıldı (tabii ki kara deliğin kendisinden yayılmıyor) ve Cygnus'un bir kara delik barındırdığı doğrulandı. Yıldızın kalıntılarından yayılan X-ışınları kara delik tarafından emiliyordu. Bir kara deliğin kütlesi görünür yıldızın hareketine yaptığı etkiden çıkarılabilir. Doğrusunu söylemek gerekirse artık gökbilimciler bir yıldızın çökmesiyle oluşan bu kadar büyük kütleli herhangi bir cismin bir kara delik olduğunu *biliyorlar*.

Günümüzde kara delikler nadir bulunan yerler değiller. Başka yıldızlarla çiftlenen ve X-ışını yayılımlarıyla gözlenebilen birçok Cygnus X-1 benzeri sistem bulunuyor. Birbiriyle çarpışırken yaydıkları kütleçekim dalgaları sayesinde geçtiğimiz yıllarda çok daha büyük kara delikler tespit edildi. Çok daha etkileyici olanıysa bizimkinin de dahil olduğu birçok galaksinin merkezinde tespit edilen süper kütleli kara delikler. Samanyo-

lu'ndaki süper kütleli kara delik, dört milyon Güneş kütlesine sahip; yani doğa bizim Einstein'ın teorisinde bahsedilen uzay ve zaman kavramlarının da yıkılışını görmemize sebep oldu.

2020'de Reinhard Genzel, Andrea Ghez ve Roger Penrose kara delikler üzerine yaptıkları çalışmalar sebebiyle Nobel Ödülü'ne layık görüldüler. Ghez süper kütleli kara delikleri çalışıyordu ve onun ödül kazanmasını görmek beni çok mutlu etmişti. 2000'lerin başında Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Bilim Vakfı ve Enerji Bölümü'nün düzenlediği bir konferans kapsamında parçacık astrofiziğinin geleceği üzerine bir konuşma yapmak için davet edilmiştim. O günlerde PowerPoint sunumları popüler olmaya başlamıştı. Ben ise fosforlu kalem ve şeffaf dosya kullanmıştım. Benim dahil olduğum oturumda ilk konuşmacı yüksek seviyede bir NASA yöneticisiydi. Konuşmasını ajansın galaksimizin merkezindeki kara deliği görüntüleme ve sonraki değerlendirmelere dair planlarını anlattığı muhteşem bir PowerPoint sunumuyla yapmıştı. Teknolojide geri kaldığımı düşünmüştüm ve moralim bozulmuştu. Neyse ki bir sonraki konuşmacı, ünlü teleskop tasarımcısı Roger Angel'ın kullandığı dosyalar neredeyse siyahtı ve zor görünüyordu. En azından benim dosyam şeffaftı ve renkli kalemler kullanmıştım. Fakat tüm bu dosyalı sunumlardan çıkardığım asıl şey, iki sene sonra Andrea Ghez'in etraflarında dolaşan yıldızların hareketini inceleyerek kara delik tespit ettiği ve benim sunumlarımda onun internet sitesinden aldığım görselleri kullandığımı öğrenmiş olmamdı. Ghez hikâyemizin ilerleyen kısımlarında bizimle olacak.

Büyük Patlama

Evreni bir bütün olarak ele aldığımızda uzay ve zaman kavramlarımız daha da uç hale geliyor. Zamanın bir başlangıcı varmış gibi görünüyor.

Einstein'ın teorisine göre uzay-zamanı büken şey enerjidir. Fakat Güneş'in yüzeyinde veya Merkür'ün yörüngesinde bile etkiler son derece küçük boyutta. Einstein ve diğerleri de büyük bir cesaretle üzerine düşünebildikleri en büyük enerjiyi evrenin kendisi olarak değiştirdiler. Cesaretle diyorum, çünkü bugün bildiklerimizle karşılaştırırsak, o zamanlar gökbilimciler Samanyolu Galaksisi hakkında sınırlı bir bilgiye ve bugün sahip olduğumuz 13 milyar ışık yıllık haritadan bile daha az ayrıntıya sahip bir haritaya sahiptiler.

Yirminci yüzyılın başında sahip olunan sınırlı bilginin yanında, evrenin detaylı özelliklerini Einstein'ın denklemlerine yerleştirmek o zamanın kalem-kâğıt teknolojisiyle ulaşılmaz duruyordu. Einstein başlangıç olarak, evrenin ilk bakışta çılgınca görünen basit bir tasvirini yaptı. Nereye, hangi açıyla bakarsanız bakın evrenin aynı göründüğünü varsaydı. Gerçekten çılgın değildi, evrenin çok daha büyük ölçekte ya da daha kaba bir bakış açısıyla bu özelliklere sahip olduğuna dair bir hipotez sunmuştu. Dünya'nın uzaydan görünüşünü düşünün. Gözünüze boyalı bir küre gibi görünecektir, yüzeyindeki yapıların detaylarını ayırt edemezsiniz. Einstein'ın "Kozmolojik İlke"sinin doğası buydu. Fakat o günlerde bu hipotezin ilkel bir kanıtı bile yoktu.

Bu varsayımın çıktısı yepyeni bir şeydi, tüm evren için bir modeldi, yapılacak deney ve gözlemler için hassas tahminler yürüten bir model! Konuyla ilgili denklemler ilk olarak Saint Petersburg'da çalışan Rus fizikçi Alexander Friedmann tarafından 1922'de çıkarıldı ve çözüldü. Çözümlerin en dikkat çekici kısmı evrenin *statik olmadığı*ydı. Zaman geçtikçe genişliyordu. Açıklama oldukça kafa karıştırıcıydı. Evrenin genişlemesi ne anlama geliyordu? İşin matematiğinden çok da uzak olmayan bir benzerlik kurmak gerekirse, şişirilen bir balonu hayal edebilirsiniz. Şişirmeden önce balonun yüzeyine

evrendeki yıldız ve galaksileri temsilen noktalar yerleştirin. Peki, balonu şişirdiğinizde ne olur? Evet, balon genişler ve noktalar birbirinden giderek uzaklaşır. Her yıldıza (noktaya) göre diğerleri uzaklaşıyormuş gibi görünür. Einstein'ın teorisi iki boyut yerine üç boyutlu bir evrende tam olarak böyle bir hareketi öngörmüştü. Aynı zamanda yıldızların bizle olan mesafelerine göre uzaklaşma hızlarının oranını da doğru tahmin etmişti.

Bu sıçrayışın hakkını vermek adına o zamanlar insanlığın büyük ölçekte evrene dair bilgisinin ne kadar sınırlı olduğunu belirtmekte yarar var. O zaman diliminde başta Edwin Hubble olmak üzere gökbilimciler bizimkinin dışındaki galaksilerin varlığını yeni keşfediyordu. 1889'da doğan Hubble'ın astronomiye olan yolculuğu dolambaçlı olmuştu. İlk olarak babasının isteği üzerine hukuk okudu. Bir süre lisede öğretmenlik yaptı ve babasının ölümünün ardından astronomi alanında lisansüstü eğitimini almak üzere Chicago Üniversitesi'ne girdi. Birinci Dünya Savaşı'ndan dolayı orduda aldığı kısa bir görevin ardından astronomi çalışmalarını İngiltere'deki Cambridge Üniversitesi'nde sürdürdü ve 1919'da Pasadena, Kaliforniya'daki Mount Wilson Rasathanesi'nde çalışmaya başladı. Dünyanın en büyük teleskopu burada bulunuyordu ve ona evrene en geniş bakış açısıyla bakabilme olanağı sağlamıştı. Zamanının gökbilimcilerinin çoğu Samanyolu'nun *tüm* evren olduğuna inanıyordu. Hubble'ın çalışması ise bunu değiştirdi. Farklı galaksiler keşfederek diğer galaksilerin bize göre olan hareketlerini gözlemledi. Galaksilerin tamamının uzaklıklarıyla orantılı bir hızla bizden uzaklaştığını keşfetti. Aradaki bu oran bugün Hubble sabiti olarak biliniyor.

Lisansüstü öğrencisiyken Hubble'ın ölçümlerini ilk kez bir seminerde öğrendiğim zamanı hatırlıyorum. Konuşmacı olan

gökbilimci Virginia Trimble durmuş ve sonuçların Kopernikus'un evrenin merkezinde olduğumuza dair fikrini yanlışladığını söylemişti. Sonrasında benzetme olarak daha önceden de anlattığımız, evreni bir balon yüzeyi olarak düşünmekten bahsetmiş ve benzer şekilde genişlediğini belirtmişti.

Hubble'ın ilksel sonuçları Einstein'ın teorisiyle her şekilde uyumluydu. Aslında ölçümleri yüksek kalitede değildi. Kendisinin bulduğu evrenin genişleme oranı bugün bildiğimizden neredeyse 10 kat yanlıştı. Fakat bu çalışma evrenin tarihini anlamak, büyük ölçekli yapısını incelemek ve Einstein'ın teorisini test etmek konusunda bir asırdan fazla süredir devam eden bir sürecin başlamasını sağladı.

Evrenin bugünkü durumunu göz önüne aldığımızda Einstein'ın teorisi evrenin genişlediğini öngörüyor. Aynı şekilde geçmişe doğru bakarsak evren küçülüyor. Eğer yeterince geçmişe bakarsak evren sonsuz derecede küçüktü, her şey bir arada bulunuyordu ve hayal edilebileceğinden daha da sıkışıktı. Matematikçiler Einstein'ın denklemlerine göre zamanın başladığı bu noktayı tekillik olarak tanımlıyor. Denklemler anlamsız olmaya başlıyor. Geldiğimiz bu noktaya *büyük patlama* adını veriyoruz. Einstein'ın teorisi burada zamanı kırıyor. Tam bu noktada bir kırılmanın nasıl olduğunu ve daha öncesinde ne olduğunu anlamaya çalışıyoruz. Fakat şu an için denklemlerin özelliği kapsamında Einstein'ın ve çağdaşlarının sonuçlarını inceleyeceğiz.

Zamanın başlaması kavramı bakış açınıza göre sıkıntılı veya ilgi çekici görünebilir. Bu duruma yarı-dinî ve bilimsel olmayan bir açıdan bakan büyük İngiliz gökbilimci Fred Hoyle sıkıntılı bulanlardandı. Radyo yayınında büyük patlama ismini bulan kişi Fred Hoyle'du fakat bunu teoriyi övme amacıyla yapmamıştı (sonrasında aslında bunu kastetmediğini söylemişti). Zamanla teoriyi destekleyen, sonraki bölüm-

lerde bahsedeceğimiz kanıtlar baskın geldi. Aynı zamanda ismi o şekilde kalmıştı. 1993'te *Sky & Telescope* dergisinde yeni bir isim vermek için yarışma yapılması teorinin gelişimini ve yayılmasını belli ediyordu. Fakat sonrasında büyük patlama ismi o kadar popüler oldu ki aynı şekilde bırakmaya karar verdiler.

Evrenin Kısa Bir Tarihi

Einstein'ın iki kez incelemiş olduğu şu anki zaman anlayışımıza göre, büyük patlamadan sonraki saniyenin küçük bir kısmına kadar uzak geçmişe bakabiliyoruz; yani evrenin tarihini aşırı erken zamanına dek çıkarmaya çalışabiliriz. Büyük patlamadan üç dakika sonra evrenin nasıl olduğuna dair güvenilir kanıtlarımız var. Sonrasında farklı dönemleri ve en az on milyar yıllık geleceğimizi takip edebiliriz.

Zamanda geriye baktığımızda tüm cisimler –yıldızlar, galaksiler, toz parçacıkları– sıkışmış bir halde görünecek. Yeterince geçmişe gidersek gezegenler, yıldızlar, galaksiler atomlarına ayrılacaktır. Birbirlerine çarptıkça ısınıyorlar. Videoyu geriye sardıkça evren küçülüyor, küçüldükçe ısınıyor.

Saati bu şekilde geriye doğru çalıştırmak baş döndürücü. Akla daha uygun bir yaklaşım ise İkinci Dünya Savaşı'ndan hemen sonra Rus siyasi göçmen fizikçi George Gamow ve lisansüstü öğrencisi Ralph Alpher tarafından geliştirildi. Gamow, Sovyetler Birliği'ndeki Stalinist baskıdan kaçıp 1933'te ilk olarak Fransa'ya, bir sonraki yıl ise Birleşik Devletler'e göç etti. Kariyerinin kalan kısmında Saint Louis'deki Washington Üniversitesi'nde ve Boulder'daki Colorado Üniversitesi'nde görev aldı. Nükleer fizik çalışmalarına önemli katkılarda bulundu. Başarılı bir popüler bilim yazarı ve muzip bir kişiydi. En önemli çalışması ise Einstein'ın kozmolojisini yıldız ve gezegenlerin oluşmasından önceki zamana uyarlamasıydı. Bu

sayede evrenin son derece genç zamanlarının tarihini anlama ve Hubble'ın gözlemlediği genişlemenin ötesinde gözlemler yapma imkânı doğmuştu.

Gamow ve Alpher evrenin bir anlığına, büyük patlamadan sadece birkaç saniye sonra, *aşırı* sıcak olduğunu varsayarak işe başladı. Düşündükleri sıcaklık, 45 milyon derecelik sıcaklığa sahip olan Güneş'in merkezinden milyonlarca kat daha fazlaydı.

Sıcaklık, atom ve moleküllerin hızlarının ölçüsüdür. Havadaki moleküller çok hızlı hareket ederler. Oda sıcaklığında saniyede 100 metre ya da başka bir deyişle saatte 100 kilometre civarı bir hıza sahipler. Her yönde hareket edip sıklıkla birbirleriyle çarpışırlar (bize sıcaklık hissiyatını veren şey de budur). Fakat moleküller ne kadar hızlı hareket etseler de Einstein'ın hız için standart olarak belirlediği ışık hızı ile karşılaştırıldığında çok yavaşlardır. Güneş'in çekirdeği oda koşullarından 10^5 kat, yani 100.000 kat daha sıcaktır ve atomlar ışık hızının 10^4'te biri hızında hareket ederler. Bu hız elektronların protonlar tarafından tutulmasını engelleyecek kadar fazladır, bundan dolayı Güneş'in çekirdeği çoğunlukla iyonize gazlardan oluşur. Fakat Gamow ve Alpher sadece atomların iyonize gaza dönüştüğü değil, atom çekirdeğinin bir arada tutunamadığı kadar yüksek sıcaklıkları ele aldılar. Proton, nötron, elektron ve fotonların (ışığı oluşturan bu parçacıklar hikâyemizin sonraki kısımlarında önemli rol oynayacak) ayrı ayrı hareket edip neredeyse serbest halde oldukları bir evren resmi çizdiler. 10^{14} derece sıcaklık olduğunu hayal ettiler (bu kadar yüksek bir değerde birimin Fahrenheit, santigrat ya da Kelvin olmasının bir önemi yok, bir trilyon derece Fahrenheit yaklaşık iki milyon santigrat dereceye ve Kelvin olarak santigratın sadece 273 derece fazlasına eşittir).

Bu yüksek sıcaklıklarda proton, nötron, elektron ve fotonlara ek olarak hikâyemizin geri kalan kısmında sıklıkla duyacağımız nötrino adı verilen tuhaf bir parçacık bulunur. Nötrinolar, nötron ve protonların sayısının aynı kalmasını sağlarlar. Bunu da iki farklı rol oynayarak sağlarlar. İlk olarak protonlarla çarpışıp nötron ve diğer parçacıkları üretirler. İkinci olarak nötronlar radyoaktif bozunuma uğrayıp nötrinoları, protonları ve elektronları üretir. Fotonlar protonlarla çarpışıp proton ve nötronların bir araya gelerek atom çekirdeğinin oluşmasını ve elektronlarla atom yapısının oluşmasını engellerler.

Fakat evren genişledikçe soğur ve içindeki farklı bileşenler daha yavaş hareket etmeye başlar. Nihayetinde nötrinolar, protonları nötronlara dönüştürecek enerjiye sahip olamaz. Nötronların bazıları bozunur, bazıları ise protonlara katılarak çekirdeğinde bir proton ve bir nötron bulunan, hidrojenin döteryum adı verilen bir izotopunu oluştururlar. Proton ve nötronlar aynı zamanda helyum ve lityum gibi daha karmaşık atomların çekirdeğini oluşturmak için de bir araya gelebilirler. Evrendeki maddelerin büyük bir çoğunluğu, döteryum, helyum ve lityumun atom çekirdekleri bu şekilde oluşur. Daha ağır çekirdeğe sahip elementler çok daha sonra, yıldızlarda hidrojenin yanması süreciyle oluşurlar. Erken evrende hafif elementlerin çekirdeklerinin oluştuğu bu sürece ilkel nükleosentez adı veriliyor. Büyük patlamadan yaklaşık 3 dakika sonra meydana geldi. Bir süreliğine evrenin doğasının nasıl olduğunu ve nükleer reaksiyonların ne kadar gerçekleştiğini hafif element miktarını tahmin edecek kadar biliyoruz. Gökbilimciler evrendeki hidrojen, helyum ve diğer hafif elementlerin oranını ölçebiliyor ve çıkan sonuç teorinin öngördüğüyle uyuşuyor.

Fakat bu düşüncelerden doğan çarpıcı bir tahmin daha var. Bu aşamada evren aşırı sıcak. Bir milyon Kelvin veya

iki milyon Fahrenheit derecenin biraz üzerinde oluşabilecek atomlar için yeterince soğuk değil. Gamow ve Alpher'in çalışmalarını yürüttükleri zamanlarda evrenin kaç yaşında olduğu ancak kabaca biliniyordu. Bugün nötr atomların büyük patlamadan yaklaşık 100.000 yıl sonra oluştuğunu biliyoruz. İlk üç dakikanın kalıntıları hafif elementler olsalar da 100.000 yıl sonrası için çok daha net bir fosil bulunuyor: Evreni dolduran mikrodalgalar, kozmik mikrodalga arkaplan ışıması (CMBR: *Cosmic microwave background radiation*).

Bu zamandan önce fotonlar –Einstein'ın 1907'de ışığı oluşturduğunu öne sürdüğü parçacıklar– elektron ve protonlarla çarpışıyor ve çarpışmalar arasında ancak kısa mesafe ilerleyebiliyordu. Evren nötr atomlarla dolduğunda ise fotonlar tüm evren boyunca engel olmadan ilerleyebilir hale geldi. Gamow ve Alpher bu fotonların bugün çevremizde olması gerektiğini fark etti. Kozmik rekombinasyonun olduğu bu vakitlerde görünür ışığa benzer bir dalga boyuna sahip olmalılardı. Fakat Einstein'ın kızıla kayma etkisinden ötürü sıradan bir fotonun fırınımızdaki mikrodalgalar gibi daha büyük bir dalga boyu olacaktı.

Kozmik mikrodalga arkaplan ışıması Gamow ve Alpher'in çalışmasından neredeyse yirmi yıl sonra, 1964'te muhteşem bir şekilde kazara keşfedildi. O zamanlar büyük şirketlere ait çok iyi birkaç endüstriyel laboratuvar bulunuyordu. New Jersey'de bulunan Bell Laboratuvarları bunların önde gelenlerindendi. Sonrasında telekomünikasyonda tekel olacak AT&T tarafından yönetiliyorlardı. Diğer bir laboratuvar ise IBM'in Yorktown Heights, New York'ta bulunan araştırma merkeziydi. Bu laboratuvarlarda çalışan bilim insanları asıl olarak şirketlerinin işlerini yapsalar da genellikle kendi bilimsel meraklarını test etme imkânına da sahiplerdi. Holmdel, New Jersey'deki Bell Laboratuvarları'nda çalışan iki fi-

zikçi Arno Penzias ve Robert Wilson, radyo astronomisinde kullanılmak üzere büyük bir anten inşa ettiler. İyi deneyciler oldukları için öncelikle enstrümanlarının doğru çalışıp çalışmadığını test etmek istediler ve gökyüzünden sinyal almayı beklemedikleri bir noktaya enstrümanı *hiçbir sinyal almadığı*ndan emin olmak için doğrulttular. Fakat bunun yerine arabanızın radyosunu ayarlarken arka planda duyduğunuza benzer bir ses tespit ettiler. İlk olarak bunun enstrümanlarındaki bir problem olduğunu düşündüler ve sorunun kaynağını bulmak için testler yapmaya başladılar. Sinyalden o kadar çok şüpheleniyorlardı ki, güvercinlerin antene yuva yaptığını fark ettiklerinde kuş dışkılarının sorun oluşturabileceğini düşündüler. Anteni söküp temizlediler. Fakat halen aynı sinyali alıyorlardı. Sonunda Princeton'daki astrofizikçiler Robert Dicke ve Jim Peebles ile görüştüler. İkisi de kozmik mikrodalga arkaplan ışıması üzerine sıkı çalışıyordu. Peebles teori kısmındaydı, Dicke ise bir deney tasarlamaya çalışıyordu. Bu ikili Bell Laboratuvarları çalışanına bekledikleri ışımanın gücü ve frekansından bahsettiler. Penzias ve Wilson da keşfettiklerinin bahsedilen dalga olup olmadığını anlamak için işe koyuldu. Zaten hikâyemizin temel noktası keşfetmiş olmaları. İlk gelen veri cılızdı, sinyalin gücü ancak birkaç frekans için bilinebiliyordu. Fakat sonraki birkaç senede bu dalgaya adanan ölçümler gelişim sağladı. Kısa bir süre sonra sinyalin gücü ve frekansa olan bağlılığı tam olarak Gamow ve Alpher'in, sonrasında da Peebles ve diğerlerinin tahmin ettiği gibi çıkmıştı. Günümüzde teori ve deneyler neredeyse mükemmel derecede birbirine uyuyor.

Mikrodalga ışımasının spektrumu geldiği yolun sıcaklığına göre değişir; yani bu ışımanın ölçülmesi evrenin bugünkü sıcaklığını ölçmemizi sağlar. Fakat bu durum yeni bir şeye daha olanak sağlar: Kozmolojik ilkenin sınanması. Dünya'ya

farklı yönlerden gelen tüm ışımaları çalışan astrofizikçiler sıcaklığın her yönde yüksek hassaslıkla aynı olduğunu buldular. Işıma çok uzaktan geldiğinden (yaklaşık 13,5 milyar yıllık bir mesafe) evrenin tüm açılardan büyük ölçekte Einstein'ın da öngördüğü gibi aynı olduğu belirlenmiş oldu. Ayrıca son yıllarda uzak galaksilerin keşfi üzerine yapılan çalışmalar madde yayılımının büyük ölçekte her yönde eşit olduğunu ortaya koydu. Gökbilimciler evrenin homojen (pürüzsüz) ve izotropik (tüm yönlerde aynı) olduğunu söylüyor.

Fakat bir açıdan da kulağa gerçek olmak için fazla düzgün geliyor. Evren kesinlikle mükemmel derecede homojen ve izotropik değil. Bu şekilde görünmesinin en mantıklı açıklaması başlangıçta evrenin tam anlamıyla homojen ve izotropik olmaması ve bu kusurun evren genişleyip yaşlandıkça büyümesi. Uzun bir süre için kozmik mikrodalga arkaplan ışıması için böyle bir kanıt yoktu. Doğrusu, kozmik mikrodalga arkaplan ışıması 10.000'de bir hassaslıkla homojen ve izotropik ölçülmüştü.

Bugün evrenin tarihiyle ilgili büyük patlamanın üç dakika sonrasından günümüze, 13 milyar yıl sonrasına dek deneysel ve gözlemsel kanıtlara sahibiz. Fakat yine de Einstein'ın denklemlerindeki tekilliğin ne manaya geldiğini ya da evrenin gerçekten bir başlangıcı olup olmadığını bilmiyoruz.

İKİNCİ ADIM

BÖLÜM 4

KUANTUM MEKANİĞİ GELECEĞİ TAHMİN EDEBİLİR Mİ?

Bu bölümde bakışlarımızı evrensel büyüklüklerden uzaklaştırıp tam tersine, çok küçük dünyaları keşfetmeye çevireceğiz. Doğa anlayışımızı derinden değiştirmek üzereyiz. Öğrencilik zamanlarımda fiziğe bakışımı fazla "mekanik" bulan bir kız arkadaşım vardı. Newton'un evren anlayışı *gerçekten* fazla mekanikti. Bana bir gezegenin konumunu, hızını söyleyin ve iyi bir bilgisayar verin, ben de size gezegenin herhangi bir vakitte geleceği konumunu söyleyeyim. Belki sadece bana öyle geliyordur ama ben sıkıcı bulmuyorum. Yine de biraz utanmıştım ve onu tarih ve edebiyata olan ilgimle etkilemeye çalışmıştım.

Einstein'ın görelilik teorileri hareketin daha farklı bir tanımını yapıyor. Yine de bir gökbilimci konumunu ve hızını bildiği bir galaksinin gelecekte herhangi bir vakitteki konumunu Einstein'ın denklemlerini kullanarak hesaplayabilir. Fakat atomlara ve daha küçük ölçeklere inildikçe işler değişiyor. Öğrencilik günlerimde bilimin Newtoncu bakış açısını daha

farklı ve garip bir şeyle değiştirmesi gerektiğini öğrenmiştim. Doğanın bizim cisimlerin hareketine dair sezilerimize uymayan gizemli kurallarla tanımlanması ve insanların bunu çözebilmiş olması bana mükemmel geliyor. Kuantum dünyasından bahsediyorum.

Evrimsel biyolog olmasam da Newton'un geliştirdiği şekilde geleceği tahmin etmek evrimsel programlamamızın doğal bir uzantısı gibi görünüyor. Avı takip etmek, düşen cisimlerden kaçınmak, bir şey atarken eğimi göz önüne almak ya da hayatta kalmak için yüzleştiğimiz diğer şeyler konusunda nesnelerin nasıl düştüğü ya da havada nasıl ilerleyecekleri önem arz ediyor. On dokuzuncu yüzyılın sonu ve yirminci yüzyılın başında fizikçiler atomları daha ciddi bir şekilde çalışmaya başladılar ve Newton ve Einstein'ın kurallarına uymadıklarını görüp şaşırdılar. Belki o kadar da şaşırtıcı değildir. İnsanların atom ve daha küçük şeylerin doğasını anlamasını gerektiren evrimsel bir zorunluluk yok. Çalışma prensiplerini anlayabilmek için gerekli olan sezgilere sahip değiliz. Fakat insanlar yine de anlamayı başardı.

Maddenin içeriğinin ne olduğuna dair spekülasyonlar Antik Yunan'a dek tarihlenebiliyor fakat yüzyıllar boyunca yalnızca spekülasyondan *ibaretler*di ve evrenin nasıl işlediğine dair öne sürülen görüşlerin herhangi bir kanıtı bulunmuyordu. On dokuzuncu yüzyılda her şey ciddi manada değişti. Kimyacılar elementlerin belli örüntülere sahip özelliklerinin olduğunu ve test tüplerinde yüksek miktarda atom barındıran örneklerinin karakteristik özellikleri olduğunu fark ettiler. Elektrik ve manyetizma konusunda karşımıza çıkan Michael Faraday, elektik akımı üzerine sonuçlarını yüklü parçacıklardan oluşan atomların varlığıyla açıklayabildiğini fark ettiği deneyler yürüttü. Atomik hipotezini şu sözleriyle anlıyoruz: "Aklımıza gelen küçük parçacıklar fikrini öne sürmekten ken-

dimizi alamıyoruz... Atomların çarpıcı özelliklerinden dolayı elektrik gücünü iletebilen maddeler olduğuna inanmamızı haklı kılacak birçok gerçek bulunuyor." Elektrik ve manyetizma anlayışımıza büyük katkıda bulunan bir diğer isim James Clerk Maxwell atomların varlığını gazların gözlemlenebilen özellikleriyle açıklayabildiği bir teori geliştirdi. Yunanlar gibi (*atom* kelimesi Yunanca "bölünemez" anlamına gelir) atomların parçalanamaz olduğunu düşünüyordu: "Çağlar boyunca felaketler meydana gelmesine ve belki de gökyüzünde de olacak olmasına, eski sistemlerin parçalarına ayrılıp yenilerinin onların kalıntılarından oluşmasına rağmen sistemleri oluşturan atomlar –evrenin maddesel temel taşları– kırılmaz ve aşınmaz şekilde durmaya devam ediyor. Bugün de yaratıldıkları zamandaki gibi sayıca ve ağırlıkça mükemmel kalmayı sürdürüyorlar..." Maxwell'in gazların yüksek sayıda atomdan oluştuğuna dair tasviri Newton'un yasalarına göre hareket ediyordu ve klasik bakışa bir tehdit oluşturmuyordu. Fakat yine de atomun net bir tasviri oluşmamıştı.

Gerçek karşıtlıklar on dokuzuncu yüzyılın bitip yirminci yüzyılın başladığı noktada geldi. Özellikle ikisi Newton'un dünya bakışının sonunu getirdi. İlki, 1895'te Henri Becquerel tarafından radyoaktivitenin keşfiydi. Becquerel, Paris Doğa Tarihi Müzesi'ndeki fizik kürsüsünün başında dört nesildir bulunan ailenin üçüncü üyesiydi. Yeni keşfedilen X-ışınları fenomenini anlamak için deneyler yürüttüğü sırada, neredeyse kazara, uranyumun ışınlar çıkarabildiğini ve fotoğrafik plaka (cep telefonlarından çok önce, dijital kamera öncesi çağda fotoğraf çekmek için kullanılan ışığa duyarlı materyal) üzerinde görüntü oluşturabildiğini fark etti.

Sonrasında, çalışmak için ilgi çekici sorunlar arayan genç bilim insanı Marie Curie, "Becquerel ışınları"nı çalışmaya karar verdi. Kısa sürede radyasyonun atoma has bir özellik ol-

duğunu gösterdi: Aynı element farklı tür bileşikler oluştursa da aynı şekilde radyasyon yayıyordu. Aynı zamanda elde ettiği radyasyona elindeki uranyum örneklerinde –tamamen saf değillerdi– bulunan birden fazla elementin sebep olduğunu fark etti. Kısa süre sonra, bizim hikâyemiz açısından önemli bir başarıya daha imza attı: Radyasyon miktarının radyasyon yayan elementin miktarıyla doğru orantılı olduğunu gösterdi. Sonrasında o ve diğerleri tek bir atomun ne zaman bozunacağının tahmin edilemeyeceğini, ancak bir atomun bir sonraki saniye bozunma ihtimalinin hesaplanabileceğini fark ettiler. Newton'un devrilmesi an meselesiydi.

Burada Marie Curie'nin ne kadar etkileyici bir bilim insanı olduğunu ve hayatının birçok açıdan dikkat çekici olduğunu belirmekte yarar var. Polonya'da doğan Marie (ilk ismi Maria Sklodowska'ydı) tıp okuyan ablasına yardımcı olmak amacıyla Paris'e geldi. Ablası Bronislawa da onun iyiliğine karşılık vermek için Marie'ye 1891'de Sorbonne'da fizik okuması için yardım etti. Biraz önce açıkladığım çalışma, doktorasının bir parçasıydı. Bu sırada kendisinden biraz daha büyük ve yine tanınan bir fizikçi olan Pierre Curie ile tanıştı ve evlendi. Marie örneklerindeki diğer radyoaktif elementlerle çalışmak istediğinde Pierre bunun kendi çalışmasından daha önemli olduğuna karar verdi ve kendisini eşinin asistanı olmaya adadı. Bir süre laboratuvarlarında çalışan bir bilim insanı şöyle yazmıştı: "Günümüzde ve geçmişte aralarında büyük fark olan birçok akademik çift var, fakat buradaki gibi ikisinin de büyük bilim insanı olduğu ikinci bir çift hiç olmadı. Eşlerin ikisinin de birbirlerine olan hayranlıklarını ve bağımsız karakterlerini bilimde olduğu kadar hayatta da korudukları bu kadar seçkin bir örnek bulmak mümkün değil." Curie biri fizik, biri kimya alanında olmak üzere iki Nobel Ödülü kazandı ve Sorbonne'da pro-

fesör olan ilk kadın oldu. Ve bunların hepsini kadınların oy bile kullanamadığı bir zamanda yaptı!

Atom anlayışımızda önemli rol oynayan bir diğer fizikçi ise Ernest Rutherford'du. Becquerel'in keşfinden sonra o da radyoaktivite çalışmaya başladı. Aslen Yeni Zelandalı olan Rutherford, Montreal'deki McGill Üniversitesi'nde profesörlük yaptı ve Cambridge Üniversitesi'ne geçmeden önce Manchester Üniversitesi'nde görev aldı. Rutherford sadık bir oğuldu, sonrasında sadık bir eş ve baba oldu. 1902'de Yeni Zelanda'daki annesine yazdığı mektup bana Curie'nin ne kadar iyi olduğunu gösteriyor: "Önümde insanlar olduğu sürece devam etmem gerekiyor. Yarışta kalmak için çalışmalarımı mümkün olduğu kadar çabuk yayımlamalıyım. Bu yarıştaki en iyi isimler son yıllarda radyoaktif cisimler üzerine önemli işler yapan Becquerel ve Paris'teki Curieler."

Radyoaktivitenin keşfiyle aynı zamanda klasik fizik için ikinci büyük zorluk ortaya çıktı: Yüksek sıcaklıktaki cisimlerden yayılan radyasyonun doğasını anlamak. Sıcak bir cismin, örneğin kızgın bir tavanın yanında durursanız sıcaklık hissedersiniz. Sebebi tavanın hava moleküllerini ısıtması değil, kızılötesi radyasyon denen bir elektromanyetik radyasyon yaymasıdır. Bu radyasyonu gözünüzle göremezsiniz, fakat derinizdeki moleküllerin titreşmesine ve sıcaklık hissetmenize sebep olur. On dokuzuncu yüzyılın sonunda deneysel olarak çalışılan bu radyasyon *karacisim ışıması* olarak biliniyor. Tüm evren 2,7 Kelvin olan şu anki sıcaklığıyla bir karacisim gibi davranır ki, bu da büyük patlamayı anlamamızda büyük rol oynayan kozmik mikrodalga arkaplan ışımasıdır. Maxwell'in belli bir sıcaklığa sahip parçacıklardan oluşan sistemin davranışıyla ilgili fikirlerini takip eden biri, klasik fiziği kullanarak bir karacismin ışımasının frekansını tahmin edebilir. Sıcak cismin yaydığı bu ışıma sadece kızılötesi radyasyon

değil; mikrodalgalar, görünür ışık, X-ışınları ve gamma ışınları gibi tüm radyasyon türlerini içerir. Aslına bakarsanız sonsuz sayıda farklı tip ışıma vardır ve bundan dolayı teori sıcak cismin sonsuz enerjiye sahip radyasyon yayacağını tahmin eder. Tabii ki bunun bir manası yoktur, frekanslar arasındaki bu demokrasi, örneğin 300 santigrat derece sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı, çoğunluğu kızılötesi olan radyasyona ait deneysel gözlemlerle uyuşmaz.

Max Planck'a geçelim. Planck birçok açıdan gelenekselci, muhafazakâr bir kişilik ve bilim insanıydı. Fakat iş bu sorunu çözmeye geldiğinde oldukça radikal bir adım attı. Newton'un fiziğinde enerji her değeri alabilir, matematikçiler buna süreklilik adı verir. Başka bir deyişle 1,000000 veya 1,000001 birim enerji olabilir, istenildiği kadar ondalık değer alabilir. Planck ise enerjinin sadece 1,00000 veya 2,000000 gibi belli aralıklara sahip değerler alabildiği bir atomik sistem hipotezi oluşturdu. Öne sürdüğü bu değerler görünür ışık ve kızılötesi ışımadan çok daha büyük, X- ışınları için, hatta gamma ışınları için bile büyüktü. Karacisim ışımasında görünür ışık, X-ışınları ve gamma ışınları üretilmez; çünkü cismin sıcaklığı üretmek için gerekli olan en düşük enerji paketi, enerjinin *kuantum*u kadar yüksek değildir. Planck'ın hipotezi verilerle son derece güzel bir şekilde uyumlu oldu. 1905'te çalışması Nobel Ödülü'nü getirdi. Einstein ise Planck'ın hipotezini başka bir açıdan kullandı, ışığın madde tarafından *emilim*inin ve yayılmasının belirli enerjilerle gerçekleştiğini varsaydı. 1907'de hipotezini bir adım ileri götürdü ve ışığın *foton* adı verilen farklı bir kuanta ya da parçacık türüyle taşındığını söyledi. Newtonculuk ciddi sıkıntıya girmişti. Newton fiziğindeki hiçbir şey enerjideki bu ayrılığı, *kuantalama* ya da *nicemleme* denilen özelliği açıklayamıyordu.

Klasik bakış açısına öldürücü darbe atom yapısının keşfiyle geldi. On dokuzuncu yüzyılın sonu ve yirminci yüzyılın

başı atomun ve parçalarının "görülebileceği" aletlerin yapılmasına şahitlik etti. Keşfin ilk adımı Cambridge Üniversitesi'nden J.J. Thomson'ın elektronu bulmasıydı. Thomson 1897'de gazlardaki elektrik akımını çalışıyordu. Bu akımın aslında çok sayıdaki küçük parçacığın (elektron) akışından kaynaklandığını gösterdi ve elektronun kütlesi ile elektrik yükünü ölçtü. Aynı zamanda elektronun hidrojen atomundan çok daha hafif olduğunu da gösterdi.

Başka bir deyişle, atomlar artık parçalanamaz değildi, öyleyse neydi? Thomson elektronların pozitif yüklü yapışkan bir lapanın içerisine oturduğu ve atomun toplam yükünün nötr olduğu bir resim ortaya koydu. Elektronlar arkalarında diğer elektronları ve yapışkan maddeyi, kimyacıların ilgisini çeken o yüklü iyonları bırakarak atomdan koparılabilirdi. Thomson Britanyalıydı, atom modeline "üzümlü kek modeli" adını vermişti. Yapının bir arada tam olarak nasıl kaldığı ve nasıl bir madde olduğu net değildi, fakat Thomson ve çağdaşları sorunu halen Newtoncu bakış açısıyla ele alıyordu.

Model dayanamamıştı.

Atomik dünyayı keşfetmek için kullanılabilecek yeni bir yol bulunmuştu. Britanyalı büyük deneyci Ernest Rutherford radyoaktif maddelerden yayılan hızlı parçacıkların atom yapısını incelemek için kullanılabileceğini fark etmişti. Radyoaktivite kaynağından parçacıkları ince bir altın film tabakasına (yine fotoğrafik plaka kullanarak) göndermiş, parçacıkların altından geri saçılmasını inceleyerek altın atomlarının yapısını haritalayabilmişti. Thomson'ın modeli doğruysa parçacıkların lapanın içerisinden yön değiştirmeden geçmesi gerekirdi. Bunun yerine parçacıkların atomlardan düzenli bir şekilde geri yansıdığını buldu. Tam anlamıyla şok ediciydi. Deneyimini "hayatımda şahit olduğum en olağanüstü olaydı. Ateşlediğiniz 15 inçlik bir merminin bir peçete parçasından

sekip sizi geri vurması kadar olağanüstüydü" şeklinde anlatmıştı. Gözlemleri Thomson'ın modelini yıkmıştı.

Rutherford daha fazlasını yaptı. Bilinen farklı radyasyon tiplerini meydana getiren parçacıkları tanımlamıştı. Üç tip vardı. Gamma ışınları yüksek enerjili ışık parçacıklarından, alfa ışınları helyum atomlarının çekirdeklerinden, beta ışınları da elektronlardan oluşuyordu. Yüklü alfa parçacıkları atomun yapısını anlamasını sağlayan araçtı. Rutherford parçacıkların çekirdekten nasıl saçıldığı teorisi üzerine çalıştı, ölçümlerini karşılaştırdı ve teori atomun farklı kısımlarının boyutlarını açığa çıkardı. Bu keşiflerin her biri mükemmel bir bilimsel kariyere yeterli olsa da daha fazlasını yaptı. Protonu keşfeden kişi Rutherford'du, meslektaşı (ve eski öğrencisi) James Chadwick de Rutherford'un tavsiyelerini takip ederek nötronu keşfetti. Ayrıca Rutherford yaklaşık 10^{-8} cm ile atomun ve 100.000 kat daha küçük, 10^{-13} cm ile atom çekirdeğinin boyutlarını da iyi bir şekilde ölçtü. Radyoaktivite mikroskopla görünebilen şeylerden 10^{8} kat daha küçük şeylerin keşfini sağlayan bir araç olmuştu.

Niels Bohr, Rutherford'un keşiflerinin olağanüstü çıkarımlarının farkına varmıştı. 27 yaşındayken, atom çekirdeğinin keşfinden kısa bir süre sonra, Rutherford'un laboratuvarına asistan olarak (bugün doktora sonrası araştırmacı diyebileceğimiz bir pozisyon) çalışmak için gelmişti. Danimarka'da doğmuş ve Kopenhag'da eğitim görmüştü, kuantum devriminde önemli bir rol oynadı. Rutherford'un sonuçlarının ortaya çıkardığı sorunu fark etmişti. İlk olarak, Newton'un (ya da Einstein'ın) tasviri doğruysa atomların neden özdeş olduklarını anlamanın bir yolu yoktu. Kimyaları her elektronun belirli bir vakitte atomun neresinde olduğuna ve hangi hızla hareket ettiğine bağlıydı ve bunların tamamı da atomun geçmişinden kaynaklanıyordu. Diğer bir deyişle,

her atom türünün kimyası farklı olmalıydı. Bu sorun başka bir şeyi daha ortaya çıkardı. Eğer elektronlar Maxwell'in teorisine göre, çekirdek etrafında belirli bir bölgede hareket ediyorsa ışın yaymalıydı. Işın enerji taşırdı ve bundan dolayı elektronlar zamanla yavaşlayıp atom çekirdeğine düşerdi. Rutherford'un keşfettiği türden atomlarda ise böyle bir şey olmuyordu.

Bohr, Planck'ın enerjinin ayrık kuantası üzerine çalışması ve Einstein'ın foton kavramından haberdardı. Atom bilmecesini çözmek için fikirlerini bir adım ileri götürdü ve klasik fizik kurallarının sonunu getirdi. Tasarısı elektronların ancak belirli yörüngelerde ya da bölgelerde, belirli bir hız ve buna bağlı olarak belirli bir enerji ile hareket ettikleri yönündeydi. Daha yüksek enerji konumundan daha düşük enerji konumuna, aradaki enerji farkını taşıyan bir foton yayarak "atlayabilirler"di. Ya da düşük enerji konumundan bir foton emerek yüksek enerji konumuna zıplayabilirdi. Bu kararla iki bilmeceyi de çözmüştü. Düşük enerji konumu kararlıydı. Bozunmazdı. Her atom aynı atom türüyle özdeş bir şekilde en düşük enerji konumunda bulunuyordu. Yayılan fotonların enerjileriyle ilgili tahminleri hidrojen atomu tarafından yayılan ışığın spektrumuyla uyuşuyordu ve muhteşem bir başarıydı. Fakat Bohr'un modeli hidrojene özeldi ve halihazırda diğer atomları tanımlayamıyordu. Yaklaşık 10 yıl boyunca Bohr ve meslektaşları bu kuralları genişletmeye çalıştılar, fakat sınırlı başarılar elde ettiler. Kurallar fazla özelleşmişti. Newton fiziği yıkılmıştı, fakat yerine nasıl bir fizik gelecekti?

Fransız fizikçi Louis de Broglie tarafından önemli bir adım atıldı. Bohr'un önermelerini Planck'ınkilerle kıyaslayarak, bir elektronun parçacıktan ziyade ışık gibi bir dalga olduğuna dair tuhaf görünen bir çıkarım yaptı. Bu şekilde Bohr'un kuralları Planck'ın uygulaması haline geliyordu. Birkaç sene

sonra deneyler elektronların *dalga* gibi davrandığını gösterdi. Parçacık, dalga; gerçekten hangisiydi?

Fizik için tamamen farklı bir çerçeve kurulmaya, 1920'lerin başında Werner Heisenberg ve Erwin Schrodinger'in doğa yasaları için yeni bir sahne kurmalarıyla başlandı. Heisenberg, Planck ve Bohr'un ayrık durumları için zamanla nasıl değişeceklerine dair denklemler yazdı. Schrodinger, De Broglie'nin fikirlerini bir adım ileri götürdü. Elektronların dalga olarak tanımlanabileceğini varsaydı ve dalgaların zamanla nasıl değişeceklerini anlamak için Maxwell'in denklemlerine benzer bir denklem yazdı. İki denklem de ek bir varsayım eklemeden veya özelleşmeye gerek duymadan Bohr'un hidrojen atomu için elde ettiği sonuçları vermişti. İkisi de helyum gibi daha karmaşık atomlara da uygundu. Fizikçilerin halihazırda alışkın olduğu formda olduğundan, ilk olarak Schrodinger'in ortamı daha büyük etki yarattı ve kuantum mekaniğinin kritik denklemi Schrodinger denklemi olarak bilinir oldu. Fakat bütün resme bakıldığında Heisenberg, Bohr ve diğer iki teorisyen Paul Dirac ile Max Born biraz tuhaf ve bazı açılardan sıkıntılı olsa da bütün bir tasvir ortaya koyarken Schrodinger ve De Broglie çok geride kalmıştı.

İngiliz fizikçi Paul Dirac kariyerinin büyük bir kısmını Cambridge Üniversitesi'nde geçirdi ve hayatının son döneminde Florida State Üniversitesi'nde görev aldı. "En Tuhaf Adam" olarak bilinirdi. Sosyal olarak oldukça garip bir kişilikti, fakat kuantum fiziğinin gelişiminde önemli bir rol oynadı. Heisenberg ve Schrodinger'in kuantum formülleştirmelerinin aslında aynı olduğunu anlayan ve ikisini tek bir noktada buluşturup kuantum mekaniğinin geniş bir uygulamasını ortaya koyan isim Dirac'tı: Periyodik tabloyu moleküllerin fizik ve kimyası kadar atomların özellikleri açısından da tamamen anlamak. Maddenin diğer halleri –katı, sıvı, gaz– anlaşılabi-

lirdi ve artık kuantum mekaniği çok daha küçük ölçekli fenomenleri anlamak için bir ortam sağlıyordu.

Fakat Heisenberg ve Schrodinger'in kuantum mekaniğinin Newton biliminin yerine nasıl geçtiğini anlayan kişi Max Born'du. Almanya'da, Göttingen'de profesörlük yapan Born, yeni mekaniği kullanarak Rutherford'un deneyindeki gibi süreçleri anlamaya çalışıyordu. Eğer Newton'un yasaları elektron ve proton gibi parçacıkları açıklıyorsa tüm parçacıkların konumu ve hızı bilinerek gelecekte herhangi bir vakitteki konumu tahmin edilebilirdi. Born kuantum mekaniğinde Schrodinger ve Heisenberg'in denklemlerinin ölçüm sonuçlarının *ihtimaller*ini tahmin ettiklerini fark etti. Schrodinger'in dalga fonksiyonu parçacıkların uzayda belirli bir noktada bulunma ihtimallerinin *kare*leriyle ilişkiliydi. Diğer sayılar belirli bir zamandaki radyoaktif bozunum ihtimalini ve deneyin diğer sonuçlarının ihtimallerini veriyordu. Kesin sonuç tahmin etmeye yönelik kavramlar büyük çoğunlukla ihtimal tahminleriyle yer değiştirmişti.

Born bundan dolayı Curie, Rutherford ve diğerlerinin radyoaktif bozunma çalışmalarından yaptığı çıkarımla gelecekle ilgili yapabileceğimiz tahminlerin sınırlarını çizdi. Werner Heisenberg, *belirsizlik prensibi* ile bilebileceklerimizin sınırını kesin çizgilerle belirledi. Elektronun hareketiyle ilgili hayali ölçüm değerleri düşündü ve elektronun konumunun belirlenebildiği durumlarda hızın belirlenemediğini, hızın iyi ölçüldüğü durumlarda ise konumun tam belirlenemediğini fark etti. Kuantum mekaniği yasalarından kaynaklanan temel bir sınırlamaydı. Kullanılan enstrümanların geliştirilmesiyle çözülebilecek bir sorun değildi. İlke sadece elektronlara değil, tüm parçacıklara ve sadece konum ve hıza değil, sistemde ölçülmesi istenen her şeye uygulanıyordu.

Kuantum mekaniğinin Newton'a yaptığı, Einstein'ın yaptığından bir noktada çok farklı sayılmazdı. Soruları sorma ve cevaplama şeklimizi değiştirdiler ama günlük deneyimlerimiz için pek bir şey fark etmedi. Kuantum mekaniği de Newton'un nihai amacına engel olmadı. Newton fiziği halen fiziksel sistemleri ve davranışlarını açıklayabiliyordu. Kuantum mekaniği ise olağanüstü derecede net ve keskin tahminler yapıyordu. Fakat sorulan soruların mantığını değiştirdi. Newton'un denklemlerini kullanarak bir parçacığın farklı zamanlardaki konumunu anlamaktansa, geçmişteki dalga fonksiyonunun bilinmesi durumunda, Schrodinger'in denklemi kullanılarak gelecekteki farklı olayların ihtimali bilinebilir. Bu şekilde Planck ve Bohr'un önerdiği ayrık enerjiler bulunabilir. Ayrıca daha fazlası yapılabilir. Bohr aynı zamanda atomların ışık kuantasını, fotonu nasıl emdiğine veya yaydığına dair kurallar önerdi. Schrodinger'in teorisiyle daha fazlası tahmin edilebilirdi: Örneğin bir atomun geçen ışık kuantasını emmesinin ve başka birinin yaymasının ihtimali. İleride de göreceğimiz üzere bu tahminler inanılmaz, hatta saçma derecede başarılı oldu. Kuantum mekanikçileri ayrıca hidrojenden daha fazla elektrona sahip, daha karmaşık atomları çalışıp hidrojenin yapısından daha iyi tahminler yapabiliyor. Kopenhag Üniversitesi'ndeki Niels Bohr Enstitüsü (bira şirketinin hayırsever bir kolu olan Carlsberg Vakfı tarafından fonlanan) bu görüşlerin merkezi olmuştu. Bu dönemde kuantum mekaniğiyle ilgili ifade edilen görüşler *Kopenhag yorumu* olarak biliniyor.

Kuantum mekaniği doğa hakkında atomlar ve daha küçük şeyler için günlük deneyimlerimizden hareketle edindiğimiz sezgilerin yanlış olduğunu göstermeye devam ediyor. İnsanlığın bunları anlamış olması beni büyülüyor. Düşen bir cismin veya fırlatılan bir çubuk ya da mızrağın yolunu an-

lamanın evrimsel zorunluluğu anlaşılabilir. Fakat hayatta kalma içgüdümüzün yakın bir zamana dek atomların nasıl çalıştığını anlamamızla bir alakası yoktu. Bohr, Heisenberg ve Born atomik boyuttaki olayların insan anlayışının ötesinde olduğunun düşünüldüğü umutsuz zamanlarda bu resmi bir araya getirmeyi başardı. Fakat kuantum mekaniğinin periyodik tablonun birçok özelliğiyle birlikte atomları ve ışığın yayılması ve emilimini açıklamaktaki başarısı doğal fenomenler üzerine yeni bir bakış açısı getirdi. Artık daha önceden hayal edilemeyen sorular cevaplanabilir.

Newton'un dünya görüşünün yıkılmasıyla birlikte Einstein'ınki de yıkıldı. Einstein foton kavramı ve Planck'ın radyasyon yasasını genelleştirdiği diğer çalışmasıyla kuantum teorisine zemin hazırladı. Ayrıca yine Einstein genç Hint teorisyen Satyendra Nath Bose ile birlikte birçok atom sisteminin kuantum mekaniğinin çalışılmasına öncü oldu. Çok sonra lazer geliştirilmesi için önemli olacak olan atomların radyasyon emilimi ve yaymasının anlaşılmasını kolaylaştıracak çalışmalar yaptı. Fakat 1920'lerde kuantum mekaniğinin gelişmesiyle Einstein gitgide daha tedirgin olmaya başladı. Bohr ile olasılık yorumlarını yıkmaya çalıştığı uzun tartışmalara girdi. Sonunda başaramadı.

Einstein'ın özel göreliliği ve kuantum mekaniğinin birleştirilmesi daha radikal adımlar gerektiriyordu. Schrodinger ve Heisenberg'in denklemleri atomlarla ilgili birçok fenomeni başarılı şekilde açıklarken Einstein'ın ilkelerine Newton'unkilere olduğu gibi uymuyordu. Bu durum erken fark edildi, fakat özel görelilikle uyumlu denklemler bulmak için yapılan ilk denemelerde ciddi zorluklarla karşılaşıldı.

Kritik adımı atan isim Dirac oldu. Göreli elektronun hareketini tanımlayacak denklem hakkında bir tahminde bulundu. Denklem elektronun başlangıçtan beri bilinen tüm özel-

likleri (özellikle spin denilen özelliği) ve atomik yapının en ince detayları üzerine inşa edilmişti. Fakat yine de denklem ve çıkarım önemli sorunlarla karşılaştı. Elektron kararsız görünüyordu. Attığı birkaç yanlış adımın ardından Dirac'ın dikkat çekici bir sezgisi olmuştu: Denklemin antimaddenin varlığını tahmin ettiğini fark etmişti, bu durumda elektrona benzer, fakat karşıt elektrik yüke sahip bir parçacık olmalıydı. Dirac denklemi tekrar düşünerek problemleri eledi. İlki buydu. Newton'un dünyasında, hatta Schrodinger'in göreli olmayan evreninde bile, belirli tipte bir parçacığın olması gerektiği öngörülüyordu. Şimdi ise teori doğası gereği elektronun oldukça net özelliklere sahip başka bir parçacık ile birlikte olması gerektiğini söylüyordu. Parçacık pozitif yüke sahip olmasından ötürü pozitron olarak adlandırıldı. Dirac'ın teorisi bir elektron ve pozitronun bir araya gelmeleri durumunda birbirlerini imha edip farklı enerji türlerini (bu durumda yüksek enerjili fotonlar) üretebileceklerini öngördü.

Dirac öngörüsünü Mayıs 1931'de yapmıştı. Pozitron ise birkaç ay sonra Carl D. Anderson tarafından keşfedildi. Anderson parlak bir deneyciydi, teoriler ve teorisyenler konusunda kuşkucuydu. Keşfini doktorasını aldıktan hemen sonra, uzaydan dünyaya düzenli olarak gelen enerji yüklü radyasyonu (parçacıkları), kozmik ışınları çalışmak için yapılan bir enstrümanla gerçekleştirmişti. Anderson, Dirac'ın teorisine ve keşfine önem vermiyordu, Dirac'ın birkaç ay önce yayımlanan makalesi net bir şekilde canını sıkmıştı: "Evet, Dirac'ın teorisini biliyorum... Fakat Dirac'ın çalışmasının ayrıntılarına hâkim değilim. Makalelerini okumaktansa enstrümanı çalıştırmakla meşguldüm... Ezoterik karakteri günümüzün bilimsel düşüncesiyle uyuşmuyor... Pozitron tamamen kaza eseri keşfedildi."

Dirac'ın denklemi başka bir açıdan daha çarpıcıydı. Elektronlar farklı deneylerden, küçük mıknatıslar gibi davranmaları sayesinde biliniyordu. Manyetik özelliği spin özelliğiyle alakalıydı. Belli bir yöndeki spin değerleri mıknatısın yönlülüğünü belirler (çubuk mıknatısların bir yönden diğerine yönelebilmesi gibi). Pozisyon ve momentum kavramları kuantum mekaniğine kadar geliştirilmiş olsa da spinin klasik fizikte bir karşılığı yoktu. Tamamen buraya hastı. Fakat spin Dirac'ın teorisinden kaynaklanıyordu. Daha da vurucu olan ise teorisinde elektronun manyetizması ile spin kavramları arasında bulunan bağlantının doğru olmasıydı.

Elektromanyetik Alanın Kuantumlaması

Dirac'ın denklemi ve antimaddenin keşfiyle kuantum mekaniği ve özel göreliliği birleştirme yolundaki problemlerin bir kısmı çözülmüş oldu. Yüklü parçacıkların elektrodinamiğinin anlaşıldığı düşünülebilirdi. Peki ya görünür ışığı, mikrodalgaları, X-ışınlarını, gamma ışınlarını ve elektromanyetik spektrumun diğer ışınlarını oluşturan elektromanyetik dalgalar, alanlar ne olacaktı? Planck'ın ve Bohr'un enerji seviyeleri Schröinger'in denklemiyle açıklandığı gibi, Einstein'ın ışığı oluşturan parçacıkları fotonlar da benzer denklemlerle açıklanabilirdi. Sonuçlar Maxwell'in denklemlerinde olduğu gibi çıkıyordu, fakat kuantum mekaniğinin kurallarına göre yorumlanmalıydı. Alanların kendileri *kuantumlanmıştı.*

Schrödinger ve Heisenberg'in çalışmaları elektronu J.J. Thomson'ın deneylerinde gösterildiği gibi parçacık olarak ve De Broglie'nin varsaydığı gibi dalga olarak sistemleştirmişti. Fakat fotonlar daha ciddi sorunlarla karşı karşıya kaldı. Kuantum mekaniğini ilk çalışan kişiler fotonları uzayda hareket etmeleri ve maddeden izole olmalarıyla anlıyordu. Atomları bir arada tutan kuvveti *foton değişimleri*yle açıklıyorlardı. Fa-

kat fotonların atomlar tarafından emilim ve yayılım oranlarını ancak kabaca hesaplayabiliyorlardı. Öte yandan bu süreçleri çalışan deneysel ölçümler gittikçe daha hassas olmaya başlamıştı. Teorisyenler içinse kesin hesaplamaların önündeki engeller aşılmaz gibi görünüyordu. Kuantum mekaniği kuralları sabit bir şekilde alındığında anlamsız cevaplar veriyordu. Sorun atomun bir enerji durumundan diğerine geçiş oranı gibi büyüklüklerin hesaplanmaya çalışıldığı durumlarda çıkıyordu. Çok daha hassas hesaplamalar geldikçe ilk tahmini yapmanın doğal bir yolu var gibi göründü. Bu şekilde ilerlemeye kalkındığında ise bir noktada hassas hesaplama yapılması için yazılması gerektiği düşünülen ifadeler anlamsız görünmeye başladı.

Zorlukların sebebi belirsizlik prensibiydi. Elektronun kütlesini bilen biri elektronun kısa süreliğine bir elektron ve fotona dönüşme ihtimalini hesaplayabilir. Bu durum enerjinin korunumunu ihlal eder fakat Heisenberg'in ilkesi buna izin veriyor. Sıkıntı, elektron ve fotonun herhangi bir enerjiye, rastgele büyük bir enerjiye bile sahip olabilmesinden kaynaklanıyor. Tüm bu "sanal konumlar" elektronun kütlesine eklenir ve sonsuz derecede ekleme yapmak da sonsuz sayıda sonuç çıkmasına sebep olur. Aynı durum bu teorilerdeki atomun ayrıntılı özelliklerini, ışığın emilim ve yayılım oranını hesaplamak isteyen biri için de geçerlidir.

Neredeyse yirmi yıl boyunca yapılan denemelerde sorun çözülemedi. Fakat İkinci Dünya Savaşı'ndan birkaç sene sonra birçok başarı elde edilmeye başlandı. Birleşik Devletler'deki öncü oyuncular Cornell'deki Alman Yahudi'si göçmen Hans Bethe ve iki genç teorisyen, Harvard'dan Julian Schwinger ve Richard Feynman'dı. Üçü de savaşa yönelik araştırmalarda yer almıştı. Schwinger savaş yıllarını MIT'de radar teknolojileri üzerine çalışarak geçirdi. Bethe ve Feyn-

man Los Alamos'taki atom bombası projesinde çalıştı. Hepsi de savaş çalışmaları sırasında elektrik ve manyetizmanın klasik teorisine dair birçok şey öğrendi. Dördüncü önemli oyuncu savaş döneminde bu sorular üzerinde önemli ilerlemeler yapan Japan teorisyen Sin-Itiro Tomonaga'ydı. Tabii ki yaptığı çalışmalar savaşın sonuna dek ABD'de bilinmiyordu.

Savaş sonrası dönemde yapılan hassas deneyler önemli bir rol oynadı. Başlangıçta yapılan kaba hesaplamalar yeni deneylerin sonuçlarını açıklamak için yeterli olmadı. Bu deneyler arasında atomların enerji konumlarını ve elektronun manyetik özelliklerini daha kesin ölçümlerle belirleyenler vardı. Hemen arkasından teorik çalışmalar geldi. Çarpıcı başarılar elde eden isim Hans Bethe'ydi. 1930'larda modern astronominin en önemli alanlarından biri olan yıldızların nükleer reaksiyonları nasıl gerçekleştirdiği konusunda öncü çalışmalar yapmıştı. Kuantum mekaniği ve nükleer fizik bilgimize çok sayıda katkıda bulundu. 1947'de Columbia Üniversitesi'ndeki Willis Lamb'in hidrojen atomları tarafından salınan fotonların enerjisini büyük bir hassasiyetle ölçtüğü deneylerinden haberdar oldu. New York'taki Shelter Island'da yapılan bir konferansta Dirac'ın elektron teorisiyle uyuşmayan bu sonuçlar tartışmanın ana konusu oldu. Dirac'ın teorisinde elektromanyetik alana klasik bir cisim gibi bakılıyordu, alanın –fotonların– kuantum özelliği dikkate alınmıyordu. Konferansta muhtemel çözüm yolları tartışıldı. Bethe, Cornell'e trenle döndüğü sırada Lamb'in ölçümleriyle Dirac'ın sonuçları arasındaki farklılığı çözmek adına kaba hesaplamalar yaptı. Fakat mantıklı bir sonuç elde etti, Bethe kuantum mekaniğinin kurallarından anladıklarını bir kenara koymak zorunda kalmıştı ve Bethe'nin tahmininin nasıl geliştirilip daha iyi sonuçlar elde edileceği net değildi.

Sorunun çözülmesi için kritik adım Bethe ve diğerlerinin elektromanyetizma kuantum teorisini formülleştirmelerindeki sıkıntıdan kaynaklanıyordu. Hesaplamaları uzayın aksine sadece zamanı içeriyordu. Halbuki Einstein'ın özel göreliliğinde zaman ve uzay benzer noktalardaydı. Problemi belirlemek nispeten kolaydı, fakat çözümünü yapmak deha olmayı gerektiriyordu. Schwinger, Feynman ve Tomonaga devrim yaptılar. Her aşamasında Einstein'ın ilkesiyle uyumlu bir metot kurmak hem etkili hesaplamalar yapmayı hem de teorinin eksik taraflarını işaret eden bir yapı kurmayı sağladı. Tomonaga Japonya'da savaş süresince dünyadan izoleydi, etkisini hemen gösterebilen çalışmalar Feynman ve Schwinger'inkiler olmuştu. İkili hayatlarında ve işlerinde çok farklı iki tarza sahipti. Schwinger havalı sayılabilecek bir tipti. "İşçi sınıfının Harvard'ı" olarak bilinen New York'taki City College'a girdiği zamanlarda Cadillac arabaların ve özel dikim takım elbiselerin hayalini kurardı. Feynman daha gösterişsiz bir karaktere sahipti, fakat Los Alamos'ta olduğu yıllarda (Bethe ile birlikte) neredeyse sihir denebilecek matematik gösterileri yapan ve laboratuvar güvenlik kurallarına uymayan bir şovmendi. Sonraki yıllarda ünlü kulüplerde bongo çalmasıyla bilinir olmuştu. Bu karşıtlığın aksine fizik anlayışları benziyordu. Schwinger'in matematiği karmaşıktı ve fizikçiler için takip edebilmek zordu. Feynman'ın yine daha gösterişsiz fakat daha sezgisel olan fiziği keyfî konan fakat katı kurallara sahip tasvirlerden oluşuyordu. Atom bombası projesinin başındaki isim olmasıyla bilinen J. Robert Oppenheimer o zamanlar Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün yöneticisiydi ve bu rolüyle teorik fizikte söz sahibi isimlerden biriydi. Çok daha matematiksel bir yaklaşıma sahip olan Schwinger'i benimsemiş, Feynman'a kayıtsız kalmıştı. Sonraki yıllarda Feynman'ı kendine daha güvenli, gösterişli ve yenilikçi olarak

görsek de Oppenheimer'ın eleştirilerini yıkıcı bulmuş, zor zamanlar geçirmişti.*

Sonunda zaferi Feynman'ın görüşü kazandı. Galibiyetini çoğunlukla, savaştan sonra Birleşik Devletler'e gelmek zorunda kalan Britanyalı teorik fizikçi Freeman Dyson'a borçluydu. Feynman ile yakın bir arkadaşlık kurmuştu. İkili arabayla tüm ülkeyi gezmişlerdi. Dyson, Schwinger'in bakış açısını takdir ediyordu ve Feynman ile ikisinin yaklaşımını birleştirmeyi başardı. Böylece Oppenheimer'ı ikisinin de değerli olduğuna ikna etmişti. Dyson'ın yaklaşımı teorisyenlerin ve deneycilerin bugüne kadar elektromanyetik alanın kuantum özelliği anlayışını derinden etkiledi.

Bu tekniklerle kuantum alan teorisindeki sonsuzluk problemi çözülmüş ve hassas hesaplamalar yapılmıştı. Bugün elektronların manyetik özellikleri –"manyetik moment" doğada en hassas ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerden biri– sıfırdan sonra on dört basamağa dek biliniyor. Fotonun kuantum mekaniğinin ihmal edildiği Dirac'ın teorisinde büyüklük 2 olarak belirlenmişti. Bugün ölçülen değer ise 2,00231930436182. Feynman, Schwinger ve Tomonaga 1965'te Nobel Ödülü'nü kazandı, Lamb de deneylerinden dolayı 1955'te ödüle layık görüldü.

Kuantum Mekaniği ile İlgili Sıkıntı Ne?

Bohr, Heisenberg, Dirac ve Born kuantum mekaniği kuralları-na uyarken başlangıçta önemli rol oynayan bazı isimler Newtoncu hareketin nedenselliğinin ölümünü sindirememişlerdi. Bu isimler arasında olan De Broglie ve Schrödinger, elektron

* Feynman'ın yıllar boyunca birçok takipçisi oldu ve kitaplara ve makalelere konu oldu. Hem ders kitapları hem de popüler bilim kitapları büyük bir okuyucu kitlesine ulaştı. Fakat son yıllarda cinsiyetçi –hatta muhtemelen mizojinist– davranışları tartışma konusu oldu.

ve benzeri dalgaları maddenin hareketini açıkladıkları gibi düşünmek istemişlerdi. Eksikliklerini anlamak basitti ve itirazlarını Bohr, Heisenberg ve diğerlerinin yaptığı gibi reddetmek kolaydı. Fakat sonrasında, 1935'te, Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen kuantum mekaniğini sarsacak bir formül kurdu. Makale ve makalenin öne sürdüğü bilmece EPR paradoksu olarak ün –ve karmaşa– saldı. "Fiziksel gerçekliğin bütün tanımı" dedikleri bir kavramı tanımlamakla başladılar ve kuantum mekaniğinin maddelerden birini sağlamadığını söylediler. İtirazları belirsizlik prensibi ve kuantum mekaniği sistemlerinin tamamen bilinememesi üzerine kurmuşlardı.

EPR'nin öne sürdüğü problem gerçek bir sistemde çalışılabilir. Bir elektron negatif yükünden dolayı pozitif yüklü bir protona bağlanıp atom oluşturabilir ya da atom oluşturmak için antimaddesi olan pozitrona bağlanabilir. Aslında bu sistem bir laboratuvarda yaratıldı ve çalışıldı. Önemli bir özelliği dışında hidrojene oldukça benziyor: Ortalama bir atom boyu (ya da bir inçin 100 milyonda biri) mesafeyle birbirinden ayrılan elektron ve pozitron elbet birbirini bulur ve yok olurlar. Böyle bir şey olduğunda iki veya üç foton üretirler. Konum enerjilerinin ve yok olma için gereken sürenin ölçümleri son derece hassas şekilde gerçekleştirildi. Feynman, Schwinger ve Tomonaga'nın metotları kullanılarak yapılan kuantum hesaplamaları da ölçülen değerlerle başarılı şekilde uyuştu. Örneğin, teori bir elektronun pozitronu bulup yok olmasının 7,03996 mikrosaniye (milyonda bir saniye) aldığını virgülden sonraki son değer hassaslığıyla hesapladı. Deneysel ölçümlerle mükemmel bir uyum sağladı.

Kuantum mekaniğinin başarısı göz önüne alındığında hatalı olduğunu görmek çok şaşırtıcı olurdu. Fakat kuantum mekaniğinin, pozitronyum iki fotona dönüştüğünde ne olduğuna dair öngörüsüne baktığımızda EPR'nin itirazını anlayabiliriz.

Elektronların aşağı veya yukarı doğru spin özelliği olduğundan, oluşan fotonun da aşağı veya yukarı spin özelliği olması gerekir. Fotonda ise spin hareket ettiği yöne diktir. Spin, ışığın polarizasyon dediğimiz özelliğiyle alakalıdır. Kuantum teorisine göre bir fotonun spinini yukarı doğru ölçersek diğer fotonunki aşağı doğru olmalıdır. İlk fotonun spini aşağı yönlüyse diğeri yukarı yönlü olmak zorundadır. Sorun da birisi ölçümü başarana dek sonucun bilinmemesi, sadece fotonların yönünün olasılığının verilebilmesiydi. Başka bir deyişle, birbirlerine bir ışık yılı uzaklıkta, ters yönlere giden iki fotonu ve iki gözlemcinin kendilerine yaklaşan fotonun spinini ölçtüğünü düşünelim. Foton kendilerine varana dek ne ölçtüklerini bilmeyeceklerdir. Foton yanlarından geçip ölçümü *gerçekten* yapabildiklerinde iki ışık yılı uzaklıkta olsa bile diğer gözlemcinin ne ölçtüğünü direkt anlayabilirler. Bu durum Einstein'ı rahatsız etmişti. Fakat sonrasında bugüne dek yapılan deneyler kuantum mekaniğinin bu özelliğinin gerçek olduğunu gösterdi.

EPR bilmecesi uzun yıllar boyunca inatçı kuşkucuların garip bir ilgisi olarak görünse de son yıllarda yeniden gündeme geldi. Pozitronyumdan iki fotonun oluştuğu bozunma *dolanıklık* durumu olarak biliniyor. Sistemin bilgisi burada oldukça ince bir şekilde saklanır. Aslında bu şekilde veri depolanması çok yüksek miktarda veri depolama ve geleneksel bilgisayarlardan çok daha ayrıntılı hesaplama yapabilme kapasitesine sahip aşırı güçlü bilgisayarların yapılabilmesine imkân sağlayabilir. Böyle güçlü "kuantum bilgisayarlar"ı yapabilmenin birçok zorluğu bulunuyor. Muhtemelen en büyük zorluk bu sistemlerin ortamından izole halde olmasının gerekmesidir, aksi halde dışarı bilgi sızdırabilir.

Schrödinger'in kedisinden bahsetmezsek olmaz. Schrödinger tarafından ortaya atılan bu paradoks kuantum mekaniği üzerine kafa yoran herkesin durup düşünmesine sebep

oldu. Schrödinger bir kedinin bir şişe zehirli gazla bir kutunun içinde olduğu bir durum hayal etti. Şimdi elimizde tekrar bir pozitronyumun bozunmasıyla oluşmuş iki adet foton bulunuyor. İkinci foton, şişeye bağlı bir spin detektöründen geçiyor. Eğer ikinci fotonun spini yukarı yönlüyse gazın salınmasına ve kedinin ölmesine yol açacak. Eğer spini aşağı yönlüyse gaz şişenin içinde kalacak ve kedi yaşamaya devam edecek. İlk fotonun spin ölçümü ½ ihtimalle aşağı yönlü, ½ ihtimalle yukarı yönlü olduğunu veriyor. Ölçüm kesin bir sonuca sahip değil. Kedi aynı anda hem hayatta hem de ölü. Hayvan severler için kötü olacak ama yapılacak ölçüm kediyi öldürebilir ya da hayatta tutabilir ve sonuç ölçümün yapıldığı anda gerçekleşecek.

Schrödinger'in anlamadığı şey kuantum hesaplama problemindeki farklılıktı. Bu problemde iki fotondan çok daha fazlası var. Kedi ve gaz şişesi de spin ve diğer özellikleriyle devasa sayıda atomdan oluşuyor, tüm foton ve atomlar da dolanık durumda. Tüm bunlar EPR ve Schrödinger'in kedisinin kuantum mekaniğine karşıt olmadığı anlamına geliyor. Fakat siz yine de kuantum mekaniğinin eksik özelliklerini bulmakla sorumlusunuz.

Kuantum Mekaniğinin Zaferi

Kuantum mekaniğinin *kuantum elektrodinamiği* denen teoriyle atom ve fotonları anlamadaki başarısı; insanlığın doğayı atomik seviyede, Newton'un, hatta Maxwell'in zamanında bilinenden onlarca kat daha küçük uzunluk ve zaman ölçeklerinde anlamasını sağladı. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki gelişmelerle birlikte yirminci yüzyılın ikinci yarısı ve yirmi birinci yüzyılın başında 10^8 kat küçük uzunlukların tanımlaması yapılmaya başlandı. Güçlü ve zayıf nükleer kuvvetlerin altında yatan yasalar, evrende hidrojenden daha ağır

elementlerin oluşmasını sağlayan kozmik simyacı, kuantum elektrodinamiğini yönlendiren kuantum mekaniği ve özel görelilik ilkeleri *Standart Model* adı verilen teoriyle bir araya getirilebilir. Teori, teorik ve deneysel fiziğin mükemmel evliliğini temsil ediyor.

BÖLÜM 5
NÜKLEER ÇAĞIN MEYVELERİ

Enerji üzerine olan sorularımız –ne kadar ihtiyacımız olduğu, nereden elde edeceğimiz, iklimimize etkisi– hayatlarımızı, siyasetimizi ve dünya meselelerini meşgul ediyor. Enerjiyi kilowatt saat, BTU (*British Termal Unit*: İngiliz termal birimi) ya da eşit miktardaki petrol varilleriyle ölçüyoruz. Güç, açığa çıkan enerjinin ölçüsüdür, watt ve beygir gücü ile ölçülür. İlk buhar makinelerinin mucidi James Watt *beygir gücü* tabirini motorlarının reklamını yapmak için ortaya atan kişiydi. E bir nesnenin enerjisi, m kütlesi ve c ışık hızı olarak alındığında $E=mc^2$ muhtemelen en ünlü denklem olarak ortaya çıkıyor. Işık hızı devasa bir sayıdır (saniyede 300.000 kilometre). Sonuç olarak çok küçük miktardaki bir madde bile devasa enerjiye sahip olabilir. Bir çay kaşığı su bir şehre birkaç gün yetecek enerjiye sahiptir. Ama bu enerjiyi elde edebilmek başka bir mesele.

Bir atom bombası yaklaşık 15 kilogram uranyum içerir; bu uranyumun binde biri bile enerjiye dönüştürüldüğündeyse sonuç korkunç derecede yıkıcı olur. Bir nükleer reaktörde, büyük bir şehrin kullanması için bir yılda yaklaşık bir kilogram

madde kullanılır. Bunları atom çekirdeğindeki parçacıklar arasında bulunan güçlü etkileşimlere borçluyuz. 10'un üsleriyle yaptığımız yolculukta sıfır noktasına atomu koyup atom çekirdeğine inmek 10^5 büyütme gerektiriyor, parçacıklar santimetrenin trilyonda biri, 10^{-13} cm boyunda. Bu küçük boyutlarda saklı olan yüksek miktardaki enerji atom bombalarının ve nükleer reaktörlerin inşasına imkân sağlıyor.

Enerji bugün tamamen anlaşılmış olsa da yüzyılın büyük bir kısmında gizemini sürdürdü. Bu durumun arkasındaki, tıpkı kuantum elektrodinamiği (QED: *quantum electrodynamics*) gibi Standart Model'in üç ayağından ikincisini oluşturan teori, kuantum kronodinamiği (QCD: *quantum chronodynamics*) olarak biliniyor. QCD sayesinde atomdan 10^5 kat küçük olan parçacıkların ve aralarındaki etkileşimin, evrenin büyük patlamadan milyonda bir saniye sonraki tarihinin doğasını anlayabiliyoruz.

Nükleer Fizik

Nükleer fizik çoğumuzu tedirgin eden bir kavram. Nükleer silah ve nükleer enerjinin çok tartışılan iyi yönlerini ve tartışmaya açık olmayan tehlikelerini anımsatıyor. Fakat yirminci yüzyıl fiziğini derinden etkileyen atom çekirdeği bilimi büyüleyici bir alan. Bir önceki bölümde çalışmalarında nükleer radyasyonu bir araç olarak kullanan ve kuantum mekaniğine büyük katkılarda bulunan Marie Curie ve Ernest Rutherford'la karşılaşmıştık. İkili, nükleer fiziğin gelişiminde de kritik bir role sahip.

Rutherford'un çekirdek keşfi atomu anlama konusunda büyük bir adım atlattı. Fakat başka bir bilmece doğurdu. Eğer atom çekirdeği proton ve nötronlardan oluşuyorsa tüm protonlar pozitif yüke sahip olduğu için birbirini itmeliydi. Parçacıkları bu kadar küçük bir alanda bir arada tutan şey ne olabilirdi?

Başka bir güç, elektromanyetik güçten çok daha kuvvetli bir güç olmalıydı. Hayal gücü eksikliğinden olsa gerek, bu kuvvet güçlü nükleer kuvvet ya da kısaca *güçlü kuvvet* olarak adlandırıldı. Kısa sürede bu nükleer gücün anlaşılması fizikteki büyük problemlerden biri haline geldi. Takip eden yıllarda birçok özelliği açığa çıktı. En önemlisi, bu kuvvet ancak kısa mesafelerde etkili oluyordu. Başka bir deyişle, protonlar ancak birbirinin üzerinde olacak kadar yakın olduklarında çekiliyordu. Protonların boyutundan biraz daha büyük bir mesafe olduğunda sadece elektriksel itmeyi hisseder hale geliyorlardı. Fakat söz konusu kuvvetin yasasının oluşması –elektrik, manyetizma ya da kütleçekim yasalarında olduğu gibi– oldukça zor oldu.

Bu yöndeki ilerleme 1934'te Japon teorisyen Hideki Yukawa'nın çalışmasıyla geldi. Yukawa kuantum mekaniğine ve özellikle belirsizlik ilkesine nükleer kuvveti sorgulamak adına yeni fikirler getirdi. Belirsizlik ilkesi bir sürecin enerjisinin ve ne kadar sürede meydana geldiğinin aynı anda kesin bir şekilde ölçülemeyeceğini öngörüyordu. Elektrik ve manyetizma etkileşimlerinde kuvveti taşıyan parçacık fotondu. Fotonun kütlesi yoktur, yani enerjisi (Einstein'ın $E=mc^2$ denklemi doğrultusunda) herhangi derecede küçük olabilir. Aynı zamanda fotonun ilerleme süresi, örneğin protondan elektrona gitme süresi, herhangi bir değer alabilir. Işık çok hızlı hareket ettiği için bu durum elektrik ve manyetizma kuvvetlerinin (benzer şekilde kütleçekim kuvvetinin) çok büyük mesafelere etki edebilme ihtimalini ortaya koyuyor. Yukawa nükleer kuvvetin ancak kısa mesafede etki edebilmesinin ise ağır bir kuvvet taşıyıcıya sahip olmasından kaynaklanabileceği sonucuna vardı. Heisenberg'in belirsizlik ilkesindeki sayıları kullanarak protonun sekizde biri kütleye sahip bir parçacığın varlığını öngördü. Zamanındaki verilerle yapılan bu tahmin çok kesin değildi ama atom çekirdeği ile güçlü bir

şekilde etkileşen ve protondan oldukça küçük olan bir parçacığın varlığı dayanaklı bir tahmindi.

İkinci Dünya Savaşı'ndan önceki yıllarda Yukawa'nın parçacığı olabilecek bir parçacık, yine bir önceki bölümde gördüğümüz Carl Anderson tarafından kozmik ışınlarda keşfedilmişti. Kabaca beklenen ağırlıktaydı fakat çekirdekle beklendiği şekilde etkileşmiyordu. Nükleer fizik ve parçacık fiziği çalışmaları savaşla birlikte sekteye uğradı, keşfedilen parçacığın Yukawa'nın mezonu olmadığı ancak yıllar sonra fark edildi. "Müon" adı verilen parçacık elektrona benziyordu fakat 200 kat daha ağırdı. Savaştan sonra Yukawa'nın mezonu hem kozmik ışınlarda hem de hızlandırıcılarda tespit edildi. Aslında Π^+ ve Π^- olarak ifade edilen biri pozitif, biri negatif yüklü parçacık ve Π^0 şeklinde gösterilen elektriksel olarak nötr olan üç parçacık bulunuyor. Neredeyse aynı kütledeler; yani bir zafer elde edilmiş olsa da yeni gizemler de açığa çıktı. Pion olarak bilinen bu parçacıkların kütleleri Yukawa'nın önerdiğine çok yakın, fakat hiçbir teorisyen müon gibi bir parçacığın keşfini tahmin etmemişti, etmiş olsalar bile kütlesinin piona bu kadar yakın olacağını öngöremezlerdi.

Doğa Rehberi Olarak Simetri

Matematikte ve birçok bilimde iki farklı *zor* kavramı bulunuyor. Bunlardan biri bizim bir ödev veya sınavdaki sorunun zorluğu veya bir kitapta anlamaya çalıştığımız konunun zorluğu anlamında kullanılıyor. Buradaki engeller uğraşmaya devam ederek, uzmanlardan yardım alarak ya da daha çok çalışarak aşılabilir. Diğer zor kavramını bugünün bilgisayar çağında aşmak daha da kolay. Bu problemler için çözüm stratejisi, hesaplamada kullanmak adına bazı dikkatsiz kurallar içerir. Tüm gereken çok miktarda toplama, çarpma ve benzeri işlemlerdir. Problem çözümünde aklın ve düşüncenin

dahil olduğu nokta kural koyma kısmıdır. Bir bilgisayar akıl almayan hesaplamalar yapmak için programlanabilir. Fakat problem karmaşıksa ve birçok işlem gerektiriyorsa bilgisayarın hesaplama süresi fazla uzun olabilir. Süre, hesaplamanın mümkün olmadığı veya sonuçların anlamsız olacağı kadar uzun olabilir. Mesela hava durumu buna örnektir. Eğer hesaplamanız çok yüksek kesinlik gerektiriyorsa modelinizin fırtınayı tahmin etmesi fırtınadan sonrasına kalabilir. Bu tarz problemler teknik ve matematiksel açıdan zor sayılıyor.

İleride bahsedeceğimiz sebeplerden ötürü, güçlü nükleer kuvvet etkileşimleri zor problemlerdir. Başlangıçta çözüm belli olsa da bilgisayar teknolojisinin gerekli seviyeye ulaşması on yıllar sürdüğü için çok güçlü bir bilgisayarın problemi çözeceği bir stratejinin geliştirilmesi zaman aldı. Konunun ortaya çıktığı ilk günden itibaren nükleer kuvveti anlamak adına daha çok endirekt stratejiler geliştirildi. Önemli adım güçlü etkileşimlerin *simetri*sini keşfetmek oldu.

Kimi zaman mimaride simetriyi çekici buluruz. Kimi zamansa simetriden yoksunluk veya hafif asimetriler hoşumuza gidebilir. Doğaya dair gözlemlerimiz; bir yüz, bir bitki ya da bir dağ ikinci duruma örnek verilebilir. Cisimlere baktığımızda aklımıza iki türlü simetri gelir. Biri dönme simetrisidir. Bir kavanozu merkezi etrafında döndürdüğünüzde neredeyse özdeş görünür. Diğer simetri ise sol ve sağ arasındadır. Bu simetriyi –mükemmel seviyede olmasa da– yakınımızda bulunan insanlarda görebiliriz. Bu tür simetriye yansıma simetrisi ya da *parite* denir. Bu simetriler –ve diğerleri– fiziksel yasaları anlamamızda önemli rol oynuyor.

Doğadaki simetriye duyulan estetik zevk antik zamanlara dayanıyor. Fakat Galileo ve Newton'la birlikte doğa yasalarının simetriye yol açtığı ve simetrilerin doğal dünyadaki fenomenleri etkilediği anlaşıldı.

Bazı simetriler o kadar bariz ki fark etmemek zor. Newton'un hareket ve kütleçekim yasaları herhangi bir zamanı temsil etmiyor. Bugün, dün veya 1.000 sene önceyle aynılar ve yarın farklı olması gerçekten çok şaşırtıcı olur. Bildiğimiz tüm yasalar, hatta kuantum mekaniği, Standart Model'deki elektrik ve manyetizma yasaları için de aynı durum geçerli. Fakat bu *enerjinin korunumu* özelliğinin bir sonucu. Günlük hayatımızı tamamen kontrol eden bir kural. Bize yaptığımız o tüm fiziksel işin sonrasında uzaya taşıyabileceğimiz kargo miktarının ancak yüksek gaz miktarına (ya da elektrikli bir araç için bataryanın kilowatt saat ölçüsünden şarj durumuna) bağlı olduğunu söylüyor. Bu ilkenin sonucunu görmek için çok bir şey bilmemize gerek yok. Çıktıyı anlamak, hatta hesaplayabilmek için arabamızın motorundaki tüm kimyasal reaksiyonları ya da yediğimiz yemeğin karmaşık sindirilme mekanizmasını bilmek zorunda değiliz.

Newton'un yasaları için bu durum on sekizinci yüzyılın sonunda anlaşılsa da simetri ve enerjinin korunumu yasalarının arasındaki ilişki tam olarak yirminci yüzyılın başında, matematikçi Emmy Noether tarafından anlaşıldı ve formülleştirildi. 1882'de Almanya'da doğan Noether olağanüstü bir matematikçiydi ve eğer erkek olsaydı profesör olabilirdi. Kadın bir matematikçi olması kariyerini sınırlasa da kendi çabası ve ortaklıklarıyla çok iyi işler çıkardı. Simetri üzerine olan çalışmaları için Einstein şöyle demişti: "Dün Bayan Noether'den değişmezler üzerine çok ilginç bir mektup aldım. Bu tarz şeyleri bu şekilde genelleyebilmesinden çok etkilendim. Göttingen'deki demode ekibin Bayan Noether'den ders alması lazım! İşinde tam bir usta."

Noether 1933'te Yahudilere yapılan zulümden kaçtı ve Birleşik Devletler'deki Bryn Mawr Koleji'nde görev aldı. İki sene sonra vefat etti. Einstein *The New York Times* gazetesine

onun için yazmıştı: "Bayan Noether bir kadının alabildiği en yüksek eğitimden fazlasını üretebildiği için yaşayan en iyi matematikçiler arasından en yaratıcı matematiksel zekâydı. Yüzyıllar boyu en yetenekli matematikçilerin meşgul olduğu cebir alanında bugünün genç nesil matematikçilerinin gelişimindeki büyük önemi ispatlanmış olan birkaç metodun kâşifiydi."

Noether, çalışmasında diğer ilkelerin enerjinin korunumuyla birlikte korunum yasalarını oluşturduğunu açıkladı. Başka bir deyişle, doğa yasaları ben kendi ofisimin veya yandaki ofisin kapısının önünde durduğumda aynı şekilde işleyecekti. Daha genel bir tabirle sola ya da sağa, öne veya geri ya da yukarı veya aşağı hareket etsem de aynı kalacaklardı. Bu simetrinin sonucu enerjinin korunumunu kontrol eden ilke, momentumun korunumuydu. Benzer şekilde doğa kuzeye ya da kuzey doğuya hareket etmenizi umursamaz. Bu rotasyon simetrisidir ve bildiğimiz tüm doğa yasalarının bir özelliğidir. Daha zor göze çarpan fakat aynı derinlikte bir ilke halinde, açısal momentumun korunumu şeklinde de görülebilir. Bu ilke Dünya'nın nasıl kendi çevresinde dönüp uzun jeolojik zaman süreçleri boyunca aynı kalabildiğini açıklar.

Elektriksel yükün korunumunu açıklayan ve daha kutsal olan bir simetri daha bulunuyor. Bu simetriyi fark etmek daha da zor. Görülebilen ya da hissedilebilen bir değişim değil. Fakat Maxwell'in denklemlerinin içinde olan ve kuantum mekaniği eklendiğinde de hayatta kalmaya devam eden bir özellik.

Simetrilerin keşfi parçacık fiziği alanının neredeyse başlangıcından beri ilgi konusu oldu. İlk hızlandırıcı deneylerinde enerjinin, momentumun ve açısal momentumun korunumuyla ilgili dikkatli gözlemler yapıldı. Tüm özelliklerin olağanüstü bir hassaslığa sahip olduğu gösterildi. Daha ilginç olanı ise

mükemmel bir simetri *olmamaları*; daha çok ayna yansıması, daha önceden bahsettiğimiz parite olmalarıydı. Paritenin ne olduğuna dair içten gelen kuvvetli bir sezgimiz var fakat bazen de sağ ile solu karıştırabiliyoruz. "Parite değişmezliği"nin doğa yasaları için ne anlama geldiğini ise daha net anlayabiliriz. Eğer izlediğimiz bir şeyin aynada bir yansıması varsa iki görüntü de bizim için anlamlı olur, doğa yasalarına göre de aynı durum geçerli olmalı. Newton'un yasalarının ve Einstein'ın genel göreliliğinin ifadesi olan parite, elektrik ve manyetizma yasalarının da bir özelliğiydi ve uzun bir süre iyi anlaşıldığı düşünülmüştü. Fakat 1950'lerde parçacık hızlandırıcılarıyla belirli elementlerin radyoaktif bozunmalarının çalışılması mümkün hale geldiğinde şaşırtıcı sonuçlar ortaya çıktı. Paritenin iyi bir simetri olduğu kabul edildiğinde bu bozunmalar anlaşılamıyordu. Bilim insanları her parçacığın bir eşleniği olduğunu öne sürerek durumu açıklamaya çalıştı. Fakat sonrasında İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde çalışacak olan Çinli iki genç fizikçi Tsung Dao (T.D.) Lee ve Chen-Ning (C.N.) Yang, paritenin doğanın iyi bir simetrisi olmayabileceği üzerine radikal bir fikir sundu. Atom çekirdeğinin radyoaktif bozunumlarının bu soruya cevap verebileceğini düşündüler. Kısa süre sonra Columbia Üniversitesi'nden Chien-Shiung Wu parite üzerine usta işi deneyler yaptı. Wu aynı zamanda paritenin iyi bir simetri olmadığını gösterdi. Paritenin bu ihlâli Standart Model'in de dayattığı bir özellikti.

Paritenin ihlâli hipotezi Lee ve Yang'a Nobel Ödülü'nü kazandırdı. Öte yandan "Çinli Madam Curie" olarak bilinen, deneyi tasarlayan, gerçekleştiren ve asıl keşfi yapan kişi ödüle layık görülmedi. Üç bilim insanı da tanınmış olsa da ve Birleşik Devletler ve Çin'deki Çinli topluluklar tarafından gurur kaynağı olarak görülse de Wu bir kadın olarak birçok zorlukla karşılaştı. Wu tüm bu zorluklara rağmen Birleşik

Devletler'deki profesyonel fizikçilerin topluluğu olan Amerikan Fizik Birliği'nin başkanı seçildi. Başarıları 1975'te Başkan Gerald Ford'un Ulusal Bilim Madalyası vermesiyle ödüllendirilmiş oldu. Aynı zamanda Çin'de ve diğer ülkelerde insan hakları savunucularının önde gelen isimlerinden biri oldu.

Diğer önemli bir simetri de *zaman tersinirliği*dir. Newton'un dünyasında bir olayın videosunu çekin –örneğin bir topun tepeden yuvarlanması ya da bir gezegenin yıldızının etrafında dönmesi– ve sonra videoyu geriye doğru oynatın. Göreceğiniz şey şaşırtıcı olabilir, hatta anlamakta zorlanabilirsiniz ama doğa yasalarına uyacaktır. Pariteyi simetri olarak saymadığımızda zaman tersinirliği gibi simetriler yanlış görünebilir. 1964'te zaman tersinirliği simetrisinin küçük bir ihlâlinin zayıf etkileşimlerde oldukça gizli bir şekilde saklı olduğu keşfedildi.

Şu ana dek karşılaştığımız simetriler –uzay ve zaman dönüşümleri, dönmeler ve parite– günlük deneyimlerimizde karşımıza çıkabilen ve sezgilerimizle anlayabildiğimiz simetrilerdi. Kuantum mekaniğinin keşfiyle simetriler doğa yasalarının içerisinde daha da merkezî bir rol aldı. Enerji, momentum ve açısal momentum hâlâ korunuyordu ve (varsa) etkileri artırılmıştı. Fakat kuantum mekaniği aynı zamanda daha yabancı olduğumuz simetrilerin ortaya çıkmasına sebep oldu. Uzay ve zamanla net bir bağlantısı olmayan bu simetrileri fizikçiler "içsel simetriler" olarak adlandırıyor. Bunların ilki kuantum mekaniğinin kâşiflerinden biri olan, ünlü belirsizlik ilkesinin sahibi Werner Heisenberg tarafından ortaya atıldı. Heisenberg proton ve nötronun neredeyse aynı ağırlığa sahip olduğunu belirtti. Kütleleri 1000'de bir oranında eşitti. Tesadüf olabilirdi fakat oldukça ilgi çekiciydi. Öte yandan proton ve nötron ciddi manada farklı görünüyordu, parçacıklardan birinin elektrik yükü varken diğerinin yoktu.

Heisenberg elektrik yükünü ihmal ettiğimizde parçacıkları ayırt edemeyeceğimizin –belki de bir *simetrileri* olduğunun sonucuna vardı. Çekirdekteki nötron sayısı elementin izotop formunu belirlediğinden bu duruma "izotopik spin" ya da "izospin" adını verdi. Heisenberg ve diğerleri protonlar arasındaki elektriksel itme kuvvetinin ve protonla nötron arasındaki minik kütle farkının ihmal edildiği durumlarda çekirdek özelliklerinin böyle bir simetriyle uyumlu olup olmadığını test ettiler.

Yang ve Mills: Einstein'ı Takip Etmek ve Yeni Bir Simetri Türü

C.N. Yang'ın parite ihlâlindeki, o zamana dek aşikâr görünen doğa simetrisinin yıkımındaki rolü olağanüstüydü. Fakat kısa süre sonrasında büyük önemi olan başka bir keşif daha yaptı. Bu fikrin hakkını vermek için Einstein'a dönmemiz gerekiyor. Einstein'ın genel göreliliği simetriler açısından da düşünülebilir. Doğa yasalarının bir eksende dönmeden etkilenmeyip aynı kaldığını biliyoruz. Fakat bu durum Newton'un yasalarının bir özelliğiydi ve bu şekilde bir simetri tutulacaksa *tüm evren*in döndürülmesi gerekirdi. Kulağa garip gelebilir ama öyle. Einstein'ın genel göreliliği, yasaları bu zorunluluktan kurtarıyor. Einstein'ın teorisiyle evrenin belirli bir kısmı –bir laboratuvarın, sınıfımın, ya da Güneş Sistemi'nin içi– döndürülebilir. Fakat ancak yerçekimsel alan dahil edildiğinde işe yarar. Başka bir deyişle, bu simetri ilkesiyle kütleçekim zorunlu hale gelir.

Yang ve Robert Mills, 1954'te aynı soruyu Heisenberg'in izospin simetrisi için sordular. Tüm evren yerine, evrenin sadece bir noktasındaki bir nötron protonla değiştirilebilir miydi? Bu fikri ifade eden bir teori yazdılar. Matematiği oldukça iyiydi. Tıpkı Einstein'ın rotasyonun uzay-zamanda *yerçekim-*

*sel alan*ın varlığını gerektirdiği konusundaki ısrarı gibi, Yang ve Mills'in uzay-zamanın bir yerindeki izotopik spin transformasyonunun elektrik ve manyetizmaya benzer üç yeni alanın ve fotona benzer üç kütlesiz parçacığın varlığını gerektirdiğini öngördükleri bir ısrarı oldu. Böyle parçacıklar yoktu, fakat Yang ve Mills o zamanlar bilinen üç büyük parçacığın, "vektör mezonları"nın onlar olabileceğini belirtti. Bu parçacıkların nasıl büyüdüğüyse birer gizemden ibaretti ve teori on seneden uzun bir süre etkisiz kaldı.

Yang yoğun madde fiziği alanında ve teorik fiziğin bazı alanlarında birçok başarıya ulaşmaya devam etti. Yıllarca Stony Brook'taki New York State Üniversitesi'nde, C.N. Yang Fizik Enstitüsü'nü yönetti. Parçacık fiziği ve temel doğa yasalarına olan katkılarına rağmen sonunda parçacık fiziği girişiminin ağır eleştirmeni oldu. Parçacık fiziğinin de bir parçası olduğu "büyük bilim" konusunda özellikle isteksizdi. Yang bu kitabın yazıldığı zamanda Çin'de inşa edilmesi planlanan, İsviçre'deki CERN Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ile benzer maliyete sahip fakat daha fazla enerji üretecek, çok yüksek enerjili hızlandırıcının ("Çin Çarpıştırıcısı") karşıtı konumunda.

Yang ve Mills'in teorisi ileride de göreceğimiz üzere Standart Model'in öncülerinden biri oldu. Aynı zamanda matematiğe büyük katkılarda bulundu. Fakat bu teorilerin değerini kazanması ve muhtemel rolünün görülmesi on yıldan uzun bir süre aldı. Bu sürede ise birçok şey yaşandı.

Pionlar Neden Işıktır? – Nambu-Goldstone Fenomeni

Pionun keşfedilmesiyle Yukawa'nın tasviri güçlü nükleer kuvvetin tanımını kabaca yapar hale geldi. Fakat elektrik ve manyetizma kuvvetlerinin kuantum teorisini sağlayamıyordu. Öncelikle, etkileşimler çok güçlü olduğu için muhtemelen Feynman, Schwinger ve Tomonaga'nın metotları bu problemi

çözmek için uygun değildi; yani teorinin ne öngördüğünü belirlemek zordu. Fakat teorinin güçlü etkileşimleri tam olarak modelleyemediğinin anlaşılması uzun sürmemişti. Pionların keşfini nükleer kuvvette rolü olabileceği düşünülen daha ağır, başka bir parçacığın keşfi takip etti. Güçlü etkileşen bu parçacıklara *hadronlar* deniyor. Şimdi yeni bir soru açığa çıkıyor: Tüm bu diğer parçacıkların rolü ne olabilir? Pionların özel olmasının sebebi nedir? Özellikle neden diğer parçacıklardan daha hafiftiler ve nötronlarla protonların arasındaki kuvveti nasıl açıklayabiliyorlardı?

Sorunun çözümü büyük Japon-Amerikan fizikçi Yoichiro Nambu'dan geldi. Genç bir adam olarak Birleşik Devletler'e gelmek zorunda kaldı ve Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde görev aldı. Nambu mütevazı ve kibar bir kişiliğe sahip olmasına rağmen utangaç ya da çekingen biri değildi. Enstitüye geldiğinde enstitünün yöneticisi J. Robert Oppenheimer'dı ve yeni üyelere (enstitünün doktora sonrası araştırmacıları) Einstein'ı rahatsız etmemeleri gerektiğini söylemişti. Nambu başlangıçtaki uyarıyı aldıktan sonra hemen Einstein'la bir toplantı ayarladı. Efsanevi fizikçinin göstereceği tüm bilgeliği almak için hevesliydi. Görüşmelerinde Einstein gençlerin kendisini görmeye gelmemesinden yakınmıştı. Nambu o zamanlar yurtdışından gelen genç biri için alışık olunmadığı üzere bir arabaya sahipti ve ilk görüşmelerinin ardından Einstein'a işe beraber gitmeyi teklif etmişti. Bir sabah Einstein arabaya yürürken bugünün kameralarına hiç benzemeyen bir makineyle Einstein'ın gizlice fotoğrafını çekti. Günümüzde olsa çektiği fotoğraf sosyal medyada viral olurdu.

Nambu enstitüdeki çalışmasından sonra Chicago Üniversitesi'ne geçti. Burada önemli çalışmalarda bulundu, özellikle güçlü etkileşimlerin simetrileri ve pionlarla olan bağlantısıyla

ilgilendi. Güçlü etkileşimlerin bilinmeyen bir simetri türüne sahip olabileceğini düşündü. İki farklı açıdan farklıydı. İlki görelilik ve kuantum mekaniğinin kombinasyonundan kaynaklanmasıydı. Eğer elektronun kütlesi yoksa farklı bir korunum yasasına uymalıydı. Elektronun spin sayısı belirli bir yöndedir. Kuantum mekaniğine göre elektron kütlesiz olursa foton gibi davranır ve ışık hızında hareket eder. Spinin yönü de elektronun hareketiyle aynı veya ters yönde olabilir. Hareketiyle aynı yönde olursa yolunda kalmaya devam eder, aynı durum tersi için de geçerlidir. Bu korunan bir özelliktir. Bu korunum yasasıyla ilgili olan simetri ellerimize benzer bir özellik gösterdiği için "kiral simetri" olarak adlandırılır (Yunancada *kiral* kelimesi el anlamına gelir). Elektron kütlesiz değildir (fakat çok yüksek enerjilerde korunum yasası geçerli kalacağından kütlesi ihmal edilebilir), proton ve nötron ise zaten daha yüksek kütleye sahiptir.

Sıra Nambu'nun düşüncesindeki ikinci atılıma geldi. Güçlü etkileşimlerin de bir simetriye sahip olduğunu, fakat bunun *bozuk simetri* olduğunu düşündü. Başlangıçta tuhaf bir fikir gibi görünebilirdi fakat aslında bozuk simetri kavramına yabancı değiliz. Doğa yasaları dönmelerde simetriktir fakat karşılaştığımız cisimlerde bunu görmeyiz. Mesela bir sürahinin tutacağı dönme simetrisini bozar. Paradoksal bir durum değil, çünkü sürahinin simetrisi tutacağın herhangi bir yönde olabileceği şekilde yansır. Mükemmel küre dışındaki cisimler bir yöne sahiptir ve hareket halinde olmadıkları zaman *bir yön*ü gösterir. Fizikçiler bu simetriye "kendiliğinden kırılma simetrisi" adı veriyor. Nambu nükleer kuvvetlerdeki kiral simetrinin bu tür bir simetri olduğu sonucuna vardı. Aynı zamanda doğa yasalarının simetrisinin bu şekilde kırılabileceğini fark edip kütlesiz bir parçacığın olması gerektiğini öngördü. Güçlü etkileşimlerde kütlesiz bir parçacık yoktu,

fakat pionlar diğerlerinden çok daha hafif olduğundan bu parçacıkların kütlesiz olabileceğini düşündü. Eğer güçlü etkileşimlerin altında yatan kiral simetri tam bir simetri değil ve "biraz kırık"sa küçük kütleli pionlardan kaynaklanıyor olabilirdi. MIT'den Jeffrey Goldstone anlık simetri kırılmasının kütlesiz parçacıklar oluşturabileceğini kanıtladı ve bu kütlesiz parçacıklar Nambu-Goldstone bozonları olarak tanımlandı. Yapılan birçok deneysel çalışma pionların beklenildiği gibi davrandığını gösterdi.

Güçlü Etkileşen Bir Sürü Parçacık

1940'ların sonunda parçacık fiziğinde hızlandırıcı çağı başladı. İkinci Dünya Savaşı'ndan yıllar önce ilkel hızlandırıcılar kurulmuş olsa da, fizik bilimine artık bir ulusun savunması olarak bakılıyordu ve federal hükümetten daha cömert fonlar alınabiliyordu.

Savaş dönemindeki teknolojik gelişmeler ve bilim insanları ve teknisyenlerden oluşan uzmanların eğitimi patlamayı hızlandırdı. UC Berkeley'de, Long Island'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda ve farklı yerlerde hızlandırıcılar kuruldu ve işletildi. Bu hızlandırıcıların enerjileri pionların ve diğer birçok parçacığın üretilmesi için yeterliydi. Detayları bizim hikâyemiz için önemli değil. Önemli olan şey yüzlerce parçacık üretilmiş olmasıydı. Tıpkı pionlar gibi kısa ömürlü olan, neredeyse 10^{-20} saniyede bozunan parçacıklar keşfedilmişti! Fakat hassas ölçümlerle belirlenebilen farklara sahiplerdi.

Ancak şimdi ortada bir gizem var. Başlangıçta proton, nötron ve pionun elektron gibi temel ve belli bir yapıya sahip olmayan parçacıklar olduğu düşünülmüştü. Fakat yeni parçacıkların keşfi bu tasvirin sorgulanmasına neden oldu. Yapılan hassas ölçümler protonun 10^{-13} cm ile atom çekirdeğiyle

benzer boyuta ve şekle sahip olduğunu gösterdi. Keşfedilen yeni parçacıklar, elektronlar ve atom çekirdeklerine göre düzenlenen periyodik tabloya yeni özellikler getirebilirdi. Murray Gell-Mann bu karışıklığı çözmek adına hadronlar için bir periyodik tablo hazırladı. Tablosu matematikçilerin *grup teorisi* dediği, fizikçilerin aşina olmadığı bir metoda dayanıyordu. Sekiz sayısı tabloda önemli bir rol oynuyordu. En hafif mezonlar en hafif baryonlar gibi sekiz tipte olup ½ spinle proton ve nötronla etkileşen parçacıklardı. Gell-Mann (2019'da hayata gözlerini yumdu) çok bilgili bir adamdı ve bunu fark ettirmeyi severdi; Doğu dilleri ve inançlarına olan ilgisini göstermek için teorisine sekiz katlı yol adını vermişti. Budizm'de sekiz katlı asil yol inançlı kimsenin Nirvana'ya ulaşması için uyması gereken kuralları içerir: Doğru görüş, niyet, söz, eylem, kazanç, çaba, dikkat ve konsantrasyon. Gell-Mann'in periyodik tablosunda ise sekiz sayısı parçacıkların elektrik yükleri gibi daha sıradan bir şeyi ifade etmekteydi.

Dmitri Mendeleev periyodik tabloyu elementlerin kimyasal özelliklerine göre düzenlemişti. Elektronların ve atom çekirdeğinin özelliklerinin anlaşılması ise ancak kuantum mekaniğinin keşfiyle mümkün olmuştu. Gell-Mann ve George Zweig birbirinden bağımsız şekilde hadronlar için bir özellik daha ortaya koydular: Sekiz katlı yolun elektron, proton ve nötronlara benzer, *kuark* adını verdikleri parçacıklarla anlaşılabileceğini öne sürdüler. Gell-Mann kuark ismini James Joyce'un *Finnegan Uyanması* kitabından seçmişti (Zweig parçacıklara As adını vermişti fakat bu isim tutmadı). Aşağı, yukarı ve acayip olmak üzere üç kuark tipi vardı.

Kuarklar güçlü etkileşen parçacıkların, hadronların özelliklerini iyi bir şekilde temsil ediyordu. Fakat kendilerine has bazı özellikleri vardı. Elektrik yükü taşıyorlardı. İnsanlar için en önemli yüklü parçacığın elektron olduğu söylenebilir.

Elektrik akımını oluşturan ve bilgisayar ve cep telefonlarımızdaki bilginin depolanmasını sağlayan parçacıklar elektronlardır. Elektronlar sahip oldukları bu önemden dolayı temel birim olarak kabul ediliyor. Elektronun yükünün -1 olarak kabul edilmesi Benjamin Franklin'e dayandırılıyor. Proton da +1 yüke sahip olduğundan atomlar elektriksel olarak nötr oluyor. Gell-Mann ve Zweig'ın öne sürdüğü kuarklar ise tam değerden ziyade +2/3 veya -1/3 elektrik yüküne sahipler. Kuark modelinde pion gibi sıfır spine sahip parçacıklar antikuarklar içerisinde bulunur. Bu parçacıklar mezonlar olarak biliniyor. Elektron gibi spine sahip proton ve diğer parçacıklar üç kuarka bağlıdır. Proton, iki yukarı ve bir aşağı kuarktan oluşur. Yüksüz olan nötron bir yukarı ve iki aşağı kuarktan meydana gelir. Diğer hadronlar da farklı kombinasyonlara sahiptir. Örneğin Π+ mezonu bir yukarı kuark ve bir anti-aşağı kuarktan (aşağı kuarkın antiparçacığı) oluşuyor.*

Yeni periyodik tablo işe yarar görünüyordu fakat bir problem vardı. Elektronlar atomlardan kolayca ayrılıyordu. Bu durumu güçlü bir elektrik alan elektronları atomlardan kopardığında (örneğin bir elektrik devresi) açığa çıkan kıvılcımlarda görebiliyorduk. Kimyacıların işi iyonları çalışmak, bilim insanları elektronları ve atom çekirdeklerini kontrollü ortamlarda ayrı ayrı çalışıyorlar. Fakat kuarklar için benzer bir durum yok. Protonlar birbirleriyle ya da nötron ve pionlarla çarpıştıklarında artı veya eksi 1/3 ve 2/3 yüke sahip parçacıkların oluştuğu tespit edilemedi. Bilim insanları bu kesirli yükleri her yerde, hatta Ay taşlarında bile aradılar.

---

* İlk üç kuarktan yukarı kuark +2/3, aşağı ve garip kuarklar -1/3 yüke sahiptir. Protonun iki yukarı, bir aşağı kuarktan oluşması +1; nötronun bir yukarı, iki aşağı kuarktan oluşması 0 elektrik yükü anlamına gelir. Sıfır ya da bir spine sahip olan mezonlar ise kimi zaman +1 (bir kuark ve bir anti-aşağı kuark kombinasyonuyla), kimi zaman -1 veya 0 yüke sahip olurlar.

Gell-Mann bir süreliğine kuarkların fiziksel gerçekliği olmadığını, ancak matematiksel bir oyun aracı olduklarını düşünmeye başlamıştı.

Fakat nihayetinde farklı bir deney yaklaşımı kuarkların *gerçek* olduğunu gösterdi. Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nden (Caltech) Richard Feynman ve o zamanlar yeni inşa edilmiş olan Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nden (SLAC: *Stanford Linear Accelerator Center*) James Bjorken (BJ olarak da biliniyordu) 1960'ların ortalarında kuark içeren proton ve nötronların çok yüksek enerji deneylerinde nasıl davranacağı üzerine düşünmeye başladı. Gell-Mann ile kötü şöhretli bir rekabeti olan Feynman bir süre hadron kuarklara parton demişti. Yine de Feynman ve Bjorken net bir tahmin yaptı. Elektronların atom çekirdeğine fırlatıldığı, çok yüksek enerjilerin proton ve nötronun iç yapısını ortaya çıkaracağı, Rutherford'unkine benzer deneyler yapıldı. SLAC'de yapılan deneyler bu fenomenin anlaşılmasını sağladı. Protonun kesirli yüklere sahip parçacıklardan oluştuğu görüldü. Yapılan bu çalışmalar Jerome Friedman, Henry Kendall ve Richard Taylor'a Nobel Ödülü kazandırdı. Okuyucuların bir kısmına Henry Kendall ismi nükleer enerji, çevre çalışmaları ve enerji politikası üzerine çalışan Endişeli Bilim İnsanları Birliği'ni kurmasından tanıdık gelecektir.

Bundan dolayı fizikçiler nükleer kuvveti etkileyen doğa yasalarının gizemini çözmüş gibi görünebilir. Fakat kuark modelinin başarısı önemli sorular açığa çıkardı. Kuantum teorisi ve göreliliğin nükleer kuvvetlerin kuantum alan teorisi ile tanımlanmasını gerektirdiği düşünülebilir. Fakat kuantum alan teorisi kuarkların neden yalnızken görünmediğini ve izole olduklarını ya da eğer kuarklardan oluşuyorlarsa neden hadronların bu şekilde davrandığını açıklayacak özelliklere sahip gibi görünmüyordu.

Çığır Açıcı İlerleme: Yang-Mills Teorileri ve Dikkat Çekici Özellikleri

Hadronların çarpıştıklarında kuarklardan meydana geldiklerini gösteren ilk bilmeceye dair açıklama 1973'te Princeton'dan David Gross, Frank Wilczek ve Harvard'dan David Politzer tarafından yapıldı. İlk noktayı açıklamalarındaki başarılarının teorinin *asimptotik serbestlik* adı verilen bir özelliğe sahip olması gerektirdiğini fark ettiler. Bu, kuarkların arasındaki kuvvetin kuarklar birbirine yaklaştıkça zayıflaması gerektiğini söylemenin daha renkli bir yoluydu. Ancak teorisyenlere göre bu durum kuantum alan teorisinde mümkün görünmüyordu. Örneğin kuantum elektrodinamiğinde tam tersi bir davranış görüyoruz: Elektronlar birbirine yaklaştıkça aralarındaki kuvvet büyüyor. Kuantum mekaniğinin genel ilkeleri göz önüne alındığında her zaman böyle olacağına dair tartışmalar vardı.

Gross ve öğrencisi Wilczek bilinen hiçbir kuantum alan teorisinin böyle bir özelliğe sahip olmadığını açıklamak için yola çıktılar. Politzer ise aynı problemi kendi tez danışmanı Sidney Coleman'ın (ileride tanışacağız) tavsiyesiyle farklı bir açıdan ele aldı. QED ve Yukawa'nın mezon teorisi gibi teorilerde hesaplamalar nispeten daha basit ve aşina olunan türdendi. Fakat bu tür problemler daha zorlayıcıydı. Yang ve Mills'in teorileri bugün *abelyan olmayan ayar teorisi* ya da daha önce karşılaştığımız şekliyle *Yang-Mills teorileri* olarak biliniyor. Teoriler sonraki on yıl rağbet görmedi. Muhteşemlerdi fakat anlaması zordu, bundan dolayı kimse doğa yasalarını anlamak için onları kullanmayı göze almadı. Bazı ilerlemeler olsa da QED'in anlaşıldığı seviyede anlaşılmamışlardı. 1940'larda QED'in gelişiminde büyük rol oynayan Richard Feynman bu teorileri hesaplamak için birtakım kurallar öngördü. Freeman Dyson'ın Feynman'ın tahminini doğrula-

masında ilk rolü iki Sovyet fizikçi Ludvig Faddeev ve Victor Popov oynadı. Aslında Feynman'dan daha başarılı oldular. Yang-Mills teorilerindeki kuantum mekaniğini anlarken Feynman'ın tuhaf fikirlerinden birini alıp kullanışlı ve güçlü bir metot haline getirdiler.

Fakat halen hesaplamalar zordu. Ortaya çıkan matematiksel ifadeler bir anlam taşımıyordu. Bir sonraki büyük başarı iki Hollandalı fizikçi Martinus "Tini" Veltman ve öğrencisi Gerard 't Hooft'un çalışmalarıyla geldi. QED'deki hesaplamalarında uzman olan Veltman uzun sayı sütunları ekleyerek cebir yapmaktansa, teoriyi hesaplamak için bilgisayar kodları yazan muhtemelen ilk kişiydi. Cebir zor olabilirdi ve QED probleminde *çok daha fazlası* vardı. Akıl almayacak kadar zor görünüyordu ve bilgisayarlar için muhteşem bir işti. Fakat Yang-Mills teorisinin gelişimindeki işlerin çoğunluğunu yapan kişi öğrencisi Hooft'tu. Uzun yıllar boyunca ikilinin arasında işin kredisini kimin almasının gerektiğine dair bir gerginlik oldu. Yine de Yang-Mills teorilerindeki kuantum mekaniğini açıklamalarından dolayı 1999'da Nobel Ödülü'nü paylaştılar.

Faddeev, Popov, Hooft ve Veltman sayesinde Gross, Wilczek ve Politzer gereken hesaplamaları yapabildiler. Çoğu zaman olduğu gibi bu hesaplamalar da başlangıçta zorluydu, bugünse lisansüstü fizik dersimde verdiğim standart ödevler haline geldi. Yang-Mills teorilerinin gereken özelliğe sahip olduğunu keşfettiler.

Bu keşifle birlikte kuark modeli Yang-Mills teorisiyle birleşince, Yang ve Mills'in fikirleri üzerinde yükselen yeni doğa yasalarına, güçlü kuvvetin gerçek teorisine ulaşıldı. Hadronlar renk özelliğine sahip kuarklardan meydana gelir. Kırmızı, mavi ve yeşil olmak üzere üç renk bulunur. Glüon adı verilen bu sekiz tür parçacık fotonlara benzer şekilde etkileşiyordu.

Bu yeni teori kuantum elektrodinamiğine (QED) benzer şekilde kuantum kronodinamiği (QCD) olarak adlandırıldı. Gross, Wilczek ve Politzer sadece SLAC sonuçlarını açıklamamış, aynı zamanda Bjorken ve Feynman'ın öngörülerini düzeltecek öngörülerde bulunmuşlardı. Bununla birlikte, teorinin test edileceği ve teorinin öngörebileceği süreçleri genişletmek adına uzun bir süreç başladı. Teoriyi test etmek ve tamamen anlayabilmek için birçok zorluk bulunuyordu, fakat bugün Standart Model ayrıntılarıyla doğrulandı.

Gross, Politzer ve Wilczek'in çalışmaları 2004'te Nobel Ödülü'ne layık görüldü. Bazılarımız Sidney Coleman'ın da farkındalığından dolayı ödülü hak ettiğini düşünebilir, fakat en fazla üç kişi ödülü paylaşabiliyor.

Asimptotik serbestlik probleminin çözülmesiyle geriye kuarkların sınırlanması sorusu kalmıştı. Asimptotik serbestlik özelliği çözüm adına bir umut sağlıyordu. Öte yandan güçlü etkileşimler kuarklar birbirine yaklaştığında zayıflıyor, birbirinden uzaklaştıklarında güçleniyordu. Güçlü etkileşimin kuarkların birbirinden kopmasını engelleyecek kadar güçlendiği düşünülüyordu. Özelliğe "kızılötesi kölelik" adı verilmişti. Fakat kuark sınırlanmasının teknik ve matematiksel açıdan zor bir problem olduğu ispatlanmıştı. Aslında birçok yönden teorik fizikçilerin daha önce karşılaştıklarından daha zor bir problemdi. Diğer alanlardaki benzer fenomenler incelendi. Sonunda Cornell'den Ken Wilson soyut problemi oldukça zor ve net bir soruya dönüştürdü. Faddeev ve Popov gibi, Feynman'ın kuantum fiziğindeki çılgın fikrini alıp daha çılgın bir şey yaptı ve bilgisayarın çözebileceği anlamlı bir hale getirdi. Wilson kullanışlı hesaplamalar yapmak için uzay-zaman sürekliliğinin ayrık değer seti ile değiştirilmesini önerdi. Matematikçi ve fizikçiler uzay-zamanı dekorasyon sanatlarındaki düzenli yapıları düşünerek



İki boyutlu bir kafes tasviri.

kafeslere dönüştürür. Örnek bir kafes tasvirini aşağıda görebilirsiniz. Bununla birlikte renk ayar teorisi –QCD– çözmek iyi bir bilgisayar problemine dönüştürülmüş oldu. Yine de problem *oldukça zordu*.

Zorun ne demek olduğunu anlatmak adına 100 noktaya sahip bir kafeste doğru sonucu elde etmek için on üzeri on üzeri sekiz ($10^{100000000}$) işlem yapılması gerektiğini örnek verebiliriz. Evrendeki tüm elektronları kullanan bir bilgisayar yapsaydık bile bu işlemleri gerçekleştiremezdik. Burada zekâ gerektiren asıl kısım problemi hesaplanabilir bir ölçeğe indirmektir. O zaman bile çok güçlü ve pahalı bir bilgisayar ağı kullanmak gerekir. Araştırmacılar bu problemi çözmek için özel makineler inşa etti. Fakat milenyum sonrasında bilgisayar gücünün artması ve hesaplamaları yapacak algo-

ritmaların geliştirilmesi güvenilir sonuçların elde edilebilmesini sağladı. Hesaplamalar sadece kuark sınırlanmasını göstermekle kalmadı; ayrıca hadronların, proton, nötron ve pion gibi parçacıkların kütleleri gibi özelliklerin (pionlarınki ayrıca zor oldu) detaylı bir şekilde anlaşılabilmesini sağladı. Daha da iyisi, özellikle de ağır b kuarkı üzerine henüz gerçekleştirilmemiş deneylerin sonuçlarının hesaplanmasına imkân verdi.

Bu hikâyedeki birçok isim teorik fizik alanında başka büyük katkılarda da bulundu. Bu kitabı yazdığım sırada 98 yaşında olan C.N. Yang (1922'de doğdu) Çin biliminde önde gelen isim olmaya devam ediyor. Gerard 't Hooft güçlü etkileşimleri anlama konusunda halen öncü rol oynuyor. Leonard Susskind ve Stephen Hawking'le birlikte kütleçekim kuantum teorisi problemi üzerine düşünen en önemli isimlerden biri oldu. David Gross süper sicim teorisinin gelişiminde kritik bir rol oynadı. Ken Wilson güçlü etkileşimlerin hesaplanması üzerine yaptığı çalışmaların sonucu olarak kimya ve diğer alanlardaki uygulamalarıyla büyük ölçekli bilgisayar hesaplamalarına büyük bir ilgi uyandırdı. Yoğun madde fiziği ve güçlü etkileşimler üzerine yaptığı çalışmalarıyla 1982'de Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

Fakat tüm bu süreç teorik veya deneyci fizikçilerin çoğunu tam anlamıyla tatmin etmiş değil. Fizikçiler kaba hesaplamalar yapmayı, başka bir deyişle daha basit çalışmayı, ayrıntılı ve karmaşık hesaplamaların en azından neden bu şekilde çalıştığını anlamayı severler. "Bilgisayar gerçekten zor olan bu hesaplamaları gerçekleştirdi ve sonucu bu şekilde buldu" cinsinden açıklamalardan pek hoşlanmazlar. Peterborough, New Hampshire'daki Clay Matematik Enstitüsü matematik ve fizikteki zor problemlerin çözümünü yapanlara Milenyum Ödülü veriyor. Problemlerden biri QCD'deki kuantum

sınırlanmasını bilgisayara bağlı olmayan bir yöntemle gösterebilmek. Öğrencilerime bunu anlatıyorum. Ödül bir milyon dolar. Henüz çözüm bulan biri ise yok.

BÖLÜM 6

EN KÜÇÜK ŞEYLERİN KÜTLESİ

Bilim insanlarının bir nesneyi tanımlamakta kullandığı anahtar niteliklerden biri kütledir. Altının özel olmasının sebebi sadece nadirliği ve parlaklığı değil, aynı zamanda küçük miktarının bile ağır olmasıdır. Aksine temel parçacıkların kütlesi son derece azdır. Bin trilyon kere trilyon elektronun ağırlığı bir gramı anca geçer, aynı sayıda proton da yaklaşık bir kilograma denk gelir. Sadece yüksek sayıdaki parçacıkların kütlesini ölçmüyoruz, aynı zamanda belirli bir zamanda tek bir parçacığın kütlesini de ölçebiliyoruz. Bildiğimiz en ağır parçacık olan üst kuarkın bile trilyon kere trilyon tanesi yaklaşık bir kilograma denk geliyor. Fakat bir yığını beraber ölçmemiz imkânsız. Üst kuarkın yarılanma ömrü yaklaşık 10^{-24} saniyedir. Bu bir yığın parçacık neredeyse bir anda daha hafif parçacıklara ayrışacaktır. Bundan dolayı üst kuarkın kütlesini dolaylı yoldan ölçmek zorundayız. Bu kadar kısa bir süreyi ölçecek bir saate sahip olmadığımızdan aynı durum üst kuarkın yarılanma süresi için de geçerli. Bu kadar dramatik olmasa da diğer parçacıkların kütle ölçümleri için de benzer bir durumla karşı karşıyayız.

Bu parçacıkların kütlesi nedir? Sadece bir ders kitabının arkasındaki tabloyu dolduran veya internette gördüğümüz sayılardan mı ibaretler? Yoksa onları bazı temel ilkeler cinsinden anlayabilir miyiz? Bunların iki örneğini zaten gördük: Dirac elektronun antiparçacığı olan pozitronun neden var olması ve elektronla *tam olarak aynı kütlede olması* gerektiğini açıklamıştı. QED'in öncüleri de her parçacık için benzer kurallarla antiparçacık bulunduğunu göstermişti. Foton elektrodinamik özelliğinden dolayı kütleye sahip değildir. Peki ya diğer parçacıklar? Bu soruyu cevaplamak için Standart Model'e bir ekleme daha yapmamız gerekiyor.

Radyoaktivite korkunçtur. Nükleer bir silahın patladığı ya da bir nükleer reaktörün kontrolden çıktığı yüksek miktarlar anında öldürebilirken, düşük miktarı kansere yol açabilir. Fakat radyoaktivitenin bir açıdan diğer zehirlerden daha az korkutucu olduğunu söyleyebiliriz. Hiroşima, Nagazaki, Çernobil ve Fukişima'daki deneyimlerimizden yüksek miktardaki radyasyonun etkisini biliyoruz, yüksek miktardaki kimyasal ve çevresel zehirler ise bizim için bir gizem.

Radyoaktivite aslında dünyadaki maddelerin doğasında ya da kozmosun derinliklerinden gelen yüksek enerjili parçacıklar atmosferin üst kısmına çarptığında oluşan kozmik ışınlarda bulunuyor. Curieler ve Rutherford maddenin yapısını anlamak için radyoaktivitenin farklı formlarını kullandılar. Rutherford doğal üretilen radyoaktiviteyi üç sınıfa ayırdı: Alfa, beta ve gamma radyasyonu. Alfa ışınlarının uranyum ve radyum gibi ağır çekirdekler parçalandığında açığa çıkan helyum çekirdeği olduğu anlaşıldı. Gamma ışınları görünür ışıktan, radyo dalgalarından ya da mikrodalgalardaki fotonlardan çok daha yüksek enerjiye sahip fotonlardır. Beta ışınları da elektronları veya antiparçacıklarını içerir.

Işınların anlaşılmasının ardından radyasyonun verdiği zararların üzerindeki sır perdesi kalkmış oldu. Tüm bu parçacıklar vücudumuzdaki atom ve moleküllerle çarpışarak kopmalarına sebep olur. Yüksek dozlarda dokulara büyük zarar verip kısa sürede ölüme yol açabilir. Düşük dozlarda ise DNA'nın kırılması birçok hastalığa neden olabilir. Bu durumların sebebini anlamak radyoaktivitenin korkunçluğunu azaltmasa da muhtemel sonuçların ve bunlardan kaçınmak için uygulanacak stratejilerin anlaşılmasına yardımcı oluyor.

Nötronun keşfinden önce atom çekirdeğinin protonlar ve protonun yükünü dengeleyecek elektronlardan oluştuğu düşünülüyordu. Fakat elektronları protonlara neyin bu kadar sıkı tutacağı ve neden hidrojende olduğundan daha yakın oldukları bilinmiyordu. Nötronun keşfiyle sadece maddenin büyük bir kısmı bilinmekle kalmadı, aynı zamanda beta radyasyonunun arkasındaki fenomen de anlaşılmış oldu. Nötron tek başınayken radyoaktiftir. Yaklaşık 11 dakikalık bir sürede bir proton, bir elektron ve daha önce karşılaştığımız, maddenin diğer formlarıyla çok nadir etkileşen hafif ışık parçacıkları nötrinoyu oluşturur. Nötronun protondan çok az daha ağır olduğunu hatırlayın. Aralarındaki kütle farkı elektronun kütlesinden biraz daha fazla. Einstein'a göre kütle ve enerji eşittir. Enerji korunduğundan dolayı proton ve nötronun arasındaki kütlesel yakınlığın sonucu olarak nötron bozunması çok sık gerçekleşmiyor. Nötronun enerjisi çekirdek içerisindeyken daha düşük, bundan dolayı çoğu atom çekirdeğinde bozunma hiç gerçekleşmiyor. Altı proton ve altı nötron içeren karbon 12 (neyse ki) kararlı bir izotop ve yaşamın oluşmasına izin veriyor. Altı proton ve yedi nötronu olan karbon 13 ise kararlı bir izotop değildir.

Süreç tersine de işleyebilir. Bir elektron bir protonla çarpışabilir ve bir nötrino yayarak nötron oluşturabilir. Bu şekilde

bir atom çekirdeği başka bir atom çekirdeğine dönüşür. Doğanın simyası için çok önemli bir süreçtir. Çoğunlukla hidrojenden oluşan yıldızlarda karbon, oksijen, demir ve yaşam için önemli olan diğer ağır elementler bu şekilde üretiliyor. Üretilen bu atomlar yıldızların patlayıcı ölümüyle, süpernova patlamalarıyla evrene yayılıyor. Bizler de erken jenerasyon yıldızların tozlarından meydana geliyoruz.

Nötron bozunmasına dönecek olursak on bir dakika uzun görünmeyebilir fakat bu süreçlerde saçma derecede uzun bir süredir. İnsanlar günlük hayatlarında karşılaştıkları deneyimler için inç, ayak, mil ve kilometre gibi birimler ürettiler. Fakat farklı uzunluk ve zamanları düşünmenin daha doğal bir yolu da var. Işığın Güneş'e en yakın yıldıza gitmesi 2,4 yıl sürer. Ay'a ulaşması ise yaklaşık 10^7 kat daha hızlı olur ve yaklaşık 2 saniye sürer. Işık, 10^{-18} saniyede bir atom boyu yol alır. Bir nötron boyu mesafeyi ise sadece 10^{-23} saniyede alır! Bu değerler karşılaştırıldığında nötronun sonsuza dek yaşadığını söyleyebiliriz. Bu kadar uzun süre beta bozunmasıyla ilgili kuvvetin son derece güçsüz olduğu anlamına geliyor. Bu kuvvet zayıf kuvvet olarak adlandırılıyor ve bu kuvvetin içinde bulunduğu etkileşimlere zayıf etkileşimler deniyor.

Yeni kuvvetler yeni yasalar demekti. 1933'te Enrico Fermi nötron bozunmasından yola çıkarak zayıf etkileşimleri tanımlayan yeni yasalar önerdi. Fermi, QED'den ilham almıştı. Teori nötron bozunmasının birçok özelliğini gösterse de tamamını açıklamıyordu. Fermi'nin teorisinin atom çekirdeğinin ve kararsız hadronların beta bozunmasını açıklamasından çok uzun zaman önceydi. Bu bozunmaları kuarklar, elektronlar, diğer parçacıklar ve nötrinolar cinsinden açıklamak ise kırk yılı aldı.

Bu özellikler konusunda taşların yerine oturmasına ve büyük bir veri grubunu açıklamasına rağmen Fermi'nin teori-

sinde büyük bir problem vardı. Teori eğer daha kısa mesafeleri veya daha yüksek enerjileri açıklamaya çalışırsa anlamını kaybetmeye başlıyordu. Kuantum mekaniği teorisinde olduğu gibi sonuçları tahmin edebiliyordu. Protonun boyutundan 1000 kat daha küçük mesafelerde meydana gelen süreçleri ele aldığımızda yüksek sayıda ihtimal ortaya çıkıyordu; peki bu ne anlama gelebilirdi? Bu durumun düzeltmesi de yine Fermi'deydi. QED'de yüklü parçacıkların arasındaki kuvvet foton değişiminden kaynaklanıyor. Einstein'ın teorisinde kütleçekimsel kuvvet gravitonların değişiminden meydana geliyor. Fotonlar ve gravitonlar kütleye sahip değiller. Bunun sonucunda çok uzun mesafeleri rahatça alıp kuvvetin yüksek mesafelere etki etmesini sağlayabilirler. Fermi'nin teorisindeki zayıf kuvvet ise ancak kısa mesafede; sonsuz derecede kısa mesafede etki gösterebiliyor. Bu açıklama kulağa çılgın gelmeyebilir ama yine de çılgın ve aynı zamanda problemin kaynağı. Eğer zayıf etkileşim elektromanyetizma ve kütleçekim gibi parçacıkların değişimiyle kontrol ediliyorsa, fakat bu parçacıklar ağırsa; ancak kısa mesafelerde ilerleyebilir ve kuvvetin kısa mesafede etkili olmasına neden olabilirdi. Nükleer kuvvetlerde pionların oynadığına benzer bir roldü. Fermi'nin teorisinin başarılı olması için parçacıkların proton veya nötronun 100 katı kütleye sahip olması; yani fotonun elektrik yüküne sahip ağır bir versiyonu olması gerekirdi. Bu parçacıklar W bozonu olarak biliniyor ve W^+ olan elektronla ters yükü, W^- olan aynı yükü taşıyor.

Yine de bu parçacıklar tek başlarına Fermi'nin teorisindeki tüm problemleri çözmek için yeterli değildi. Teorinin çökmesi ancak kısa bir süre daha ötelenmişti fakat yine de çökmüştü. Sorunlardan ilki fotonların ağır versiyonlarıydı. Fotonun QED'in simetri ilkelerinden dolayı kütlesiz olduğunu söylemiştik. QED'in sadece ayar simetrileri denen simetri ilkele-

riyle parçacıkları bir arada tuttuğu ortaya çıkmıştı. Durum, kuvveti taşıyan parçacıkların ("vektör bozonları" veya "ayar bozonları") ayar simetrisinden ötürü ancak kütlesiz olduklarında doğru görüneceği Yang ve Mills teorilerinde daha da katıydı.

Her şey 1964'te birkaç teorik fizikçinin ayar ilkesinin ayar bozonları ağır olduğunda geçerli olduğunu bulmasıyla değişti. Bu problemde çalışan kişiler İskoçya'dan Peter Higgs, Belçika'dan Robert Brout ve Francois Englert, Birleşik Devletler'den Gerald Guralnik ve C.R. Hagen ve İngiltere'den Tom Kibble'dı. Bu tarihî hatanın sonucu olarak ayar simetrisi kavramı *Higgs fenomeni* olarak bilinir oldu. Higgs kâşifleri –ben onlara "altılı ekip" diyorum– Nambu ve Goldstone'da olduğu gibi kırık simetrilerin ayar simetrisi olduğunu, kütlesiz bozonun var olmadığını buldular. Aksine ayar bozonları oldukça ağırdı.

Altılı ekibin yazdığı teoride iki element vardı. İlki, elektrik ve manyetizmadan farklı, yeni bir alan tipi olan *Higgs alanı*ydı. Higgs alanı skaler bir alandı, belirli bir yönü gösteren elektrik ve manyetizma alanlarının aksine (Dünya'nın manyetik alanı kuzey kutbunu gösterir) Higgs alanının bir yönü yoktu. Önemli olan nokta bu alanın evrenin herhangi bir yerinde sıfırdan farklı bir değer almasıydı. Bu da temel parçacıklarının kütleli olmasına neden oluyordu, Higgs alanı büyüdükçe parçacıkların kütlesi de büyüyordu. İkinci olarak, elektromanyetik alanın foton parçacığıyla ve Yang-Mills alanlarının glüon, W ve Z bozonlarıyla ilişkilendirilmesi gibi, Higgs alanı da spine sahip olmayan özel Higgs parçacığıyla ilişkilendirilmişti.

Parçacık teorisinin gelişiminde büyük rol oynayan Nambu, göz ardı ediliyor olsa da bu hikâyede de kritik bir rol oynadı. Higgs, yayın için yolladığı makalesinin ilk taslağında

mekanizmasının ayar bozonlarına kütle verdiğini anlasa da modelinin ekstra bir skaler *Higgs bozonu*nun varlığını öngördüğünü fark etmemişti. Buna işaret eden isim makalenin hakemi olan Nambu'ydu.

Higgs kâşifleri gözlemlerindeki zayıf etkileşimler için bir teori inşa etmemişlerdi. 1967'de bu teoriyi geliştiren kişiler Harvard'dan Sheldon Glashow, Steven Weinberg (sonrasında MIT'de, Harvard'da ve Teksas Üniversitesi'nde görev aldı) ve Londra'daki Imperial College'da çalışan Pakistanlı fizikçi Abdus Salam'dı. Teorileri Standart Model'in zayıf ve elektromanyetik etkileşimleri açıklayan kısmını oluşturdu. Higgs mekanizmasının uygulaması için bir öneride bulundular. En basit olasılığı seçmişlerdi. Kendi versiyonları Fermi'nin versiyonuna iki büyük eklenti içeriyordu. W^+ ve W^- parçacıklarına ek olarak, Nambu'nun da işaret ettiği şekilde elektrik yükü olmayan skaler bir Z^0 ayar bozonu bulunuyordu. Teorileri bu parçacıkların tam olarak ne kadar kütleye sahip olduğunu öngörmese de kaba bir tahmin yapılabiliyordu.

Güçlü etkileşimlere maruz kalmayan temel parçacıklara lepton adı verilir. Söz konusu dönemde leptonlar elektron, müon ve nötrinolardan oluşuyordu. Yeni teoriye iyi bir şekilde uyuyorlardı. Weinberg'in makalesi "Lepton Modeli" başlığını taşıyordu. Bilinen üç kuark (alt, üst, acayip) ise modele tam uymuyordu. Glashow ve iki meslektaşı bu problemin *tılsım kuark* adını verdikleri dördüncü bir kuarkın varlığıyla çözülebileceğini öne sürdüler. Bununla birlikte Higgs parçacığı sadece W ve Z^0 parçacıklarının değil, tüm kuark ve leptonların kütlesini kapsar hale geldi.

Altılı ekibin Higgs mekanizmasının keşfindeki rolü oldukça etkileyiciydi. Öte yandan Glashow, Weinberg ve Salam halihazırda tanınmış teorisyenlerdi ve uzun yıllar boyunca teorik fizikte öncü rol oynayacaklardı. Glashow ile Weinberg, arka-

daşları ve rakipleri New York'taki Bronx Bilim Lisesi'nde sınıf arkadaşıydı ve 1953'te birlikte mezun oldular. Harlem'deki City College'da profesörlük yaptığım zamanlarda aynı lise sınıfında bulunmuş iki meslektaşım vardı. Bunlardan biri olan Myriam Sarachik bu iki sınıf arkadaşını göz korkutucu bulurdu. Yoğun madde deneycisi Sarachik, 1960'ların başında dönemin normal bir davranışı gibi görünen cinsiyetçilikle mücadele etmek zorunda kalan bir kadın fizikçiydi. Birçok başarısı oldu ve daha o günlerde Ulusal Bilim Akademisi'ne seçildi. Geçtiğimiz yıllarda ABD'deki profesyonel fizikçilerin birliği olan Amerikan Fizik Topluluğu'nun başkanlığını yaptı ve 2019'da topluluğun Özel Araştırma Başarısı Madalyası'nı alan dördüncü isim oldu.

Sheldon Glashow ile lisansımın son senesinde, lisansüstü eğitimimi sürdürmek umuduyla ziyaret ettiğim Harvard'da tanıştık. Sonraki yıllarda Myriam'dan duyduklarım sayesinde Glashow'a sempati duyacaktım, fakat kısa karşılaşmamızda bana neden teorik fizik yapabileceğimi düşündüğümü sormuş ve aptal gibi hissettirmişti. Harvard başvurumu reddettiği için şanslıydım. Üç yıl sonra Harvard'daki acımasız ortamdan uzaklaşan Tom Appelquist tez danışmanım olmuştu. Mükemmel bir öğretmendi ve benim sakarlık ve kafa karışıklıklarıma Harvard'da olacağından çok daha fazla sabır gösterdi.

Kariyerimin ilerleyen dönemlerinde Steven Weinberg ile karşılaşmam ise çok daha tatmin ediciydi. Weinberg de kendinden aşağıda gördüklerine acımazdı ama en azından naçiz ölümlülere Glashow'dan daha merhametliydi. Daha genç ve daha az tanınmış meslektaşlarına konuşmaya değer, bir şeyler öğretebileceği ve onlardan bir şeyler öğrenebileceği insanlar olarak yaklaşırdı. Zayıf etkileşimlerin anlaşılmasıyla yaptığı büyük sıçramaya dek uzun bir listeyi dolduracak başarı-

lar elde etmişti. Bir 30 yıl daha alanının öncüsü oldu. Hukuk profesörü olan eşi Louise Weinberg ile birlikte Harvard'dan ayrıldı ve Austin'deki Teksas Üniversitesi'ne geçti. Bu kitabın tamamlanması yakın bir zamanda Weinberg hayata gözlerini yumdu. Çok özlenecek.

Önemli başarılara imza atan bir diğer isim ise Abdus Salam. Pakistan'da ve Cambridge Üniversitesi'nde eğitim alan Abdus Salam 1964'e dek Pakistan fiziğinin önde gelen ismi oldu. Ahmediye Müslüman Cemaati'nin bir üyesiydi ve 1974'te cemaatinin Müslüman olmadığı iddia edilince ülkeyi terk etmek zorunda kaldı. Yaşadığım şehir San Jose'de de aktif bir Ahmediye cemaati bulunuyordu ve eşimle birlikte birkaç yerde cemaatin iftarına katıldık. Daha büyük Müslüman topluluklarıyla olan ilişkilerimiz en azından saygı çerçevesindeydi.

Hikâyemize dönecek olursak Glashow, Salam ve Weinberg'in modeli ilk başta fizikçiler arasında pek bir yankı uyandırmadı. Sorun modelin güçlü etkileşimlerin teorisi kısmında gördüğümüz Yang ve Mills'in fikirlerine dayanmasıydı ve ilk bakışta anlamlı görünmüyordu. Higgs mekanizmasının eklenmesiyle her şey daha da karışmıştı. Fakat Gerard 't Hooft problemi çözdü. Yang-Mills teorisi için geliştirdiği metoda Higgs'i de dahil ederek tüm teorinin anlamlı olduğunu gösterdi. Weinberg'in ancak bu noktada teorisini benimsediğini görüyoruz.

Teorinin beş yeni parçacığı; W^+, W^-, Z^0, tılsım kuark ve Higgs bozonunu öngördüğünü gördük. Z^0'ın varlığı CERN'de ve Batavia, Illinois'deki Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı'nda (Fermilab) yapılan deneylerle dolaylı olarak kanıtlandı. Tılsım kuark Kasım 1974'te SLAC'den Burt Richter ve MIT'den Sam Ting'in liderliğini yaptığı büyük bir araştırma ekibi tarafından Long Island'daki Brookhaven Ulusal Labo-

ratuvarı'nda keşfedildi. Buldukları dramatik sinyal "Kasım Devrimi" olarak ünlendi. Danışmanım Tom Appelquist tarafından da öngörülmüştü (yine de Harvard'dan sınırsız süreli kadro verilmedi). Hemen sonrasında Nobel Ödülü için bir yarış başladı. Glashow ve Weinberg modellerinden emindi ve diğer tüm modelleri küçümsemişlerdi. Teorilerine Standart Model adını verdiler, çünkü teorilerinin *standart olması gerektiği* konusunda ısrarcılardı. 1970'lerin sonuna doğru modelin öngörüleri doğrulanmaya başladı. 1983'te W^+, W^- ve Z^0 parçacıkları gözlemlendi. Tılsım kuarkın deneysel keşfinden dolayı Richter ve Ting, W'ların ve Z'nin keşfinde hızlandırıcının ve detektörlerin gelişimine katkılarından dolayı CERN'den Carlo Rubbia ve Simon van der Meer Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

Sonraki 30 yılda etkileyici gelişmeler sürdü. W'lar ve Z'nin keşfinden bile önce, beklenmeyen bir kuark seti ve leptonlar keşfedildi. Elektron ve müonun partneri olan tau (τ) leptonu ya da ağır lepton olarak bilinen parçacık SLAC'de keşfedildi. Tau leptonu protonun neredeyse iki katı, elektronun yaklaşık 3500 katı kadar ağırdı. *Lepton* kelimesi Yunanca kökeninde "küçük" anlamına geliyor, bundan dolayı tauya ağır lepton demek biraz oksimoron bir ifade. Yine yakın zamanlarda başka bir kuark olan b kuarkı (*beauty* "güzellik" ya da *bottom* "alt" kelimesinden geliyor) keşfedildi. Standart Model simetrileri üst kuark dediğimiz başka bir kuarkın daha varlığını gerektiriyordu. Çalışmalar yirmi sene daha devam etti ve parçacık sonunda 1995'te Fermilab'da yapılan deneylerde bulundu. Üst kuark bilinen tüm kuark ve leptonlardan daha ağırdı. Kütlesi elektronun kütlesinden 10.000 kat, bir sonraki en ağır kuark olan b kuarkından 40 kat daha fazlaydı.

Kuarkların üçüncü türünün ve leptonların keşfi bir sürpriz değildi. İki Japon fizikçi tarafından zaten öngörülmüştü.

Yine bu üçüncü türün öngörüsü de simetri tartışmalarından ortaya çıkmıştı. Newton'un yasalarına göre zamansal bir simetri olduğunu söylemiştik; bildiğimiz doğa yasalarına göre geçmiş ve geleceğimiz aynıydı. Ayrıca Newton'un yasalarında parite simetrisi adını verdiğimiz sağ sol ayrımı da yoktu. Bu iki simetri de Maxwell'in denklemlerinin bir özelliğiydi. Paritenin ihlali keşfedilince, zaman simetrisi de sorgulanır olmuştu. Kuantum mekaniği ve göreliliğin genel ilkelerinden dolayı temel parçacıklar için zaman antiparçacıklarıyla ilgiliydi. Bu simetri CP (*Charge parity:* Yük parite) simetrisi olarak biliniyor. QED'de teorinin diğer özelliklerinin zaman ve parite simetrisini gerektirdiği ortaya çıksa da zayıf etkileşimlerde böyle bir zorunluluk yoktu (güçlü etkileşimlerde de aynı durum geçerli, ileride göreceğiz). Zayıf etkileşimlerin henüz tam anlaşılmadığı bu noktada deneyciler Jim Cronin ve Val Fitch bu konu üzerine çalıştı. Deneyler bir önceki bölümde karşılaştığımız, güzel bir kuantum mekaniği fenomeni olan K mezonuyla ilgiliydi ve fenomenin Einstein, Podolsky ve Rosen'ı ilgilendiren varyantını kullanmışlardı. Cronin ve Fitch zaman tersinirliğinin zayıf etkileşimler için iyi bir simetri türü olmadığını gösterdiler. Glashow, Weinberg ve Salam tarafından ortaya konan Standart Model, QED'deki iki kuark ve leptonlarla birleştirildiğinde zaman tersinirliği iyi çalışan bir simetri olarak görünüyordu. 1973'te Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa *üç* tür kuark ve leptonlar söz konusu olduğunda kuralın bozulduğunu gösterdiler. Zaman tersinirliğinin ihlalini anlamanın en basit yoluydu. İleride de göreceğimiz gibi, zaman tersinirliğini kesin bir simetri olarak kabul ettiğimizde evrenin en temel gerçeklerinden birini anlayamıyoruz: Evren maddeden oluşuyor, fakat eşit miktarda madde ve antimadde yok.

Simetrinin bozulmasının birkaç farklı açıklaması vardı, bir süre ben de alternatiflerden birini savunmuştum. Fakat milenyumdan sonra ABD ve Japonya'da yapılan başarılı deneyler Kobayashi ve Maskawa'nın haklı olduğunu gösterdi. İkili 2004 yılında Nobel Ödülü'ne layık görüldüler.

Higgs Bozonu Avı

2004 yılına dek Standart Model'in biri dışında tüm özellikleri açığa çıkarılmıştı: Kalan tek şey Higgs parçacığıydı. Sonrasında teorisyenler ve deneycilerin çabaları bu kayıp parçayı bulmak üzerine yoğunlaştı. 1990'da Santa Cruz'daki meslektaşım Howard Haber, Sally Dawson (Brookhaven Ulusal Laboratuvarı), John Gunion (UC Davis) ve Gordon Kane (Michigan Üniversitesi) ile birlikte *Higgs Avcısının Rehberi* adında bir kitap yazdı (kitap isimlendirilirken *Otostopçunun Galaksi Rehberi* kitabına gönderme yapılmıştı). Kitap Higgs parçacığının aranması stratejileri üzerineydi. Higgs'in kütlesine bağlı olarak hızlandırıcılarda hangi mekanizmaların üretileceğinin ve bozunmanın hangi yollarla meydana geleceğinin çok farklı olabileceğini belirttiler.

Parçacık hızlandırıcılarda geçen otuz yılın ardından Higgs'e dair bir işaret bulunamamıştı. 2008'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC: *Large Hadron Collider*) uygulamaya sokulana dek Higgs ile ilgili bilinen tek şey protondan 116 kat daha ağır olduğuydu.

LHC 1980'lerin sonunda, ABD'de o güne dek tasarlanmış en büyük çarpıştırıcı olacak Süper İletken Süper Çarpıştırıcı'yı (SSC: *Superconducting Super Collider*) planladığı zamanda tasarlanmıştı. SSC Teksas'ta, Dallas'a otuz mil uzaklıktaki Waxahachie kasabasına yakın bir yerde inşa edilecekti. Hızlandırıcı yaklaşık 87 km'lik bir çevre uzunluğuna sahip büyük bir halka şeklinde olacaktı. Halka farklı yönlere hareket eden proton

ışınlarının olduğu iki tüpten oluşacaktı. Protonları dairesel yörüngede tutabilmek için büyük mıknatıslar gerekecekti.

Oyuncaklarımızdan ya da buzdolaplarımızdan mıknatıslara aşinayız. Çoğu kalıcı mıknatıstır. Elektronun spininin, spinle orantılı küçük bir manyetik alan oluşturma prensibine bağlıdır. Çoğu atomda elektronların spinleri rastgele yönlü olduğundan birbirlerinin oluşturdukları manyetik alanları sıfırlar. Demir ve diğer birkaç elementte ise spinler belirli bir doğrultuda olma eğilimindedir (aynı zamanda simetri ihlalinin bir başka örneğidir). Doğada da manyetik alanlar oldukça yaygındır ve daha çok elektrik akımından kaynaklanır. Bu tarz manyetik alanlar parçacık hızlandırıcılarının ilk zamanlarından beri çok önemli oldu. Hızlandırıcılar için önemli olan nokta yüklü bir parçacığın manyetik alandan geçerken doğrultusunun yamulmasıdır. Bundan dolayı manyetik alanlar hızlandırıcıda parçacıkları hızlandırmak, hedefi vurmak ve parçacıkların hızlarını ölçmek için kullanılabilir.

Bilim insanları ve mühendisler en güçlü mıknatısları süper iletken maddelerden üretiyor. Evinizde, arabanızda veya iş yerinizde elektrik, elektriği iletebilen maddelerle taşınır. Fakat elektrikli aletleri bir süre kullandıktan sonra ısındığını fark etmişsinizdir. Bunun sebebi *dirençtir*. Maddelerin çoğu elektrik akımına direnir; bakır ve alüminyum iletkenliği yüksek maddelerdir, yani akıma yüksek derecede direnç göstermezler. Ayrıca çok pahalı değiller. 1911'de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes bazı maddelerin *aşırı düşük* sıcaklıklarda elektriğe direnç göstermediklerini keşfetti. Mükemmel iletkenler diyebiliriz. Bu fenomenin arkasında muhteşem bir fizik var ve halen yoğun madde fizikçilerinin önemli bir kısmını meşgul etmeye devam ediyor. Bizim açımızdan önemli olan şeyse *yüksek* akım taşıyabilen süper iletkenlerdir. Elektrik akımının manyetik alan oluş-

turduğunu görmüştük ve bu alan devasa olabilir. Bir hızlandırıcı içinse denge durumu vardır. Ne kadar büyük bir manyetik alan yaratırsanız hızlandırıcınızın halkası o kadar küçük olabilir. Öte yandan süper iletken mıknatısları kullanmanız için gereken maliyet çok yüksektir; hepsinin çok düşük sıcaklıklara dek soğutulması gerekir ve bu soğutma işlemi oldukça pahalıdır, yani SSC fiyat performans dengesi için optimum bir noktadaydı.

1980'lerin sonundan 1990'ların başına dek SSC süreci oldukça hızlı ilerledi. Mıknatıs örnekleri inşa edildi ve testlerden başarıyla geçti. Endüstriyel ölçekte üretim için şemalar hazırlandı. Hızlandırıcının yerleştirileceği devasa tüneller kazılmaya başlandı. Asıl deney için gereken büyük parçacık detektörleri tasarlanmaya ve geliştirilmeye başlandı. Teorisyenler ve deneyciler deneylerden bekledikleri büyük miktarda veriyi nasıl analiz edecekleri üzerine çalıştılar. Teorisyenler beklenen fenomeni karmaşık deney çalışmalarında kaybetmemek için Higgs'den süper simetriye kadar tüm ihtimallere özellikle odaklandılar.

Fakat başından beri SSC'nin geleceğini zora sokan başka meseleler vardı. En önemli mesele maliyetti. Kabaca on milyar dolarlık bir giderden bahsediyoruz. Herhangi bir ülkenin vatandaşlarına saf bilim yapmak için harcanacağını açıklamakta zorlanacağı bir miktar (hızlandırıcı için gereken teknolojinin geliştirilmesinin yararlı olacağına ikna etseniz bile). Çoğu eyalet hızlandırıcıya ev sahipliği yapmak için aday oldu, fakat Teksas seçildikten sonra geriye hızlandırıcı için ekonomik ilgisi azalan 49 eyalet kalmıştı (üreticileri tüm ülkeye dağıtma çabalarına rağmen). Muhtemelen Başkan George H.W. Bush'un Teksaslı olması projenin bir dönem yararına olmuştu. Fakat sonunda içinden çıkılamayan bir problem içerisine girilmişti. Kongre'nin SSC için ilk savı ABD'nin bi-

limsel prestijini artıracak bir *Amerikan projesi* olmasıydı. Fakat giderler daha da büyüyünce bir soru gündeme geldi: Neden daha fazla uluslararası iş birliği yoktu? 1990'ların başında ise yeni bir başkan (entelektüel ilgileri olan biri olsa da) ve daha önemlisi bütçe açıklarına müsamaha göstermeyen bir siyasi ortam vardı. 1993'te Kongre'ye proje konusundaki destek azaldı ve proje iptal oldu. *The West Wing* dizisini izleyenler (ya da izlemek isteyenler) projenin iptalinden ilham alan, 2002'de yayınlanan bir bölümü hatırlayacaktır.

Neyse ki tüm bu SSC planlarından sonra masada bir seçenek daha vardı: Cenevre, İsviçre'deki CERN'de, büyük Avrupa parçacık fiziği laboratuvarında inşa edilmesi planlanan bir hızlandırıcı. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki yıllarda kurulan CERN, bu zor yıllarda Avrupa'da bilim ve teknolojinin canlanmasında büyük rol oynadı. Laboratuvardaki hızlandırıcılarda önemli keşifler yapıldı. W ve Z bozonlarının keşfi kadar QCD ve zayıf etkileşim teorileri üzerine testler yapılmıştı. Son önerilen hızlandırıcı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) ise SSC kadar büyük kapasiteye sahip olmasa da çok daha kısa sürede inşa edilecekti. SSC'nin aktif bir proje olduğu zamanlarda Birleşik Devletler'deki çoğu insan Avrupa'nın planını küçümsüyordu. Öngörülen enerjisi ve diğer özellikleri planlanan SSC'den daha düşüktü. Amerikan fizikçilerin bir kısmı Avrupalıların acele edip işin kolay kısmını yapacağını ve asıl zor kısmı sonrasında SSC'nin yapacağını düşünmüş olabilirler. Fakat SSC'nin iptaliyle her şey değişti. Santa Cruz'daki deneyci arkadaşlarımın SSC detektörlerinde önemli sorumlulukları vardı. SSC'nin iptalinden saatler sonra LHC deneylerinden birine davet edildiler ve hemen odaklarını Cenevre'deki işe yönelttiler. Çalışma azimlerine hayran kalmıştım. Ben olsaydım muhtemelen birkaç ay boşa giden emeğimin yasını tutardım.

LHC de SSC'nin başına gelen iptal tehdidiyle karşı karşıya kalmıştı, fakat hem teknik hem de finansal zorlukların üstesinden gelmeyi başardılar. Birkaç yıl sürmesi planlanan süreç 15 yıl sürmüştü. Yine de sadece Santa Cruz'dakilerin değil tüm meslektaşlarımın sabır ve azmine hayran kalmıştım. Nihayetinde her şey tamamlandı. Gereken mıknatıslar –ve süper iletkenler– geliştirildi, test edildi ve üretildi (binlercesi birkaç farklı ülkede imal edildi). Birçok noktada 150 metreyi geçen derinliğe sahip yirmi yedi kilometrelik tüneller kazıldı. İki devasa detektör inşa edildi. 2008'de her şey hazırdı.

Deneyci olmadığım için bu muhteşem cihazın tüm özelliklerine hâkim değildim. 2005'te Fermilab'ın bir törenine katılmıştım. Bir noktada yönetici laboratuvarın LHC ile olan geniş ortaklığından bahsetti ve makinedeki enerjinin saatte 83 km hızla giden bir uçak gemisinin kinetik enerjisine eşit olduğunu söyledi. O sırada dikkatimi kaybettim –benim pozisyonumdaki biri için doğru bir davranış değildi fakat kendimi tutamadım– ve kurduğu benzetmeyi kontrol ederek doğru olduğunu anladım. Neredeyse bir arabanın otoyolda ilerlediği hızda ilerleyen bir uçak gemisindeki kötü adamın ve onu durdurmaya çalışan bir süper kahramanın olduğu bir bilimkurgu filmi hayal ettim. Bayağı korkutucuydu.

Tüm bekleyişin ardından LHC zayıf bir başlangıç yaptı. Birkaç hafta içinde bir kaza oldu ve bir elektrik hatası mıknatısların bazılarının ısınıp "normalleşme"sine (süper iletkenliğin kaybolmasına) yol açtı. Süper iletken mıknatısların dünyası için bu bir kıyamet senaryosuydu. Mıknatıslardaki elektrik akımında yüksek miktarda enerji birikti ve manyetik alanlarının bir anda ısıya dönmesine neden oldu. Bu benim için tam bir bilimkurgu felaketi senaryosuydu, makineleri gerçek zamanlı kontrol eden sistemler fazla enerjiyi atmaya

ve makineyi kurtarmaya çalışıyordu. Neyse ki LHC kurtartıldı fakat tamamının kapatılması gerekti. Yüzlerce mıknatısın değiştirilmesi gerekmişti. Böyle bir felaketin tekrar yaşanmaması için sistem iyileştirildi. Tüm bu süreç iki yıl sürdü. Bozulma korumalı cihazlar kullanıldı ve ilk planın artık güvenli olmadığı düşünüldüğünden makine bir süre tasarlananın yarı enerjisinde çalıştırıldı.

Makine tekrar çalıştırıldığında hızlandırıcı operatörlerinin ne kadar dikkatli olduğunu hayal edebiliyorsunuzdur. Fakat bu kez işler farklıydı. LHC güzel bir şekilde çalışmıştı. Takip eden iki yılda Higgs bozonunun protonun mc^2 enerjisinin 125 katı civarında olduğuna dair ipuçları elde edildi. Sonunda 4 Temmuz 2012'de, Higgs'e dair sanal istatistiksel kesinliğe ulaşıldı ve keşfin resmî duyurusu yapıldı.

Peki deneyler aslında ne yapmıştı? Tam anlamıyla trilyonlarca proton çarpışması gerçekleştirilmişti. İki proton LHC'de buluştuklarında bir protonun 8.000 mc^2 enerjisine sahip oluyordu; yani 8.000 proton üretmeye yetecek enerjiye! Aslında her çarpışmada birkaç yüz farklı tipte parçacık üretilmişti. İki büyük detektör ATLAS ve CMS oluşan parçacıkların özelliklerini ölçmüştü. Devasa cihazlardı (ATLAS 7.000 ton, CMS 14.000 tondu), öte yandan ince bir şekilde tasarlanmışlardı. Oluşan parçacıkların neredeyse tüm özelliklerini; enerjilerini, momentumlarını, yüklerini ve en önemlisi, ne olduklarını tayin edebiliyorlardı. Aslında her saniyede birçok çarpışma oluyordu (yaklaşık bir trilyon) ve detektörler her birinde kaydedilmesi imkânsız miktarda veri topluyordu. Bundan dolayı bilgisayarlar Higgs veya başka bir yeni fenomeni ortaya çıkaracak bilgileri seçiyordu (seçmeye devam ediyor). Sadece 10 milyonda bir veri kaydediliyordu. Buna rağmen 15 petabyte veri depolanmıştı (15 milyon gigabyte, yarım milyon laptopu dolduracak kadar ya da Kongre

Kütüphanesi'nin 1.000 katı kadar veri). Bu samanlıkta Higgs'i nasıl bulabilirdiniz? 10 milyar çarpışmadan ancak biri Higgs parçacığını oluşturuyordu. O kadar büyük bir sayı ki, eğer her bir çarpışmanın sonuçlarını bir saniyede kontrol etseniz Higgs bozonunu oluşturan üç çarpışmayı bulmanız bin sene sürerdi. Higgs parçacığını bulsanız bile kendini belli etmezdi. Higgs son derece radyoaktif bir parçacıktır, yani üretildikten sonra yalnızca 10^{-25} saniye içerisinde, bir saniyenin milyarda milyarda milyonda biri kadar sürede radyoaktif bozunmaya uğrar. En hızlı elektronik cihazların bile direkt tespit edebilmesi için çok kısa bir süredir. Fakat ipucu bozunma ürünleriydi. Bu da belirsizlik ilkesinin bir tür uygulamasıydı. Higgs parçacığının enerjisini tespit edebileceğiniz limiti (veride görecek kadar) kararsız parçacığın yaşam süresi belirliyordu.

Doğa Higgs'in tespiti için daha farklı zorluklar da çıkarmıştı. Higgs bozunmalarının büyük bir çoğunluğu belli bir kuarkı, alt kuarkı (b kuarkı) oluşturur. Fakat alt kuarklar hızlandırıcılarda birçok farklı şekilde üretilebilir, yani Higgs bozunmasının ürünleriyle karıştırılabilir. Bunun yerine deneylerde ilk olarak nadir bir bozunma türü, bir çift yüksek enerjili gamma ışının üretildiği bozunma arandı. Bu ışınlar da hızlandırıcılarda farklı şekillerde üretilebilir, fakat diğer süreçler teorisyenler tarafından net bir şekilde ayıklanabilir (başlı başına büyük bir iştir). Higgs'in 100 GeV ve üzerinde olduğu biliniyordu, bu enerjilerde foton çiftlerinin tespiti hedeflenebilirdi. Yapılan deneyler Higgs parçacığına dair ilk kanıtı tam da bu şekilde buldu.

İlk açıklamanın ardından daha da iyi kanıtlar elde edildi. Higgs'in diğer bozunmaları tespit edildi ve tüm bozunmalar Standart Model'in en basit versiyonunda beklenenlerle uyumluydu. Atom çekirdeğinden 10.000 kat küçük ölçek-

lerde doğa yasalarının nasıl işlediğini öğrenmiş olabilirdik. LHC'de ve Japonya, Çin, CERN'deki diğer makinelerde yapılması planlanan deneysel çalışmalar Standart Model'in öngördüğü özelliklerle Higgs'in özellikleri arasında çelişen noktaların açıklanmasını sağlayabilir, fakat Standart Model'in parçacık fiziğiyle çalışılabileceği noktanın sonuna gelmiş olabiliriz.

BÖLÜM 7
YILDIZLAR

Bazı fizikçiler meşhur isimler olabiliyorken bazıları büyük başarılar elde etmesine rağmen olamıyor. Bir önceki bölümde bahsi geçen Hans Bethe ise şöhret elde edebilen isimlerden biriydi, yirminci yüzyılın en büyük teorik fizikçilerinden biri olarak biliniyordu. 1906'da Almanya'da doğan Bethe'nin yetenekleri çocukken fark edilmişti. Annesi Yahudi olduğundan, 1933'te Naziler yönetime geldiğinde hayatları tehlikeye girmişti. İngiltere ve İtalya'da geçirdiği bir dönemin ardından 1935'te Birleşik Devletler'e gitti ve kariyerinin büyük bir kısmını Cornell Üniversitesi'nde geçirdi. Kuantum elektrodinamiği üzerine olan çalışmalarının bir kısmından bahsetmiştik. Atomların ve atom çekirdeklerinin fiziğini anlamamızda birçok katkısı oldu. İkinci Dünya Savaşı sırasında Los Alamos'ta atom bombası üzerine çalışan teorisyenlerin liderliğini yürüttü. Savaştan sonra ise silahlanma kontrolünün ve enerji politikalarının önde savunucularından biri haline geldi. Doksanlarına kadar çalışmaya devam etti. Hayatının sonuna dek astrofizik ve nötrinolar üzerine tutkuyla ve o güzel konuşmasıyla verdiği seminerlerden birine katılma şansına erişmiştim. Bet-

he, evreni anlamamız konusunda çok önemli bir adım atmıştı: Yıldızların nasıl çalıştığını açıkladı. Atom çekirdeğinin ve nükleer reaksiyonlardaki devasa enerjinin keşfine dek güneş ve yıldızlar birer gizem öğesiydi. Eğer sıradan kimyasal reaksiyonlarla çalışıyorlarsa tüm yakıtlarını binlerce yıl içinde bitirmeleri gerekirdi fakat milyarlarca yıl yaşıyorlardı. Nükleer reaksiyonlar kimyasal reaksiyonlara göre milyonlarca kat enerji üretir, aradaki farkın sebebi bu olabilirdi. Bunu fark eden kişi Bethe'ydi, nükleer reaksiyonlarla güneş ve yıldızların enerjisini tek bir resimde topladı. Yıldızları anlamamıza yönelik çabalarından ötürü 1967'de Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

Bundan sonra gökbilimciler yıldızların nasıl doğduğu, yandığı ve öldüğüne dair bir tasvir yapabildiler. Yıldızlar büyük hidrojen bulutlarının çok daha küçük bir alana çöküp yoğunlaşmasından meydana gelir. Maddenin kütleçekim kuvvetleriyle çok yüksek düzeyde sıkışması çok yüksek sıcaklıklara dek ısınmasını sağlar. İçerisi o kadar sıcak olur ki, hidrojen çekirdeklerinin bir kısmı çarpışıp nükleer reaksiyona girer ve yüksek miktarda enerjiyle birlikte daha ağır elementleri oluşturur. Bir yıldızın yanması milyarlarca yıl sürer. Sonunda yakıtı bittiğinde yıldız kütleçekim kuvvetine dayanamaz hale gelir ve çöker. Yıldızlar kütlelerine göre farklı final formlarına sahip olur. Güneşimiz *kırmızı dev* olarak geçirdiği periyodun ardından çökerek yoğun, Dünya boyutunda, yanmayan bir *beyaz cüce*ye dönüşecek. Daha büyük yıldızlar çöktükten sonra süpernova patlamasına uğrar, maddesinin büyük bir kısmını uzaya saçar ve geriye bir nötron yıldızı veya bir kara delik kalır. Saçılan maddeler diğer yıldızlar veya gezegenlerin oluşması için yapı taşı görevi görür. Bu elementlerden karbon, azot, oksijen ve demir yaşam için gerekli elementlerdendir. Tüm bu güzel hikâye astronomideki devasa veri setiyle

oldukça tutarlı. Fakat söz konusu yıldızların içinde yaşanan aksiyonlar olduğunda gözümüzle göremiyoruz. Yoksa görebilir miyiz? Burada hikâyemize ünlü bilim insanı John Bahcall dahil oluyor.

2016'da Salt Lake City'deki Amerikan Fizik Birliği toplantısına katıldım. Sonraki bölümlerde göreceğimiz yakın arkadaşım Ed Witten'ın birliğin ilk kez verilecek olan, kendisini aday gösterdiğim Özel Araştırma Başarısı Madalyası'nı alacağı töreni izlemeye gelmiştim. Toplantıdaki en özel anlardan biri Princeton Üniversitesi'nden astronomi profesörü Neta Bahcall'ın konuşmasıydı. Konuşması vefat etmiş olan eşi, teorik fizikçi ve gökbilimci John Bahcall hakkındaydı. Çok tatlı bir aşk hikâyesiydi ve John'un Nobel Ödülü kazanmamasının hayal kırıklığı vardı. Çoğu fizikçi alması gerektiğine inanıyordu.

Bahcall'ın birçok başarısı bulunuyordu fakat en önemlileri şu sorulara odaklanıyordu: Güneşimiz tam olarak nasıl çalışıyor? Bunu *deneysel* olarak nasıl anlayabiliriz? Bahcall ilk soru için Bethe ve diğerlerinin fikirlerini aldı ve Güneş'in iç sıcaklığını tahmin ederek (15 milyon Kelvin ya ad $1,5 \times 10^7$ Kelvin) çok detaylı bir model oluşturdu.

İkinci soru için Güneş'in yüzeyinde kolayca yapabildiğimiz gözlemlerden elde ettiğimiz bilgiler vardı. Modellerin sıcaklığa, güneş lekelerine ve güneş depremlerine göre öngörüleri test edilebilir (heliosismoloji –Dünya'daki sismolojinin Güneş'teki versiyonu– Bahcall'ın ilgi alanıydı). Fakat Güneş'in içini göremiyoruz, daha uzaktaki bir yıldızı görmekse daha da zor. Güneş'in içerisi o kadar sıcak ve yoğundur ki ışık –enerjili fotonlar– dışarı çıkamaz. Güneş'in içerisinde üretilen fotonlar çok sık bir şekilde elektronlar ve atom çekirdekleriyle çarpışır. Fakat fotonlar Güneş'in içerisinde üretildikten ancak milyonlarca yıl sonra, sarhoş birinin yürüyüşüne benzer bir şekilde salınır. Uzayda Dünya'ya olan yolculuklarına çık-

tıkları zamanda ise ilk üretildiklerindeki enerjinin sadece çok küçük bir kısmına sahip olurlar.

Ancak Bahcall Güneş'in çekirdeğini çalışmanın başka bir yolunu daha fark etmişti. Güneş ve diğer yıldızlardaki nükleer reaksiyonlar fotonlardan çok daha farklı olan nötrinoları da üretiyordu. Sıradan maddeyle son derece zayıf bir şekilde etkileşirler. Bahcall bundan dolayı Güneş'te üretilen nötrinoların neredeyse tamamının kaçacağını fark etti. Çoğu üretildikten sadece sekiz dakika sonra Dünya'ya çarpacaktı. Öyleyse yeni bir soru doğmuştu: Eğer nötrinoları tespit edebileceksek ne kadarını "görme"yi bekleyecektik? Bahcall bugün *standart Güneş modeli* adını verdiğimiz modeliyle Güneş'ten her saniye gelecek nötrino sayısını ve parçacıkların enerjilerini tahmin etti. Peki, nasıl tespit edecektik? Bahcall eğer yoğun malzemeye sahip bir detektör inşa edersek nötrinoların büyük bir çoğunluğunun içinden geçeceğini, fakat en azından birinin duracağını ortaya sürdü. Atomlardan –ya da atom çekirdeklerinden– oluşan bir malzeme düşünün. Nötrinonun bir klor çekirdeğine çarpması bir simya oluşturabilir. Bu deneylerin hedefi olan klor 17 proton ve 20 nötrondan oluşur. Nötrona çarpan bir nötrino bir proton ve bir elektronun oluşmasına sebep olur, bunun sonucunda oluşan argon çekirdeği de 18 proton ve 19 nötrona sahiptir. Argon ise radyoaktiftir ve yarılanma ömrü 35 gündür.

Bahcall, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'ndan kimyacı Ray Davis ile iş birliği yaptı. Davis detektör olarak temizlik sıvısıyla dolu bir tank tasarladı (temizlik sıvısı olarak kullanılan karbon tetraklorür molekülü bir karbon ve dört klor atomundan oluşur). Tankın birkaç haftada bir boşaltılıp argon çekirdeği bozunmasının takip edileceği bir protokol oluşturdu.

Radyoaktivite korkunçtur, fakat diğer zehirlerle karşılaştırıldığında tespit edilmesi daha kolaydır. Radyoaktivite temel-

de yüklü parçacıkların hızlı bir şekilde salınmasıyla meydana gelir. Bu tarz parçacıklar maddenin içinden geçerken elektronların atomlardan kopmasına sebep olur. Oluşan iyonlar elektronik cihazlarla takip edilebilir. Radyoaktivite için en ünlü olanı Geiger sayacıdır. LHC ve iki detektörü bu cihazların *çok büyük* versiyonlarıdır. Davis'in metodunda da argon radyoaktivitesi ölçülecekti.

Bahcall ve Davis çalışmalarına Güneş veya diğer yıldızlardan gelen ışığın yerine nötrinoların gözleneceği yeni bir tip gözlemevi gibi yaklaştılar. Deneylerini yerin derinliklerine gerçekleştirmeleri gerektiğini fark ettiler. Yoksa uzaydan gelen kozmik ışınlar ve diğer etkiler ikilinin saymayı hedeflediği nötrino etkisini taklit edebilirdi. Davis tankını Homestake Madencilik'in yerin yaklaşık 1.500 metre altında bulunan altın madenine yerleştirdi. Davis-Bahcall iş birliği yıllarca sürdü. Davis nötrino etkileşimlerinin oranını sürekli Bahcall'ın tahmininin üçte biri miktarında buluyordu. Çoğu kimse –ben de dahil– ölçümlerin bize ilgi çekici bir şey söylediği konusunda kuşkuluyduk. Belki de Bahcall'ın hesaplamaları güvenilir değildi. Güneş'in içerisindeki sıcaklığa dair yapacağı çok küçük bir hata bu çelişkinin sebebi olabilirdi. Deneyin kendisinde de bir sorun olabilirdi.

Fakat Bahcall hesaplamalarını kontrol etmeyi ve düzeltmeyi; buradaki belirsizliklerin nötrino eksikliğine sebep olmadığı konusunda ısrarını sürdürdü. Davis deneylerini birçok açıdan kontrol etti, grubunun dışından olan fizikçiler gelip tekniğini inceledi ve kimse sistematik bir problem bulamadı. Zamanla bu soruya olan ilgi büyüdü, farklı deney fikirleri ortaya atıldı ve gerçekleştirildi. Bu deneyler Davis'in deneyinden farklı enerjiye sahip nötrinolara, yani Güneş'te gerçekleşen farklı süreçlere hassastı. Muhtemel sistematik hataların çözünmesine yardımcı olabilirdi.

Bu sırada bir grup fizikçi başka bir olasılığı incelemeye başlamıştı. Belki de Davis deneylerindeki problem Güneş değil, nötrino anlayışımızdaydı. Nötrinolar üç şekilde geliyordu. Elektronun partneri olan bir nötrino, v_e; müonun partneri olan bir nötrino, v_μ; ve taunun partneri olan bir nötrino bulunuyordu. Hepsi de elektrondan çok daha hafifti. Davis deneyinin yapıldığı sıralarda çoğu fizikçi nötrinoların fotonlar gibi kütlesiz olduğunu düşünüyordu. Fakat küçük bir kütleleri varsa kuantum mekaniğinden dolayı yeni bir ihtimal doğuyordu. Kuantum mekaniği bir parçacığın aynı anda hem konumunun hem de hızının bilinmesine izin vermediğinden nötrinoların kütlesi olması durumunda üç tip nötrinodan hangisini bulduğunuzu söyleyemezdiniz. Belki de elektronun partneri olan nötrinolar Güneş'ten çıktıktan sonra yolda diğer nötrino türlerine dönüşüyor, Davis'in deneylerinde de bundan dolayı tespit edilemiyor olabilirdi.

Benim gibi kuşkucular için kabullenmesi zor bir durumdu. Nötrinonun bir kütlesinin (ve "osilasyon"unun) olması şaşırtıcı bir durum değildi. Fakat nötrinoların kütlelerinin daha kısa veya uzun mesafelerin aksine Dünya'ya kat edilen yoldaki osilasyonun aralığında olması gerekiyordu. Sanki bir güç Davis'in deneyini bozmak için komplo kuruyordu. Davis'in sonuçlarından ilham alan diğer deneylerde de nötrinonun kütlesiyle açıklanabilecek çelişkiler bulunmuştu.

Fakat bu noktada nötrinolarla ilgili başka bir anomali ortaya çıkmıştı. Güneş'ten gelen nötrinolara ek olarak kozmik ışınlarla da Dünya'ya nötrino taşınır. Kozmik ışınlar derin uzayda (çoğunluğu diğer galaksiler) üretilen yüksek enerjili parçacıklardan oluşur. Parçacıklar çoğunlukla protonlar olsa da daha ağır çekirdekler ve fotonlar da içerir. Çekirdek üst atmosfere girdiğinde nötrinoların da üretildiği nükleer reaksiyonlara uğrar. Bu nötrinolar çoğunlukla müon tipindedir

ve Güneş'ten gelen nötrinolardan çok daha yüksek enerjiye sahiptir.

Atmosferik nötrino akışını çalışan nötrino deneyleri de gerçekleştirildi. Aralarında Japonya'daki Ikeno Dağı'nın altında bulunan madende gerçekleştirilen Süper Kamiokande deneyi de bulunuyordu. Bu detektör de müon nötrinoların sayısını eksik bulmuştu! Bir kuşkucu için bunu kabullenmek *gerçekten* çok zordu. Ölçek artık 160 milyon kilometredense 160 kilometreydi, farklı nötrinolar ve farklı enerjiler çalışılıyordu. Şimdi iki farklı komplo gerekiyor gibi görünüyordu. Artık Güneş'ten gelen nötrinoyu doğru anlamadığımız ve fizikçilerin kozmik ışınlardan gelmesini beklediğimiz sayıyı doğru hesaplamadıklarını düşünmek daha kolaydı. Fakat ilerleyen zamanlarda yapılan deneyler nötrino kütlesinin ve osilasyonunun daha güçlü kanıtları oldular. Japonya'da yapılan iki önemli deney daha vardı. Kamland adı verilen deney ülkedeki nükleer reaktörlerden salınan nötrinoları incelemişti. Reaktörlerin içi iyi bir şekilde biliniyordu, reaktörlerden salınan nötrinoların sayısı ve enerjisi kolayca hesaplanabilirdi. Sonuçlar osilasyon hipotezini destekledi (Fukuşima faciası önemli veri sağlamış oldu, bu reaktörün toplam Japon nötrino akışı veri setinden çıkmasının ardından yine beklenen değerler elde edilmişti). Bir diğer deney ise Kamiokande madeninde (KEK) Tokyo yakınlarındaki bir hızlandırıcının ürettiği nötrino ışınlarını çalışmıştı. Deney K2K olarak adlandırıldı. Sonuçlar yine nötrinoların kütlesi olduğu hipotezini destekliyordu.

Son adım Kanada'da Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde (SNO: *Sudbury Neutrino Observatory*), yapılan deneyde atıldı. Deney çok derin bir nikel madeninde gerçekleştirildi. Farklı bir strateji kullanıldı. Diğer tüm deneyler bir parçacığın yük değiştirdiği nötrino etkileşimlerini incelemişti. Örneğin pro-

ton nötrona, nötron da elektrona dönüşüyordu. Fakat elektrik yükünün değişmediği, nötrinoların ya da diğer parçacıkların başka bir parçacığa dönüşmediği nötrino etkileşimleri de vardı. Bu reaksiyonları tespit etmenin büyük zorlukları vardı, fakat önemli olan tüm nötrino tiplerinin aynı oranda etkileşiyor olmasıydı. Yolda osilasyona uğrasalar bile Güneş'ten gelen (veya üst atmosferde oluşan) tüm nötrinolar aynı sayıda etkileşim göstermeliydi. Bundan dolayı nötrino sayısı Bahcall'ın ilk tahmin ettiği kadar olmalıydı. SNO deneyi muhteşem bir şekilde durumun tam da böyle olduğunu gösterdi.

Bugün nötrinonun birçok özelliğiyle ilgili iyi ölçümlerimiz var. Son zamanlarda Çin'deki Daya Körfezi'ndeki (Güney Çin Denizi'nde bulunan bir körfez) reaktörün yakınlarında yapılan uluslararası iş birliğinden (Çin ve ABD) önemli sonuçlar elde edildi. Bu alanın gelişmeye devam edeceğine ve Birleşik Devletler Enerji Bakanlığı'nın Yüksek Enerji Fiziği Programı'nın önemli bir kısmını oluşturacağına şüphe yok.

Bahcall ve Davis iş birliği ısrarlı ve dikkatli çalışmanın, kolay yoldan kaçmayı reddetmenin ve şaşırtıcı sonuçlar konusunda ısrar etmenin muhteşem bir hikâyesi. Ray Davis 2002 yılında Nobel Ödülü'nü kazandı. Fakat Bahcall ödüle layık görülmedi. Birçok iddia ortaya atıldı fakat Nobel Komitesi'nin iç çalışmaları kamuya duyurulmuyor. Davis'in ödülü kazanmasının ardından İleri Araştırmalar Enstitüsü'nü ziyaret ettim. Bir akşam o zamanlar sekiz yaşında olan kızım Shifrah ile ortak alanda otururken John yanımıza gelmişti.

Bilim, ailelerimiz ve diğer şeyler hakkında keyifli bir sohbet ettik. Sonrasında Shifrah'a Bahcall ve Davis'in ve ödülün hikâyesini anlattım. Sekiz yaşında bir çocuğa göre çok sinirlenmişti. Sonrasında fizik lisansı yaptığı sıralarda nötrinonun kütlesinin keşfi konusunda bir makale yazdı. Bir sabah araba ekibimle işe giderken 2015 Nobel Ödülü'nün Süper Kamio-

kande ve SNO deneycilerinin (iş birliğinin önderleri Japonya'dan Takaaki Kajita ve Kanada'dan Arthur B. McDonald) nötrino osilasyonu keşfine gittiğini öğrendim. Hemen dizüstü bilgisayarımı çıkardım ve Shifrah'ın makalesindeki şekil ve grafikleri kullanarak sınıfıma ödülün önemini açıklamak adına bir sunum hazırlamaya başladım. Bahcall 2005'te hayata gözlerini yumdu. Başarıları birçok yönden onurlandırıldı, kızımın nötrinolara ilgi duymasını sağladı. Yine de Nobel Ödülü kazanmamış olması Neta Bahcall ve John'un birçok arkadaşının üzülmesine yol açıyor.

Nötrinoların bu kadar küçük bir boyutta –atom çekirdeğinden muhtemelen 100 trilyon, 10^{14} kat daha küçük– nasıl kütleye sahip oldukları bilinmiyor. Fakat bu küçük parçacıkla ilgili sorular aynı zamanda kozmik seviyedeki fenomenlerin anlaşılması için umut barındırıyor. Artık kitabın bir sonraki kısmına geçiyoruz. Şu ana kadar cevaplarını bildiğimiz ya da bildiğimizi düşündüğümüz sorulara odaklandık. Şimdi haritası çizilmemiş dünyalara –hararetli sorularımızın ve tartışmalarımızın olduğu, bazılarının deneysel testlere uygun olduğu alanlara– yelken açmak üzereyiz. Bir sonraki bölümde nötrinoların (ve onlara kütle veren süreçlerin) maddenin bildiğimiz şekilde var olmasından sorumlu olabileceğini göreceğiz. Eğer öyleyse çok erken bir süreçte, büyük patlamadan 10^{-37} saniye sonra (bir saniyenin yaklaşık trilyonda, trilyonda, trilyonda biri) olmuş olmalı. Diğer sorularımız için bilim şimdilik bilinmez durumda.

ÜÇÜNCÜ ADIM

BÖLÜM 8

NEDEN HİÇLİK YERİNE BİR ŞEYLER VAR?

Dirac'ın elektron kuantum teorisini Einstein'ın özel görelilik ilkeleriyle birleştirmeye çalışırken antimaddeyi tesadüfen bulduğunu görmüştük. Öngördüğü maddenin kütlesi elektronla tam olarak aynıydı fakat ters elektrik yüküne sahipti. Yakın bir zaman sonra bunun genel bir sonuç olduğu anlaşıldı. Yüklü her parçacık için ters yüke, fakat aynı kütleye sahip bir antiparçacık bulunuyordu. Antielektron –pozitron– Dirac'ın teorik düşünceleriyle neredeyse aynı zamanda tespit edilmişti. Antiproton 1955'te Berkeley'de büyük hızlandırıcıların kurulmasıyla keşfedildi. Sonrasında süreci diğer parçacıkların keşfi takip etti. Nötr parçacıkların bile antiparçacıkları bulunmuştu. Antinötron ve antinötrino buna örnekti. Antinötron nötronla aynı elektrik yüküne sahip olsa da nötrondan bozunma reaksiyonlarıyla ayırt edilebiliyor. Nötronun bir proton, bir elektron ve bir antinötrinoya bozunduğunu hatırlarsınız, antinötron da bir antiproton, bir pozitron ve bir nötrinoya bozunur. Ayrıca bir antinötron nötronla çarpışırsa maddenin diğer formları ve enerji üretilir.

Yirminci yüzyılın sonlarında antimadde kavramına aşinaydık. Tüm parçacıkların antiparçacıkları hızlandırıcılarda üretilmişti. Stanford ve CERN'de Z^0 gibi parçacıkların çalışıldığı deneylerde antielektron ışınları elektronlarla çarpıştırılmıştı. CERN ve Fermilab'da W, Z^0 ve üst kuarkın keşfedildiği deneylerde antiproton ve proton çarpışmaları önemli rol oynadı.

Öte yandan deneyimlerimize göre içinde yaşadığımız evren antimaddeden ziyade tamamen maddeden oluşmuş gibi görünüyor. Antimaddeden oluşan kayaların, gezegenlerin, yıldızların hatta galaksilerin çarpışmasının bir felaket senaryosu olacağı çok açık. Belki de evrenin büyüklüğünü düşündüğümüzde durum farklıdır. Elbette her gün bu korkuyla uyanmıyoruz. Fakat antimadde ile ilgili biraz bilgi sahibi olduğunuzda senaryo mantıklı bir hale geliyor. Galaksimizde antimadde yıldızları olduğunu farz edelim. Sadece bakarak ayırt edemeyeceğiz, çünkü yaydıkları ışık sıradan yıldızlarla çok benzer –hatta aynı– olacak. Fakat maddesel bir yıldız antimadde yıldızıyla çarpıştığında (ya da yakınından geçtiğinde bile) meydana gelecek patlama devasa olacak. Bir antimadde yıldızı maddesel bir toz bulutundan (gökbilimciler uzayda serbest halde bulunan hidrojen ve benzeri atomlara toz adını verir) geçtiğinde bile çok sayıda yüksek enerjili gamma ışını üretilecek. Bu düşünceler astrofizikçilerin gözlemlenebilir evrendeki antimadde miktarına bir sınır getirmesini sağlıyor; yani cevapları antimaddenin o kadar fazla olamayacağı yönünde.

Aslında evrende bugün bulunan madde miktarını toplam proton ve nötron sayısını kozmik mikrodalga radyasyonundaki foton sayısıyla karşılaştırarak bulabiliriz. Evrenin bir metre küpünde ortalama yarım milyar mikrodalga fotonu bulunuyor. Aynı hacimde proton ya da nötron bulma ihtima-

liniz ise %10'dan daha az. Başka bir deyişle, bulduğunuz her fotona karşılık bir proton ya da nötron (bir "baryon") bulma şansınız 10 milyarda birdir. Ülkenizin piyangosunu kazanma ihtimalinizden bile daha düşük. Bu 10^{-10}'luk oran iyi hesaplanmıştır ve "foton başına baryon oranı" olarak bilinir. Bu sayının zamanla değişmediği, en azından çok erken vakitlerden beri aynı olduğu anlaşıldı. Fotona karşılık gelen madde miktarının bu kadar az olması bir açıklama bekliyor. Eğer çılgın bir tahmin yapmak gerekirse baryon ve foton miktarlarının aynı olması gerektiği ya da baryonların hiç olmaması gerektiği söylenebilir.

Standart kozmoloji bilgimize göre evren büyük patlamadan çok kısa süre sonra bugünkünden çok daha sıcaktı. Yüksek sıcaklığın daha yüksek enerjili parçacıklar anlamına geldiğini hatırlayın. Yeterince sıcak olduğunda $E=mc^2$ denklemine göre sıradan bir parçacık o kadar yüksek enerjiye sahip olur ki enerjinin bir kısmı kütleye, bir proton ve antiprotona ya da bir nötron ve antinötrona dönüşür. Evren on binde bir saniye (10^{-4} saniye) yaşındayken durum bu şekildeydi. Başka bir deyişle, parçacık ve antiparçacık sayısı hem birbiriyle hem de foton sayısı ile aynı olmalıydı. Saatlerimizi ileri aldığımızda ise baryon ve antibaryon sayısı tam aynı ise birbirlerini yok edecekler ve arkalarında sadece fotonları bırakacaklardı. O zaman da yıldızları, galaksileri, gezegenleri ve insanları oluşturacak proton ve nötron olmazdı. Fakat bugünkü evrene baktığımızda madde miktarının antimadde miktarından, on milyar mikrodalga fotonuna bir tane proton, nötron ya da elektron olacak şekilde fazla olmuş olması gerekiyor.

Bu şekilde düşündüğümüzde evren çok az miktarda madde içerirken neredeyse hiç antimadde içermiyor. Kozmologlar maddenin fazlalığını madde-antimadde asimetrisi olarak adlandırıyor, işte 10'un üslerinin doğadaki ilginç belirmele-

rinden biri daha. Toplam baryon sayısı –proton artı nötron– toplam foton sayısının 10^{10}'da biri.

Bunun ne kadar garip olduğunu anlatmak için doğa yasalarındaki simetriye dönmemiz gerekiyor. Burada iki tanesi önemli rol oynuyor. İlki parçacık ve antiparçacıklar arasındaki simetri; tam olarak aynı kütleye ve karşıt elektrik yüküne sahipler. Kuantum mekaniği ve Einstein'ın özel göreliliğinin temel ilkelerinden ortaya çıkan bir özellik. Eğer parçacıklar ve antiparçacıkları her yönden aynı olsalardı evrende neden parçacık miktarının antiparçacıktan fazla olduğunu bilimsel olarak açıklamak çok zor olurdu. Evrenin daha üst bir güç tarafından bu şekilde yaratıldığını söyleyip işin içinden çıkardık. Bu güç, evrenin insanlar için yaşanabilir bir yer olmasını sağlamak adına doğru madde miktarını koymuştu. Bugün herhangi bir dine inanan bilim insanları bile böyle bir açıklamadan tatmin olmuyor.

Fizikçiler parçacıklar ve antiparçacıkları arasındaki simetriye CP simetrisi adını veriyor. Kuantum mekaniği ve özel göreliliğin genel ilkelerine göre daha önceden tartıştığımız zaman tersinirliği şeklinde işliyor. Fakat parçacıklar ve antiparçacıkların tam olarak aynı kütleye sahip olması gerekirken diğer parçacıklarla etkileşme şekilleri –örneğin çarpışma sıklıkları– aynı olmasına gerek olmadığını gösteriyor. Standart Model'de parçacıklar ve antiparçacıkları arasında *neredeyse* tam bir simetri bulunur. Zayıf etkileşimle ilgili öğrendiklerimize baktığımızda deneylerde gözlemlenenler arasında küçük farklılıklar olduğunu ve bunun üçüncü nesil kuark ve leptonları (alt ve üst kuarklar, tau leptonu ve onunla ilgili nötrino) açıklamada kritik bir rol oynadığını öğrenmiştik.

Lisede kimya dersi aldığım zamanlarda korunma yasalarını öğrenmiştik. Bunlardan biri kütlenin korunumuydu. Sınıfta yaptığımız deneyler için kullanışlı bir yasa olsa da Einstein

sayesinde değişmez bir yasa olmadığını öğrendik: Kütle diğer enerji formlarına dönüşebilir veya onlardan oluşabilir. Öğretmenimin anlattığı daha çok yönlü versiyon *maddenin korunumu*ydu. Nükleer reaksiyonlarda protonlar nötronlara dönüşebilir veya tam tersi olabilir. Fakat bir nükleer reaksiyondaki proton ve nötronun toplam sayısı hep aynı kalır. Antiprotonlar ve antinötronları göz önüne aldığımızda durumu genelleştirmemiz gerekiyor. Örneğin bir foton çifti çarpıştıklarında bir proton ve antiproton üretebilir; yani toplam parçacık sayısının (proton artı nötron) *eksi* antiparçacık sayısının (antiproton artı antinötron) çarpışmadan önce ve sonra aynı kalacağını söyleyebiliriz. Fizikçiler bu duruma *baryon sayısının korunumu* adını veriyor. Kural Standart Model'de neredeyse tamamen aynı şekilde geçerli. Eğer bu doğada da bu şekildeyse ve evrenin ilk zamanlarında belirli bir baryon sayısına sahipsek bugün değişmemiş olmalıdır. Eğer hiç yoktuysa bugün de olmamalıdır. Yine Tanrı'ya bağlama tehlikesiyle karşı karşıyayız.

Andrei Sakharov önemli bir bilim insanı ve eski Sovyetler Birliği'ndeki aykırı seslerden biriydi. 1921'de doğan Sakharov, 1950'lerde Sovyet hidrojen bombasının geliştirilmesinde kritik bir rol oynadı. 1960'larda komünist rejim eleştirilerinde önemli bir figür oldu. Sovyetler Birliği için şöyle demişti: "Devletimiz mesihçi ve yayılmacı politikasıyla, farklı sesler üzerindeki totaliter baskısıyla, gücün otorite sahibi olduğu yapısıyla, iç ve dış politikada alınan kararlarda halkın fikrini önemsememesiyle vatandaşlarını önemli hiçbir konuda bilgilendirmeyen, seyahat özgürlüğünü ve bilgi paylaşımını kısıtlamasıyla dış dünyaya tamamen kapalı bir kanser hücresi gibi." İnsan hakları ve silahlanma kontrolü üzerine yaptığı çalışmalarıyla 1975'te Nobel Barış Ödülü'ne layık görüldü. 1980'de ülke içinde sürgüne gönderildi, 1988'de hayata gözlerini yumdu.

1965'e, zaman tersinirliğinin (CP) ihlalinin keşfinden hemen sonrasına dönelim. Sakharov bunun evrende maddenin nasıl yaratıldığına dair bir ipucu olabileceğini fark etmişti. Başlangıçta eşit miktarda madde ve antimaddeye sahip olan evrenin böyle bir asimetri geliştirmesi için doğa yasalarının altında yatması gereken üç özellik öne sürdü. Gerekliliklerden ikisi şu ana dek karşımıza çıktı: CP korunumunun ihlali ve baryon sayısının korunumu. Üçüncüsü ise zamanla ilgiliydi: Bir yönü olmalıydı. Zamanda ileri ve geri gitmenin arasında belirgin bir fark olmalıydı. Günlük hayatımızda zamanın yönlülüğünü belki de biraz melankolik bir şekilde anlamış durumdayız. Yaşlanıyoruz ve vücudumuz yıpranıyor. Evimizdeki ve iş yerimizdeki cihazlar zamanla fonksiyonlarını kaybeder hale geliyor. Zamana ters hareket edebilen bir yüzücünün havuzdan geri fırlayıp atlama tahtasına konmasını hayal etmek zor, fakat böyle bir şey Newton'un yasalarına göre mümkün. İleri ve geri giden olaylardaki farklılık başlangıç ve bitiş noktalarındaki enerji farkından kaynaklanıyor. Dalış olayında zamana ters gidebilmek için su damlacıklarını geriye doğru itip yüzücüyü havuzdan geri iterek tahtaya zıplatacak bir basınç oluşturmamız gerekiyor. Hayal edilemeyecek kadar zor bir olay.

Entropi böyle bir karışıklığı açıklamanın bir yolu. "Mantıklı" tüm durumlarda entropi –düzensizlik– artar; yani zaman, düzensizliği ya da "entropi"yi artıracak yönde olmalı. Yüzücünün ve suyun durumu atlayış gerçekleştikten sonra öncesine göre çok daha düzensiz durumdadır. Havuzdan dışarı fırlama benzerliği kullanılarak Sakharov'un evrenin ilk zamanlarında, büyük patlamanın hemen sonrasındaki üç gerekliliğinin nasıl bir sorunun parçası olduğu anlaşılabilir.

Baryon sayısının ihlali nasıl bir şeye benziyor? Protonun pozitrona ve nükleer fizik bölümünde karşılaştığımız mezon-

lardan birine, Π^0'e bozunduğu reaksiyon baryon sayısını değiştirebilir. Bu bozunma reaksiyonunu $p \rightarrow \Pi^0 + e^+$ şeklinde ifade edebiliriz. Bu reaksiyon elektrik yükü, enerji, momentum ve açısal momentum korunma yasalarına uyarken baryon sayısı korunumunu ihlal eder. Başlangıçtaki protonun baryon numarası birdir, fakat Π^0'ın baryon numarası sıfırdır (1/3 baryon ve 1/3 antibaryon gibi bir kuark ve bir antikuarktan oluşur ve net baryon numarası sıfırdır). Öte yandan pozitronun da baryon numarası sıfırdır, bundan dolayı bozunma baryon sayısını bozar. Π^0 radyoaktiftir ve bir foton çiftine dönüştüğü bozunma reaksiyonunun yarılanma ömrü 10^{-16} saniyedir. Başka bir deyişle, bu bozunma gerçekleştiğinde proton son ürün olarak bir pozitron ve iki fotona dönüşmüş olur ve geriye atom çekirdeği oluşturacak bir malzeme kalmaz.

Dikkatli okuyucular bu reaksiyonların başka bir korunum yasasını daha ihlal ettiğini fark edecektir. Bozunma sürecinde sadece bir baryon kaybolmuyor, aynı zamanda bir lepton – bir elektron ya da pozitron– ortaya çıkıyor. Standart Model baryon eksi antibaryon sayısını koruduğu kadar lepton eksi antilepton sayısını da korur. Doğada bu korunum yasasının da ihlal edildiğini düşünmemiz için iyi bir sebep olduğunu göreceğiz.

İçinde bulunduğu zamanda Sakharov'un fikri oldukça radikaldi. Bugün bile birçok araştırmaya rağmen baryon sayısını ihlal eden etkileşimlere ait bir kanıt bulunamadı. Eğer oluyorsa, büyük bir ev boyutundaki su tankında yılda bir kereden az gerçekleşecek nadirlikte oluyor. Eğer madde-antimadde asimetrisini bu süreçle açıklayacaksak evrenin ilk zamanlarında bugünkünden çok daha sık olmuş olması gerekir.

Bu noktada CP (zaman tersinirliği) ihlali anlaşılır bir ihtiyaç. Çok sıcak bir genç evrende baryon sayısını ihlal eden bozunma süreçleri tersinir olabilir. Π^0 parçacığıyla bir pozitron

çarpışıp proton veya bir elektron çarpışıp antiproton üretebilir. Eğer bu süreçler sık (ve muhtemelen eşit) oluyorsa, eşit sayıda proton ve antiprotonla başlamamız durumunda her zaman eşit sayıda proton ve antiprotona sahip olmaya devam ederiz; yani parçacık ve antiparçacıkları içeren bu süreçler aynı sıklıkta *olmamalı*. Zaman tersinirliği ya da CP, daha önceden belirttiğimiz gibi parçacık ve antiparçacıkların tamamen aynı davranması gerektiğini ve bu süreçlerin simetri ihlal edilmediği sürece *benzer sıklıkta* olması gerektiğini öne sürüyor; yani proton sayısını antiproton sayısından üstün tutmak için CP ihlali olması gerekiyor.

Nihayetinde Sakharov zamanın bir yönü *tercih etmesi gerektiğini* belirtti. Elbette biz insanlar kendimizi zamanın yönüne mahkûm olarak görüyoruz. Hatalarımızı düzeltmek ve kaçırılmış fırsatları gerçekleştirebilmek (ya da havuzdan geriye sıçramak) için "geriye dönemiyoruz." Temel parçacıklar için de Sakharov'un koşullarında benzer bir şey saklı. Tekrardan proton ve antiproton bozunmalarını ve proton ile antiproton üreten ters süreçleri ele alabiliriz. Zamanın belirli bir yönü varsa üretim süreçleri bozunma süreçleriyle benzer sıklıkta olmalıdır. Baryon sayısının değişmemesi gerekir. Kimyacılar ve fizikçiler bir sistemin yüksek sıcaklığa sahip olduğu ve süreçlerin ileri ve geri aynı hızda ilerleyebileceği durumlara termal denge adını veriyor. Feynman denge durumunu kısa bir şekilde açıklıyor: "Tüm hızlı reaksiyonlar olmuş, yavaş reaksiyonlar henüz olmamışsa sistem dengededir." Güneş Feynman'ın denge tasvirine bir örnektir. Güneş şu an son derece sıcak ve termal dengededir. Feynman'ın hızlı reaksiyonlar olarak adlandırdığı reaksiyonlar Güneş'in merkezindeki hidrojen çarpışmaları ya da yüzeye yakın bölgelerden ışık salınmasıdır. Merkezdeki nükleer çarpışmalar saniyenin çok küçük bir parçasında gerçekleşir. Merkezde üretilen fotonlar

elektron ve proton ışınlarıyla yavaşça yüzeye gelir. Güneş'in içinde üretilen radyasyonun yüzeye ulaşması milyonlarca yıl alır ve bu sürede Güneş'in içerisinde herhangi bir değişiklik olmaz. Fakat Güneş nükleer yakıtını da yavaş bir şekilde kullanır. Yaklaşık beş milyar yıl sonra yakıtını yakmış ve büyük bir değişiklik geçirmeye başlamış olacak. İlk olarak içine doğru çökecek ve sonrasında kızıl dev haline büyüyecek. Bu noktada Güneş'te bir süreliğine yeni bir denge durumu sağlanmış olur. Feynman'ın aşırı yavaş reaksiyonlar diye adlandırdığı kısım da bu durumdur.

Güneş hikâyemizde zamanın yönlülüğünün bir örneğini görüyoruz. Sürecin aktığı zamanda net bir yön (maalesef hayatlarımızda olduğu gibi) bulunur. Bu durum daha önceden de belirttiğimiz gibi sistemin düzensizlik seviyesi olarak adlandırılabilecek entropi kavramıyla yakından ilişkilidir. Termal dengede olan bir sistem son derece düzensizdir. Eğer her atom ve fotonu saymazsanız –ki sayamazsınız– ancak kaba bir tahmin yapabilirsiniz. Güneş'in sıcaklığı, yoğunluğu ve boyutu gibi şeyler hakkında konuşabilir, fazlasını söyleyemezsiniz. Termodinamiğin belalı ikinci yasası entropinin hiçbir zaman düşmediğini, hatta neredeyse her zaman arttığını söylüyor.

Bu durum büyük patlama kozmolojisinde çok daha tatmin edici. Zamanın kesinlikle bir yönü var, çünkü zamanla evren genişliyor. Hatta evrenin boyutunu bir saat olarak düşünebiliriz. Evrenin 100 milyon yaşında olduğunu söylemektense o zamanki boyutunu verebiliriz. Fakat burada bir sorun var. Evren üç dakikalıkken –bugünle karşılaştırıldığında aşırı genç– boyutu yaklaşık her 15 dakikada bir ikiye katlanıyordu. Kulağa çok hızlı gelebilir fakat proton ve nötron çarpışma zamanıyla karşılaştırıldığında aşırı uzun bir süre. Başka bir ifadeyle, erken evrenin sıcak plazmasını oluşturan temel par-

çacıklar açısından bakarsak evren aşırı yavaş bir şekilde genişliyor. Feynman'ın tasvirine göre sistem *neredeyse* dengede. Eğer büyük patlama baryon asimetrisine sebep olduysa daha erken bir aşamada önemli bir şey olmuş olmalı.

Sakharov tüm koşulları karşılayacak bir model oluşturdu. Madde-antimadde simetrisinin erken evrendeki mikroskobik süreçlerden kaynaklandığına dair bir kanıt sunduğu zamanlarda modeli pek mantıklı görünmüyordu (o zamanlar Standart Model'in temel öğeleri bile bilinmiyordu). Fakat bugün doğa yasaları hakkında daha çok şey biliyoruz ve Standart Model'deki etkileşimlerin daha büyük yapılara nasıl adapte edilebildiği hakkında bilgi sahibiyiz.

Sakharov'un modeli ikna edici olmasa da maddenin oluşumu ve çarpıcı çıkarımlarıyla ilgili yeni soruların doğmasını sağladı. Örneğin, proton bozunabiliyorsa *her şey* bozunabilirdi. Protonun yarılanma ömrü nötronunkine yakınsa birkaç dakika içinde tamamının yok olması gerekirdi. Ama olmadı. Aslında 10^{16} yıldan daha kısa yarılanma ömrüne sahip olan bir şey vücudumuzda saniyede 100.000 bozunma olmasına ve hepimizin kanserden ölmesine sebep olurdu (bu noktaya protonun çok uzun süre yaşadığını "sezgimizle biliyoruz" diyen fizikçi Maurice Goldhaber işaret etmişti). Peki, protonun yarılanma ömrü ne kadar olabilirdi?

Standart Model'de Baryojenez

Çözülecek ilk mesele Standart Model'in büyük patlamayla birlikte Sakharov'un üç gerekliliğini; CP korunumunun ihlali, baryon korunumunun ihlali ve zaman yönlülüğünü sağlayıp sağlayamadığıydı. Uzun bir süre boyunca, 1980'lere gelene dek cevap hayırdı. Fakat cevabın aslında içinde saklı olduğu ortaya çıktı. Standart Model CP değişkenini ihlal ediyordu. Aynı zamanda zaman yönlülüğü için gerekli olan denge

sapmasını barındırma ihtimali de vardı. Higgs alanının temel parçacıklarının çoğunun kütle sahibi olmasından sorumlu olduğunu görmüştük. Fakat Higgs mekanizması evrenin çok sıcak olduğu; fotonların, kuarkların, leptonların ve diğer parçacıkların sürekli çarpışarak Higgs parçacığı oluşturacak kadar sıcak olduğu durumlarda çalışmıyor. Bu kadar yüksek sıcaklıklarda W, Z^0, kuarklar ve leptonlar kütlesiz hale gelir. Higgs mekanizması ise evrenin sıcaklığının 10^{16} Kelvin olduğu, büyük patlamadan 10^{-11} saniye sonrasında devreye girer. Higgs mekanizması çalıştığı zaman temel parçacıklar kütle kazanır. Sıfır kütleyle sıfır olmayan kütle arasındaki geçiş ani olabilir ve zaman yönlülüğünü sağlayabilir. Fakat CERN'de keşfedildiği kadar ağır olan bir Higgs parçacığı için bu geçiş bir zaman yönlülüğü sağlayabilmek için fazla yavaştır; yani Sakharov'un üçüncü gerekliliği sağlanmamıştı.

Standart Model en iyi ihtimalle bizimkinden çok daha hafif bir Higgs parçacığına sahip olan alternatif bir evrende madde-antimadde simetrisini sağlayabilirdi. Fakat fikri tamamen terk etmeden önce Sakharov'un ikinci koşuluna, baryon sayısının ihlaline bir kez daha bakalım. Standart Model'in başarılarından biri baryon sayısındaki simetriyi korumasıydı. Bunun modelde inşa edilmesine gerek yoktu, model zaten kendi kendine sağlıyordu. İleride de göreceğimiz gibi, Standart Model'in ötesindeki fizik önerilerinin çoğunda bu durum geçerli değildir. Eğer proton radyoaktifse, aşırı uzun bir yarılanma ömrüne sahiptir. En azından büyük patlamadan beri geçen zamandan uzun olmalı, çünkü aksi halde biz olmazdık, yani Standart Model zafer kazanan taraftı.

Tüm hikâye bundan ibaret değil. Zayıf etkileşimleri anlayabilmemizde büyük rol oynayan Gerard 't Hooft protonun Standart Model'e uyarak bozunabileceği kuantum mekaniği etkilerini keşfetti. Bu etki sayesinde protonun ömrünü he-

saplayabilirdi. İnanılmaz uzun bir süreydi. O kadar uzun bir süreydi ki, büyük patlamadan sonraki ilk saniyeden beri evren tarihi boyunca bir protonun bozunma ihtimali, sizin ülkenizdeki piyangoyu yirmi kere üst üste kazanma ihtimaliniz kadardı. Fakat diğer fizikçiler bu etkinin sıcaklık arttıkça büyüdüğünü ve erken evrende baryon sayısı ihlalinin daha hızlı olabileceğini fark ettiler, yani Standart Model ile ilgili artık iki sıkıntı var. İlki Higgs'in yüksek kültesi, ikincisi ise CP ihlalinin gözlemlenen asimetriyi yaratamayacak kadar yüksek olması.

Büyük Birleşik Teori

Proton stabilitesi ve madde-antimadde asimetrisinin meydana gelmesi sorularının cevaplanması için ortaya konan ilk teori *büyük birleşik teori* olarak biliniyor. Fikir zayıf etkileşim bölümünde karşılaştığımız Sheldon Glashow ve Harvard Üniversitesi'nden Howard Georgi tarafından öne sürüldü. Standart Model oldukça başarılı bir teorik yapı olsa da (1974'te teorinin doğru olduğuna dair mantıklı argümanlar ileri sürülebilirdi) kullanışlı görünmüyordu. Üç tip Yang-Mills etkileşimini –güçlü etkileşim, zayıf etkileşim, elektromanyetik etkileşim– barındırdığı için gereksiz bir karmaşıklığa sahip görünüyordu. Georgi ve Glashow tüm yapının tek ve büyük bir ayar etkileşimine sahip olup olamayacağını sorguladı. Daha büyük bir simetri gerekiyordu. Matematik kitaplarını kullanarak üç etkileşimi birleştirebilecek en basit cismi seçtiler. Bu yapıya bağlı kalarak bir parçacık fiziği modeli oluşturdular. Modellerine göre çok yüksek sıcaklıklarda yüksek dereceli bir simetriye uyuluyordu. Standart Model'deki 12 ayar bozonuna (foton, sekiz glüon, iki W ve bir Z bozonu) ek olarak on iki ağır ayar bozonu bulunuyordu. Simetrinin kırılması ve sonradan eklenen ayar bozonlarının yüksek kütlesi

Higgs mekanizmasından kaynaklanıyor olabilirdi. Bu ekstra ayar bozonları elektrik yüküne (W'lar gibi) ve renge sahipti. Bundan dolayı etkileşimleri kuarkları leptonlara dönüştürebilir ve baryon sayısını (ayrıca lepton sayısını) ihlal edebilirdi. Öncesinde bahsettiğimiz şekilde proton bozunmasına yol açabilirdi.

Sıradaki soru şu: Protonun yarılanma ömrü nasıl tahmin edilebilir? Yarılanma ömrü ağır ayar bozonlarının kütlesine bağlıdır. Kütle 10 kat arttığında yarılanma ömrü 10.000 kat uzar.

Bu ekstra ayar bozonlarının kütlesi çok yüksek olmalıydı. Güçlü, zayıf ve elektromanyetik etkileşimlerin gücü bilindiğinde bu bozonların kütlesi hesaplanabilirdi. Hesaplamayı ilk olarak Georgi, Helen Quinn ve Steven Weinberg yaptı. Kütlelerinin protonun 10^{14} katı olması gerektiğini buldular. Buna göre protonun ömrü 10^{27} sene oluyordu. Bu da ilginç bir sayıydı. 100 kilogram suda 10^{29} proton bulunur, yani bir yıl boyunca bu suyu takip ederseniz 100 proton bozunması görebilirsiniz. 50 ton suyu (ortalama bir yüzme havuzu) göz önüne aldığımızda ise saatte birkaç proton bozunması görme ihtimaliniz vardır!

Fizikçiler bu tipte deneyler önermeye başladılar. Başarılı olmaları için kozmik ışınların etkisini engellemek adına nötrino deneylerinde olduğu gibi yerin derinliklerinde yapılması gerekiyordu. Kozmik ışınların küçük bir kısmının yerin derinliklerine ilerleyebilmesinin yanında doğal radyoaktiviteden kaynaklanan sonuçların da göz önüne alınması gerekiyordu. Bu deneylerden ilki Minnesota'daki Soudan demir madeninde 700 metre derinlikte gerçekleştirildi. Herhangi bir proton bozunması tespit edilmedi.

O zamandan beri proton bozunması oranı üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etti. Bugünkü tahminler 10^{33} ila 10^{37}

yıl arasında. Daha yeni deneyler –en önemlilerinden biri Japonya'daki Super-Kamiokande deneyi– yaklaşık 1 km derinlikte bu hassaslığa ulaştı ve şu anki birçok teori yanlışlanmış oldu.

Bu sürece bir isim vermemiz gerekiyor. Fizikçiler evrende baryon asimetrisinin oluşmasına baryon sayısını artıran bir süreç olduğu için *baryojenez* adını veriyor. Büyük birleşik teori bu fenomeni açıklamak için kurulan ilk ortamı sağladı. Büyük birleşik teorilerin Sakharov'un üç koşulundan biri olan baryon sayısı ihlalini sağladığını görmüştük. CP ihlali üzerine kuruldukları için Standart Model'de gözlemlenen CP ihlalini zaten açıklamak zorundalar, yani iki gereklilik otomatik olarak geliyor. Peki ya dengeden sapma, zamanın yönlülüğü ne olacak?

Evrenin büyümesi zaman yönlülüğüne bir örnektir. Zaman geçtikçe evren büyür ve soğur. Fakat büyük birleşik teoride parçacıklara mikroskobik ölçekte olanlarla ilişkilendirilmesi gerekiyor. Büyük birleşik baryojenezde temel aktörler X ve Y adı verilen ağır ayar bozonlarıdır. Baryon sayısını bozan etkileşimlerde rol alırlar. Çok ağır olduklarından hareketleri zamanın yönlülüğüne bağlıdır. *Oldukça* kararsız olan bu X ve Y parçacıklarının yarılanma ömrü yaklaşık 10^{-40} saniyedir, yani neredeyse oluştukları anda bozunurlar. Evrenin sıradan temel parçacıkların mc^2 enerjisinin X ve Y parçacıklarından bile fazla olacak kadar *sıcak* olduğu zamanlarda bu bozonları üreten reaksiyonlar daha sık meydana gelir ve parçacıklar bozunduktan hemen sonra tekrar oluşur. Fakat sıcaklık düştükçe üretim durur ve süperağır bozonlarımız bozunduktan sonra kaybolurlar. Ayrıntılara yoğunlaşıldığı vakit gözlemlerimizle karşılaştırılabilecek bir baryon asimetrisinin halihazırda mevcut olduğu görünebilir.

Baryojenez İçin Diğer İhtimaller

Sorumuzun cevabı büyük birleşik baryojenez teorisi olabilir. Fakat kuşkucu olmak için sebeplerimiz var. İlk olarak büyük birleşik teoriler için henüz açık bir delil –proton bozunması– görmedik. İkinci olarak, evrenin çok sayıda X ve Y bozonu barındıracak kadar sıcak olmasından şüphelenmek için sebeplerimiz var. 12. bölümde karşılaşacağımız, büyük patlamadan sonraki ilk saniyenin belirli bir kısmını evrenin kısa sürede çok hızlı bir şekilde genişlediği şeklinde gösteren kozmik enflasyon teorisi çok başarılı bir model. Enflasyonun bitişinde evren saati sıfırlanır, evrenin bu aşamada X ve Y bozonlarını üretecek kadar sıcak olma ihtimali düşüktür.

Başka ihtimaller de var. Oldukça şaşırtıcı olan bir tanesi de nötrinonun kütlesiyle alakalı. Standart Model'de baryon sayısına ek olarak lepton sayısının da korunduğunu söylemiştik. Fakat nötrino kütleleri neredeyse kesinlikle lepton sayısını ihlal ediyor. Çok erken evrende olacak lepton sayısı ihlali önemli olabilir ve belirli bir sayıda lepton üretilmesine neden olabilir. Hooft'un baryon sayısı ihlaline sebep olabileceğini belirlediği etkilerden biri leptonların baryonlara dönüşmesiydi, yani baryon sayısının artmasının bir diğer sebebi bu olabilir. Bu düşünceler de *leptojenez* olarak biliniyor. Bu durum özellikle ilgi çekici, çünkü önümüzdeki on yılda nötrinolar üzerine yapılacak deneysel çalışmalarla direkt bir kanıt elde edebiliriz. Şanslıysak ilk olarak lepton sayısını artıracak ihlale yönelik kanıtlar bulabiliriz. Sonrasında nötrinolarda CP ihlalini ölçmemiz gerekir. Baryonların bu şekilde nasıl üretildiğini bilmemiz gerekenlerin henüz sadece bir kısmını oluştursa da dolaylı kanıt sağlayabilirler.

Hâlâ bir ihtimal daha var. Hem leptojenez hem de büyük birleşik baryojenez üzerine çalıştım fakat benim favorim başka bir teori. Size anlatmak istediğim bir şey var. Yeni mezun

öğrenciler odama gelip teorik fizik üzerine bir kariyer kurmak istediklerini söylediklerinde kendimi en azından biraz olsun heveslerini kırmam gerekiyormuş gibi hissediyorum. Alanın rekabetçi olduğunu ve üniversiteler ya da ulusal laboratuvarlarda istedikleri pozisyonu bulma ihtimallerinin düşük olduğunu söylüyorum. Ayrıca iş bulsalar bile alana büyük bir katkı yapma ihtimallerinin de yüksek olmadığını ekliyorum. Genelde "bilim tarihinde bir dipnot olacak kadar şanslı olmanız gerekir" diyorum. Sonra da gururla Andrei Sakharov'un anılarında bulunan, Ian Affleck (British Columbia Üniversitesi'nde saygıdeğer bir yoğun madde fizikçisi) ile birlikte öne sürdüğümüz mekanizmadan bahsedilen dipnotu gösteriyorum. Fikir doğanın yeni bir simetri türü olması muhtemel, *süpersimetri*ye dayanıyor. İleride göreceğiz. Şimdilik bu mekanizmanın en önemli özelliğinin oldukça etkili bir şekilde *çok sayıda* baryon üretmesi olduğunu eklemekle yetinelim.

Başka bir deyişle, fizikçiler madde ile antimadde arasındaki asimetrinin nedeni için birkaç muhtemel sebep sunuyor. Sormanız gereken soru şu: Bunların hangisinin doğru olduğunu (eğer biri doğruysa) bilme şansımız olacak mı? Şimdilik gökyüzüne bakıp bunu test etmek için bir yol olduğunu söyleyemeyeceğim. Kanıt muhtemelen dolaylı olacak. Büyük birleşik baryojenez için proton bozunmasının keşfi olacak. Leptojenez için nötrinolar ve diğer özellikleri üzerine yapılacak sonraki gelişmeler olabilir. Affleck-Dine baryojenezi için ise süpersimetrinin keşfi kanıt olacak. Zamanın bize neden hiçlik değil de bir şeylerin olduğunu söyleyeceğini umuyorum.

BÖLÜM 9

"BÜYÜK SAYI PROBLEMİ"

Günlük hayatımızda sık sık büyük sayılarla karşılaşıyoruz. ABD hükümetinin bütçesi gibi sayılardan bahsediyorum (yaklaşık 5 trilyon dolar ya da 5×10^{12} dolar). Çok büyük bir sayı. Eğer oturup 5 trilyon tane bir doları saymaya kalkarsanız, saniyede bir para saydığınızı ve uyumak veya yemek için ara vermediğinizi varsayarsak, 10.000 seneden fazla zamanınızı alacaktır. Büyük sayılara Dünya'nın nüfusu (yaklaşık 6 milyar)* ya da bir günde yapılan internet araması sayısı (yaklaşık 6 milyar, kişi başına bir arama) örnek verilebilir.

Doğada ise 10'un yüksek üsleri gibi devasa sayılarla veya negatif üsleri gibi çok küçük sayılarla karşılaşıyoruz. Gözlemlenebilir evren 13 milyar ışık yılı uzunluğunda. Bu devasa sayı büyük patlamadan bu yana geçen zamanı ifade ediyor. Ayrıca doğadaki küçük parçacıklarla karşılaştırıldığında bahsedilen hacim olağanüstüdür. Örneğin bu hacme 10^{100} (bir gugol**) nötron sığdırabilirsiniz. Bir insan orta-

---

* Kasım 2022 itibariyle Dünya Nüfusu 8 milyara ulaşmıştır. (Ed.)

** Dev internet arama motorunun yanlış hecelenmesiyle oluşturulan bu matematiksel terim ilk olarak Einstein'ın teorisine göre evrenin erken

lama 5×10^{25} atomdan meydana gelir. Ortalama bir yıldız 10^{55} atomdan oluşur. Bir önceki bölümde evrendeki madde yoğunluğunun çok küçük, yaklaşık 10^{-10}, yani 10 milyarda bir olduğunu görmüştük. Bizim varlığımız da bu sayılara bağlı. Evrenin yaşı gözlemlediğimizden (sayı olarak) daha küçük veya büyük olamaz. Galaksiler, yıldızlar ve insanlar, bizi oluşturması gereken ağır elementler ilk nesil yıldızlarda oluştuğu için büyük patlamadan sonraki bir milyar yıl içinde oluşamaz. Evren bugünkünden çok daha yaşlı olup hayatı destekleyemez.

Bu sayıların bir kısmı doğa yasalarında gördüğümüz çılgın sayılarla ilgili. Yıldızların meydana gelmesini sağlayan yasaların evrenin erken dönemlerinde devreye girdiğini bilsek de tam ne zaman olduğunu bilmiyoruz. Öte yandan yıldızların boyutları anlayabildiğimiz bir olgu. Yıldızlar kütleçekim, maddelerin birbirine çekimi ve atomların (gerçek manada iyonize atomlar, atom çekirdekleri ve elektronlar) birbirlerini itmelerine neden olan atomik kuvvetlerin arasındaki dengeden doğuyor. Güneş'te proton ve elektronlar bir atomun içerisinde ne kadar uzak durabilirlerse o kadar ayrılmış durumdalar. Bir atomda proton ve elektron arasındaki elektriksel kuvvet yerçekimsel kuvvetten 10^{43} kat (trilyon kere trilyon kere trilyondan fazla) daha büyüktür. Güneş'in hacmi bir atomun hacminin 10^{56} katıdır, yani tam olarak aynı olmasa da bu büyük sayılar arasında bir ilişki bulunduğunu varsayabiliriz. Ki vardır da. Yıldızların boyutu kütleçekim kuvveti gözlemlediğimizden zayıfladıkça büyür, güçlendikçe küçülür.

---

dönemindeki kozmolojiyi çalışan matematikçi Edward Kasner'in küçük yeğeni tarafından ortaya atılmıştı. Bu tür şirketleri kuran isimler çok daha büyük sayılardan *googolplex*'ten bahsederler.

Yoksa Doğanın Katsayıları Zamanla Değişiyor mu?

Kuantum teorisinin antimaddenin varlığını öngörmesinde büyük bir rol oynayan Paul Dirac bu büyük sayıların nedenine dikkat çeken ilk kişiydi, sorunu "büyük sayı problemi" olarak adlandırdı. Çok küçük ve çok büyük sayılarla uğraşırken çok küçük sayıları üsteki sayıya bakarak çok büyük sayabilir ve tüm sayıları tek bir kümede toplayabiliriz.

Dirac bu büyük sayıların bir kısmının evrenin yaşıyla alakalı olduğunu varsaydı. Örneğin yerçekimsel kuvvetin gücü zamanla azalabilirdi. Bugün evren kuarkların çekirdeğe girebileceği sıcaklığa sahip olduğu zamandan 10^{38} kat daha yaşlı. Belki de o zamanlarda protonlar arasındaki kütleçekim kuvveti elektriksel ve nükleer kuvvetler kadar büyüktü ve zaman ilerleyip evren yaşlandıkça gücü azalmış olabilirdi.

Bu açıklamaya karşıt birçok kanıtımız mevcut. Öncelikle evrenin çok daha sıcak olduğu zamanlarda –rekombinasyon sıcaklığının olduğu 100.000 yaşındaki evrende veya nükleosentez sıcaklığının olduğu büyük patlamadan üç dakika sonrasında– kütleçekim kuvveti bugünküyle aynıdır. Ayrıca Dirac'ın açıklaması doğruysa diğer kuvvetlerin gücünün de zamanla azalması gerekirdi. Fakat böyle olmadığına dair kanıta sahibiz. Dramatik ve şaşırtıcı bir kanıtı *Yerküre* tarihinde de bulabiliriz. Yirminci yüzyılın ortalarında, Gabon'da bulunan Oklo uranyum madeni Fransız bir şirket tarafından işletiliyordu. Uranyum hem silah hem de güç kaynağı olarak kullanılabildiği için madencilik şirketi ne kadar U^{235} çıkarılabileceğine dair hesaplama yapmış ve 1972'de hesaplanandan daha az çıkarıldığı rapor edilmişti. Madenin yanlış ilerlemesinden ya da hırsızlıktan şüphelenen Fransa Atom Enerjisi Komisyonu (Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA) bir soruşturma başlattı ve eksikliğin sebebinin 1,8 milyar yıl önce madendeki

uranyumun doğal bir nükleer reaktör gibi davranıp bozunması olduğunu belirledi.

Freeman Dyson (kuantum elektrodinamiği tartışmamızda bahsetmiştik) Oklo fenomeninin muhteşem olduğunu ve 1,8 milyar yıl önceki fizik yasalarının bugünle aynı olup olmadığını anlamak için kullanılabileceğini fark etti. Nükleer fizikçiler bu reaksiyonların detaylarını iyi bir şekilde çalışıp aradan geçen zamanda doğa sabitlerindeki son derece küçük değişimleri belirleyebiliyor, yani Dirac'ın değişen sabitlerle ilgili heyecanlandıran fikri hükümsüz kılındı.

Büyük Sayılar İçin Diğer Açıklamalar

Doğa yasalarındaki sabitler arasında saf büyük olan birkaç sayı vardır. Elektronun kütlesi üst kuarkın kütlesinden 10^5 kat daha küçüktür. Bunun için geçerli bir açıklamamız yok. Kütleçekim kuvvetinde daha da uç bir durum var. Max Planck kuantum hipotezini ortaya koymasından kısa bir süre sonra Newton'un kütleçekim yasasındaki kuvvetin kütleye ya da ($E=mc^2$ yoluyla) enerjiye dönüştürülebileceğini fark etti. Elektron ve proton arasındaki elektrostatik çekim kuvveti ve kütleçekim kuvvetinin birbirine olan oranından bahsetmiştik. Elektron ve protonu daha ağır parçacıklarla değiştirirsek kütleçekimsel kuvvet çok daha büyük olacaktır. Planck, parçacıkların standart elektriksel yüke ve protondan 10^{19} kat yüksek bir kütleye sahip olmaları durumunda aralarındaki kütleçekimsel kuvvetin elektriksel kuvvetle yakın olacağını fark etti. Bu devasa kütle *Planck kütlesi* olarak biliniyor. Bugün bildiğimiz temel parçacıkların hepsinden çok daha ağır, ancak yine de elinize aldığınızda ağırlığını hissedebileceğiniz kadar büyük bir kütle değildir. Fakat bin tanesini hissedebilirsiniz.

Kütleçekim kuvveti hakkında bu şekilde düşünmek Dirac'ın büyük sayı problemi üzerine düşünülmesi için yeni bir

yol açtı. Soru şuydu: Planck kütlesi neden protonun kütlesinden 10^{19} kat büyüktür? Neden W, Z ya da Higgs parçacığından 10^{17} kat büyük? Bunlar çılgın sayılardı.

Aslında bunlardan ilki, güçlü etkileşim anlayışımız açısından pek garip görünmüyor. Çok küçük olmasına rağmen protonun boyutu direkt olarak teoriden çıkarılabiliyor. Belirsizlik ilkesine göre protonun kütlesi boyutuyla bağlantılı.

Fakat Higgs kütlesi W ve Z'nin kütlesiyle bağlantılı ve daha zorlu. Standart Model'deki sorun Higgs parçacığının tam anlamıyla bir nokta olması, sonsuz küçük bir boyuta sahip. Buna bağlı olarak belirsizlik ilkesi hızını –ve enerjisini– bilemeyeceğimizi öngörür. Kimi zaman sıfır enerjiye kimi zaman sonsuz enerjiye sahip görünür. Gözlemlerimiz bu iki değerin ortalamasıdır, sonsuz derecede büyük bir değerdir.

Kuantum mekaniğinin Higgs parçacığının kütlesi üzerindeki etkisini hesaplamaya çalışan biri, belirsizlik ilkesine göre manasız bir sonuç alacaktır. Daha mantıklı bir sonuca ulaşmak isteyen biri Higgs parçacığının bir boyuta, bir nevi bir iç yapıya sahip olduğunu varsayar. Higgs'in boyutu küçüldükçe kuantum düzeltmesinin kütleye olan etkisi büyür. Eğer kütleye olan etki kütlenin kendisi kadar büyük olmazsa Higgs'in boyutunun protonun boyutunun binde birinden küçük olmaması gerekir.

Dirac'ın büyük sayılar probleminin bu özel örneğine –Higgs kütlesinin Planck kütlesinden çok daha küçük olması– hiyerarşi problemi ya da doğallık problemi deniyor. Bu problemi ilk olarak lisansüstü öğrencisi olduğum zamanlarda Leonard Susskind'in bir konuşmasında duymuştum. Leonard konuşmasında nükleer kuvvet konusunda karşılaştığımız Ken Wilson'dan bahsetmişti ama Wilson hiçbir zaman bu problemi çok ciddiye almamıştı. Ciddiye alanlardan biri ise Steven Weinberg'di ve Susskind'in önerdiklerine benzer

çözümler bulmuştu. Leonard problemi farklı bir yönden ele aldı. Higgs'in boyutu küçüldükçe kütlesi artıyordu, teorinin özelliklerinin boyut küçüldükçe daha dikkatli bir şekilde ele alınması gerektiğini belirtti. Boyut eğer Planck'ın formülünün önerdiği büyüklüğe sahipse –yaklaşık 10^{-32} cm– iki basamağın değiştirilmesi durumunda sadece ilk basamak değil, ikinci, üçüncü ve sonrakilerin de; 34 basamağın değişmesi gerekir. Çok fazla formül yazmamaya çalışıyorum, onun için ne kadar saçma olduğunu anlatmam adına farazi bir formül yazmam için izninizi istiyorum. Higgs'in kütlesinin birbirine çok yakın iki sayının farkı olması gerekiyor, örneğin:

5,378,443,281,965,748,315,889,724,792,162,335,814

-5,378,443,281,965,748,315,889,724,792,162,335,262.

Susskind buna ince-ayar problemi adını verdi.

Tam bir şoka girdiğimi hatırlıyorum. Numaraları hassasça ayarlayan bir yaratıcının bizimki gibi bir dünya yaratmaya çalıştığını hayal etmiştim. Saçma görünüyordu. Leonard bu sorunla ilgili farkındalık yarattı. Bir çözüm önerisi sundu. Belki Higgs parçacığı protona benziyordu. Parçacıkları bir arada tutan bir kuvvete, kuarkları bir arada tutan "renk" (*color*) kuvvetine atıfta bulunarak isimlendirdiği "technicolor" kuvvetine maruz kalıyordu (belli bir yaşın altındaysanız filmlerin siyah beyaz yerine ilk kez renkli yapılmaya başladığı zamanlarda kullanılan teknolojinin isminin Technicolor olduğunu hatırlamayabilirsiniz. Makalesini gönderdiği *Physical Review* dergisi ise telif hakkı problem olabileceğinden ismi değiştirmesini istemişti). Kuarkların yerine teknikuarklar vardı ve glüon benzerleriyle (tekniglüon adını vermişti) bir arada tutuluyordu. Tıpkı proton gibi, bağlı durumda olan sonlu boyutlu bir nesne doğallık ya da ince-ayar problemini ortadan kaldırıyordu.

Fikir çok güzeldi ve benim de dahil olduğum birçok fizikçi bu çözümün işe yarayıp yaramayacağını ve gelecekteki deneyler için ne öngöreceğini görmek için büyük bir çaba harcadı. Maalesef kısa süre sonra kuarklar ve leptonlarla ilgili bildiklerimizle uyumlu olacak bir deney kurmanın zor olacağı ortaya çıktı. Yine de fikir çekiciliğini sürdürüyor, yıllar geçtikçe "küçük Higgs" ve "bükülmüş ekstra boyutlar" gibi isimlerle farklı formlarla karşımıza çıktı (Lisa Randall'ın 2005 tarihli *Bükülmüş Geçitler* adlı kitabının konusunu oluşturuyor). CERN'deki LHC'de bu fenomen için kanıt bulma adına büyük bir çaba gösterildi fakat henüz herhangi bir olumlu sonuç elde edilemedi.

Higgs kütlesi problemine dönecek olursa şöyle bir soru sorabilirsiniz: Peki ya Standart Model'deki diğer parçacıklar? Onlar önemli değil mi? Higgs parçacığıyla aynı sorunu yaşamıyorlar mı? Cevap hem evet hem hayır. Susskind bu soruyu kendi seminerinde cevaplamıştı. Örneğin elektron için, genel özelliklerinden dolayı, kütleyi küçük tutmak için iptal etmeniz gereken terimler kendiliğinden var oluyor. Teorinin kütleye karşı simetriye sahip olmasıyla açıklanabiliyor.

Aslında kuantum mekaniğinin ilk zamanlarında fizikçiler bu soruyu sormuştu fakat cevap belli değildi. Feynman ve diğerleri elektromanyetizma kuantum teorisini anlamak için etkin teknikler geliştirmeden önce Wolfgang Pauli öğrencisi Victor Weisskopf'tan elektron kütlesine olan katkılar probleminin üzerinde çalışmasını istemişti. Weisskopf hesaplamayı ilk yaptığında devasa bir sonuç elde etti. Fakat başka bir öğrenci hesaplamada bir hata olduğunu öne sürmüştü. Belirsizlik ilkesinden dolayı elektronun bir anlığına bir elektron ve pozitron çifti gibi görüneceğini hesaplamaya tam olarak eklememişti. Bu ekleme diğer noktalardan elektron kütlesinin bir kısmını elemiş ve gerçek elektron kütlesinin çok küçük bir

kısmı için kuantum düzeltmesi kalmıştı. Sonrasında denklemdeki bu iptalin altında güçlü etkileşimlerde söz ettiğimiz kiral simetriye benzer bir simetrinin yattığı anlaşılmıştı. Weisskopf teorik fizik alanında çok iyi bir kariyere sahip oldu, nükleer fizik alanına önemli katkılar yaptı ve CERN'de genel müdürlük görevi yürüttü. Fakat bu hatası –önemli ve öğretici olsa da– kariyeri boyunca onu takip etti ve uğraşmak istediği problemlerin seçiminde etkili oldu.

Nihayetinde hiyerarşi problemi karşısında sadece Standart Model'deki Higgs parçacığı savunmasız kaldı. Bu problemi inceleyen Gerard 't Hooft duruma "doğallık" adını verdi. Büyük saf sayıların simetrilerle açıklanması gerektiğini öne sürerek bunun doğa yasalarının "doğal" bir özelliği olması gerektiğini belirtti. Technicolor bu özelliğe sahipti fakat en azından çok sayıda çirkin bükme yapılmadığı sürece deneylerle uyumlu olmadı.

Birçok teorisyen ve deneyci artık başka bir açıya yönelmişti.

Süpersimetrinin Güzel Matematiğinden Etkilenmek

Susskind'in technicolor fikri zaten bildiğimiz bir fiziğin uyarlamasıydı. Belki de tamamen farklı bir şey gerekiyordu. Belki yeni bir matematik türü. Matematik çoğumuzun gözünü korkutabilir. Zorluğundan dolayı çirkin görünebilir ve günlük deneyimlerimizden uzaklaştıkça soğuyabilirsiniz. Fakat bazılarımız matematiğin zorluklarından hoşlanıyor ve onu güzel buluyor. Matematikçiler ve bu işle uğraşmayı sevenler matematiği genelde insani bir girişim değil, gerçek doğruya ulaşma çabası olarak görüyor. Fizikçiler ve matematikçilerin karmaşık bir ilişkisi var. En azından Newton'dan beri birbirlerini destekliyorlar. Kalkülüs Newton'un yasalarını anlamak için güçlü bir araç olsa da, aynı zamanda bu yasaları anlama çabası matematiğin en önemli alanlarından biri olan kalkülüsün

gelişmesini sağladı. Matematikten kaçınan fizikçiler –özellikle de teorik fizikçiler– deneyleri anlamak için sarf edecekleri çabadan daha fazlasını matematiğe vereceğini hissederken matematiği sevenler de uğraştıkları bilimsel problemi daha çok matematiğin güzelliğini kullanarak çözmeye çalışıyor.

İki tarafta da olduğumu söyleyebilirim. En küçük ve en büyük boyuttaki fenomenleri anlamak istiyorum. Matematiği –özellikle de modern matematiği– oldukça zor bulsam da ilgilendiğim sorunları anlamada önemli bir araç olduğunu düşünüyorum. Yine de matematiği bazen güzel bulmamın sebebinin ilginç fiziklere yol açması olduğunu itiraf etmeliyim.

Fakat ben bu iki görüşü bir arada tutmaya çalışsam da güncel teorik fizik alanı bazen bir araya getirilmesi zor, birbirinden çok farklı iki görüşü birden barındırıyor. Tarih ikisinin arasında denge bulmanın en iyi çözüm olduğunu destekliyor. Einstein genel görelilik teorisi üzerine çalıştığı zamanlarda matematikteki önemli gelişmeleri takip etmediği için zorlandı. Zamanının en iyi matematikçilerinden biri olan David Hilbert bu matematiksel bilgiye sahipti fakat onda da fiziksel bakış açısı yoktu. Sonunda Einstein'ın da etkisiyle fizikçiler matematiği öğrendiler ve matematik dünyasına genel görelilikle birlikte yeni fikirler girmiş oldu.

Takip eden yüzyılda teorisyenler matematiğin birçok alanından yararlandılar, hatta kimi zaman yenilerini geliştirdiler. Matematiğe güzel bir ekleme yapan ve geniş bir deney programına girişilmesine yol açan fikir süpersimetriydi. Deneysel bir eğilime yol açmasının sebebi, süpersimetrinin hiyerarşi problemine bir çözüm getirme ihtimaline sahip olmasıydı. Biraz yeni bir matematiksel yapı oluşturmasından, biraz da süpersimetrinin kütleçekim kuantum teorisi üzerine etkisi olabileceğinin umulmasından teorik tarafta da ilgi uyandırdı. Zamanla matematik son derece zengin bir hale geldi, saf

matematiği ve fiziksel teorileri anlayışımızda önemli bir araç oldu. Teori önemli öngörülerde bulunsa da deneysel açıdan şu ana dek hayal kırıklığı oldu.

Süpersimetri ve ondan kaynaklanan süper sicim teorisi yıllar boyunca alanın fazla matematikselleşmesinden endişe duyan fizikçilerin eleştirisine uğradı. Doğanın bu ek simetriye sahip olma ihtimalinin neden zor olduğunu ve sicim teorisini neyin çekici yaptığını açıklayabileceğimi umuyorum. Aynı zamanda iki fikrin de şu anda tam bir sisteme sahip olmadığını ve yanlış olma ihtimalinin yüksek olduğunu göreceğiz.

't Hooft'un doğallık teorisini kenarda tutarsak, 1980'lerden beri fizikçiler hiyerarşi problemine en son keşifleri kullanarak bir çözüm getirmeye, hiyerarşi problemini 't Hooft'un belirttiği şekilde açıklama ihtimali olan yeni bir simetri türü olan süpersimetriyi açıklamaya çalışıyorlar. O zamanlar süpersimetri aşina olunmayan, gizemli bir simetri türüydü. İzotopik simetriden ve Murray Gell-Mann'in yaptığı genellemeden bahsetmiştik. Bu tarz simetriler farklı tipte kuarklarla çalışırlar. Süpersimetri ise varsayımsal bir simetri türüdür ve doğada bir rolü varsa benzer şekilde, fakat farklı yollarla olur. Bildiğimiz –kuarklar, leptonlar, glüonlar ve diğerleri– ve bilmediğimiz tüm parçacık türlerini etkilerler. Etkileyici olan kısmı ise tüm parçacıkların partnerlerinin farklı spin değerlerine sahip olmasıdır. Örneğin, elektron spin değeri olmayan (Higgs gibi) fakat aynı elektrik yüküne sahip, selektron dediğimiz bir parçacıkla eşleşir. Fotonlar elektron gibi spin sahibi olan fakat elektrik yükü olmayan fotino (nötrinoya gönderme) parçacıklarıyla partner olur. Kuarklar da skuark denen spinsiz kuarklarla eşleşir.

Eğer süpersimetri varsa her parçacığın tam olarak aynı kütlede bir süperpartnerinin olması gerekir. Örneğin elektronla selektron aynı kütlede olmalı. Fakat durum bu şekilde

değil. Öyleyse elektronların selektronlarla ve protonlarla nötronların da süperpartnerleriyle yer değiştirdiği atomlar bulabiliriz. Sıfır spinli parçacıklar dışarlama ilkesine uymayacaklarından son derece garip bir durum olurdu. Sonuç olarak çok farklı bir periyodik tablo ortaya çıkardı, yani süpersimetri bir doğa simetrisiyse kırık bir simetri olmalı. Hatta bayağı bir kırık olmalı. Bu durum hiyerarşi problemini çözmek için ihtiyacımız olan şey olabilir. Higgs bozonuyla ilgili sıkıntımız Standart Model'i Higgs'e indirdiğimizde daha fazla simetrik olamadığından parçacığın *çok büyük* bir kütleye sahip olmasının gerekmesi. Süpersimetride elektronda olduğu gibi Higgs'in kütlesine de katkı veren birçok faktör vardır fakat kırık olmayan tam bir simetriyle bu katkılar iptal edilir. Higgs yüksek bir kütleye sahip olmaz. Eğer kırık bir simetri varsa bilinen parçacıkların partnerlerinin farklı kütleleri vardır ve etkiler birbirini götürmez, fakat farklı parçacıkların etkileri kendilerinin kütlelerinden daha düşüktür. Açıkladığımız ince ayar teorisi bu duruma bir öngörüde bulunur: Süperpartnerlerin kütlesi Z parçacığın kütlesiyle kendi kütlesinin 10 katı, ya da protonun kütlesinin 1.000 katı arasında olmalıdır. Teorilerimiz bu parçacıkların ne kadar kütleye sahip olmaları gerektiğini yeterince etkili bir şekilde öngöremiyor, fakat doğallık ilkesi bu parçacıkları LHC'de keşfedeceğimizden neredeyse emin. Deneylerin neyi aradığını ve sonuçlarını açıklamadan önce süpersimetri hipotezinin bahsetmeye değer iki özelliğini daha açıklayalım.

Süpersimetrinin bu yeni parçacıklar yığınını öngörme ve hiyerarşi problemini çözme ihtimaline ek olarak iki önemli öngörüsü daha bulunuyor. Yeni parçacıkların çoğu aşırı radyoaktif olmalı. Saçma derecede kısa süren bir yarılanma ömrüyle, saniyenin yaklaşık trilyonda birinin trilyonda biri kadar sürede bildiğimiz parçacıklara bozunurlar. Bozunma

o kadar hızlı gerçekleşir ki, hızlandırıcıda üretildikten sonra ışık hızıyla hareket etseler bile bir santimetrenin trilyonda birinden daha kısa bir mesafe ilerleyebilirler; başka bir deyişle hızlandırıcıda üretildikleri yeri ancak geçebilirler. Fakat bu parçacıklardan biri farklı olmalı. Diğer tüm parçacıklardan daha hafif ve kararlı olmalıdır. Elektrik yükü taşımamalı ve nötrinolar gibi diğer parçacıklarla nadiren etkileşmelidir. Bu ekstra-kararlı parçacık "en hafif süpersimetrik parçacık" ya da LSP (*lightest supersymmetric particle*) olarak biliniyor.

Sistemin ikinci bir öngörüsü daha var. Güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin gücü üç sayı tarafından, eşleşme katsayısı ya da yalnızca eşleşme olarak adlandırılan sayılar tarafından kontrol edilir. Sayılar birbirinden bağımsızdır, kitabın arkasında gördüğümüz ve öğrencilerin –ve çoğumuzun– hakkında çok soru sormadığı cinsten sayılardır. Fakat Georgi ve Glashow'un önerdiği gibi bu kuvvetleri çok kısa mesafeli ya da çok yüksek enerji seviyesinde varsayarsak elektromanyetik ve zayıf etkileşimleri bilmemiz durumunda güçlü etkileşimin kuvvetini hesaplayabiliriz. Süpersimetri hipotezinin uygulandığı ve uygulanmadığı hesaplamaların sonuçları arasında büyük farklar bulunuyor. Aslında süpersimetri büyük sayı problemine bir çözüm olarak sunulduğu zamanda eşleşmeler iyi ölçülememişti ve hesaplamanın süpersimetri versiyonu da deneylerle uyuşmuyordu. Bu durum LHC'nin öncüsü olan Büyük Elektron-Pozitron Çapıştırıcısı'nda (LEP: *Large Electron-Positron Collider*) yapılan deneylerle değişti, aradaki uyum etkileyiciydi.

Şu an iki önemli sorumuz var: Bir hızlandırıcının bu parçacıkları üretebilmek için sahip olması gereken enerji miktarı nedir? Ve bu parçacıklar kendilerini nasıl gösterecek? Ne kadar enerjinin gerektiğiyle ilgili olan ilk soru direkt olarak bu

yeni parçacıkların kütleleriyle alakalıdır ($E=mc^2$'den dolayı). Kütlelerinin ne olacağına dair kaba bir tahminimiz var. Eğer süpersimetrinin Higgs'le ilgili hiyerarşi problemini çözdüğünü veya kolaylaştırdığını kabul edersek yeni parçacıkların kütlesinin Higgs'den çok farklı olmaması gerekir. Belki onda birine düşebilir veya on katına çıkabiliriz. Diğer parçacıklar bozunduklarında oluşan yeni parçacıklar her zaman kararlı LSP'lerden birini içerir. LSP'ler nötrinolar gibi davrandıklarından deneylerde görünmeyeceklerdir. Sahip oldukları enerjiyle birlikte makinenin duvarlarından geçerek uçup gideceklerdir. Başka bir deyişle, süpersimetrik parçacıklar arkalarında bir kartvizit bırakıyor: Bazı sıradan parçacıklar oluşuyor ve yüksek miktarda enerji kaybı gerçekleşiyor. Bu kayıp çok net bir deneysel izdir ve deneyler gittikçe daha yüksek enerjilerde, hipotezin önerdiği şekilde parçacıkların izlerini arıyor. Karanlık maddeden bahsetmiştik. Bu yeni, kararlı parçacık bu rolün sahibi olmak adına iyi bir (tartışmalı olsa da) aday gibi görünüyor.

Süpersimetri hiyerarşi problemine bir cevap olacaksa parçacıkların kütleleri LHC'de tespit edilebilecek bir aralıkta olmalıdır. Bu yeni parçacıklardan hiçbirinin kütlesini bilmediğimizden arama yaparken mümkün olduğunca bir beklentimiz olması gerekiyor. Yine de bu kütle aralığıyla proton çarpışmasında kaç tane süpersimetrik parçacığın oluşacağını ve nasıl bozunacaklarını hesaplayabiliriz. LHC deneylerinde şimdiye dek süpersimetriye dair bir ipucu bulunamadı, bundan dolayı bu parçacıklar için bazı kütle seçenekleri ortadan kaldırıldı. Fizikçiler bunu "süpersimetri ihraçları" olarak adlandırıyor. Kütle limitleri süpersimetri taraftarları için gittikçe can sıkıcı bir hale geliyor. Çoğumuz (ben de dahil) süpersimetrinin var olması halinde şimdiye dek bunun bir işaretini görmüş olmayı bekliyorduk.

Başka hiçbir fikir hiyerarşi problemi için daha iyi bir çözüm sunamıyor. Yeni bir fenomen bulmak üzere olabiliriz. Fakat aynı zamanda doğallık ve hiyerarşi üzerine yanılıyor da olabiliriz. LHC programının önünde gideceği daha çok yol var, gitgide daha yoğun ışınlar ve yüksek enerjiler kullanılıyor. Gelecekte ne olacağını göreceğiz.

Öte yandan süpersimetri teorisyenler için adeta bir fırsat oldu. Anlaşılması zor kuantum alan teori problemlerinin anlaşılmasını sağladı. Süpersimetrik teorilerin kendilerine has matematiksel özellikleri analiz edilmelerini kolaylaştırıyor. Bunun fark edilmesi bazılarımız için hipotezin Standart Model'deki kiral simetri gibi kırık simetrilerin anlaşılmasının yeni bir yolu olarak görülmesini sağladı. Bu soruya giden yol Ed Witten tarafından açıldı. Ian Affleck ve Nathan Seiberg ile birlikte bu problemi çözebilecek pozisyondaydık. Bu çalışma kapsamında ancak süper bilgisayarlarla çalışılabilen alan teorisi sorularının kalem kâğıt kullanarak çözülebileceğini fark ettik. Seiberg ve Witten işi bir adım ileri götürdü ve bu teorilerdeki kuark sınırlaması mekanizmalarını anlamak için kullandılar. Çalışmaları büyük bir etki yarattı. Seiberg-Witten makalesi binlerce atıf aldı. Süpersimetri doğada olabilecek yeni yasalarla –temel yasalar demeyi tercih ediyorum– ilgili temel soruların cevaplanması için kullanışlı bir araç olmaya devam ediyor.

LHC'den gelen sonuçlar fiziğin hiyerarşi problemini çözmeye yakın olmadığını, deneysel bilmecenin *yeni fenomenler*in habercisi olduğunu gösteriyor. QED'den bahsettiğimiz kısımda elektronun manyetik momentine dair yapılan deneysel ölçümle teorik tahminin olağanüstü derecede uyuştuğunu görmüştük. Aynı soru –hem deneysel hem teorik açıdan– müon için de sorulabilir. Burada küçük bir farklılık bulunuyor. Teorik olarak hesaplanan ve ölçülen değerlerin ikisi de

benzer seviyededir. Değerler 10^{11}'de bir oranında, mükemmel bir seviyede uyuşuyor. Fakat 2000'de Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan son derece hassas deneyde son basamakta bir farklılık belirlendi. Sayı çok ilgi çekmişti. Aradaki fark süpersimetride beklenen yeni parçacıklarla ve hiyerarşi problemini çözmeye yönelik diğer denemelerle *açıklanabilir*di. Chicago yakınlarındaki Fermilab'daki fizikçiler laboratuvarın imkânlarını kullanarak müon üretmek için deneyin daha da hassas bir versiyonunu önerdiler. Tüm Brookhaven cihazı kara ve deniz yoluyla Illinois'ye götürüldü, üzerinde geliştirmeler yapıldı ve deney gerçekleştirildi. Kitabı tamamladığım zamanlarda sonuçlar ilan edildi. Gerçekten de insani önyargının bu basamağı etkileme potansiyeli göz önüne aldığımızda veriler "körleştirildi." Başka bir deyişle, verileri çalışan kişiler hangi değeri bulduklarını açıklayamadılar. Sonunda sonuç açıklandığında Brookhaven deneyiyle uyuştuğu belirlendi ve teorik öngörü ile arasındaki farkı görmezden gelmek daha da zorlaştı. Ben bu durumun yeni ve heyecan verici bir fiziği temsil ediyor olmasından umutluyum, fakat aynı zamanda Standart Model hesaplamalarındaki muhtemel limitlemeleri belirlemeye kendimi adadığım için muhafazakâr sayılabilirim. Deneysel sonuçların değişmesini beklemiyorum. Problem üzerine son derece azimli deneysel ve teorik çalışmalar yürütüldü. Her iki tarafın da bu küçücük anlaşmazlığı görmezden gelmeyi reddetmesinin sergilendiği bilimsel dürüstlüğe hayranım.

BÖLÜM 10

EVRENİ MEYDANA GETİREN NEDİR?

Gökbilimcilerin büyük hayranıyım. UC Santa Cruz'da çalışmanın en güzel yönlerinden biri çok seçkin bir kısmıyla arkadaşlık yapabilme fırsatı yakalıyor olmanız. En iyilerinden biri olan arkadaşım Sandra Faber 1993'te başlayan Hubble Uzay Teleskobu projesinin arkasındaki isimlerden biriydi ve 2013'te Başkan Barak Obama tarafından Ulusal Bilim Madalyası'na layık görüldü. Santa Cruz'a taşınmamdan kısa süre sonra Sandy ile birlikte San Jose'deki bir yemeğe eşlerimizin partneri olarak katılmıştık (Sandy'nin eşi avukattı). Birbirimizi kısa bir süre kaybetmemizin ardından etkinliğin yöneticileri bizi beraber oturtmaya karar verdi. Çok güzel bir akşam olduğunu söylemeliyim. Bilim üzerine sohbet ettik. Fizik ve astronomi alanlarını karşılaştırdık. Sandy'nin astronomi alanında kariyer yapmanın ödülünün bir bilim insanının çocukken sorduğu soruları hayatı boyunca, sadece gittikçe daha çok ayrıntıyla sorması olduğunu söylediğini hatırlıyorum. Sandy ile yıllar boyunca birbirimize yakın mesafede yaşadık ve kimi zaman yol arkadaşlığı yaptık. Bir çalışmanın arkasındaki soruyu çok net ve hızlı bir şekilde sorabilirdi, sık sık kendimi

"Bunun nesi önemli?", "Neden bunun üzerine çalışıyorsun?", "Neden bunu ekliyorsun?" gibi soruları cevaplamaya çalışırken buluyordum. Fakat aynı zamanda oldukça destekleyici biriydi, bir yaz küçük kızımın lise kapsamındaki bir projesi için danışmanlığını yapmıştı.

Bu sorulardan birini çocukluğumuzda biz de soruyorduk: Evren neyden meydana gelir? 1930'lara dek bilim insanları bu sorunun cevabının çevremizdeki maddelerin yapı taşı olan, proton, nötron ve elektronlardan meydana gelen atomlar olduğunu düşünüyordu. Buradan yola çıkarak yıldızlar gibi daha büyük kütleli cisimlerin yapısını anladık. Bu parçacıkların var olan her şeyin yapısını oluşturduğunu düşünmek doğaldı. Fakat durum bu şekilde değil. Evren çoğunlukla maddenin başka bir formundan oluşuyor. Meşhur *karanlık madde*den bahsediyorum.

Gökbilimciler teleskopla görebildikleri yıldızların, (çoğunlukla hidrojen gazından oluşan) toz bulutlarının, Samanyolu'ndan milyarlarca ışık yılı uzaklıkta bulunan cisimlerin listesini yapabiliyorlar. Bunların hepsini toplayıp evrenin *ağırlığını* bulabiliyorlar (cevap yaklaşık 10^{52} kilogram ya da pound, aslında çok fark etmiyor). Yaklaşık 10^{78} atom ağırlığına denk geliyor.

Fakat evrende teleskopla göremeyeceğiniz nesneler de bulunuyor. Son yıllarda bilimde yapılan en büyük keşiflerden biri de güneş sistemimizin dışındaki gezegenler. Çoğumuz için bu gezegenlerin bulunması büyük bir sürpriz sayılmaz. Neden güneş sistemimiz benzersiz olsun? Belki de bazılarının zeki bir yaşam formu barındırdığı diğer gezegenler, bilimkurgu türü ortaya çıktığından beri türün temel konularından birini oluşturuyor. Fakat gökbilimciler bu cisimleri nasıl tespit edebilir? Kendi ışığına sahip yıldızlar gibi değiller. En iyi ihtimalle kendi yıldızlarının ışığını yansıtabilirler. Bu gezegenler-

den en yakını Dünya'ya 4 ışık yılı uzaklıkta bulunan Proxima Centauri b. Sahip olduğu az miktardaki ışık geldiği yol süresince yayılıyor ve birkaç ışık yılı uzaklıktaki Dünya'ya ışığın milyarda birinden azı ulaşıyor. Bu gezegeni direkt tespit edemezsiniz.

Bunun yerine gezegenler yörüngesinde bulundukları yıldızlara yaptıkları etkiler sayesinde tespit edilmeye başlandılar; bugüne dek neredeyse 4.000 adet ötegezegen tespit edildi. Gökbilimciler hassas enstrümanlarla yıldızların hareketlerindeki küçük oynamaları tespit edip Newton yasaları kullanarak gezegenlerin kütlelerini belirleyebiliyorlar. Büyük kütleye sahip oldukları için yıldızlarına daha büyük çekme kuvveti uygulayan Jüpiter boyutundaki gezegenlerin ilk keşfedilenler olması doğaldı, fakat artık Dünya benzeri gezegenler de keşfediliyor. Artık gezegenlerin yaygın bulunan nesneler olduğu hakkında bir şüphemiz yok, ileride ne kadarının yaşamı destekleyebileceği üzerine de fikrimiz olacak.

Evrende başka bir yaşam formunun bulunma ihtimalini ve bize ne kadar yakın olabileceğini herkes kadar merak ediyorum. Fakat Güneş Sistemi'nin dışındaki gezegenlerin keşfi buradaki konumuz kapsamında yıldızlara ve galaksilere bakıp Newton'un yasalarını kullanarak gezegenlerin yıldızlarını ne kadar çektiğini ve buradan yola çıkarak dolaylı şekilde kütlelerinin hesaplanabileceğini gösteriyor. Galaksi gibi büyük ölçekli cisimler için bu çalışmalar çok daha erken başlamıştı. Çalışmalara öncelik eden gökbilimci Fritz Zwicky idi. 1898'de Bulgaristan'da doğan Zwicky İsviçre'de eğitim gördü ve 1925'te Amerika Birleşik Devletleri'ne, kariyerinin büyük bir kısmını geçireceği Caltech'e geldi. Nötron yıldızları ve süpernovaların keşfinde büyük bir rol oynadı, galaksiler üzerine çalıştı. Aksi biri olarak bilinse de hümanist bir kişiliğe sahipti.

Zwicky 1930'larda Dünya'dan 320 milyon ışık yılı uzaklıkta bulunan ve yaklaşık 1.000 galaksiden oluşan Saç Kümesi'ndeki (*Coma Cluster*) yıldızların hareketini çalıştı. Kümede 100 trilyondan fazla yıldız bulunuyor. Görünür yıldızların hızlı hareketlerini açıklayamadığını fark etti. Kütleçekimleri yörüngelerinden çıkmalarını engelleyecek kadar kuvvetli değildi. Kümede teleskopla görünebilenden daha fazla madde olması gerektiğini öne sürdü ve buna karanlık madde adını verdi. Sonucu üzerine uzun süre eleştiride bulunuldu. Saç Kümesi'nin bu özelliğinin bu kümeye has olmadığına dair bir kanıt yoktu. Aslında Zwicky kümedeki normal madde miktarını düşük ve buna bağlı olarak karanlık madde miktarını yüksek öngörmüştü.

Galaksilerde karanlık madde bulunmasının sıradan bir özellik olduğuna dair ikna edici kanıt ancak 1970'lerin sonunda Vera Rubin ve ortağı Kent Ford'un çalışmalarıyla elde edildi. 1928'de doğan Rubin cinsiyetçi çağda yaşayan bir kadın olarak birçok zorlukla karşılaştı. Son bölümde karşılaştığımız Neta Bahcall, Princeton'da Rubin'in meslektaşlarından biriydi. Anlattığı bazı hikâyeler var. Bunlardan birinde bölüm başkanı bir sonraki toplantıda Rubin'in de katılacak olmasına rağmen çalışmasını sunabileceğini teklif etmiş. Rubin de "Tamam, ben yaparım" şeklinde cevap vermiş. Uzun bir süre sırf kadın olduğu için Palomar Dağı'ndaki gözlemevini kullanamadı (buradaki teleskop bir süreliğine dünyanın en büyük yansıtmalı teleskobuydu). Nihayet 1960'larda gözlem yapma fırsatı bulduğunda da sadece erkekler tuvaleti bulunması sorunuyla karşılaştı. Adının büyük bir teleskop projesine verilmesinin de dahil olduğu birçok ödüle layık görüldü. 2016'da hayata gözlerini yumdu. Rubin'in başarılarına birinin meslektaşım Sandy Faber olduğu birçok başarılı öğrenci yetiştirmesini de ekleyebiliriz.

Şimdiye kadar karanlık maddeye dair kanıtlar sadece galaksilerdeki yıldızların hareketinden değil, galaksilerin galaksi kümesine göre olan hareketinden de geldi. Kanıtlar yıldız ve galaksilerden gelen ışığın Dünya'ya geldiği yol boyunca "mercekleme" dediğimiz etkiden dolayı bükülmesiyle dolaylı yoldan elde edildi. Işık ışınlarının (fotonların) yolunun kütleli cisimlerin kütleçekiminden etkilendiğini Einstein'ın teorisinden biliyoruz. Gökbilimciler yıldızlarının görüntüsünün Dünya'ya gelen yoldaki değişimine bakarak yıldızlar ve Dünya arasındaki görünmeyen yüksek miktardaki maddeye ilişkin kanıtı elde ettiler. Karanlık maddeye dair daha fazla kanıt evrende bulunan elementlerin miktarından ve kozmik mikrodalga arkaplan ışımasından geliyor.

Evrende normal maddenin beş katı karanlık madde bulunduğunu belirli bir kesinlikte biliyoruz. Karanlık kelimesi nasıl bir madde olduğu bilinmese de ışık üretmemesinden geliyor. Fakat daha fazlasını, daha doğrusu neyi bilmediğimizi biliyoruz. Bu maddenin karanlık yıldızlar veya gezegenler şeklinde bulunmadığını bu seçenekleri eleyen deney sonuçlarımız sayesinde söyleyebiliriz. Bu sonuca ayrıca bahsetmiş olduğumuz dolaylı gözlemlerle de ulaşabiliyoruz: (Hafif) elementlerin miktarı ve kozmik mikrodalga arkaplan ışımasının özellikleri, yani bunlar ne anlama geliyor? Yeni bir temel parçacığın bulunması neredeyse kesin. Bu parçacığın kütlesinin olması gerekiyor; karanlık madde olabilmesi için tipik parçacık bugün yavaş hareket ediyor olmalı. Fakat bir elektrik yükünün de olmaması gerekli, çünkü aksi halde kendisini görebilirdik. Işık üretir ve yansıtırdı. Yerçekimsel çekim dışında sıradan maddeyle etkileşime girmiyor olmalı.

Süpersimetri Karanlık Maddeyi Açıklayabilir mi?

Süpersimetrinin parçacık fizikçilerinin ilgisini çekmesinin sebeplerinden biri –(neredeyse) otomatik olarak– karanlık

madde olabilecek bir parçacığın varlığını öngörmesidir. Süpersimetrik modeller yeni bir parçacık grubunun, en azından bilinen her parçacık için yeni bir parçacığın varlığını gerektiriyor. Elektrona ek olarak *selektron*un varlığından bahsetmiştik. Karanlık madde söz konusu olduğunda elektriksel olarak nötr olan parçacıklarla ilgileniyoruz. Bunlar fotonun (*fotino*), Z bozonunun (daha teknik fakat yine de halen garip olan *bino* ya da *vino*), ya da nötr Higgs parçacığının (*higgsino*) elektron gibi spin taşıyan partnerleri olabilir. Bunlardan farklı olarak nötrinoların partneri olan *snötrinoları*n da olma ihtimali var. Bu spinsiz parçacıklar elektriksel olarak nötr ve sıradan maddeyle çok zayıf olarak etkileşiyor olabilir. Fakat en önemlisi, süpersimetrinin doğada nasıl görüneceğini tartışan hipotezlerin çoğu bu parçacıkların en hafifinin, *en hafif süpersimetrik parçacığın* tamamen kararlı ve neredeyse hiç radyoaktif olmadığını öngörüyor. Başka bir deyişle, eğer bu parçacıklar erken evrende doğru oranda üretildiyse bugün karanlık maddenin rolünü oynamak için gereken parçacıklar olabilirler.

Karanlık madde adayı olan parçacıklar WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*: Zayıf Etkileşimli Büyük Kütleli Parçacıklar) olarak adlandırılıyor. Terim protondan daha ağır olan fakat diğer temel parçacıklarla ve birbirleriyle çok zayıf etkileşen, nötrinoların etkileşimlerinden bile daha zayıf etkileşime sahip parçacıkları kapsıyor. Fakat asıl çarpıcı nokta şimdi geliyor. Bu parçacıklar erken evrende temel modeli (çok) değiştirmeden gözlemlenen karanlık madde miktarını karşılayacak miktarda üretiliyor.

Evrenin en erken zamanlarında çok sıcak olduğunu görmüştük. Büyük patlamadan 100.000 yıl sonrasında bile sıcaklık yaklaşık 10.000 Kelvin'di. Daha erken zamanlarda sıcaklık daha da fazlaydı. Yine 10'un üsleri şeklinde düşünme zamanı geldi. Evren 10.000 kat daha gençken, büyük patlamadan

10 yıl sonrasında sıcaklık 100 kat daha fazla, 10 milyon Kelvin'di. Bu sırada atomlar birbiriyle çok sık çarpışır ve elektronlarını kaybederler. Evren iyon ve elektron plazmasından meydana geliyordu. Daha erken zamanlarda –evrenin 10^{20} kat (yaklaşık 100 milyar milyar!) daha genç olduğu zamanda– parçacıkların enerjileri devasaydı. Protonun mc^2 enerjisinin 1.000 katı kadar: 1.000 proton üretmeye yetecek enerjiye sahiplerdi. Aynı zamanda WIMP'lerin serbest enerjilerinden de daha büyüktür. Sonuç olarak bu parçacıkların çarpışmaları sıklıkla WIMP üretir. Bu WIMP parçacıkları bozunabilir ya da diğerlerini yok ederek yüksek enerjili gamma ışınları ve foton, elektron ve diğer parçacıkları oluşturabilir. Bu aşırı sıcak plazmada çok sayıda WIMP bulunur.

Bir sonraki soru zaman ilerledikçe ve evren soğudukça ne olduğudur. Sonuç olarak kuark ve lepton çarpışmaları WIMP üretecek enerjiye sahip değildir. Fakat WIMP'ler kararlı olabildikleri için diğer WIMP'lerle çarpışıp imha olarak diğer enerji formlarını üretebilirler. Bu imhaların ne sıklıkla meydana geldiği hesaplanabilir. Çoğu WIMP'in imha olduğu söylenebilir, fakat küçük bir miktarı gözlenen karanlık madde miktarına uygun olacak şekilde varlığını sürdürebilir. Tipik modellerde her WIMP'e karşılık gelen 100 milyar sıradan parçacık –kuark, glüon, elektron, foton– bulunur. (100 milyar bugüne kadar Dünya'da doğmuş tüm insanların sayısına yakındır.) Bunu nasıl söyleyebiliyoruz?

WIMP'leri Tespit Etmek

Edward Witten son yılların önde gelen teorik fizikçilerinden biri. Son derece entelektüeldir. Sıra dışı bir zekâya sahip fakat aynı zamanda çok çalışkan ve disiplinlidir. Matematikte çoğu kişiden daha ustadır, ayrıca fizikteki basit ve kavramsal sorulara odaklanmakta çok iyidir.

Edward ile ilk kez lisans öğrencisiyken karşılaşmıştım. O günlerde fizik okuyordum ve lisansüstü çalışmalarımı teorik fizik alanında yapmayı planlıyordum. Hocalarımdan bazıları gerçekten cesaret kırıcıydı. İçlerinden birinin bana "Bu alanda sadece dehalar başarılı olabilir. Fiziğin başka alanlarını çalışmanı tavsiye ederim" dediğini hatırlıyorum. Cincinnati'ye ailemi ziyarete gittiğimde Cincinnati Üniversitesi'nde fizikçi olan eski bir arkadaşlarının oğullarının teorik fizikle ilgilendiğini ve Princeton'da lisansüstü eğitimine başladığını söylemişlerdi. Belki de onunla tanışmak isterdim? Bir akşam kendisini yemeğe çağırdık. Yemeğin sonunda son derece depresif hissediyordum. Çok hoş biri olan bu fizik öğrencisi benden çok daha zekiydi ve çok daha fazlasını biliyordu. Hocalarım kesinlikle haklıydı. Ailemin bu alandaki herhangi bir arkadaşı bu kadar zekiyse alandaki herkes deha olmalıydı. Fakat bu kişinin –Ed Witten– sonradan belki de alandaki en zeki kişi olduğunu söylemeliyim. Belki de aptalca bir kararla teorik fizik inadımı sürdürdüm. Edward ve fizikçi eşi Chiara Nappi ile yakın arkadaş olduk. Kariyerimin bazı dönemlerinde kendisine bulduğu şeyin heyecan verici olduğunu söyleme fırsatı yakaladım, yıllar boyunca keyifli iş birlikleri yaptık. Genelde Ed'in benim bir önerimi eleştirmesiyle başlardık. Birden çok kez benim ham fikrimi alıp bir cevhere dönüştürdü. Chiara ile de birkaç projede çalışma fırsatı buldum.

Witten bazen matematiğe fazla odaklanmasıyla eleştirilirdi. Öncelikle saf matematiğe önemli katkılarının olduğunu söylemek gerekir. Fakat Edward'ın müthiş bir fiziksel öngörüsü de vardı. 1980'lerin başında beni ve diğerlerini karanlık maddenin ne olabileceğini ve nasıl tespit edebileceğimizi düşünmemiz gerektiği konusunda zorluyordu. Ben ise başka sorunlarla ilgileniyordum. Dürüst olmak gerekirse bunun sebebi önerisini takip etmeye üşenmem olabilir. Witten, 1984'te

öğrencisi Mark W. Goodman ile WIMP'in deneylerde nasıl tespit edileceği üzerine bir konferans bildirisi yazdı. Bildirilerine bu parçacıkların karanlık maddeyi oluşturması durumunda tüm çevremizde olacağını; vücudumuzun, laboratuvarımızın ve Dünya'nın içinden geçeceğini yazarak başladılar. Kalın bir madde tabakasına gelene dek elektronlar ve atom çekirdekleri ile çarpışabilirler. Bu çarpışmalar da WIMP'ler çok ağır olduğundan bowling toplarının pinpon toplarıyla çarpışması gibi olur. WIMP'lerin yönü nadiren değişir, fakat arkalarında çekirdeğin momentumunun değişmesi cinsinden bir enerji bırakırlar. Goodman ve Witten ezilmiş pinpon topundaki bu küçük enerji değişiminin tespit edilmesinin mümkün olduğunu fark etti.

Goodman ve Witten'ın bildirisi ve bu deneylerin nasıl yürütüleceği üzerine önerilerde bulundukları diğer makaleleri takip eden yıllarda karanlık maddenin arandığı deneylerin tasarımlarına büyük etkide bulundu. Bu düşük enerjileri tespit etme üzerine olan fikirler zekiceydi; dünyanın farklı yerlerinden devlet kurumlarının fonladığı detektörler küçük prototiplerden büyük ve pahalı cihazlara evrildiler.

Direkt tespit deneyleri birçok zorlukla karşı karşıya kalıyor. Çok küçük ve nadir bulunan enerji birimlerini arıyorlar. Bundan dolayı ilk olarak cihazların kozmik ışınlardan ve arkaplan ışımasından korunması gerekir. Yapılan tüm deneyler nötrino deneylerinde olduğu gibi yerin derinliklerinde gerçekleştirildi. İkinci olarak, detektörlerin çok düşük seviyedeki enerjileri tespit edecek şekilde optimize edilmeleri gerekir. Farklı deneylerde silisyum, germanyum ve ksenon kullanıldı. Silisyuma kumun içinde bulunmasından ve elektronik teknolojisinde kullandığımız temel malzeme olmasından aşinayız. Germanyum bu işe daha yatkındır ama daha maliyetlidir. Ksenon ise kimya dersinden hatırlayacağınız üzere soy gaz-

dır. Nadir bulunur ve çok pahalıdır fakat bu tarz çalışmalar için son derece kullanışlı bir araçtır.

Şimdiye kadar bir ihtimal dışında hiçbir deney karanlık maddenin keşfini ortaya koyamadı. Karanlık maddenin WIMP'lerden oluşması durumunda şaşırtıcı derecede ağır olacağını ve sıradan parçacıklarla beklenenden çok daha zayıf etkileşeceğini biliyoruz. Bugüne dek karanlık maddeye dair en dar sınırlar CDMS (*Cryogenic Dark Matter Search*: Dondurulmuş Karanlık Madde Araştırması) detektörü tarafından belirlendi. Öncü deney Stanford Üniversitesi kampüsünde yapıldı fakat asıl deney Minnesota'nın kuzeyindeki derin Soudan demir madeninde birkaç yıldır yürütülüyor. CDMS'in ardından yapılan SuperCDMS deneyinde kullanılan detektörler silisyum ve germanyumdan inşa edildi; çok düşük sıcaklıklara, bir Kelvin'in binde birine dek soğutuldu ("dondurulmuş" kelimesi buradan geliyor). Keşfin yapılamaması süpersimetrik karanlık madde taraftarlarını hayal kırıklığına uğrattı. Diğer deneyler de benzer sonuçlara ulaştılar.

Fakat bir deney bir süreliğine muhtemel bir sinyal elde etti. Bu deneyde kullanılan detektör İtalya'daki Apenin Dağları'nın en yüksek noktası olan Gran Sasso'daki bir tünele yerleştirildi. Bu muhteşem laboratuvar İtalyan hükümeti tarafından yapıldı ve deniz seviyesinden 1.400 metre yükseklikte yapılmış olsa da dağın iç duvarları kozmik ışınları engellemek için yeterliydi. DAMA deneyi detektörü sodyum iyodürden imal edilmişti ve tek tek tüm karanlık madde parçacıkları için geçerli olmasa da yılın farklı zamanlarında farklı oranlarda üretiliyor gibi görünüyor. Karanlık madde etkileşimlerinin miktarı parçacıkların hızlarıyla orantılıdır. Dünya yılın farklı zamanlarında bir karanlık madde bulutunun içine girer veya ondan uzaklaşır. Aslında kozmik ölçekte –evrenin sıkıcı derecede homojen ve izotropik göründüğü ölçek– ka-

ranlık madde parçacıkları ortalama olarak hareketsizdir. Fakat Dünya yörüngesi boyunca bu buluta göre hareket eder; yani detektör yılın farklı zamanlarında daha çok veya daha az parçacık tespit etmelidir.

Deney 1990'dan beri sürdürülüyor ve parçacık sayısında mevsimsel farklılıklar gösteriyor. Fakat sonuçlar yine Gran Sasso tünelinde yürütülen ve ksenonun kullanıldığı ters sonuç veren deneyle karşıtlık gösteriyor. Birçok teorisyen ve deneyci bu deneyleri ortak bir noktada buluşturmak için çeşitli fikirler öne sürdü fakat durum gizemini sürdürüyor. Zaman geçtikçe DAMA deneyinin sonucunu olumsuz sonuç veren daha hassas deneylerle bir araya getirmek daha da zorlaşıyor.

Karanlık maddeyi aramanın çok farklı bir yolu daha var. *Dolaylı tespit* olarak biliniyor. Karanlık madde evrenin her noktasında olsa da galaksilerin içlerinde etraflarındaki boşluktan daha yoğun miktarda bulunuyor. Eğer karanlık madde WIMP'lerden oluşuyorsa zamanla birbirleriyle çarpışıp madde-anti madde çiftlerinde olduğu gibi birbirlerini yok edeceklerdir. Bu çarpışmalar enerjinin farklı bir formunu üretecek. Büyük bir kısmı gamma foton ışınlarına dönüşecek ve bu ışınlardan bazıları Dünya'ya ulaşacaktır. Yerde veya uzayda bulunan uygun detektörlerle bu ışımayı tespit etmeyi umabiliriz.

Standart bir WIMP ağırlığına göre burada üretilen fotonların enerjisi diş filminizde kullanılan X ışınlarından yüz milyonlarca kat daha büyük olacaktır. Bu çarpışmaların yaşanmasının en mümkün olduğu yer galaksimizde karanlık madde yoğunluğunun en yüksek olduğu yerdir. Bu noktanın galaksinin merkezi olması bekleniyor. Gökbilimciler ve astrofizikçiler galaksinin merkezindeki karanlık madde miktarı hakkında bir fikre sahipler fakat büyük belirsizlikler var, yani karanlık maddelerin oluşturacağı fotonların sayısı ancak ka-

baca hesaplanabiliyor. Birçok farklı karanlık madde türü için yüksek sayıda gamma ışınının görülmesi bekleniyor.

Bilim insanları uzaydan gelen yüksek enerjili gamma ışımasını tespit edebilecek birkaç enstrüman inşa etti. Bunlardan biri olan FERMI uydusu 2008'de Cape Canaveral'dan fırlatıldı. FERMI uydusu uzaydan gelen enerjileri ve fotonların yönlerini büyük bir hassasiyetle ölçebiliyor. Öncesinde gönderilen EGRET uydusu uzaydan gelen yüksek enerjili gamma ışınlarını analiz etti fakat FERMI daha geniş bir enerji aralığını tespit edebiliyor ve enerjinin nereden geldiğini daha iyi belirliyor. EGRET programının en önemli kısımlarından biri evrendeki en parlak elektromanyetik olay olan gamma ışını patlamalarını tespit etmesiydi. FERMI bu göreve devam etti fakat program daha geniş kapsamlıydı.

Gamma ışını patlamaları son derece dikkat çekicidir. Bu olayı keşfedenler astrofizikçiler ya da gökbilimciler değil, Soğuk Savaş'ın zirve yaptığı zamanlarda ABD Savunma Bakanlığı'ydı. Birleşik Devletler 1967'de Sovyetler'in Nükleer Deneme Yasağı Antlaşması'nı ihlal etme ihtimaline karşılık Vela uydularını yollamıştı. Uydularda bulunan detektörlerden biri yüksek enerjili gamma ışını patlamaları tespit etti. Başlangıçta bunun bir nükleer saldırı işareti olmasından korkuldu fakat bu ihtimalden kısa sürede vazgeçildi. Gözlemlerin tekrarlanmasıyla uyduların tespit ettiği sinyallerin derin uzayda daha önce gözlemlenmemiş bir fenomenden kaynaklandığı anlaşıldı. EGRET uydusuyla birlikte bunların devasa enerji patlamaları olduğu belirlendi. Fenomenin tam olarak anlaşılması için FERMI uydusunun faaliyeti gerekliydi.

FERMI uydusundaki detektörler oldukça hassas ve kabiliyetliydi, bu sayede sadece gamma ışını patlamaları değil, farklı astrofizik fenomenleri de çalışılabiliyordu. Karanlık madde de aranabilirdi. Santa Cruz'daki birkaç meslektaşımın projenin

başından beri önemli rol oynamalarıyla böbürlenmeden duramayacağım. Bill Atwood ve Robert Johnson (Stanford'daki Peter Michelson ile birlikte) ana enstrümanı geliştirdiler. Steve Ritz Santa Cruz Parçacık Fiziği Enstitüsü'nün yöneticisi olmadan önce projenin NASA'daki bilimsel yöneticisiydi. Yol arkadaşlarımdan Hartmut Sadrozinski ve Terry Schalk projenin başlangıcından itibaren merkezî bir rol oynadılar.

FERMI birçok keşfe imza attı. Verilerde karanlık madde konusunda zaman zaman cezbedici anomaliler belirlense de uydunun tespit ettiği gamma ışını sinyalleri bilinen astrofizik süreçleriyle uyumluydu. Karanlık madde avının da dahil olduğu görevlere sahip başka uydular da vardı. Bunlardan biri olan AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*: Alfa Manyetik Spektrometresi) uzaydaki pozitronları (antielektronları) inceliyor. Deneyin baş araştırmacısı, temel parçacık deneycisi Sam Ting tılsım kuarkın keşfedildiği deneyleri yapan isimlerden biriydi. AMS'in birkaç farklı görevi bulunuyor. Görevlerinden biri çoğu teorisyenin pek ihtimal vermediği bir durum olan uzak evrende madde yerine antimaddeden oluşan yapıların bulunup bulunmadığını incelemek. AMS araştırma programının diğer bir görevi ise karanlık madde arayışı. Karanlık maddenin yok olması bir çift foton ürettiği gibi bir elektron-pozitron çiftini de üretebilir. Bu ve diğer deneylerde karanlık maddeyle *ilgili olabilecek* bazı küçük anomaliler tespit edildi. Asıl soru bu çelişkilerin –örneğin, AMS verilerindeki pozitron süreci– karanlık madde yok olmasından değil de şiddetli astrofiziksel fenomenlerden kaynaklanıyor olabilir mi? Bu durumu çözmek üzerine yoğun bir çaba sarf ediliyor.

Axion Karanlık Madde

Karanlık maddedeki WIMP paradigması hiyerarşi problemi üzerine yapılan düşüncelerden ortaya çıktı ve sonuçta oluştu-

rulan hipotez doğanın yeni bir simetri türüne, süpersimetriye sahip olabileceğini ortaya koydu. Yeni parçacıkların hiyerarşi problemini açıklayabileceğini varsayarsak bu parçacıklar gözlemlenen karanlık madde yoğunluğunu açıklayabilecek kütleye ve etkileşim kuvvetine de sahip oluyorlardı. Tüm özellikler kendiliğinden geliyordu. Uydurulmasına gerek yoktu. Bu güzel tasvir, eğer doğruysa, süpersimetri hipotezinin bu kadar uzun süre ilgi görmesinin sebeplerinden biriydi. Fakat bugüne dek süpersimetrik parçacıkların kütlelerinin ağır olması bekleniyordu, aksi takdirde dikkate alınmıyorlardı. Benzer şekilde WIMP'lerin kütlesi de direkt-tespit aramalarında bulunamadı. Ellerinizi hayal kırıklığıyla yukarı kaldırmadan önce karanlık madde özelliklerine sahip –doğa yasalarıyla ilgili başka bir sorudan hareketle– başka bir karanlık madde adayımızın daha olduğunu söyleyeyim. *Axion* adıyla bilinen bu parçacık WIMP'ler kadar uzun süredir araştırma konusu.

Güçlü etkileşimler konusunda güçlü CP problemi olarak bilinen bir problemden bahsetmiştik. Newton'un yasalarının zaman tersinirliği simetrisine uyduğunu gördük. Bu simetrinin küçük miktarda kırılması baryojenez hikâyesi için oldukça önemli. Fakat güçlü etkileşimlerin iyi çalışılmış özelliklerinden biri tartıştığımız CP adı verilen başka bir simetriye uymalarıdır.

Harvardlı deneyci Norman Ramsey 1951'de güçlü etkileşimlerdeki bu özellik için çok hassas bir test yapılabileceğini fark etti. Nötron protona çok benzer. Neredeyse aynı kütleye sahiptir, fakat protondan farklı olarak elektrik yükü yoktur; yani Faraday ve Maxwell'in elektrik alanlarına girdiğinde nötrona bir şey olmayacağı düşünülebilir. Fakat elektrik yükü olmamasına rağmen elektrik alan tarafından itme veya çekmeye uğrayacağı elektriksel bir özelliğe sahip olabilir. Sonuçta nötronlar kuarklardan oluşur ve kuarklar elektrik

yüküne sahiptir. Bundan dolayı elektriksel olarak nötr olsa bile elektrik alandan etkilenebilir, en azından kuarklar nötrondan kısmen uzaklaştırılabilir. Fizikçiler bu özelliğe "elektrik dipol momenti" adını veriyor. Ramsey nötronun yaklaşık kendi boyutu kadar, 10^{-13} cm kadar bir dipol momentine sahip olabileceği sonucuna vardı. Fakat aynı zamanda zaman tersinirliğinin kesin bir simetri olduğunu ve dipol momentin engellenebileceğini fark etti. İlk deneylerinde bir moment olması halinde tahmininden 10 milyon kat daha küçük olduğunu buldu. Güncel deneyler momentin –eğer varsa– bir trilyon kattan daha küçük olacağını gösteriyor.

Güçlü etkileşimler kâğıda ilk döküldükleri zaman dikkat çekici özelliklerinden biri bu durumu otomatik olarak açıklıyor gibi görünmesiydi. Fakat zayıf etkileşim teorisinin gelişimindeki rolünden tanıdığımız Gerard 't Hooft durumun böyle olmadığına işaret etti. Sebep hemen göze çarpmıyordu, o zamanlarda çoğu fizikçinin aşina olmadığı modern matematikle fark ediliyordu. 't Hooft teorinin denklemleri yazıldığında ekleyebileceğimiz bir terimin zaman tersinirliği simetrisini ihlal ettiğini gösterdi. Bu terim Yunan alfabesinden teta (θ) harfiyle gösterilen bir sayı ile orantılıdır. Bir evren yaratırken bu sayıyı rastgele seçerseniz 2 gibi bir sonuç elde edebilirsiniz.

Yirminci yüzyılın en büyük matematikçilerinden ikisi; kariyerinin büyük bir kısmını Oxford Üniversitesi'nde geçiren Lübnan asıllı Michael Atiyah ve MIT'den Isadore Manuel Singer bu matematiğin gelişimine katkı sağladı. 1970'lerde Singer'ın Daniel Friedan ve Roger Schlafly adında iki doktora öğrencisi vardı. Biri ünlü feminist Betty Friedan'ın (*Kadınlığın Gizemi* kitabının yazarı), diğeri de muhafazakâr aktivist Phyllis Schlafly'nin (*Mrs. America* filminin başkarakteri) oğluydu. Dan Rutgers Üniversitesi'nde profesör oldu ve sicim

teorisinin önde gelen isimlerinden biri haline geldi. Dan ve Roger doktora derecelerini aynı sene aldılar ve ikisinin de annesi mezuniyete gelmiş gibi görünüyor. Törende bir gerginlik olup olmadığından emin değilim.

Yine de bu farklı matematiği kullanarak θ değerinin Ramsey'nin ölçümleriyle nasıl ilişkilendirileceği net değildi. Bazı fizikçiler θ değerinin bir önemi olduğundan bile emin değildi. Bu noktada arkadaşım Ed Witten tekrar önemli ve hassas bir deneysel öngörüyle devreye giriyor. Birkaç meslektaşıyla birlikte QCD'nin güçlü etkileşimleri gözlemlendiği şekilde açıklaması halinde nötronun elektrik dipol momentinin θ sayısı ile birlikte hesaplanabileceğini öne sürdü. θ'nın bu deneylerle gösterilebilmesi durumunda milyarda birden küçük olması gerektiğini gösterdiler. Bugün çok daha iyi ölçümler yapılıyor ve bu sayının on milyarda birden küçük olması gerektiği düşünülüyor; önümüzdeki yıllarda daha da güçlü bir limit belirlenecek (ya da θ keşfedilecek).

Gerçek bu şekilde olabilir. Fakat daha ayrıntılı bir açıklama mümkün mü? θ'nın aşırı derecede küçük olmasından kaynaklanan bir mekanizma olabilir mi? 1977'de Roberto Peccei ve Helen Quinn yeni bir seçenek ortaya sürdü. İkisi de o zamanlar Stanford'daydı. Çözümleri Peccei-Quinn simetrisi adıyla bilinen yeni bir simetri gerektiriyordu. Bunun elde edilmesi için minimum halinde bile Standart Model'in üstünde bir yapı gerekiyor. Peccei ve Quinn'in orijinal çalışmalarında dört yeni parçacık vardı. Fakat fark etmedikleri şey parçacıklardan birinin son derece hafif, nötrino dışında bilinen tüm temel parçacıklardan daha hafif olması gerektiğiydi. Bu durumu parçacığa *axion* ismini veren Steve Weinberg ve Frank Wilczek fark etti. İsimlendirme yaparken teknik bir oyun yapmışlardı, aynı zamanda 1960'ların sonunda kısa bir reklam patlaması yapmış bir çamaşır deterjanının ismiydi (ofisimde

eski doktora sonrası araştırmacılarımdan birinin hediye ettiği bir kutu var). Weinberg ve Wilczek bu parçacığın özellikleri –kütlesi ve diğer parçacıklarla etkileşme kuvveti– üzerine çalıştılar ve kısa sürede bunun güncel deneyler tarafından reddedildiğini fark ettiler.

Peccei kariyerinin UCLA'de birkaç yıl dekan olduğu sonraki dönemlerinde Standart Model fenomeni üzerine çalıştı. Quinn Stanford'daki parçacık hızlandırıcı SLAC'de ağır kuarklar üzerine çalışmalarını sürdürdü. Orada doktora sonrası araştırmacısı olduğum zamanlarda mentorluğumu yaptı. SLAC'den emekli olmadan önce birkaç sene üniversite öncesi fizik eğitimi konusunda öncü oldu. Ulusal Bilim Akademisi'nin bir üyesi oldu ve Franklin Madalyası'na layık görüldü. Peccei ve Quinn Amerikan Fizik Birliği'nin 2013'teki Sakurai Ödülü'nü paylaştılar. Maalesef Peccei 2020'de hayata gözlerini yumdu.

Weinberg ve Wilczek'in çalışmalarının ardından axion fikri birkaç sene ilgi görmedi. Ancak sonrasında bazı bilim insanları Peccei ve Quinn'in fikrinin önemli özelliğinin modellerinin ayrıntıları değil, hafif axion parçacığının kendisi olduğunu fark ettiler. İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün bir üyesi olarak (doktora sonrası araştırmacılığın daha havalı bir versiyonu) Willy Fischler (o zamanlar Pennsylvania Üniversitesi'ndeydi ve enstitüde misafir araştırmacıydı) ve Mark Srednicki (o zamanlar Princeton'da doktora sonrası araştırmacısıydı) ile birlikte parçacık fiziğinin ilk süpersimetrik modelleri üzerine çalışıyorduk ve modellerimizde sürekli Peccei ve Quinn'in axion parçacığına benzer parçacıklar buluyorduk. Kısa süre sonra daha genel bir şeyi fark ettik. Eğer axion orijinal modeldekinden daha hafifse axion etkileşimlerinin de daha zayıf olması gerekirdi ve hızlandırıcı deneylerinde detektörler tespit edemeyebilirdi.

Parçacıklarla ilgili başka bir problemi de yıldızlardan öğrendik. Axionlar da nötrinolar gibi yıldız çekirdeklerinde üretiliyorsa çoğunun yıldız enerjisinin bir kısmını taşıyarak yıldızlardan kaçması gerekirdi. Etkileşimleri *aşırı derecede* düşük olmadığı sürece axion salınımı standart yıldız süreçlerini bozmalıydı. En güçlü sınırlar egzotik yıldızlardan; kızıl devlerden, beyaz cücelerden ve Dünya'dan gözle görülebilen son süpernova patlaması SN1987a'dan (Süpernova 1987a, ilk tespit eden kişiye atıf olarak Shelton'ın süpernovası olarak da bilinir) geldi. Makalemizi yayımladığımızda başka bilim insanlarının da benzer fikirlere sahip olduğunu ve "görünmez axion" üzerine model oluşturduklarını öğrendik.

Çalışmamızdan ilk olarak gururlansam da biraz utanç hissetmiştim. Sonuçsuz bir bilmece için bir bahane üretmiş gibiydik. Fakat Willy (şu an Teksas Üniversitesi'nde kuantum kütleçekimi ve ay ışığının EMT özelliği üzerine çalışıyor) beni bu parçacığın erken evrende nasıl davranacağı üzerine sorduğu sorularla sıkıştırıyordu. Benim için yeni bir alandı. Kozmolojideki bu konular hakkında daha önce düşünmemiştim. Fakat eşimin katıldığı bir konferans için geldiğimiz Brandeis Üniversitesi Fizik Bölümü'nde saklandığım sırada axionun erken evrende Higgs parçacığı gibi tüm uzayı kaplayan bir alan oluşturacağını fark ettim. Higgs parçacığının aksine bu alan büyük patlamadan sonra titreşecek ve uzun bir süre sonra duracaktı. Fischler ile birlikte anladığımız üzere bu titreşim başlangıçta durmakta olan yüksek sayıdaki hafif axion parçacıkları anlamına gelebilirdi. Willy beni bunun bir felaket olmasındansa axionun doğru kütleye sahip olması durumunda karanlık madde olabileceğine inandırmaya çalıştı. Sonrasında bu soru üzerine düşünen kişilerin ben ve Willy'den ibaret olmadığını anladık.

Benimle birlikte SLAC'de doktora sonrası araştırmacı statüsünde bulunan Pierre Sikivie ve Larry Abbott, John Preskill ve Mark Wise (ikisi de o vakitte Harvard'daydı) ve Frank Wilczek (kitabın önceki kısımlarında karşılaşmıştık) bizimle aynı kanıya varmışlardı. Eğer bu zayıf etkileşen parçacıklar karanlık maddeyse yeni bir soru ortaya çıkıyordu: Tespit edebilir miyiz? Parçacık hızlandırıcılarda tespit etmemiz çok zor –aşırı zayıf etkileştiklerinden axionlar çok nadir üretilecek ve bundan dolayı çarpıştırıcıda üretilmeleri pek mümkün olmayacaktı– üretilse *bile* tespit etmek neredeyse imkânsızdı. Fakat Pierre Sikivie evrende bu parçacıkların çok yüksek sayıda olmasının bir avantaj olabileceğini belirtti; sonunda bu parçacıkların karanlık maddeyi oluşturduğunu ve çok hafif olduklarını varsaydık. Çok güçlü bir manyetik alanda karanlık madde axionların bir kısmı fotonlara dönüşecektir. Sikivie'nin hesaplamaları yeterince büyük bir manyetik alana sahip ve karanlık madde axionları temsil edecek çok düşük foton sinyallerini tespit edebilecek bir detektör yapmanın –zor olsa da– mümkün olduğunu gösterdi. Yapılan uzun çalışmaların ardından son yıllarda axion kütlelerinin tespit edilebileceği hassaslığa ulaşıldı. Bu deneyler çok yetenekli ve kararlı fizikçiler olan, şimdi UC Berkeley'den Karl van Bibber ve Washington Üniversitesi'nden Leslie Rosenberg tarafından yönetildi. Sekiz enstitüden yirmi sekiz fizikçinin yer aldığı deney Axion Dark Matter Experiment (Axion Karanlık Madde Deneyi), ADMX olarak biliniyor. Yıllar boyu düşük foton sinyallerini tespit edecek güçlü mıknatıs ve detektör üretiminde ilerleme kaydedildi. Olağanüstü bir cihaz.

Tespit edilmek istenen fotonların dalga boyları WIMP yok oluşundaki gamma ışınlarının aksine mikrodalga fırınınızdaki dalga boylarından daha uzundur ve daha düşük enerjilidir. Temel strateji bir oyukta, duvarları yüksek derecede iletken

bir maddeden yapılan bir kutunun içerisinde yakalamak. Bu oyuklar ise son derece ustalıklı bir biçimde tasarlanmış, yani aslında bu bir arama stratejisi. Axion kütlesi bilinmiyor, çok geniş bir aralıkta öngörülüyor. 100 kattan fazla hata payımız olabilir. Bundan dolayı beklenen mikrodalga ışımasının enerjisi de tam olarak bilinemiyor; yani arama yaparken büyük bir foton frekans aralığını küçük adımlarla ilerlememiz gerekiyor. Üzerindeki düğmeyi kullanarak eski bir radyoda çok zayıf bir sinyali hassaslıkla ayarlamaya çalıştığınızı düşünün. Deneyciler sistematik ve itinalı bir arama protokolü geliştirdiler. Axion karanlık madde fikri doğruysa bunu birkaç sene içinde öğreniriz.

Peki bu doğru mu? Çalışmamızın en başlarında bile Fischer'la evrenin erken zamanlarına yönelik yaptığımız kritik varsayımların deneysel olarak doğrulanamayacağının farkındaydık. Bunlardan en önemlisi evrenin bir zamanlar *aşırı* sıcak, yaklaşık 10^{25} Kelvin sıcaklığa sahip olduğuydu. Fakat evrenin bu sıcaklığa sahip olup olmadığı konusunda gerçek bir gözleme sahip değiliz. Deneylerden bildiğimiz tek şey evrenin bir zamanlar nükleer reaksiyonların yaygın olacağı kadar sıcak olduğudur. Bu da ışık elementlerinin oluştuğu, yaklaşık 10^{10} Kelvin derecelik bir sıcaklığa tekabül ediyor. Makalemizde evrenin bundan çok daha sıcak olduğu alternatif bir kozmoloji öne sürmüştük. Tasvirimize göre axion parçacığı çok daha hafif olacaktı. Sayıları evrende daha fazla (karanlık maddenin yoğunluğu aynı kalmak zorunda) fakat tespit etmesi daha zor olacaktı. ADMX deneyiyle görülemeyebilirlerdi. Yıllar boyunca hafif axionlar üzerine daha motive ve iyi çalışılmış modeller geliştirildi. Daha çarpıcı olansa sicim teorisinin hafif axionlar öngörmesi oldu. Ayrıca bu parçacıkları tespit etmek için alternatif stratejiler öne sürüldü. Yakın zamanda Stanford'dan Peter Graham ve çeşitli teorisyen ve

deneyci ortakları yeni bir öneri ortaya koydu. Fikirleri ilginç teknolojiler ve mahir bir fizik içeriyordu. Şu an prototip deneyler planlama ve geliştirme aşamasında. Bu heyecan verici olasılığın yeni bir pencere açma umudu var.

Önyargısız Bir Şekilde Karanlık Madde Aramak

Karanlık maddeyle ilgili olarak sadece evrende ne kadar olduğunu ve sıradan maddeyle nadir etkileştiğini biliyoruz. Çok ağır ya da aşırı hafif olabilir. CDMS ve Xenon1T WIMP deneylerinin tespit edebileceğinden çok daha ağır WIMP olabilirler. Bizim önerdiğimiz gibi ADMX deneyinin göremeyeceği kadar hafif axion parçacıkları da olabilirler.

Süpersimetrik WIMP ve axion doğa yasalarıyla ilgili büyük soruları cevaplandırma çabalarından ortaya çıktı. Fakat iki önerinin de teorisyenlerin büyük sorulara cevap bulma kibirlerinin bir yansıması olması muhtemel. Axion fikri birçok makalede iddia ettiğim gibi güçlü CP problemini açıklamak için en iyi yol. Fakat ADMX tarafından incelenen kütle aralığında bir işaret görülmedi. Süpersimetri hipotezi WIMP karanlık madde arayışı için daha büyük bir motivasyon sağladı. Ancak süpersimetri fikrinin de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda sıkıntı yaşadığını gördük. Beklediğimiz parçacıkları göremedik. Bulamamamızın sebebi şu ana dek şanssız olmamız olabilir, ya da makinenin gelecekteki deneylerinde de süpersimetri adına bir kanıt bulamayabiliriz. Fikirlerimiz bizi yanlış yönlendiriyor olabilir veya bu yeni parçacıkları tespit edecek yeterli enerjiye sahip olmayabiliriz. WIMP beklenenden daha ağır olduğu için tespit edilemiyor olabilir. Yine de WIMP karanlık madde konusundaki fikirler konusunda kuşkuculuğumuzu sürdürmemiz gerekiyor.

Kibir konusuna dönecek olursak doğayı yönlendiren ilkeler konusundaki önyargılarımızın teorik fizikçilerin daha

derin bilgilere ulaşma yolunu tıkayıp tıkamadığını sorabiliriz.

Çoğu teorisyen ve deneyci karanlık maddenin ne olabileceğiyle ilgili önyargılarımızı yok etmemiz gerektiğini düşünüyor. Daha bilmediğimiz çok şey var. Neden şu an bizi sıkıntıya sokan gizemlere takılıp kalalım? Belki de karanlık maddenin ve onu tespit etmenin diğer yollarını aramalıyız. Tüm kütle ve etkileşim kuvvetlerini çalışmamız gerçekçi olmasa da çalışabileceğimiz seçenek aralığını daha geniş tutabiliriz. Bu da bizi teorisyen ve deneycilerin daha farklı teknolojileri keşfetmesine götürecektir. Bunu yazan teorisyene göre sağlıklı ve heyecan veren gelişmeler bu şekilde olacak.

BÖLÜM 11
KARANLIK ENERJİ

Einstein'ın kütleçekim teorisine göre enerji uzay ve zamanı büker. Bir yıldız veya kara delik tarafından bükülen uzay-zamanda gezegenler ve ışınlar düz çizgiye en yakın yolu izlerler. Fakat bu yörüngeler etraflarındaki evrenle şekillenir. Einstein'ın teorisinin ilk testleri bu etkileri incelemiş ve küçük farklılıklar bulmuştu. Daha fazlası ancak nötron yıldızları ve kara deliklerin incelenmesi ve keşfiyle mümkün oldu. Bu cisimlerin yakınında uzay-zaman ciddi derecede değişir. Çarpışan kara delik ve nötron yıldızlarından çıkan yerçekimsel dalgaların gözlemlenmesiyle uzay-zamanın bozulmasını gördük.

Einstein evren bir bütün olarak düşünüldüğünde uzay-zamanda çok daha dramatik değişiklikler olacağını düşündü. Onun zamanında uzayı büken enerjinin yıldızlara ait olduğu düşünülüyordu. Yakındaki galaksilerin varlığı uzakta olanlara göre daha az anlaşılmıştı. Einstein'ın evren modeline göre uzay-zaman bükülür ve zamanla evren genişler. Sonuç olarak her şey her şeyden uzaklaşır.

Artık çok daha fazlasını biliyoruz. Gökbilimciler ve astrofizikçiler evrenin galaksiler, galaksi kümeleri ve süper kü-

melerle dolu olduğunu haritaladılar. Aralarında çoğunlukla hidrojenden oluşan büyük gaz kütleleri bulunuyor. Önceki kısımlarda gördüğümüz gibi evrenin kütlesinin büyük çoğunluğunu karanlık madde oluşturuyor.

Einstein'ın En Büyük Gafı Yeniden İnceleniyor

Ancak enerjinin, başından beri hem miktar hem de uzay-zamana olan muhtemel etkisi bakımından korkunç görünen farklı bir formu daha olma ihtimali var. Uzay ve zamanın her noktasında belirli bir miktarda enerji bulunur. Einstein'ın teorisinde kozmolojik sabit adını verdiği, denklemlerine uzay ve zamanın genişlemesini engelleyeceğini umarak eklediği bir terim bulunuyordu. Hubble'ın evren genişlemesini keşfiyle, Einstein kariyerinin en büyük hatası olarak gördüğü ilk denemesindeki kozmolojik sabiti kaldırmaya çalıştı.

Peki neden bunun bir hata olduğunu düşünüyordu? Anlayabildiğim kadarıyla denklemlerini çirkinleştirdiğini düşünmüştü ve en azından bir süreliğine evrenin büyümesiyle ilgili verilerle eşleşmesi gerekmediği kanısına varmıştı. Fakat doğa yasaları birinin, Einstein'ın bile estetiğine güzel görünmek zorunda değildir. Einstein kuantum mekaniğine bu kadar karşı olmasaydı kozmolojik sabitin neden olmadığına değil, neden büyük olmadığına şaşırabilirdi. O kadar büyük ki, evreni birkaç kilometre veya daha küçük bir çapa sahip küçük bir topa sıkıştırabilirdi.

Çok küçük şeylerin dünyasını yöneten kuantum mekaniği ile evrensel büyüklüklerin arasındaki karşıtlığın sebebi nedir? Sorun belirsizlik ilkesinden kaynaklanıyor. Belirsizlik ilkesi bir parçacığın konumunun hız ve enerji bilgisiyle birlikte kesin olarak bilinemeyeceğini söyler; ışık her şekilde titreşebilir ve titreşimin olmadığı bir yer bilinemez. Her titreşim –her frekans (radyonuzdaki kilohertz)– için küçük bir enerji mev-

cuttur. Bildiğimiz kadarıyla sınırsız sayıda frekans olasılığı bulunur; yani evrenin her noktasında sınırsız miktarda enerji olması gerekir. Garip bir şekilde bu enerji etkisini *negatif* basınç olarak gösterir. Size tuhaf gelmeyebilir. Çoğumuz (hatta anlaması gereken çoğu öğrenci ve meslektaşım bile) basınç konseptini iyi bir şekilde anlamıyoruz. Balonu bu duruma örnek verebiliriz. Balonun duvarlarına baskı uygulayan ve balonun sönmesini engelleyen şey içindeki havanın basıncıdır. Aynı şey araba tekerleğiniz için de geçerlidir. Negatif basınçla birlikte hava sanki duvarları emiyormuş gibi görünür.

Bu noktada bu çılgın sonuçtan dolayı kuantum mekaniğini neden bir kenara atmıyoruz diye sormanız gayet mümkün. Bu özellikle ilk kez karşılaşan her fizik öğrencisi de aynı soruyu soruyor. Fakat öğretmenleri ve ders kitapları onlara sonsuz enerji diye bir şey olmadığını söyler. Öğretmenlerin (ben de dahil) bunu yapmasına gerek kalmaz, çünkü genel göreliliği eklemeden önce fotonlar, elektronlar, protonlar ve diğer her şey bu enerji çorbasında bozunmadan hareket edebilirler.

Benim neslimin ve benden eski nesillerin öğretmenlerinin bu problemi reddetmeleri için bir sebep daha var. Genel görelilik uzun bir süre sallantılı bir şöhrete sahip oldu ve kuantum mekaniği ile birleştirmek güvenilmez bir işti. Bundan dolayı bu problemin farkına varsak bile göz yummayı tercih etmiştik. Uğraşmak zorunda olduğumuzda da muhtemelen başka bir yerden bir enerji daha geldiğini ve diğer enerjileri nötrlediğini düşünerek kendimizi kandırıyorduk.

Bu sorunla Leonard Susskind yüzünden erken yüzleşmek zorunda kaldım. Beni hiyerarşi problemiyle tanıştırarak dünyaya bakış açımı zaten sarsmıştı. Sonrasında da beni bir kez daha, bu sefer ince ayar problemiyle vurdu. Aspen, Colorado'da, muhteşem dağların ve ünlü ve zengin insanların malikânelerinin yakınında, teorik fizikçilerin yazın yaklaşık

üç haftalığına buluştuğu küçük bir fizik enstitüsü bulunuyor. Çok güzel bir yer. Hafta içinde çalışmalarını sürdüren fizikçiler hafta sonlarında dağların yakınında yürüyüş yapıyor veya bisiklet sürüyor. Doktora sonrası araştırmacılık yaptığım bir yaz enstitüye ziyarette bulunmuştum. Arkadaşım Willy Fischler ve Lenny de oradaydı. Lenny'nin bana evrenin neden küçük bir top haline gelmediğini sorduğunu hatırlıyorum (Ay'ın boyutu gibi düşünüyordu). Masumiyetimi kaybettim. Tüm varlığım uygun bir evren yaratmak için 32 ondalık basamağa değil 100 basamağa uyum sağlamak zorunda kaldı. Hiyerarşi problemi küçük görünmeye başlamıştı.

Sonrasında Willy ve Mark Srednicki ile hiyerarşi problemini süpersimetriyle çözdüğümüzü umduğumuz zamanlarda diğer problemi de çözmemiz gerektiğini düşünmüştük. Aslında süpersimetri bu açıdan iyi görünüyordu. Süpersimetri bozulmazsa kozmolojik sabit sıfır olabilirdi. Farklı tipte parçacıkların eklenmesi etkileri sıfırlayacaktı. Fakat süpersimetri kesin değildir, hâlâ 60 ondalık basamağı iptal etmemiz gerektiğini fark etmiştik. Beyinlerimizi bu bilmeceyi çözmek için zorladık, cevabın yakında olduğunu hayal ediyorduk.

Fakat bu bulmacanın çözüm arayışı dışında bir yönü daha bulunuyor. Sonuçta, sayının oldukça küçük olması gerektiğini biliyorduk. Evren de son derece büyük, yani sıfır olabilirdi. Gökbilimciler böyle bir şeyi ölçecek olsalardı, ancak evren bugünkü yaşında olduğunda ölçümün bir önemi olabilirdi. Peki neden bugün?

Son gülen ise doğa olacaktı.

Evren Nasıl En Yaşlı Yıldızlardan Daha Genç Olabilir?

Çoğumuz gibi ben de iki ebeveynin çalıştığı (ve bir çocuklu) bir evde yaşıyorum. Her zaman eşimin işine yakın oturmamız gerekti, işine uzak mesafede olan ben oldum. Arabayı tek

başıma kullanamazdım ya da kullandığımda suçlu hissederdim, bundan dolayı genellikle toplu taşıma ya da iş arkadaşlarımla ortak bir araba kullanırdım. Benzer sıkıntı çekenleriniz için bu ulaşım şeklini tavsiye ederim. Duygusal sağlığımı geliştirmem ve yoldaki zamanımı verimli geçirmem konusunda çok yardımcı oldu. Aynı zamanda uzun yıllar boyu karbon ayak izimin ciddi derecede düşmesini sağladı. Yıllarca yol arkadaşlığı yaptığım isimlerden biri George Blumenthal'dı. George ayrıcalıklı bir gökbilimciydi ve karanlık madde teorisinin gelişiminde önemli bir rol oynadı. Sonrasında üniversitemde rektör oldu. 1990'larda hukuk profesörü eşi Kelly Weisberg San Francisco'da çalıştığından evlerini iş yerlerine ortalamak istediler ve komşum oldular. George ve Kelly'nin çocukları iki büyük çocuğumuzla aynı yaştalardı, işe giderken çocuklarımızı veya kampüs ortamını konuşmadığımızda merak uyandırıcı sorular üzerine tartışırdık. Einstein'ın teorisine göre tüm madde ve enerjiyi (karanlık madde dahil) görebildiğimizi varsayarsak, bugünkü genişleme oranını göz önüne alarak evrenin yaşını ve büyük patlamadan bu yana ne kadar zaman geçtiğini hesaplayabiliriz. 1990'ların ortalarında yapılan Hubble ölçümleri evrenin yaşını yaklaşık 9 milyar yıl olarak verdi. Fakat ciddi bir problem vardı. Evrendeki küresel küme adı verilen cisimler 10 milyar yaşındaydı. Bunun nasıl bir hayal kırıklığı olduğunu söylemeye gerek yok.

George benim aklıma yatmayan bir çözümden bahsetti. Kozmolojik sabitin olması durumunda evrenin genişlemesi zamanla hızlanacaktı (gökbilimcilerin ivmeden kastı budur). Başka bir deyişle, geçmişteki genişleme bugünkünden daha yavaştı ve evren ivmesiz hesaplanacağından daha yaşlıydı. Bir grup bilim insanı bu durumun yaş çelişkisini açıklayacağına işaret etti. Bana ve diğerlerine göreyse doğru değerde olan bir kozmolojik sabit ödenmesi gereken büyük bir bedel gibi

görünüyordu. Ancak kozmolojik sabiti değerlendirmek için başka bir neden daha var. Bu neden Santa Cruz'daki meslektaşım Joel Primack'tan duyduğum, galaksilerin oluşumuyla ilgili yapılan bir çalışmadan geldi. Birkaç meslektaşıyla birlikte galaksilerin nasıl oluştuğunu anlamaya çalışıyorlardı. Çalışmalarına başlarken evrenin tarihi boyunca sahip olduğu enerjinin büyük bir kısmının maddelerden –sıradan madde ve karanlık madde– geldiğini varsaydılar. Bu problemin son teknoloji bilgisayar simülasyonlarıyla çalışılması gerekiyordu. Gözlemlenebilen tipik galaksiler için yapılan ölçümler çok uzak olmasa da tam doğru değildi. Fakat modellerine bir kozmolojik sabitin olduğu ve bugünkü enerjinin önemli bir kısmını oluşturduğu eklendiğinde sonuçlar daha iyi bir hale geliyordu.

Bunun bana neden garip göründüğünü anlamak için evrenin tarihinde ne zaman kozmolojik sabitin boyutunun önemli olduğu sorulabilir. Cevap bunun ilk birkaç yüz milyon yıl için neredeyse hiç önemli olmadığıydı. Evren bir milyar yaşına geldiğinde ve yıldızlar oluşmaya başladığında sabitin etkileri tespit edilebilir olmaya başladı. Meslektaşlarım haklıysa, bilmediğimiz bir sebepten ötürü kozmolojik sabit sadece "şimdi", evrenin içinde yaşadığımız döneminde önemli hale geldi. Yine kuşkulanmıştım. Bu çılgın sayı ancak bugün ve gelecekte önemli olup geçmişte olmuyorsa bana daha çok küresel kümelerin ve galaksilerin oluşumu yanlış anlaşılmış gibi geliyordu.

Düşüncelerim sadece önyargıydı ve tamamen yanlış olduğu ortaya çıktı. Neyse ki gökbilimciler ve astrofizikçiler genel göreliliğin ilk günlerinden beri kozmolojik sabiti inceliyorlardı. Evren küçük bir topa küçülmediği için çok büyük bir değere sahip olamayacağını biliyorlardı. 1990'ların başında herhangi bir olumlu kanıt bulunmuyordu, sadece belirli bir

sayıdan küçük olması gerektiğini söylüyorlar ve gözlemlemeyi umuyorlardı.

Burada hikâyemize yine Steven Weinberg dahil oluyor. Weinberg birçok alana ilgisi olan bir bilim insanıydı. Standart Model'e yaptığı önemli eklemelerin yanında uzman bir gökbilimciydi. Konuyu öğrenmek için 1970'lerin başında bir ders vermeye başladı ve *Gravitation and Cosmology* (Kütleçekimi ve Kozmoloji) adında kapsamlı bir ders kitabı yazdı. Karanlık madde miktarının hesaplanması için başlangıç noktası teşkil eden önemli makaleler kaleme aldı. Son yıllarda güncel bilgisiyle yeni bir ders daha verdi ve *Cosmology* (Kozmoloji) adında *başka* bir ders kitabı yazdı.

Weinberg kozmolojik sabit sorunuyla ve neden çok küçük olması gerektiği tartışmasıyla ilgiliydi. 1989'da Harvard'da halka açık ders verdi ve konuyla ilgili bir derleme makalesi yazdı. Üstünkörü argümanları keskinleştirdi. "Kozmolojik sabit evreni çok küçük hale getirecek kadar büyük olamaz" demek yerine kozmolojik sabitin çok büyük olması durumunda yıldızların ve galaksilerin oluşamayacağına işaret etti. Galaksiler büyük patlamadan yaklaşık bir milyar yıl sonra oluşmaya başladı. Evren bu sırada çok hızlı genişliyorsa yıldızları oluşturan maddeler bu patlayıcı genişlemeden ötürü parçalarına ayrılırdı. Diğer bir ifadeyle, direkt bir gözlem olmamasına rağmen kozmolojik sabitin ne kadar büyüklüğe sahip olduğunu söyleyebilirdi. Bunu açıklayıp kozmolojik sabitin neden küçük olacağını anlamanın zor olduğunu söyledi ve kozmolojik sabitin belirli bir değerden küçük olmasına gerek olmadığını belirtti. Bu veriyi gözlemleyebilmek bizden milyarlarca ışık yılı uzaklıkta bulunan yıldız ve galaksilerin hareketlerinin çalışılmasını gerektiriyor.

UC Berkeley'den Saul Perlmutter ile Johns Hopkins Üniversitesi'nden Adam Riess'ın ve Avustralya Ulusal Üniver-

sitesi'nden Brian Schmidt'in liderliğini yürüttüğü iki gözlemsel astrofizik grubu kozmolojik sabiti ölçecek bir strateji üzerine çalıştı. Bu sorunun şiddetli bir etkinliğin, *süpernova patlamalarının* çalışılmasıyla cevaplanabileceğini fark ettiler. Süpernovalar bazı yıldızların hayatlarını sona erdiren patlayıcı olaylardır ve kozmostaki en dramatik olaylardan biridir. Gökbilimciler yıldızların doğumunu ve ölümünü çok iyi anlamışlardır, bundan dolayı bu olaylar evrenle ilgili ölçümlerin yapılabileceği bir araç olarak kullanılabilir. Yıldızlar madde miktarının –içerisinde daha ağır elementlerin de bulunduğu hidrojen gazı kütlesi– daha yoğun olduğu bölgelerde doğar. Parçacıklar yerçekimsel çekimden ötürü birbirlerine yaklaşır. Sıkı bir şekilde kenetlenebildikleri vakit ısınmaya başlar. Sonunda nükleer reaksiyonların gerçekleşebileceği kadar yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı vakit yıldız ısınır ve ışık, sıcaklık ve radyasyon yaymaya başlar. Bu noktadan sonra yıldızın yaşamı iç kısımlarında meydana gelen ve kendisini patlatacak kuvvet uygulayan termonükleer reaksiyonlarla yüksek kütlesinden dolayı yıldızın içine çökmesine neden olacak kuvvet uygulayan devasa kütleçekimi kuvveti arasındaki rekabete döner. Bu kuvvetlerin arasındaki denge yıldızın boyutu ve sıcaklığını belirler. Nihayet nükleer yakıt bittiği zaman yıldız kütleçekiminden ötürü içine çöker. (Madde aslında yok olmaz fakat sonunda reaksiyonu sürdürecek kadar hidrojen kalmaz.) Bu noktada yıldızın boyutuna (kütlesine) göre farklı şeyler meydana gelir. Güneşimiz farklı evrelerden geçecek. 5 milyar yıl içerisinde nükleer yakıtının büyük bir kısmını tüketecek ve yaşamını beyaz cüce olarak bilinen soğuk kalıntı halinde sonlandırmadan önce kısa süreliğine büyüyerek kızıl dev haline gelecek.

Daha yüksek kütleye sahip diğer yıldızlar bir noktada tüm nükleer yakıtını tüketir ve içine çöker, yıldızın yüzeyine ya-

kın olan bölgelerdeki maddeler merkeze çekilir. Madde yeteri kadar sıkıştırıldığında sistem tekrar hızlı bir şekilde ısınır ve devasa bir patlama meydana gelir. Bu patlama Tip II süpernova olarak bilinir. Karbon ve demir gibi daha ağır elementler de içeren maddenin büyük bir kısmı daha sonra diğer yıldızları oluşturmak üzere uzaya saçılır. Maddenin bir kısmı nötrino ve ışık halinde salınır. Kalan maddeler de geride kalarak nötron yıldızı veya kara delik oluşturur. Süpernovalar Dünya'dan çıplak gözle nadiren görünür. Sonuncusu 1987'de Güney Yarımküre'den gözlemlenebildi. Bir diğer süpernova türünde ise ikili yıldız sisteminde beyaz cüce diğer yıldızdan saçılan maddeleri alır ve tekrar canlanır. Bu tip süpernovalar Tip I süpernova olarak adlandırılır.

Tip I süpernovaları Riess, Schmidt ve Perlmutter tarafından kullanışlı yapan özelliği gökbilimciler *standart mumlar* olarak adlandırıyor. Hepsi neredeyse aynı görünüyorlar ve bunun sonucu olarak yaydıkları ışığın ayırıcı bir karakteristiği bulunuyor. En önemlisi de yayılan ışığın spektrumu biliniyor. Einstein'ın kızıla kayma özelliğine göre Dünya'dan gözlemlediğimiz ışığın dalga boyunda nereden ve ne zaman yayıldığına göre bir kayma meydana gelir. Perlmutter, Riess, Schmidt ve ortakları gökyüzündeki Tip I süpernovaları gözlemleyen ve farklı frekanslardaki ışımasını ölçen birinin evrenin yerçekimsel alanının haritasını çıkarabileceğini fark ettiler. Bu bilgi evrenin farklı zamanlardaki genişleme hızını belirlemek için kullanılabilir.

Elde ettikleri sonuca göre kozmolojik sabit Steven Weinberg'in kaba tahminindeki gibi evrenin yaşını ve yapısının oluşumunu açıklayacak değerdeydi. Aslında karanlık enerji bugün evrenin enerjisinin %70'ini oluşturuyor. Perlmutter, Riess ve Schmidt çalışmaları sayesinde 2011'de Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

Sonraki yıllarda yapılan süpernova gözlemleri diğer gözlemlerle birleştirilince keşfi doğrulamış oldu. Sonuçtan kozmolojik sabit olarak bahsetsem de fizikçiler ve gökbilimciler başka bir şey olabileceği için *karanlık enerji* demeyi tercih ediyor. Bölüm başlığımın karanlık enerji olmasına rağmen iki sebepten ötürü kozmolojik sabit tabirini kullanmak istiyorum. İlk sebebi bugün enerji yoğunluğunun sadece beklendiği değerde olması değil, aynı zamanda evrende uzay-zaman ve basınca göre sabit olması. İkinci sebebi ise ileride göreceğimiz üzere kozmolojik sabitin yeterince çılgın olması. Daha fazlası temelli çılgınlık olur.

Evren tarihinde çok önemli bir dönemdeyiz. Büyük patlamadan sonraki saniyelerden günümüze dek evrenin genişleme hızı yavaşlıyor. Evren 150 yaşındayken 3 dakikalık halinden 10.000 kat daha büyüktü. Sonraki 13 milyar senede de benzer oranda büyüdü. Her şey değişimle alakalı. Önümüzdeki 25 milyar yılda evren 10 kat daha büyüyecek. Sonraki 25 milyar yılda bir 10 kat daha büyüyecek. Ondan sonraki 25 milyar yılda da 10 kat daha büyüyecek ve bu şekilde devam edecek. Başka bir deyişle 100 milyar yıl içerisinde evren bugünkünden 10 milyar kat daha büyük olacak. Bir trilyon yıl içerisinde bugünkünden 10^{100} kat, *gugol* kat daha büyük olacak. Bugün bizden bir milyon ışık yılı uzaklıkta bulunan galaksiler milyon gugol ışık yılı uzaklıkta, herhangi bir enstrümanın görebileceğinden çok daha uzakta olacak. Böyle büyük zaman süreçlerinin ardından evren sıkıcı bir hale gelecek.

Şimdi o soğuk uzak gelecekten geriye adım atma zamanı.

KARARSIZLIĞA ATILAN ADIM

BÖLÜM 12
HER ŞEYİN BAŞLANGICI

Evrenin bir zamanlar bugün gördüğümüzden çok daha küçük olduğunu biliyoruz. Tarihini 13 milyar yıl öncesine, bugünkünden 10^{20} kat daha küçük olduğu zamana dek takip edebiliyoruz. Bu anı büyük patlamaya dair ilk an olarak tanımlıyoruz. Evren gerçekten bir noktaya kadar küçüldü mü? Geçmişi nasıl inceleyebiliriz? Son soru için astrofizikçilerin bir cevabı bulunuyor. Büyük patlamadan hemen sonra baryonlar ve karanlık madde üretilmeden önce son derece dramatik bir olay meydana geldi. Bu olay için çok sayıda kanıtımız bulunsa da birçok açıdan gizemini koruyor. Bu dönem *enflasyon* (şişme) olarak biliniyor. Muhtemelen direkt bir kanıt elde edebileceğimiz en erken dönemi temsil ediyor.

Son bölümde evrenin üssel bir büyüme dönemine girdiğini öğrenmiştik. Her 10 milyar yılda bir 10 kat büyüyor. Ancak bundan önce olan şey daha da ilginç. Büyük patlamadan sonra saniyenin çok küçük bir kısmında –belki de 10^{-33} saniye sonra– evren her 10^{-33} saniyede (bir saniyenin yaklaşık trilyonda trilyonda milyarda biri) bir 10 kat büyüdüğü bir döneme girdi ve bunu evrenin yaklaşık 10^{100} kat –bir gugol– ka-

dar büyüyeceği bir süre boyunca devam ettirdi. Bu durum bir bakterinin saniyenin küçük bir diliminde bir evren boyutuna büyüdükten sonra bunu üç kez daha yapmasına benzer. Kozmologlar neden böyle düşünüyor? Bunu nasıl bilebilirler? Bu noktada ilginç fikirler belirli bir çalışma ve deney konusu haline gelir. Alan Guth 1970'lerde sıkı çalışan bir doktora sonrası araştırmacısıydı. Büyük patlama kozmolojisiyle ilgili dönemin klasik teorik fiziğinden oldukça uzak problemlere odaklanmıştı. Doktora sonrası araştırmacılığı yaptığım zamanlarda SLAC'ye yaptığı bir ziyarette bunları anlattığını hatırlıyorum.

Alan üç şeyle ilgileniyordu. İlk sorun Einstein'ın kozmolojideki başlangıç noktasını ilk öğrendiğimde hissettiğim rahatsızlığın çok daha şiddetli bir haliydi. *Kozmolojik ilke*ye göre evren her noktada ve yönde özdeşti. Bu tabirin hatırı sayılır derecede doğru olduğunu görmüştük. Örneğin mikrodalga arkaplan sıcaklığının her yönde 10.000'de bir Kelvin seviyesinde aynı olduğunu biliyoruz. Eğer bir noktada 2,7001 Kelvin ise diğer noktada 2,7002 Kelvin'di. Guth'un bu soruyla ilgilendiği zamanlarda bunlar bu kadar net bilinmiyordu, fakat sıcaklığın bakılan her yönde kabaca aynı olduğu kesindi.

Bu durum bir noktaya kadar çok şaşırtıcı değil. Soğuk havayla dolu bir konteynıra sıcak hava pompalar ve konteynırı kapatırsanız, ilk olarak konteynırın farklı noktalarındaki havanın sıcaklığı farklı değerler alacak, fakat bir süre sonra her noktadaki gazın sıcaklığı aynı olacaktır. Evrenin sıcaklığıyla ilgili mesele "bir süre sonra"nın ne olduğuydu. Konteynırdaki hava için sıcaklık, moleküllerin ortalama enerjisi veya hızını ifade eder. İlk olarak içeri pompalanan sıcak havadaki moleküller komşularından çok daha hızlı hareket eder. Fakat hızlı moleküller yavaşlarla çarpıştıkça enerjilerinin bir kısmını onlara aktarır ve bir noktadan sonra benzer enerjiye,

benzer sıcaklığa sahip olurlar. Bunun ne kadar zaman aldığı moleküllerin hangi sıklıkla çarpıştığıyla alakalıdır. Sıcak hava pompalandıktan kısa süre sonra konteynırın farklı noktalarının sıcaklığı ölçülürse farklı değerler elde edilir.

Konteynırın farklı noktalarının aynı sıcaklığa sahip olmasının en hızlı yolu moleküllerin ışık hızında hareket etmesidir. Erken evren için de bu durum geçerli. Kozmik mikrodalga arkaplan ışımasına baktığımızda neredeyse aynı sıcaklığa sahip olan fakat ışık hızında bile birbirlerine temas edemeyen 10^{12} bölgeye bakmış oluyoruz. Evren bu şekilde mi yaratıldı?

Guth'un üzerinde çalıştığı ikinci bilmece uzayın eğriliğiydi. Bugün uzay-zamanın evrenin tarihinde bükülmesi fikrine aşinayız, fakat uzay herhangi bir vakitte bükülmüş olabilir. Bunu bir benzetmeyle anlatabiliriz. Bir topun yüzeyinde yaşayan bir karınca olduğumuzu düşünürsek dünyamız aslında iki boyutlu, fakat eğilmiş bir iki boyutlu dünya olur. Örneğin bu büyük yuvarlak üzerinde yeterince ilerlersek başladığımız noktaya döneriz. Einstein'ın kozmolojisinde de aynı şey ekstra bir boyutla birlikte mümkün. Çevremize bakarsak evren net bir şekilde düz görünür. Bunu anlamak zor. Çok erken zamanlarda büyük bir uzay eğriliğinden kaçınmak için her şeyin doğru olması gerekir.

Guth'un ilgilendiği üçüncü bilmece *tek kutup problemi*ydi.

Enflasyon hikâyesinin bu kısmı beni başka bir soruya yönlendiriyor. Elektrik ve manyetik kuvvetlerle kütleçekim arasındaki farktan bahsetmiştik. Bir atomun içerisindeki elektrik kuvveti yerçekimsel kuvvetlerden kat kat daha büyüktür. Fakat doğada atomların büyük bir çoğunluğu elektriksel olarak nötrdür, hatta yüksek mesafelerde bu kuvvetler etkisini yitirir ve kütleçekim büyük cisimlerde –gezegenler, yıldızlar ve daha küçük şeylerde– mücadelenin galibi olur. Burada elektrik yüküyle ilgili önemli olan şey elektronun protonla karşıt

bir elektrik yüküne sahip olmasıdır. Burada "karşıt" derken dikkatli olmamız gerekir, bunun doğru olduğunu ancak deneylerle bilebiliyoruz. Özel bir deney yapmadan sadece kaba tahminlerde bulunabiliriz. Elektronun yükü protonun yükünden çok az küçük olsa yıldız ve gezegenler atomlarındaki pozitif yükün toplamı kadar bir yüke sahip olurlardı. Bu da Güneş ile Dünya arasında bir itme kuvveti oluştururdu. Bu kuvvet kütleçekimden 10^{19}'da bir kadar büyük olursa Güneş ve Dünya'yı birbirinden uzaklaştırırdı. Daha detaylı varsayımlar daha net sonuçlar ortaya çıkarıyor; yani bu yükler birbirine karşıt ve eşit büyüklükte görünüyor.

Doğa yasaları hakkında düşünürken "bu durum bu şekilde meydana geliyor deyip geçmeli miyiz yoksa bir açıklama getirmeli miyiz" diye sorabiliriz. Burada hikâyemize tekrar Paul Dirac dahil oluyor. Ben de dahil çoğu fizik öğrencisine göre elektrik üzerine düşünmek manyetizmadan daha kolaydır, çünkü elektrik temelde elektrik yüküne göre hareket eder. Manyetizmayı anlamak ise daha zordur. Elektrik akımından ve parçacıkların spinlerinden meydana gelir. Denklemleri daha karmaşıktır. Manyetik yük diye bir şey olsaydı anlaması daha kolay olabilirdi. Fakat kimse böyle bir şey bulmadı ve Maxwell'in denklemleri elektrik yüklerine işaret ederken manyetik yüklerden bahsetmez. Bu şekildeki manyetik yüklere *manyetik tek kutup* adı veriliyor.

Antimaddenin varlığını öne süren Paul Dirac 1931'de Maxwell'in teorisine tek kutup eklendiğinde ne olacağını sorguladı. Ben olsaydım en bariz şeyi yapar ve Maxwell'in denklemlerine manyetik yük eklerdim. Dirac bu problemi tıpkı Einstein'ın kütleçekim görelilik teorisini geliştirirken yaptığı gibi daha derin ve ustaca ele aldı. Evrende manyetik bir tek kutbun varlığının –sadece birinin bile– kuantum mekaniği için engel oluşturacağını fark etti. Schrödinger'in denklemi-

ni elektron gibi yüklü nesnelerin ve tek bir manyetik kutbun bulunduğu bir dünya için ele aldı. Schrödinger'in sisteminin matematiksel bir kurnazlık yapılmadığı sürece iki parçacığın birlikte var olmasına izin vermediğini belirledi. Meşhur makalesine bir manifestoyla başlamıştı: "Fiziğin istikrarlı bir şekilde ilerlemesi için teorik formülleştirilmesindeki matematiğin sürekli ilerlemesi gerekir."

Dirac sonrasında bir yerde tek bir manyetik tek kutbun bulunması durumunda bile proton ve elektronla ilgili tüm elektron yükleri iptal edilmediği sürece kuantum mekaniğinin çalışmayacağını öne sürdü. (Fizikçiler elektrik yüklerinin ayrık olduğunu ve tüm yüklerin en temel yük biriminin katları olduğunu söyler.) Bu, yük ayrıklığına dair önerilen ilk açıklamaydı ve o günden beri deneyciler tek kutupların bulunma ihtimalini açık tutuyor. Çeşitli çalışmalar zaman zaman ortaya bir aday çıkarsa da bunların yanlış sinyal veren sıradan olaylar olduğu anlaşıldı. Teoride ise önemli gelişmeler elde edildi. Dirac'ın yaklaşımında tek kutuplar sisteme özellikle belli bir amaca yönelik şekilde sokulmuşlardı. Yükleri, kütleleri ya da diğer özellikleri deney yapılmadan bilinemezdi. Büyük birleşik teoriler ve sicim teorisi tek kutupları içerir – teorilerin özelliği olarak tek kutuplar kendiliğinden gelir– ve Dirac'ın kuralına uyar. Çoğu zaman bu parçacıklar aşırı ağır olur. Aynı zamanda kararlıdır. Bundan dolayı bunların var olması için iyi bir şans var. Hızlandırıcılarda üretilmek için çok ağır olsalar da kozmosta tek kutupların üretildiği yer ve zamanlar olabilir.

Tek kutupların sayısı konusunda çok güçlü sınırlamalar var. İlki galaksimizi sarmalayan manyetik alanın varlığından kaynaklanıyor. Tek kutuplar var olsaydı bu alanın etkisini yok edebilirlerdi. İkincisi de evrenimizdeki enerji miktarını iyi bilmemizden geliyor. Sicim teorisi ve büyük birleşik te-

oriler gibi teorilerde tek kutuplar oldukça ağırdır ve kütlesi protonun kütlesinin 10^{16} katı veya daha fazladır (yaklaşık 10.000 trilyon). Evrende maddeye bağlı enerjinin miktarını bildiğimizden bu nesnelerin atomların sayısının 10^{16}'da birinden daha fazla olamayacağını söyleyebiliriz; yani evrende bir kilometre küplük bir alanda bir tek kutup bulma şansınız 100 milyonda birdir.

Ancak burada büyük bir sorunla karşılaşıyoruz. Evren geçmişte aşırı sıcaksa tek kutup ve anti tek kutup üretilmiş olabilirdi. Evren soğudukça bunların büyük bir kısmı varlığını sürdürürdü. Bugün foton sayısıyla karşılaştırılabilir miktarda olması gerekirdi ki, devasa kütlelerinden dolayı bu imkânsızdır. Evren hiçbir zaman çok sıcak olmamış olsa bile çok sayıda tek kutbun üretilmesi gerektiği konusunda görüşler var; yani ya tek kutupların doğada bir rolü yok ya da erken evrenin kozmolojisi konusunda öğreneceğimiz daha çok şey var.

Enflasyon

1981'de Alan Guth tek kutup probleminin yanında homojenlik, izotropi ve düzlük problemlerini de çözecek bir fikir öne sürdü. Fikrine ekonomiden hareketle enflasyon adını vermişti. 1970'lerde Birleşik Devletler'de enflasyon yükselmişti ve ülkenin "dörtnala enflasyon" tehlikesiyle karşı karşıya olmasından endişe duyuluyordu. Almanya'da 1923'te çok uç bir durum meydana gelmişti ve fiyatlar günde %41 oranında artıyordu. Bu oranla fiyatlar her hafta 10 katına çıkardı (neyse ki Birleşik Devletler'de İç Savaş'ın sonrasındaki Konfederatif Devlet'i hariç tutarsak böyle bir durum hiç yaşanmadı). Ekmeğiniz 5 dolarsa, bir sonraki hafta 50 dolar, ondan sonraki hafta ise 500 dolar olacak ve bu şekilde devam edecekti. Bir yıl sonrasında ekmeğinizin fiyatı inanılmaz bir şekilde 10^{52} dolar olacaktı. Bu miktar Güneş'teki atom sayısıyla aynıdır!

Tabii ki her şey böyle devam edemezdi. Zaten para tükenmiş olurdu. Bu durumda hükümet değişirdi veya çok daha kötüsü olurdu.

Guth evrenin kısa bir süreliğine bu şekilde genişlediğini iddia etti. Evren 60 kat hızlı büyümüş olsa biraz önce sıraladığımız tüm problemler çözülürdü. Sıcaklık da neredeyse her yerde aynı olmak zorunda olurdu. Şu anda gözlemlediğimiz tüm evreni son derece küçük bir hacme indirsek doğal olarak gördüğümüz her şey aynı sıcaklığa sahip olurdu. Evren küresel bir şekle sahip olsa bile düzlenirdi. Ayrıca tek kutuplar seyrekleşirdi. Tüm evrende en fazla bir tek kutup olurdu.

Guth bu fenomenin modelini büyük birleşik teorilerden ilham alarak ortaya koydu. Tasvirine göre evren son derece sıcak bir şekilde hayatına başladı ve bir noktada enflasyon meydana geldi. Kısa süre sonra ise modelinin umduğu şeyi ortaya koymadığını fark etti. Enflasyon asla durmuyordu. Fakat kısa süre sonra Andrei Linde (o zamanlar Sovyetler Birliği'ndeki Landau Enstitüsü'ndeydi, bugün Stanford'da), Paul Steinhardt (o zamanlar Pennsylvania Üniversitesi'ndeydi, bugün Princeton'da) ve öğrencisi Andy Albrecht (UC Davis) tarafından yeni bir model öne sürüldü. Modelin Higgs alanına benzer bir alan olan *enflasyon* ile birlikte birçok çalışan özelliği vardı. Teorinin eksikleri olsa da çalışıyordu. Tüm hikâye "Yeni Enflasyon Evreni" olarak adlandırıldı.

Enflasyon hipotezi büyük patlama teorisinin problemlerini çözecek olsa da başlangıçta belirgin bir iz bırakmış gibi görünmüyordu. Bu durum Guth ve So-Young Pi ile James Bardeen, Paul Steinhardt ve Michael Turner'ın enflasyon teorisinin kuantum versiyonu üzerine yaptıkları çalışmayla değişti. Enflasyon kuantum mekaniğiyle birleştirildiğinde fizik ve kozmolojideki en büyük ve uzun süreli sorulardan birine bir açıklama getiriyordu: Galaksi ve yıldızların yapısı nasıl

oluştu? Bu açıklamayla kozmik mikrodalga ışıması öngörülüyordu.

Mükemmel homojenlik ve izotropinin iyi bir şey olmadığını söylemiştik. Gözlemlediğimiz yapının oluşumunu başlatmak için bir miktar düzensizlik isteriz. Ancak enflasyonun her şeyi neredeyse homojen haline getirirken evrenin mükemmel homojen olmasını da engellediği fark edildi. *Homojensizliğin* oluşmasının sebebi kuantum mekaniğiydi. Kuantum mekaniğinde belirsizlik ilkesi önemli bir rol oynar. İlke en basit tabirle bir parçacığın konumunun ve momentumunun aynı anda tam bir kesinlikle bilinemeyeceğini söyler. İlkenin geniş bir uygulama alanı bulunur. Enflasyon teorileri için de enflasyon alanının değişim hızını ve değerini herhangi bir uzay-zamanda net olarak söyleyemezsiniz. Uzayın herhangi bir noktasında ne kadar enerji olacağını belirleyen kombinasyon budur. Bundan dolayı teori evrendeki ortalama enerji miktarını tahmin ederken bunun küçük olduğunu ve enerji miktarının bir noktadan bir noktaya –kuantum olasılıklarından ötürü– farklılıklar gösterebileceğini öngörür. Böyle olduğunda bu iki grup, altında yatan teorinin tüm ayrıntılarını bilmeden enflasyonun enerji yoğunluğu ve sıcaklığın dağılımı üzerindeki etkisini hesaplayabilir hale geldiler.

Yeni enflasyonun tek bir modelden ziyade geniş bir model sınıfı olduğu anlaşılıyor. Her biri sıcaklık dağılımı üzerinde bir öngörüde bulunsa da teorinin net bir sayı öngördüğünü iddia edemiyor. Yıldız ve galaksilerin oluşumunun büyük patlamadan yaklaşık bir milyar yıl sonra başladığını biliyoruz, bundan yola çıktığımızda sıcaklık farklılığı 10^5'te bir ya da ancak biraz daha büyük olmalıdır. Sıradaki soru bunu nasıl bulacağımızdır. İlk çalışmalarda bir farklılık görülmediğini söylemiştik. Bu konuyla ilgili ilk gözlemler 1993'te COBE (*Cosmic Background Explorer:* Kozmik Arkaplan Kâşifi) uydu-

suyla geldi. COBE, evrenin yapısını açıklamamıza yetecek çok küçük sıcaklık farklılıkları –yaklaşık 100.000'de bir– tespit etti. COBE'nin baş araştırmacıları John Mather ve George Smoot bu çalışmalarıyla Nobel Ödülü'ne layık görüldüler.

Bilimde genellikle bir fenomene dair yapılan ilk gözlemler sınırdadır, ancak keşfi tanımlayacak kadardır ve kuşku dolu bir eleştiriye açıktır. Fakat fenomen gerçekten doğruysa bunu daha iyi enstrüman ve tekniklerle yapılan detaylı çalışmalara ait, keşfin doğruluğunu kuvvetlendiren gelişmiş gözlemler takip eder. Kozmik mikrodalga arkaplan ışıması için de böyle oldu. Sonrasında uydularla ve yerden yapılan gözlemlerle ışıma çok daha ayrıntılı çalışıldı. Wilkinson Mikrodalga Anizotropi Sondası (NASA tarafından 2001'de gönderildi) ve Planck (ESA tarafından 2009'da gönderildi) sayesinde gökyüzündeki sıcaklığın detaylı haritasını çıkardık. Bu veriler erken evren hakkında sahip olduğumuz bilgileri yeniden değerlendirmek için kullanılabilir. Örneğin, toplam enerjinin –karanlık enerji, karanlık madde ve sıradan madde– net miktarını verebilir.

Veriler Bize Ne Söylüyor? Neyi Öğrenmek İstiyoruz?

Sahip olduğumuz engin veriler büyük patlamanın gerçekten meydana geldiğini ve evrenin bir zamanlar sıcaklığının 10.000 Kelvin olduğunu gösteriyor. Bu kez evren Einstein'ın kozmoloji üzerine yaptığı ilk tasvirindeki gibi yüksek seviyede homojen ve izotropikti. Buna ek olarak etrafımızdaki yapıların –yıldızlar, galaksiler, galaksi kümeleri– izotropi ve homojenliğin küçük ihlallerinden oluştuğuna eminiz. Bunlardan dolayı enflasyonun olmuş olduğuna inanmak için sebeplerimiz var.

Parçacık fizikçileri daha fazlasını öğrenmek istiyor. Evrende enflasyonu açıklayacak ve belki de bundan önce ne olduğuna dair bir işaret verebilecek olan doğa yasalarının –alanların ve bu alanların denklemlerinin– ne olduğunu anlamayı

amaçlıyorlar. Enflasyon bu noktada çok başarılı fakat kendisi bir teori değil, bir teori topluluğu. Enflasyonun tam olarak ne zaman başladığını veya ne zaman ve nasıl sona erdiğini bilmiyoruz. Evren birkaç dakikalıkken bitmiş olması gerektiğini biliyoruz. Ancak en dramatik, enflasyonun en hızlı olduğu periyot çok daha önce yaşandı. Yaşandığı vakitteki enerji miktarıyla karakterize ediliyor. Bu da evrenin boyutunu iki katına çıkarma süresini etkiliyor. Örneğin, enerji yoğunluğunun büyük birleşik teoriler ya da sicim teorisindeki miktarda olduğunu varsayarsak evrenin boyutunu iki katına çıkarma süresi inanılmaz derecede kısa, 10^{-37} saniye, 0,00000000000000000000000000000001 saniye olacaktır. Başka bir deyişle, uydularımız bize evrenin büyük patlamadan sonsuz derecede küçük bir an sonraki resmini gösteriyor. Bunu nasıl bilebiliriz? Seçeneklerden biri büyük bir veri setini açıklayacak ve bu fenomen hakkında net bir öngörüde bulunacak bir teori üretmemiz. Birçok denemede bulunuldu fakat şu ana kadar herhangi biri ikna edici olmadı.

Bu soruların bir kısmını, özellikle enflasyondaki enerji miktarını cevaplayacak deney kurma umudu var. Bu ölçeğin çok düşük, büyük birleşik ölçeğinin yüzde birinden daha düşük olmaması durumunda enflasyondan kaynaklanan yerçekimsel dalgaların gözlemlenmesi mümkün olabilir. Bu dalgalar kuantum etkileri tarafından, yapıyı açıklayacak küçük homojensizlikler şeklinde üretilebilir. Kütleçekim –ve yerçekimsel dalgalar– enerjiyle üretilir ve enerjinin düşük olması daha az yerçekimsel dalga anlamına gelir. 2014'te büyük bir gösterişle güney kutbunda gerçekleştirilen BICEP2 isimli deneyde erken evrendeki yerçekimsel dalgaların gözlemlendiği duyuruldu. Sonrasında tozun (gökbilimcilerin hidrojen ve diğer atomların parçacıklarından oluşan toz bulutuna verdiği isim) BICEP2 sonuçlarına neden olabileceği belirlendi. Ar-

dından açıklama hemen geri çekildi ve toz için geliştirilmiş aramalar ve analizler geliştirilmeye başlandı. Birkaç yıl içinde enflasyonun ne zaman olduğunu öğrenebiliriz. Teorik öngörülerimle uyumlu olmasa da bu deneylerden hiçbirinin yerçekimsel dalga sinyalini tespit etmemiş olması ihtimali yüksek, şu ana kadar söyleyebileceğimiz en büyük şey enflasyonun 10^{-36} saniye sonra yaşanmış olması. Yine de insanlığın evrenin 10^{-36} saniyelik haline bakabildiğini bir hayal edin!

Enflasyon sona erdiğinde evren çok sıcaktı ve sıcaklık her yerde neredeyse aynı değerdeydi. Yeni bir bilmece daha ortaya çıkıyor: Bugün gördüğümüz homojensizlik –galaksiler, yıldızlar ve gezegenler– bu tekdüze çorbadan mı meydana geldi? Cevap Guth ve Pi'nin öngördüğü, sıcaklıkta küçük farklılıklara neden olacak küçük enerji farklılıklarında yatıyor. Guth ve Pi bu küçük farklılıkların büyüyebileceğini ve yeterince büyüdükten sonra daha yoğun bölgelerin bir araya gelip galaksileri ve yıldızları oluşturmaya başlayacağını fark ettiler. Sıcaklık farklılığı ölçümleri yapılmadan önce teorik olarak çalıştılar ve 10^{-5} sayısını *öngördüler*. (Galaksilerin bu farklılıktan nasıl oluştuğuna dair bir modelleri olmadığı için bu değer belirsizlik barındırıyordu.) Yoğunluktaki bu küçük dalgalanmalar kuantum mekaniği dalgalanmalarından, belirsizlik ilkesinden kaynaklanıyor.

Galaksilerin oluşma şekilleri oldukça karmaşıktır. Santa Cruz'daki meslektaşlarım George Blumenthal, Sandra Faber ve Joel Primack 1984'te karanlık maddenin önemli bir kriter olduğunu açıklayan ilk kişilerdi. Tasvirlerinde ilk olarak karanlık madde bir araya geliyor ve çoğunlukla hidrojen gazından oluşan sıradan maddeyi çekerek yoğunlaşıp yıldızları ve galaksileri oluşturuyordu. Güçlü bilgisayarlar ve dahice algoritmalar yardımıyla yapılan galaksi oluşumu çalışmaları, enflasyonun sonrasında küçük kuantum mekaniksel farklı-

lıkların evrenin yapısının oluşumunu nasıl etkilediğine dair detaylı ve ikna edici bir tasvir yapmamızı sağladı. Kuantum mekaniğinden ve atom ile daha küçük şeylerin dünyasından bahsetmiştik. Şimdi kuantum mekaniğine gökyüzünde büyük ölçekte bakalım!

Çok Erken Evren: Nerede Duracağız?

Kozmik mikrodalga arkaplan ışıması ve evrendeki yapıların oluşumuna dair gözlemlerimize bakarak Guth'un enflasyon olarak adlandırdığı fenomenin gerçekleştiğine emin olabiliriz. Bu kadar erken bir dönemde gerçekleşmiş olan bir fenomene dair bilgimiz olması muhteşem fakat kaba bir tasvirden fazlasını bilmiyoruz. Enflasyon bize yeni doğa yasalarını ve muhtemel kapsayıcı ilkeleri işaret ediyor. Enflasyondan kaynaklanan yerçekimsel dalgaların keşfi bize neler olduğuyla ilgili önemli ipuçları sağlayacak. Fakat o zaman bile ne olduğunu tam olarak anlamamız için belki sicim teorisinden, belki de başka bir yerden gelen teorik bir altyapıya ihtiyacımız olacak.

Önümüzde başka büyük sorular duruyor. Enflasyon evrenin daha erken zamanlarında ne olduğunu saklayan bir perde gibi. Halen enflasyondan öncesi için uzay-zamanın bir noktaya mı küçüldüğünü yoksa çok farklı bir şeye mi dönüştüğünü bilmiyoruz. Bu noktada işlenmemiş ve büyük ölçüde temelsiz spekülasyon âlemlerine adım atıyoruz. Beni takip edin.

BÖLÜM 13

KOLTUĞUMUZDAN KALKMADAN BİR FİNAL TEORİSİ OLUŞTURABİLİR MİYİZ?

Birçoğumuz okulda Yunanlar ve diğer antik toplumların doğa yasalarının deney ya da dikkatli gözlem yapmadan saf akıl yürütmeyle anlaşılabileceğine inandığını öğrendik. Galileo'dan sonra ise insanların çoğunun doğa yasalarının deney ve gözlemle ortaya çıkarılabilen bir şey olduğunu düşündüğünü gördük. Aynı şekilde Newton'un yasaları da Galileo'nun çalışmalarından bir asır sonra her gün gördüğümüz cisimlerin ve gezegenlerin hareketini anlamaya çalışmıştı. Elektrik ve manyetizma yasaları elektrik yükü ve akımı üzerine bir asırdan uzun süre yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştı. Doğadaki önemli sayılar –atom kütleleri, Newton'un kütleçekiminin kuvveti, elektronun elektrik yükü– laboratuvarda ölçüldü, soyut akıl yürütmeyle belirlenmedi. Fakat belki de bu şekilde olmak zorunda değildir. Belki de doğa yasaları, denklemler ve kitaplardaki sabitler bazı büyük ilkelerden kaçınılmaz olarak doğuyordur.

Öğrenciliğim sırasında öğretmenlerim beni bilimdeki büyük fikirlerin nadiren görkemli teorilerle açığa çıkarıldığını söylemişlerdi. Einstein'ın genel göreliliği bir istisnaydı. Deneyler ve gözlemler araştırmasına hizmet etmiyordu. Bunun yerine teorisi büyük bir ilkeye dayanıyordu: Doğa yasaları herhangi bir yerdeki gözlemciye göre nereye hareket ederse etsin aynı şekilde görünmek zorundaydı. Bu basit başlangıç noktasından hareketle muhteşem bir yapı ortaya çıkıyor. Fakat tehditkâr bir tutumla bunu hayal etmememizi söylüyorlar. İlk olarak Einstein kadar zeki değilsiniz. İkincisiyse, Einstein hayatının ikinci yarısını ilk yarısındaki zaferini tekrarlamak için deneyip yanılarak harcadı.

Otoriteye saygı duymayı tercih ediyorum. Fakat böylesine ilgi çekici bir konu peşinde koşmanın cazibesi kimi zaman ben ve birçok meslektaşım için karşı konulmaz hale geliyor. Muhtemelen genel görelilik kadar dikkat çekici olmasa da saf düşünceyle yürütülen bazı teorik atılım örnekleri durup düşünmeme sebep oldu. Bunlardan biri Maxwell'in çalışması. Elektrik ve manyetizma yasalarının gelişimi deneylerle bağlantılı olsa da Maxwell son adımı büyük ilkeye bağlı kalarak attı. Doğa yasaları kapsamında elektrik yükünün korunduğunu, yenisinin üretilmediğini veya yok olmadığını konuşmuştuk. Maxwell'in zamanında bunun için ne kadar iyi bir deneysel kanıt olduğundan emin değilim fakat Maxwell doğru düşünmüş olmalıydı. Elektrik ve manyetizma yasalarıyla ilgili bilinenleri ele aldı ve bu ilkeyi ihlal ettiklerini gördü. Elektrik yükünün her zaman korunmadığını iddia edebilirdi ve deneysel olarak test edilebilirdi, fakat bunun yerine yasaları elektrik yükünün *korunduğu* şekilde revize etti. Buradan yola çıkarak elektromanyetik dalgaların varlığını öngördü.

Kesinlikle kuantum teorisi teorik bir akıl yürütme sayesinde öngörülmedi, ve ne olabileceğini hayal etmek zor. Atomlar

dünyasının deneylerle keşfedilmesi her şeyin klasik fizikle uyumlu olmadığını gösterdi. Fakat her zaman ilk kuantum mekanikçilerinin neler olduğunu nasıl anladığından etkilenmişimdir. Nasıl oldu da birisi yapıya olasılık faktörünün dahil edilmesi gerektiğini düşündü? Buradaki kritik adım bir açıdan saf düşünceydi. Alman teorisyen Max Born'un çalışmasıyla elde edilmişti. Born deneyler üzerine düşünüyordu, fakat bunlar teorinin Rutherford'unkiler gibi bir elektronun bir atom veya atom çekirdeği gibi bir hedefe çarptığı bir veri sınıfını açıklayabilecek kadar özel deneyler değildi. Schrödinger'in denkleminin bu süreçler hakkında ne dediğini anlamak için Schrödinger'in dalga fonksiyonunun farklı çıktıların olasılıklarıyla ilişkili olduğunu, hatta daha ilginci, bir şeyin olasılığını bulmak için karesinin alınması gerektiği fikrini öne sürdü. Bu sonuca radyoaktif bozunma deneyleri aracılığıyla ulaşılabilirdi, fakat burada kuantum teorisinin en önemli (ve kafa karıştırıcı) özelliği saf, teorik akıl yürütmeden geliyor. Bohr, Heisenberg ve Dirac buna yakın fikirlere sahipti ve bu bakış açışına hemen adapte oldular. Fakat Schrödinger ve De Broglie buna yanaşmadı. Einstein'ın olasılığın rolü konusunda ikna olmadığını görmüştük. Erken dönemde yaptığı çalışmaları ve büyük kuantum parçacığı topluluklarının davranışı konusunda Satyendra Nath Bose ile yaptığı çalışması dışında kuantum mekaniğine önemli bir katkıda bulunmadı.

Yine de Einstein'ın genel görelilik zaferi bu tarz bir başarının en çarpıcı örneğidir. Einstein doğa yasalarının bu şekilde çıkarılabileceğine inanıyordu, ya da en azından umuyordu. Yaşamının ikinci yarısını bilinen tüm teorilerin uyabileceği, birleşik teori adını verdiği şey üzerinde çalışarak geçirdi. Ancak pek umut vaat etmeyen bir çalışmaydı. Yıllarını bu nafile çabayla, pek bilimsel olmayan bir düşünce yapısıyla harcadı.

Bu teorinin aksine birçok teorisyen Einstein'ın birleşik teori (Her Şeyin Teorisi olarak da biliniyor) rüyasını karşılayabilecek sicim teorisinin cazibesine kapılmıştı. Sicim teorisi tesadüfen keşfedilmişti. Einstein'ın genel göreliliği gibi güncel, formülleştirilmesi basit ve mücbir bir ilkeyle bir arada tutulmuyordu. Aksine, hurda teorik fikir yığınından toplanan parçalardan bir araya getirilerek oluşturulan Rube Goldberg tipi mekanizmadır. Yine de çıktısı çok güzel ve çarpıcıdır.

Kuantum teorisi ve genel görelilik arasındaki mücadele farklı formlar alır. Teknik bir iş gibi görünüyor ancak yine de üstesinden gelmek zor. Merhum Stephen Hawking tarafından ortaya atılan daha kavramsal bir düşünce bulunuyor. Kuantum teorisinin merkezinde bulunan tüm olasılık kavramı bir kara deliğin varlığında yıkılıyor. Sicim teorisi tüm bu sorulara cevap veriyor. Aynı zamanda Standart Model'in özelliklerini, evrenin tarihini, karanlık maddeyi, karanlık enerjiyi ve daha fazlasını açıklayabiliyor gibi görünüyor. Fakat doğruluğu şu an kesin değil ve hepsi için kesin öngörülerde bulunmuyor.

Kimileri bunun insanlığın doğanın bilinen tüm yasalarını açıklayan ve yenilerini öngören bir Final Teorisi'nin ya da Her Şeyin Teorisi'nin keşfinin bir işareti olarak görse de diğerleri bunun başka bir çıkmaz sokak olduğunu düşünüyor. Okuyucular sicim teorisinin adeta bir eleştiri paratoneri olduğunu öğrenecek. Bu bölümde bu konunun neden hem çok çekici olduğunu hem de eleştirilerin haklı noktalarının bulunduğunu anlayacağız.

Standart Model gibi güncel teorilerde temel cisimler –elektronlar, kuarklar, nötrinolar, fotonlar– uzayda birer noktadan ibaret. Bir idealleştirme gibi görünüyor fakat teoriler ve yapılan deneylere göre daha karmaşık olmaları için bir sebep bulunmuyor. Hızlandırıcılarda temel parçacıkların çalışılması ilk ışık mikroskoplarının ortaya çıkardığı dünyayla zıtlık gösteri-

yor. İlk mikroskoplar bir su damlasının veya dokunun içindeki küçük boyutlu yapıları; mikroorganizmaları, hücreleri ve daha fazlasını ortaya çıkardı. Modern parçacık hızlandırıcıları çok yüksek büyütme oranına sahip mikroskoplar gibi işler. Fakat bir santimetrenin trilyonda birinin milyonda biri boyutta gözlemlediğimiz elektronlar, kuarklar ve diğer parçacıklarda benzer bir yapı olduğuna dair bir kanıtımız yok.

Yine de doğadaki temel cisimlerin bu tasvirinin biraz basit olduğunu düşünebiliriz. Noktaları canlı organizmaların hücreleri gibi oldukça karmaşık bir şeyle değiştirmeyi hayal edebiliriz, fakat şimdilik sadece biraz daha karmaşıklaştırmakla yetinelim. Doğanın temel varlıklarının nokta yerine sonlu doğru parçaları ya da lastik bant gibi kapalı doğrular olduğunu varsayalım. Bunlara *sicim* adını veriyoruz. Sicimler farklı şekilde titreşebilirler. Sicimlerin özel görelilik ve kuantum mekaniği kurallarına uyması gerektiğini öne sürersek muhteşem ve bir o kadar da garip şeyler yaşanır. Farklı titreşimlerin her biri farklı tip bir parçacığa işaret eder. Bunlardan gravitonlar Einstein'ın kütleçekim teorisinde kuvveti taşıyan parçacıklardır. Aynı zamanda kuarklar, glüonlar, elektronlar, fotonlar ve daha fazlası bulunur. Bu parçacıklar Standart Model ve genel görelilik kurallarına uygun şekilde hareket eder. Teorinin kuantum mekaniğiyle ilgili bir sıkıntısı bulunmuyor. Detaylara inince –kuark ve leptonların gözlemleyebildiğimiz sayısı, Higgs kütlesi, tespit edilen kozmolojik sabit değeri– zorluk yaşanıyor.

Bu aptalca görünen başlangıç noktasının yirminci yüzyılın önde gelen başarılarından olan Standart Model ve genel göreliliğin yapı taşlarını verebilmesi bazı teorisyenlerin üzerine düşünmesine sebep oldu.

Temel varlıkların nokta yerine tek boyutlu bir iplik yapısında olduğunu kabul etmek zor olabilir, fakat bundan neden

bu kadar etkilenmemiz gerekiyor? Fizikçilerin ilgisini çeken şeyi anlamamız için kuantum mekaniği ve Einstein'ın kütleçekim teorisinin neden çatışır gibi göründüğünü ve temel fiziğe sicim bakış açısının bunları nasıl bir araya getirebileceğini anlamamız gerekir.

Einstein'ın kuantum mekaniğine dair kuşkusunu göz önüne aldığımızda genel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki gerilimde haklılık payı olabileceğini düşünebiliriz. Einstein Max Born'a yazdığı mektupta olasılık düşüncesiyle ilgili fikrini şu şekilde açıklıyor: "Kuantum mekaniği kesinlikle muhteşem. Fakat iç sesim gerçeğin bundan ibaret olmadığını söylüyor. Teori bize çok şey söylüyor ancak bizi gizli "eski"ye dair daha fazla bilgilendirmiyor. Onun sadece zar atmadığını düşünüyorum." (Einstein 1926'da dönemin Tanrı'yı ifade eden deyişini kullanmış, fakat aslında dinle alakalı geleneksel görüşü kastetmiyor.)

Einstein kuantum mekaniğinin ilk zamanlarında rahatsızlığını teoriyi yok edecek sert eleştirilere döndürdü. Niels Bohr'a önerdiği varsayımsal "düşünce deneyleri"yle kuantum mekaniği ve Bohr'un çıkarımının manasız olduğunu tekrar tekrar göstermeye çalıştı. Einstein'ın soruları genellikle sertti fakat Bohr geçirdiği düşünme süreçlerinin ardından her seferinde paradoksu çözecek bir sonuç buldu. John Bell yıllar sonra bu düşünce deneylerinden birini (özellikle Einstein, Podolsky, Rosen, EPR ya da paradoksla alakalı olan) gerçek bir deneye dönüştürdü. Deney tekrarlı bir şekilde gerçekleştirildi ve kuantum kurallarını doğruladı. Einstein'ın rahatsızlığı kuantum merkezli gerçekliğin yıkılmasına yetmemişti.

Fakat genel görelilik yeni fikir ayrılıkları ortaya çıkardı. Olasılık hesaplamalarını doğa yasalarına dahil etme konusundaki çatışmayı çözmek önümüzdeki en zor bilimsel sorulardan bir kısmına cevap olabilir.

Kara delikler, kozmoloji ve kozmolojik sabitle ilgili sorularla ilgilenmeye başladıktan sonra kütleçekimini bir klasik teori olarak incelemeye başladık. Günlük hayatımızdaki deneyimlerimizi açıklama konusunda ve kozmostaki olaylar için yeterince iyi. Fakat genel görelilik ve kuantum mekaniğini temel seviyede ele alacak bir deney kurmak zor. İnsanlığın büyük bir kısmı kuantum mekaniğiyle atomlar ve daha küçük şeylerin dünyasına girdiğimizde tanıştı ve bu sistemlerde kütleçekimin önemli olmadığını gördük. Bunu net bir şekilde ortaya koymak için nasıl elektrik ve manyetik alanın kuantası fotonlarsa –ayrık elektrik ve manyetizma birimleri– yerçekimsel alanın kuantasının da graviton adı verilen parçacıklar olduğunu söyleyelim. Bir asırdan uzun bir süredir bilim insanları ve mühendisler tek bir foton üzerine çalışabiliyor. Bugünse henüz tek bir gravitonun izole edildiği bir deney gerçekleştiremedik. Bundan dolayı daha derin düşünce deneylerine daldık. Şimdi kuantum kütleçekimi çalışmasının uygulanabilir bir deney olmaktan ne kadar uzak olduğunu tartışalım.

Klasik Kütleçekim için Gerçek Deneyler ve Kuantum Kütleçekimi için Düşünce Deneyleri

Kuantum mekaniğinin anlamlı olması için Bohr'un ortaya koyduğu ilkelerden biri kuantum mekaniğinin uygun koşullar altında klasik görünmesi gerektiğiydi. Işık söz konusu olduğunda, bir ışın yüksek sayıda foton içeriyorsa klasik fizik kurallarına uymalıydı, kuantum mekaniğinin ayrıklık özelliği devreden kalkardı. Günlük hayatımızda deneyimlediğimiz ışık yüksek sayıda fotonlardan oluşur. 60 wattlık ampul her saniye 10^{20} adet foton salar (daha verimli olanlar için miktar yaklaşık 10^{18} fotondur). Işık bu kadar çok sayıda fotonla kuantum modifikasyonu olmadan Maxwell'in denk-

lemlerindeki klasik fiziğin kurallarına yakın şekilde hareket eder. Bugünün teknolojisiyle tek bir fotonu çalışacak durumlar oluşturmak zor değil. Bu tekil fotonlar kuantum mekaniğinin tüm kurallarına uyar. Bir fotonun bir atomdan elektron koparmasını izleyip çıktılara dair kuantum öngörülerini test edebiliriz. Bir elektronu bir protonla çarpıştırıp bir, iki ya da üç adet foton üretebiliriz.

Fakat yine çok sayıda foton, elektron ve protonla çalıştığımız durumlarda kuantum etkileri önemsiz hale gelir ve Newton ve Maxwell'in kuralları devreye girer. Örneğin ışık, çok sayıda yüklü parçacığın hızlanması veya yavaşlamasıyla üretilir. Elektrik ve manyetik alanlar retinamızdaki yüklü parçacıkları harekete geçirdiğinde ışığı görmüş oluruz. Einstein bunu Maxwell'in teorisine benzer şekilde anladı ve genel görelilik teorisini yerçekimsel alan dalgalarının –kütleçekim dalgaları– kütle veya diğer enerji formlarının hızlanması veya yavaşlamasıyla üretileceği şeklinde kurdu. Bu dalgalar geçtikleri alan boyunca maddeye ivme kazandıracaktı. Yerçekimsel kuvvet elektrik ve manyetizmadan çok daha kuvvetsiz olduğundan, etkisi yüksek miktarda kütle söz konusu olduğunda bile çok küçük olacaktı. Yirminci yüzyılın ikinci yarısında bu dalgaları tespit etme amaçlı deneyler kurulmuş olsa da hiç şansları yoktu. 1990'larda yerçekimsel dalgaları keşfetme umuduyla gerçekleştirilen ilk deneysel program LIGO'ydu (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory:* Lazer İnterferometre Yerçekimsel Dalga Gözlemevi).

Elektromanyetik dalgalar bir maddenin içerisinden geçtiğinde yüklü parçacıkların titreşmesine neden olur, bu da onları gözlerimizle görebilmemizi ve başka tür fenomenlerin oluşmasını sağlar. Öte yandan yerçekimsel dalgalar geçtikleri her şeyin düşük miktarda titreşmesine neden olur fakat o kadar düşüktür ki, tespit etmek son derece zordur. LIGO

programını yürütenler en büyük yerçekimsel dalga kaynağının ne olabileceğini sordular. Cisimlerin kütleleri ve hızları büyüdükçe dalgalar da güçleniyordu. Çarpışan iki nötron yıldızı ya da daha iyisi, çarpışan iki kara delik umut vaat ediyor gibi görünüyordu. Bu ağır cisimlerin kütlesi Güneş'e eşit veya daha fazladır, çarpışmadan saniyeler önce bir anda hızlanırlar ve ışık hızına yakın bir hıza ulaşırlar. Görebileceğimiz en güçlü dalgaları üretmeye aday görünüyorlardı. Einstein'ın teorisine göre yerçekimsel alandaki değişim uzay-zamanın bir çeşit bozulmasıydı. Dalgalar bir cisimden geçerken etrafındaki uzayı genişletir. Cisim bir anlığına daha uzun, sonra biraz kısa, sonra tekrar biraz uzun görünür. Bu genişleme ve büzülme dalgaların tespiti için anahtar olabilir.

Birazdan kastım *gerçekten birazcık*. LIGO yerçekimsel dalga detektörleri 4 kilometre uzunluğunda metal tüplerdir. Çarpışan kara deliklerin genişleme ve büzülmesi 10^{-18} cm civarında, atom çekirdeğinden 10^5 kat, 100.000 kat daha küçüktür. Kendi boyutuyla karşılaştırıldığında her uzunluk kendisinin trilyonda birinin trilyonda biri kadar boyut değiştirir. Bu kadar küçük değişimleri ölçebilmek kulağa sihir gibi geliyor. LIGO ilk keşfini açıkladığında lisans öğrencilerine genel görelilik dersi veriyor ve deneylerin nasıl çalıştığını anlatmak istiyordum. Bölümümüzün salonunda deneyin nasıl yapıldığıyla ilgili sorular soruyordum. Kimse bana tam cevabı veremedi. Anlamak için internetteki makalelere dalmak zorundaydım (ayrıca profesyonel gururumu bir kenara koyarak YouTube videolarından öğrenmeye de çalıştım). Deneyin en önemli noktası sıradan ışığın özellikleriyle yüksek-güçlü lazerlerin kullanılmasıydı.*

* Daha detaylı öğrenmek isteyenler için deneylerin iki koldan gelen lazer girişimlerini kullandığını söylemeliyim. Uzunluktaki küçük genişleme iki koldan gelen ışınların ilerlediği yolda küçük bir uzama olmasına sebep olur. Birbirlerine aynı sürede varamazlar. Yüksek yoğunluğa sahip lazer kullanılması tespit edilebilir bir sinyal elde etme açısından önemlidir.

Sıradan bir ampulden çıkan foton sayısından bahsetmiştim. LIGO detektörlerinden ise kara delik çarpışması sonucu çok çok daha yüksek sayıda graviton geçer. Tüm bu koleksiyondan ise ancak çözünürlük sınırında bir sinyal elde edilebilir. Bir graviton tespit edebilmek için bu sinyali bir de 10^{70}'e bölün; gerçekten umutsuz bir durum. Kuantum kütleçekimi öngörülebilir gelecek için düşünce deneyleri seviyesinde kalacakmış gibi görünüyor.

LIGO deneyi ilk olarak 1990'larda ortaya atıldı ve Birleşik Devletler Kongresi'nin imzaladığı bir anlaşmayla fonlandı. Biri Hanford, Washington, diğeri Livingston, Louisiana yakınlarında olmak üzere iki deneyden oluşuyordu. Gözlemlenecek herhangi bir sinyalin doğrulanması için iki farklı lokasyon seçilmişti. Yol boyunca birçok zorlukla karşılaşıldı. Enstrümanlar aşırı derecede hassas. Deney yerine belli bir mesafeden geçen tırlar bile yerçekimsel dalgaları taklit edecek titreşimler yaratabiliyordu. İlk aşamalarda Hanford yakınlarında meydana gelen bir deprem ise detektörlerin üzerinde tekrar çalışılmasını gerektirdi. Sonunda ise teknolojik açıdan sonuçlar mükemmeldi. Deney prototip aşamasındayken bile oldukça büyük ve özeldi ancak aranan sinyaller konusunda hassas değildi. Fakat geçtiğimiz yıllarda nötron yıldızları ve kara delik çarpışmaları sonucu oluşan yerçekimsel dalgalar tespit edilebildi. Evreni çalışmanın yeni bir yolu doğmuştu. Teorisyen Kip Thorne, yüksek-enerji deneycisi Barry Barish ve atomik fizik deneycisi Rainer Weiss vizyonlarını teknolojik gelişmeler ve yöneticilik becerileriyle birleştirerek Nobel Ödülü'ne layık görülen bu çalışmaya imza attılar.

Düşünce Deneyleri ve Kara Delikler

Kütleçekimin kuantum etkilerini tespit edecek bir deney yapmanın pratik zorluklarını bir kenara bırakırsak bu testlerin

ilkesel olarak mümkün olup olmadığını sorabiliriz. Kuantum mekaniği kurallarını genel göreliliğe uygulamaya çalışan fizikçiler iki sorunla karşılaştılar.

Gravitonların neredeyse hiç etkileşime girmediğini söylerken bir şey yakalıyoruz. Ne kadar etkileştikleri enerjileriyle alakalıdır. Kabaca enerjisini 10 kat artırdığımızda etkileşime girme ihtimalinin 100 kat artacağını söyleyebiliriz. Işındaki her parçacık Planck enerjisine sahip olursa etkileşme şansı önemli derecede artar. LHC'deki tüm parçacıkların bu kadar enerjiye sahip olması için gereken enerji 10^{16} nükleer reaktöre –neredeyse Güneş'in enerjisine– eşittir ve buna rağmen trilyonlarca yıl bir graviton çarpışması göremeyebiliriz. Bu akıl yürütmeye dayanarak Freeman Dyson gravitonların belirlenmesinin *ilkesel olarak* imkânsız olduğunu öne sürdü.

Ancak düşünce deneylerimizi besleyen şey belirsizlik ilkesidir. Laboratuvarda yüksek frekans (enerji) üretemesek de belirsizlik ilkesi bir yerçekimsel alanın çok kısa süreler için var olmayacağını söyleyemeyeceğimizi söyler. Aslında bu güçlü şekilde bağlanmış yüksek enerjili yerçekimsel alanların varlığından dolayı genel göreliliğin kuantum teorisi kontrolden çıkar. Feynman, Schwinger, Tomonaga ve 't Hooft tarafından ortaya konan Standart Model'in fotonlar, glüonlar ve diğer parçacıklarıyla yapılan hesaplamalar işe yaramıyor. Kuantum mekaniğinin genel göreliliğe olan etkisi hesaplanmaya çalışıldığı zaman anlamsız eşitliklere ulaşılıyor. Bu gerçeği ilk fark eden ve başarısız bir çözme denemesinde bulunan kişi Richard Feynman'dı ve birçok bilim insanı da bu sorunla uğraştı. Yalnızca genel görelilik ve Standart Model'le çözüme ulaşılamıyordu. Bazıları bu problemin 't Hooft ve diğerlerinin çalışmalarından önce Standart Model'de olduğu gibi teknik bir şey olabileceğini düşünüyorlardı. Fakat Hawking kütleçekim ve kuantumla ilgili bu sorunun, en azından ilk ba-

kışta, çok farklı göründüğünü ve kuantum mekaniğiyle genel görelilik arasında yaşanacak bir evliliğin lanetleneceğine işaret etmişti. Sorun kara deliklerle ilgiliydi.

Einstein genel görelilik teorisini yazdığında teoriyi test edecek bir deney bulmakta zorlanmıştı. Sorun teorinin çoğu zaman Newton teorisiyle neredeyse aynı sonucu vermesiydi, genel görelilikten gelen düzeltmeler aşırı derecede küçüktü. Einstein gözlemlenebilir bir etki tespit etmek için Güneş'in büyük kütlesini avantaja çevirecek ve Güneş'e yakın fenomenleri çalışacaktı. O zaman bile etkiler son derece küçüktü ve ancak yirminci yüzyılın başındaki teknolojinin tespit sınırındaydı. Fakat genel göreliliğin etkilerinin çok daha büyük, hatta baskın olacağı durumlar vardı.

Einstein'ın teoriyi yazmasından kısa süre sonra, Birinci Dünya Savaşı sırasında orduda hizmet veren Alman fizikçi ve gökbilimci Karl Schwarzschild, Einstein'ın bir yıldızın çevresindeki yerçekimsel alanı tanımlayan denklemlerinin çözümünü bulmayı başardı (maalesef Schwarzschild kısa süre sonra hayatını kaybetti). *Schwarzschild çözümü* aynı zamanda Einstein'ın Güneş'in ışığı bükmesine dair sonucunu ve Merkür'ün yörüngesindeki hareketini açıklıyordu.

Çözüm yeterince ağır ve küçük bir yıldız için kara deliği tanımlıyordu. Kara deliğe ilerleyen bir yolcu hayal edin. Kara deliğin merkezinden *Schwarzschild yarıçapı* olarak bilinen bir uzaklıkta her şey adeta bir korku filmine dönüşecektir. Uzay ve zaman rolleri değişir. Yakın bir yıldızdan gelen ışık geri döner, kütleçekim o kadar güçlüdür ki kaçamaz. Güneş'in Schwarzschild yarıçapı yaklaşık bir kilometredir, Güneş'in hacminin içerisinde kalır ve çözüm uygulanamaz. Fakat Schwarzschild yarıçapından daha küçük ve daha yoğun cisimler bulunuyor. Örneğin nötron yıldızlarının Güneş'e benzer bir kütlesi ve yaklaşık bir kilometrelik bir yarıçapı bulu-

nur. Bundan daha küçük ve daha yoğun cisimlerin kara delik olduğunu *söyleyebiliriz*. Bu tarz cisimler için Schwarzschild yarıçapı bizim okyanustan ufku gördüğümüz gibi bir yerde görünür. Bu uzaklıktan izlediğinizde kara deliğe yaklaşan cisimler kara deliğin ufkundan geçtikleri vakit gözden kaybolur.

Kara deliklerin gerçek olduğunu gördüğümüzde aynı zamanda onları bir teorik laboratuvar olarak görebileceğimiz ve oldukça ilginç düşünce deneylerine konu edebileceğimiz fark edildi. Klasik genel göreliliğe göre kara deliklerin en çarpıcı özelliklerinden biri neredeyse hiçbir özelliklerinin olmamasıdır. Eğer kütlelerini, elektrik yüklerini ve hangi hızda döndüklerini bilirseniz muhtemelen bir kara deliğe dair bilinebilecek her şeyi bilmiş olursunuz. Çevresinde gelişmiş uygarlıkların yaşadığı gezegenler barındıran karmaşık bir yıldızın içe çökmesiyle oluşmuş olabilirler, fakat oluştuklarından sonra tüm bu bilgiler yok olur. Yanmanın ya da patlamanın farklı bir formudur. Patlamanın küllerini ve açığa çıkan ışımayı (ışık ve sıcaklık) sıkı bir şekilde çalışarak ilk formunu tekrar inşa edebileceğinizi düşünebilirsiniz. İçe çöken bir kara delik için, en azından klasik fizikte, bu imkânsız görünür. Bu durum klasik bir fizikçi için kafa karıştırıcı görünebilir, fakat tek başına teorik çerçevesini yok etmek için yeterli değildir.

Fakat kuantum teorisinde kara deliklerin bu şekilde davranmadığına dair işaretler bulunuyordu. Klasik bakışı sorgulayan ilk isim Kudüs İbrani Üniversitesi'nden teorisyen Jacob Bekenstein'dı. Kara delikler ile termodinamiğin ikinci yasası arasındaki benzerliğe işaret etti. İkinci yasaya göre entropi – baryojenez ve enflasyon bölümlerinde de karsımıza çıkan düzensizlik ölçüsü– her zaman artar. Kara delikler için de her zaman artan bir büyüklük vardı: Kara delik ufkunun alanı. Kara deliğe giren herhangi bir şey –içeri çekilen masalar, san-

dalyeler, gezegenler, diğer yıldızlar– kütleyi artırır ve ufuk alanını büyütür. Bekenstein kara delik alanı ve entropi arasındaki bu ilişkinin kara deliklerin sıcaklığa sahip termodinamik sistemler olduğuna işaret ettiğini öne sürdü.

Peki bu ne anlama geliyordu? Sıcaklığı genellikle belirli parçacıkların –atomların, moleküllerin, fotonların– enerjilerinin miktarı olarak düşünürüz. Fakat kara deliğe dışarıdan bakarak kütlesi gibi büyük ölçekli niteliklerinin dışında kendisini oluşturan parçacıklar gibi özelliklerinin belirlenemeyeceğini söylemiştik. Kara deliklerin sıcaklığa sahip olduğunu keşfeden kişi Hawking'di.

Hawking 50 yıl boyunca genel görelilik çalışmalarının önde gelen ismi oldu. Konuyu kamuoyunun dikkatine sunması da çok önemliydi. İngiltere'de doğan ve eğitim gören Hawking, 1963'te yirmi bir yaşındayken henüz öğrenciliğini sürdürdüğü sırada, Lou Gehrig'in hastalığı olarak da bilinen amyotrofik lateral skleroz (ALS) hastalığına yakalandı. Genellikle ölümle sonuçlanan nörodejeneratif bir hastalıktır. Hastalık ilk teşhis edildiğinde ancak birkaç senelik ömrü olduğu tahmin ediliyordu, fakat yüksek derecede engelli olmasına rağmen 2018'e dek hayatta kaldı ve çalışmalarını sürdürdü. Engelleriyle tanımlanacak bir hayat sürmemeye kararlıydı ve bunu bilimsel çalışmalarına ve özel hayatına yansıttı. Şöhretinden açık bir şekilde zevk alıyor ve bunu meslektaşları ve diğerlerinin çekici veya sıkıcı bulacağı bir şekilde yansıtıyordu. Bilimsel, siyasi ve dinî konularda bilgiçlik taslamaktan geri kalmıyordu. Bilimsel iddiaları ve şakalarıyla bilinirdi.

Kariyerinin başında Roger Penrose ile birlikte Einstein'ın denklemlerinin evren anlayışımızdaki önemi üzerine çalıştılar. En erken zamanlara, büyük patlama anına yaklaşıldığında Einstein'ın denklemleri anlamsız hale geliyordu. Hawking'in Penrose ile yaptığı çalışması bunun genel bir özellik olduğu-

nu ortaya koydu; evrenin tarihini küçük düzeltmelerle çözemezsiniz. 2020 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü Samanyolu'nun merkezindeki kara deliğin keşfiyle Andrea Ghez ve Reinhard Genzel'in kazandıklarını söylemiştim. Ödüle layık görülen üçüncü isim kara deliklerin merkezlerinde Einstein'ın teorisine göre kaçınılmaz bir şekilde bir tekillik bulunduğunu kanıtladığı çalışmasıyla Roger Penrose'du.

Hawking'in en meşhur bilimsel başarısı kara deliklerle ilgiliydi. Kara deliklerin aslında siyah olmadığını ve radyasyon yaydığını gösterdi. Peki nasıl olabilirdi? Kuantum teorisinde belirsizlik prensibi, sıradan uzay-zamanda enerji korunumunun küçük ihlallerine izin verir. Bunun sonucu olarak bir parçacık ve anti parçacığı çevrelerinde başka bir enerji olmadan, vakum ortamında bile aşırı kısa bir süre için ortaya çıkabilir. Sonrasında ise bu parçacıklar derhal birbirini imha edecek ve kaybolacaklardır. Düz uzayda gözlemlenebilecek bir sonuç ortaya çıkmaz, fiziksel parçacıkların gözlemlenebilmesi için vakumun bir enerji kaynağıyla aranması gerekir. Fakat kara deliğin ufkunda diğer parçacıklar geri düşerken sanal parçacıklardan biri kaçabilir. Bu kaçan parçacık büyük yerçekimsel alandan bir miktar enerji alabilir, yani enerji hâlâ korunur. Ancak bir ışıma olduğundan kara deliğin toplam enerjisi –kütlesi– bir miktar azalır. Hawking bu yayılımın kozmik mikrodalga arkaplan radyasyonunda tartıştığımız siyah cisim tipinde olduğunu buldu. Kara cismin sıcaklığı tam da Bekenstein'ın beklediği gibiydi.

Kara delik kuantum dünyasında klasik olandan çok daha karmaşık bir cisim olarak görünüyor. İçerisinde çok daha fazlası gerçekleşiyor. Kara delik statik değildir. Zamanla buharlaşır ve yok olur. Güneş boyutundaki bir kara deliğin tamamen buharlaşması çok uzun; 10^{67} yıl sürer. Evrenin şu anki yaşından çok daha fazladır. Fakat bugün yok olma sürecinde

olan çok daha küçük kara delikleri inceleyebiliriz. Yaşamlarının sonunda çok büyük bir enerji patlaması olacak. Astrofizikçiler bu ihtimali arıyor. Böyle bir şey bulmak için son derece şanslı olmamız gerekiyor ki, şimdiye dek bu boyutta bir kara deliğe dair bir kanıt bulamadık.

Keşfi Hawking'in bilimsel şöhretinin ve popülerliğinin artmasını sağladı. Nihayetinde Cambridge Üniversitesi'nde Isaac Newton'un pozisyonunu, Lucasian Matematik Profesörlüğü'nü aldı. Dindar bir Hıristiyan olmasına rağmen kâfir görüşler ortaya koyan Newton'u korumak için yaratılan bir pozisyona gururlu bir ateist imajı çizmeyi seçen Hawking'in gelmiş olması ironik olsa gerek.

Hawking'in Düşünce Deneyi

Hawking'in Hawking radyasyonu (teorik) keşfi büyük bir başarıydı. 1976'da tüm teorisyenlerin kafasını karıştıran bir düşünce deneyi yürüttü. Problemi anlayabilmek için kuantum mekaniğinin bilgiyle ilgili bir başka özelliğini göz önüne almalıyız. Kuantum mekaniğinin olasılıkları çalıştığından bahsetmiştik. Olasılık kullanışlı bir konsepttir, bazen karmaşık olabilir ancak hem net olmayacak kadar basit hem önemi kolayca göz ardı edebilecek kadar açık bir yönü vardır. Konuyu belirli bir formda karşılaşacağımız şekilde ele almamızı sağlar. Bir piyango bileti aldığınızda kazanma şansınıza odaklanırsınız. Bir bilet aldıysanız ve toplamda on milyon bilet satıldıysa ikramiyeyi kazanma şansınız on milyonda birdir. Çok küçük bir sayı. Öğrencilerime bu tarz bir şeyden bahsettiğim zaman herhangi bir günde bir trafik kazası nedeniyle ölme ihtimallerini düşünmelerini isterim. Amerika'da günde 100 adet ölümcül trafik kazası yaşanıyor. Ülkede kabaca 300 milyon insanın yaşadığı düşünüldüğünde bir insanın kaza sonucu ölme ihtimali 3 milyonda bir oluyor. Bunun kaderim

olmasından endişelenmeyeceğim kadar düşük bir olasılık olduğunu açıklamaya çalışıyorum. Büyük ikramiyeyi kazanma ihtimalim de oldukça düşük, hatta muhtemelen hiç yaşanmayacak kadar düşük! (Kitabı okuyacak piyango yöneticilerinden özür diliyorum.)

Olasılıklarla ilgili temel gerçek *herhangi bir olasılığın* meydana gelme ihtimalinin 1 olmasıdır; yani ikramiyeyi kazanır ya da kaybedebilirim, bugün bir trafik kazasında ölebilir ya da böyle bir şey yaşamayabilirim. Schrödinger'in denkleminin en önemli noktalarından biri de bu özelliğe sahip olmasıdır. İkramiye kadar net değildir. Bu özelliği görebilmek için denklemi özel bir matematik kullanarak çalışmanız gerekir. Fakat bu özellik zaten doğru olmasaydı kuantum mekaniğinin olasılıksal çıkarımları anlamsız hale gelirdi.

Olasılıklarla ilgili gerçek, bir bilginin yok olma ihtimalinin olup olmadığı sorusunu doğurur. Tabii ki bazı şeyleri unutabiliriz, belli şeylerin kayıtlarını kaybedebiliriz ya da bilinçli bir şekilde bir kâğıdı parçalamamız veya yok etmemiz bizi sıkıntıya sokabilir. Ancak yeterince sabra ve kaynağa sahip olduğumuzda bilgiyi tekrar inşa edebileceğimize inanıyoruz. Bilgisayar çağında bir şeyler hakkında düşünüyor ve sahip olduğumuz bilginin *miktarını* hesaplıyoruz. Dizüstü bilgisayarımın hafızasında 80 GB'lık bilgi depolanıyor. İnternet bağlantım bana bir saniyede çok yüksek miktarda byte getiriyor. Sınırsız kaynağa sahip olsaydım dizüstü bilgisayarım bozulsa veya evim yansa bile bu bilgiyi tekrar oluşturabilirdim. Her ne kadar zamanla ulaşmak daha zor bir hale gelse de bir sistemde (veya evrende) var olan bilgi miktarı değişmez. Genel göreliliği dahil etmeden önce kuantum mekaniği için de aynı durum geçerliydi. Kuantum sistemdeki konumun bilgisi *Schrödinger dalga fonksiyonu*nda saklıdır. Çöken bir yıldız gibi karmaşık bir sistemde yüksek miktarda; hayal edilemeyecek

miktarda bilgi bulunur. Klasik fizikte tüm atom çekirdeğinin ve elektronların konum ve hızları bilinebilir. Kuantum mekaniğinde ise aralarında daha karmaşık ilişkiler bulunur, bir parçacığın konumu diğer tüm parçacıkların konumları tam olarak bilinmediği sürece bilinemez.

Bundan dolayı çöken bir yıldız *devasa* miktarda bilgi içerir. Hawking sayesinde bir yıldızın yeterince ağır olması durumunda bir kara delik oluşturacağını ve sonrasında radyasyon yayarak yavaşça buharlaşacağını biliyoruz. Yıldızın başlangıçtaki tüm o karmaşık yapısı sıcak bir cisimden yayılan sıradan radyasyona dönüşür. Tüm bilgiler nereye gidiyor? Hawking 1976'daki makalesinde bu bilgilerin kaybolacağını iddia etti. Kuantum mekaniğinin kara deliklerin yakınında bozulduğunu öne sürdü.

Mükemmel bir düşünce deneyiydi. Kuantum mekaniğini veya genel göreliliği, ya da ikisini birden tehdit etti. Deneysel olarak test edilmesi son derece zor olan sorular barındıran gerçek bir düşünce deneyiydi. Önde gelen birçok teorisyen bu soru üzerinden tartışmaya çekildi. Bazıları kuantum mekaniği ya da genel göreliliğin tekrar inşa edilmesi gerektiğini düşünüyordu. Diğerleri ise daha kuşkucuydu. Kara delik buharlaşması bir kamp yerinde yanan odun yığınındaki kül topağı gibi olabilirdi. Tabii ki cisim yandığında kuantum mekaniği kuralları kırılmayacaktı. Bu durumda bilmecenin çözümü, oluşan radyasyonun direkt kara cisimden çıkmadığıydı, çıkan fotonlarla arasında gizli bir bağ bulunuyordu. Fakat Hawking'in kara delik problemiyle ilgili sorduğu sorunun cevabının basit olmadığı anlaşılmıştı, uzay ve zamanın yapısı bu tarz ilişkilerin nasıl meydana gelebileceğini anlamayı zorlaştırıyordu. Hiçbiri tatmin edici olmayan başka öneriler de bulunuyordu. Belki de Hawking haklıydı: Kuantum mekaniği ya da genel görelilikten vazgeçilmeliydi.

Fakat sonrasında kara deliklerin var olması ve kuantum mekaniğinin anlamlı olmasının gerektiği bir durumun varlığı anlaşılmıştı: Sicim teorisi. Sicim teorisi bilmeceye en azından kısmi bir çözüm sunuyordu. Şimdi de bu teoriyi inceleyelim.

Sicim Teorisi

Neden bazı fizikçiler sicim teorisini kutsal bir kâse gibi görüp kendilerini sicim teorisyeni olarak adlandırırken diğerleri konuyu tamamen küçümseyip tam gelişmemiş cahilliklerini adeta bir onur nişanı gibi sergiliyor? Sicim teorisine kısa bir giriş yapmış ve genel göreliliği bir şekilde dahil edebildiğini söylemiştik. Konunun kendine has tarihi sicimlerin barındırdığı gizeme ve en azından bizimkine benzeyen bir dünyanın nasıl oluşacağına dair kabaca fikir veriyor, şimdi fizikçilerin bu ilgi çekici teorilere nasıl geldiklerine bakalım. Kuantum kronodinamiği (QCD) ortaya çıkmadan önce, 1960'ların sonlarında güçlü etkileşimler teorisyenler ve deneyciler için büyük hayal kırıklığına yol açmıştı. Yüzlerce farklı türde parçacık bulunuyordu. Kuark modeli büyük ilgi görmüştü fakat net değildi, Murray Gell-Mann'in kendisi bile kuarkların gerçek varlıklar olduğundan emin değildi. Kuark modelde güçlü etkileşen farklı parçacıklar kuarkların, Niels Bohr'un atom modelinde elektronların farklı yörüngeleri takip etmesi gibi farklı şekillerde bir araya gelmesiyle oluşur. Bu durumu farklı parçacıkların daha basit olanların uyarılmış hali oldukları bir tasvir alaşımı olarak görebiliriz. Bazı bilim insanları belki de tüm hadronların benzer bir yapıya sahip olduğu daha demokratik bir tablonun olması gerektiği sonucuna varmıştı. Yoichiro Nambu ve Leonard Susskind bu modellerle oynayarak güçlü etkileşen parçacıkların sicimlerle modellenebileceği fikrine vardılar.

Sicim derken noktaların aksine doğru parçalarından bahsettiğimizi belirtmiştim. Fakat Nambu ile Susskind neden bunun güçlü etkileşen parçacıklar dünyasında bir önemi olacağını düşündüler? Bu tarz bir problemle çalışmak kolay değildir ancak çalışkan bir yüksek lisans öğrencisi için uygun bir ev ödevi olabilir. 1. ödev sorusu: Klasik sicim teorisini çalışın ve özel görelilik kurallarına uydurun. 2. ödev sorusu: Kuantum mekaniği kurallarını birinci sorunun sonuçlarına uygulayın.

Öğrenci birinci soru üzerinde çalışırken müzik enstrümanlarının yayları hakkında bildiklerimizi öğrenecektir. Sicimler tıpkı gitarın, kemanın ya da piyanonun yaylarında olduğu gibi karakteristik bir *temel* frekansta ve bu temel frekansların katları olan (1, 2, 3, ...) daha yüksek frekanslarda titreşirler. Bunlara *harmoni* denir. Müziği nasıl duyduğumuz konusunda önem taşırlar. Önemli bir fark ise Nambu ve Susskind'in temel sicimlerinin müzik enstrümanındaki yayların aksine bir bütün halinde de uçuşabilmesidir.

Kuantum mekaniğini içeren ikinci problem ise ilk bakışta bir felaket gibi görünür. Çözümü olanaksız bir problem gibidir, öğrenci özel görelilik kurallarının çalıştığını fakat kuantum teorisine uymadığını, en azından aşina olduğumuz uzayın üç boyutu ve zaman boyutu için durumun bu şekilde olduğunu fark eder. Mantıklı bir öğrenci bu noktada pes edebilir fakat gerçeğe dayanmayan öğrenciler daha fazla uzay boyutuna sahip bir dünya tasarlayabilir. Bu 25 boyutlu uzayın (26 boyutlu uzay-zaman) Schrödinger-Heisenberg-Dirac'ın taleplerini karşılayabildiğini görecektir.

Bu tuhaf öğrencimiz zorlamaya devam edebilir. Frekansların enerjiye ve Einstein'ın göreliliğinde olduğu gibi enerjilerin de kütleye dönüşebileceğini fark edecektir. Sicimler farklı şekillerde uyarılabilir, başka bir deyişle kütleye sahip parçacık-

lar gibi görünebilirler. Sicimler sınırsız türde titreşebilir; sınırsız sayıda harmoni bulunur. Bundan dolayı daha yüksek kütlelere sahip sonsuz sayıda parçacık bulunma ihtimali vardır. Güçlü etkileşimler bu şekilde çalışıyormuş gibi görünüyor.

Bu tuhaf uzay-zamana bir şekilde izin versek bile güçlü kuvvet modeli için bazı şeyler doğru görünmüyordu. *Takyon* adı verilen ürkütücü parçacıklar vardı. Işıktan hızlı hareket eden ve diğerlerine öncü olan bu parçacık anlamsız sonuçlar veriyordu. Yeterince kötü değilmiş gibi *sıfır* kütleli bir parçacığın olması gibi ikinci bir sorun daha bulunuyordu. Güçlü etkileşimlerde buna aday olabilecek bir parçacık yok. Bu parçacığın diğer bir garip özelliği de spiniydi. Spini π mezonları gibi sıfır veya foton gibi bir değildi, ikiydi.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında her şey daha da kötü görünüyor. Orijinal sicim modelinde elektron ve kuarklar gibi -1/2 spine sahip parçacıklar bulunmuyor. Teori bunları da içine alacak şekilde düzenlendiğinde takyonun varlığından kurtulunuyor ve teori 9 uzay ve 1 zaman boyutunda anlamlı hale geliyor. Ancak bunun da büyük bir bedeli var: Farklı spine sahip parçacıklar arasında tuhaf bir simetri bulunuyor. Öğrenci şu an süpersimetriyi keşfetti fakat hadronların özelliklerini de modellemeyi amaçlasaydı istenmeyen bir gelişmeden ibaret olacaktı.

Nihayet bu noktada zavallı öğrencimiz ödevi imkânsız bulacaktır. Hesaplamalar son derece zor ve karmaşık. Artık sonuçlarımız son derece sınırlıdır. Güçlü etkileşimlerin yeni teorisi olan QCD'de bu hesaplamaları yapmak çok daha kolaydı ve derhal deney uygulamalarına –başarılı bir şekilde– dönüştürülebiliyordu.

Bu teorileri güçlü etkileşimlerin gözlemlenen özellikleriyle eşleştirmeye çalışan insanlar 1973'te QCD'nin keşfedilmesiyle zorluklarından kurtuldular. 1974'te lisansüstü

eğitimime başladığımda sicim teorisine kanmaktan kurtulduğumu hissetmiş ve teorinin terk edilmesine izin vermeyen hâlâ birkaç teorisyen olduğunu gördüğümde şaşkına dönmüştüm.

Bugünse ısrarcı olan isimlerin öngörülü insanlar olduklarını görüyorum. Aslında sicim teorilerinin doğada önemli bir rol oynaması gerektiğine inanan az sayıda fizikçi bulunuyordu. 1974'te Joel Scherk ve John Schwarz önemli bir atılım yaptı. Gravitonun Einstein'ın teorisinin kuantum versiyonundaki iki spin değerine sahip parçacık olabileceğini öne sürdüler. Sicim teorisinin sadece güçlü etkileşimlerin teorisi olmadığını, genel görelilikle de ilgili olduğunu belirttiler.

Aslında garip bir durumdu. Zavallı öğrencimizden genel görelilik ilkelerinin değil, sadece özel göreliliğin uygulaması istenmişti. Bir sonraki yıla dek genel görelilik dersi almayacaktı. Yanlış sayıda boyuta sahip bir evren için bile olsa Einstein'ın gerekliliklerini sağlamayı başarmıştı. Oysaki önceden yapılan çalışmalar, özellikle Steven Weinberg'in çalışmaları, iki spin değerine sahip kütlesiz bir parçacığın Einstein'ın ilkesine uymak zorunda olduğunu göstermişti. Sonuç olarak, ortaya çıkan sicim teorisi mantıklı bir teoriydi ve bu şekilde çalışmalıydı.

Scherk ve Schwarz'ı bu kadar heyecanlandıran şey belki de yüksek lisans öğrencimizin takdir etmediği şeydir. Genel görelilik kuantum teorisinin çok yüksek enerjilerde korkunç sorunlarla karşı karşıya kaldığını söylemiştik. Feynman'ın kurallarıyla hesaplama yapmaya çalışan biri manasız sonuçlara ulaşacaktı. Sicim teorisinde durum farklı oluyordu, çünkü sicimler (noktaların aksine) hesaplamaları anlamsız hale getirecek matematiksel problemlere karşı daha dayanıklıydı. Scherk ve Schwarz sicim teorilerinin kütleçekimin kuantum teorisini anlamlı bir hale getirebileceğini öne sürdü.

Her şey hâlâ çılgınca görünüyor. 26 boyutu (25'i 3 boyutlu uzayımıza benzer, diğeri de zamandır) oluşturan ve teorinin bir versiyonunda takyon bulunmasına sebep olan şey nedir? Ya da en azından takyonun olmadığı ve 10 boyuttan oluşan fakat yine de garip olan versiyonuna ne yol açıyor? En iyi ihtimalle gerçek dünyayla bir alakası olmayan güzel matematik modeller gibi görünüyorlar.

Fakat Scherk ve Schwarz korkusuzdu. Ekstra uzay boyutlarının aşina olduğumuz üç boyutla aynı düzeyde olmayabileceğini öne sürdüler. Belki oradalardı ancak biz göremiyorduk. İkili diğer boyutlarda uzayın çok küçük çemberlere bükülebileceğini belirttiler.

Uzayın üçten daha fazla boyuta sahip olması ve diğerlerinin daha küçük olması fikrinin uzun bir tarihi var. İlk olarak yirminci yüzyılın başlarında Theodor Kaluza ve Oskar Klein tarafından öne sürüldü ve Einstein'ın ilgisini çekti. Genel görelilik ve elektromanyetizmayı birleştirerek oluşturmaya çalıştığı birleşik teoride Einstein'ın incelediği fikirlerden biriydi.

Ekstra boyut fikri nasıl bir şeydi ve sonrasında Kaluza ile Klein ne yaptı? Fark edilecek ilk şey bunun beynimizin düşünmeye hazır olmadığı bir fikir olduğudur. 4 veya 5 boyutlu bir dünyanın nasıl olacağını hayal etmek bile çok zor, 25'i aklınızdan bile geçirmeyin. Bunun yerine bu ekstra boyutların matematiksel bir çıkarım olduklarını kabul edin. Çoğumuzun lise matematiğinde karşılaştığı fikirlerin genişletilmiş halidir. 17. yüzyılda yaşayan Fransız matematikçi René Descartes bize bir düzlemi x ve y olarak kodladığı koordinatlarla düşünmeyi öğretmişti. Düzlem üzerinde bir noktayı x ve y'ye x=3 ve y=4 gibi değerler verip (3,4) basit bir şekilde ifade edebiliriz. Descartes'ın fikrini x,y,z olarak ya da üç sayıyla belirterek (örneğin (1,3,5)) bir noktanın üç boyutlu uzaydaki yerini belirtmek için kullanabiliriz. Sonrasını hayal edemesek

de matematiksel olarak devam edebiliriz. Örneğin 4 boyut (x,y,z,a) ya da 5 boyut (x,y,z,a,b) olabilir. Bu ekstra boyutlar dört, beş ya da sonsuz olabilir, aynı zamanda çember ya da küre gibi sonlu olabilirler.

Kaluza ile Klein ekstra bir boyutun bulunduğu şemaları üzerine çalıştılar. O zamanlar bu küçük boyutların nasıl olacağını veya olması gerektiğini düşünecek bir işaretleri olmamasına rağmen bu boyutu küçük bir çember olarak aldılar. Ancak heyecan verici buldukları bir keşif yaptılar. Bu çok boyutlu temel teorilerine genel göreliliği dahil ettiler. Dört boyuttaki bir gözlemcinin bakış açısına göre genel görelilik *ve* elektromanyetizma ortaya çıkıyordu. Einstein'ı heyecanlandıran şey buydu. Yüksek boyutlu genel görelilik bir şekilde genel görelilik, elektrik ve manyetizmanın birleşik teorisini ortaya çıkarıyordu. Asıl olarak sicim teorisinin çok-boyut problemiyle karşı karşıya olan Scherk ve Schwarz ekstra boyutların *sıkıştırılması*nın bir çözüm sunabileceğini belirtti. Tüm bu ekstra boyutlar gözlemlenemeyecek kadar küçük etkilere sahip küçük ve kompakt uzaylar olabilirdi, bundan dolayı uzay-zaman dört boyutta görünebilir ve belki de yeni parçacıklar ve etkileşimler bu boyutlardan geliyor olabilirdi. Eğer bunu kabul ederseniz sicim teorisinin diğer iyi özellikleri geçerliliğini sürdürüyordu. Teori daha önce önerilenlerden radikal derecede farklı bir çerçeveye sahip oluyor. Sicim teorisi kütleçekim teorisinin ve bu farklılıklardan ötürü dört boyutlu genel göreliliğin haricinde diğer etkileşimlerin teorisi olabilir.

Kimse bu trende dahil olmadı; ortada bir trend yoktu. O zamanlar QCD yeni ve heyecan vericiydi. Kuantum genel göreliliği çoğu fizikçinin önceliği değildi. Joel Scherk 1980'de sadece 43 yaşındayken vefat etti. John Schwarz, Michael Green ile çalışmaya başladı (o zamanlar Londra'daki Queen

Mary Koleji'nde olan Green, sonrasında Cambridge Üniversitesi'nde Newton ve Hawking'in de sahibi olduğu Lucasian profesörlüğünü aldı. Son olarak Londra'daki Queen Mary Üniversitesi'nde çalıştı). Süpersimetrik sicimler ya da süpersicimler üzerine uzun ve yoğun bir çalışma programı yürüttüler. Kütleçekim teorilerini anlamlı kılacak teoriler kurmaya çalıştılar ve hesaplamaları için teknikler geliştirdiler. Müthiş bir ilerleme kaydettiler. Ancak farklı bir yerden bir engelle karşılaştılar.

Edward Witten bu gelişmeleri büyük bir ilgiyle takip eden birkaç isimden biriydi. İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde doktora sonrası araştırmacısıyken sicim teorisi hakkında konuştuğumuz öğle yemeklerimizi hatırlıyorum. Edward bize Green ve Schwarz'un çok önemli ve bir o kadar da zor bir şey yaptıklarını söylemişti. Programın ciddi engellerini görebiliyordu. Bizi bu konuda cesaretlendirirken doğa yasalarını destekleyecek ilginç bir şey yapmalarına rağmen problemin yüzlerce yıl çözüm bekleyen matematik problemleri türünden bir şey olabileceği konusunda uyarmıştı. Genç meslektaşlarımla kibarca gülümsemiş ve o sırada yaptığımız çalışmalara devam etmek için ofislerimize dönmüştük. O günlerde John Schwarz ile karşılaştığımda gördüğüm ısrarının hayret verici olduğunu söylemeliyim. Problem çok zordu ve öngörülebilir bir gelecekte bir çözümü vaat etmiyordu. Ayrıca John'un Caltech'de sahip olduğu pozisyonu da sallantıdaydı. Neden tüm enerjisini olağandan bu kadar uzak bir problemde harcadığını merak ediyordum.

Ed'in teoride gördüğü problemler matematiksel karmaşıklığından kaynaklanıyordu. Fakat sicim teorisi için aşılmaz bir engel oluşturabileceği anlaşılan bazı somut ve kavramsal endişeleri vardı. İki tiptelerdi. İlki sicim teorisini Standart Model'deki parçacık ve alanlarda bulmakla alakalıydı. Diğeri

ise teorinin muhtemel hastalıkları; diğer bir deyişle anomalileriyle ilgiliydi.

Witten bir süreliğine Kaluza-Klein programıyla ilgilendi. Yine de net kurallar bulunmadığından nasıl çalışacağı konusunda sıkıntıları vardı. Sınırsız sayıda olasılık varmış gibi görünüyordu. Bir, iki, üç ya da altında yatan teori sicim teorisiyse altı ekstra boyut olabilirdi, ancak muhtemel yedinci bir boyutun rolü hakkında da işaretler vardı. Peki diğer ekstra boyutlar nasıl görünecekti? Altı çember şeklinde mi? İki ekstra boyut daha varsa küre şeklinde mi? Çok daha fazla boyuta sahip egzotik şekillerde mi? Witten tespit edilmesi zor ayrıntıları hariç tutarak kompakt uzay oluşturmak için bazı minimum gerekliliklerin olduğunu fark etti. Glüonları, fotonu, W ve Z parçacıklarını karşılayabilecek parçacık bulmak zor değildi. Elektronlar, kuarklar ve benzerleri elde edilebilirdi. Fakat bu gerekliliklerin bazıları Kaluza-Klein programında Standart Model'in elde edilmesini engelleyen ciddi engeller oluşturuyor görünüyordu. Standart Model'in daha önceden karşılaştığımız çarpıcı bir özelliği var: Tam eşitliği, ayna görüntüsünü ihlal ediyor. Witten eğer dünyamız yüksek boyutların sıkıştırılmasından meydana geliyorsa bu özelliği anlamanın zor hale geleceğini fark etti. Çok özel bir matematik kullanarak Standart Model'in tam eşitlik ihlali özelliğinin çok boyutlu uzay-zamanda genel görelilikten elde edilemeyeceğini ispatladı.

Standart Model'deki etkileşimleri iyi bir şekilde açıklayabilir görünen Kaluza-Klein programı sert bir duvara çarpmıştı. Witten'ın tam eşitlik sonuçlarının sonrasında yapılacak en basit iş bu çarpıcı özellikten vazgeçmek ve Standart Model'in Yang-Mills teorisini yüksek boyutlu teoride olduğu gibi kabul etmekti. Parçacıklara gelecek olursak; teori fotonları, W parçacıklarını ve glüonları, yani teorinin *ayar parçacıklarını*

içermeliydi. Green ve Schwarz tarafından sınıflanan süpersicim teorileri Standart Model'de olduğu gibi ekstra bir ayar alanı sınıfı içeriyordu. Ekstra boyutların sıkıştırılmasını yüksek boyutlu genel görelilikten Standart Model'i elde etmeden kabul etmek isteyen biri bugün bildiğimiz fiziğe uygun bir açıklama bulabilirdi.

Fakat Witten'ın yüksek boyut programına yönelttiği ikinci itiraz üstesinden gelinemeyecek gibi görünen *anomalilerdi*. Dört boyutta bile her teori kuantum teorisi cinsinden yazılamıyordu. Sicim teorisinde 10 veya 26 boyut olduğunda benzer problemler yaşanıyordu: Kuantum mekaniğinin olasılık yorumu çıkarılamıyordu. Standart Model bile bu anomalilerden nadiren kaçınabiliyor, çukura düşmekten etrafından dolaşarak kurtulabiliyordu. Fakat yüksek boyutlarda bu durumlar daha sınırlayıcı oluyordu. Witten tasvire genel göreliliğin de eklenmesiyle gerekliliklerin sağlanmasının imkânsız olduğunu gösterdi. Bilinen süpersicim teorilerinin bu ikisi dışında hepsinin anomalilerden mustarip olduğunu kanıtladı. Aynı zamanda teorilerden sadece ikisinin matematiksel olarak anlamlı olduğu gösterilmiş oldu. İki teoride de Standart Model'deki ayar bozonlarının rolünü oynayacak parçacık bulunmuyor. Çoğumuz bunun sicim teorisinin ölüm fermanı olduğunu düşünmüştük. Bu noktada Witten'ın argümanlarına hayran kaldığımı ve sicim teorileri üzerinde çalışmaktan bir kez daha kurtulduğuma rahatladığımı itiraf etmeliyim.

Green ve Schwarz yine pes etmedi. Witten'ın argümanlarının çok genel olduğuna ve sicim teorisinin bunlardan bir şekilde kaçınabileceğine inanıyorlardı. Süpersicim teorisindeki anomalileri hesaplamaya başladılar. Çarpıcı bir şey buldular. Witten *neredeyse* haklıydı. Sınırsız sayıdaki teoriden üç tanesi matematiksel olarak tutarlıydı. Üçünden –sadece– biri ayar simetrisi gösteriyordu. Bu simetriler Standart Model'i kap-

samak için yeterliydi. Yine de önlerinde bir bilmece vardı. Neden Witten'ın argümanları her zaman çalışıyordu? Fiziğin tarihinin teoremlerin kendisinin ve aksinin ispatlanmasıyla dolu olduğunu söylememiz gerekir. Bu tarz teoremlere "geçilemeyen teoremler" adı veriliyor. Bu teoremler genellikle döngüye girer. Tamamen yanlış değillerdir fakat bazen açıkça belirtilmeyen veya önemi anlaşılamamış istisnalara izin veren bir varsayım vardır. 10 boyutlu teorilerin anomalileri benzer bir yola girdi ve Green ile Schwarz bir çıkış yolu buldu. Kendilerinin ve Witten'ın hesaplamalarının derinlerine girdiler ve döngü buldular. Ancak şaşırtıcı bir şey daha vardı. Teorinin ayar simetrisi barındırıp anomaliye sahip olmayacağı bir ihtimal daha mümkündü. O zamanlar bu yapıda bir sicim teorisi bilinmiyordu.

1984 yazında yapılan bu keşiflerin etkisi heyecanlandırıcı olmuştu. *Birinci Süpersicim Devrimi* adı verilmişti. Witten'ın ortaya sürdüğü engeller aşılmaz görünmüş olabilirdi fakat artık çoğumuza bir tür nihai teori keşfetmenin eşiğinde olabileceğimizi düşündürmüştü. Direnmeye devam ediyordum fakat bir yandan da büyük bir şeyi kaçırma tehlikesindeydim. İleri Araştırmalar Enstitüsü'ndeki meslektaşım Nathan Seiberg bana konuya girmem konusunda baskı uyguluyordu. Nati o zamanlar çok gençti ve İsrail'deki enstitüsünden yeni gelmişti. Bir önceki yılı süpersimetri problemleri üzerine Ian Affleck ile yaptığımız başarılı iş birliği ile geçirmiştik. İkimiz de bu süreçte çocuk sahibi olmuştuk. Şimdi Nati beni zorla sicim teorisine çekmeye çalışıyordu. Zor bir konuydu ve karmaşık bir literatür bilgisine sahipti. Fakat o ders döneminde David Gross'un –QCD'nin gelişiminde kritik rol oynayan David Gross– Princeton Üniversitesi'nde verdiği sicim teorisi dersi imdadımıza yetişti. David yüksek lisans öğrencisiyken sicim teorisi üzerine çalışmıştı ve son gelişmeleri hızla takip

edebiliyordu. Sınıf yüksek lisans öğrencileriyle doluydu fakat aynı zamanda ünlü Princeton fakültesinden birçok kişi de vardı. Herkes çılgınlar gibi not alıyor ve ödev yapıyordu. Bu sırada David ve iş birlikçileri Jeffrey Harvey, Emil Martinec ve Ryan Rohm, Green ve Schwarz'un keşfettiği diğer olasılığı cevaplayacak yeni bir sicim teorisi oluşturuyorlardı. "Heterotik" dedikleri teorinin detayları son derece teknikti. Grup teorisi olarak bilinen, çoğu fizikçinin aşina olduğu bir matematik barındırıyordu fakat çoğumuza yabancı gelen özel bir kısmını kullanıyorlardı. Bu teoriler genel göreliliği içeren yapıya Standart Model'i dahil etme umudu veren özelliklere sahipti.

Geriye ekstra boyut problemi kalmıştı. Tüm süpersicim teorileri 10 boyutlu teorilerdi. 1985'in başında Witten, Phil Candelas (Teksas Üniversitesi), Gary Horowitz (UC Santa Barbara) ve Andy Strominger (Harvard) ile birlikte günlük deneyimlerimizde olduğu gibi 4 büyük boyut ve bunlara ek olarak 6 küçük boyut olması durumunda sicim teorisini çözecek denklemleri buldu. Küçük olan altı boyut özel bir uzay tipindeydi ve keşfeden iki matematikçiye ithafen Calabi-Yau uzayı olarak biliniyordu. Mükemmel sonuçlar geldi. Standart Model'in ayar teorisi kendiliğinden çıkıyordu. Hiyerarşi problemine çözüm olarak ortaya çıkan süpersimetri de neredeyse kendiliğinden çıkıyor gibi görünüyordu.

Keşif ayrıca Standart Model'in uzun süredir barındırdığı başka bir probleme daha işaret ediyordu. Üç nesil kuark ve lepton olduğunu görmüştük. Bu tekrarlı yapı kafa karıştırıyordu. İlk nesille mükemmel bir evrene sahip olabilirmişiz gibi görünüyordu. Sonrasında İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra müon keşfedildi (daha doğrusu tanımlandı). Teorisyen Wolfgang Pauli "bunu kim istemişti" diye sormuştu. Yıllar boyunca ortaya birçok fikir atıldı fakat hiçbiri ikna edici olmadı. Sıkıştırılmış sicim teorileri bu tekrarlı garip yapıları

neredeyse her seferinde üretiyordu. Ortadaki tek şey bir zenginlik israfıydı. *Fazla* üretilmiş bulunmuştu.

Hâlâ direnmeye devam ediyordum. Fakat bir cuma öğle arasında Witten ile yaptığım bir sohbet beni düşündürmeye başladı. Kuşkucu ve hatta gelişmelerden biraz rahatsız olmuş bir şekilde Ed'e bu sistemde hiyerarşi problemiyle alakalı büyük birleşik teori problemlerinin nasıl çözüleceğini sordum. Kaşlarını çattı ve iyi bir cevabının olmadığını söyledi. Egomu tatmin etmiştim ve konuya ilgi duymamamı haklı çıkarmıştım.

Sonraki pazartesi David Gross'un dersinden önce ona denk geldim, beni kenara çekip "bu arada, soruna bir cevap buldum" dedi. Beni Princeton'daki Jadwin Hall'da bulunan kara tahtaya götürdü ve açıkladı. Tamamını anlamamıştım ama temel noktayı alacak kadar anladım. Artık benim de bu trene binmeye hazır olduğumu hissettim; fizikte sıkıntıya girdiğim tüm temel sorular cevaplanmak üzere görünüyordu.

Sicim Teorisinin Doğayla İlişkilenmesini Engelleyen Bariyer

Sonraki birkaç ayda katkıda bulunduğum yoğun bir çalışma ve ilerleme süreci yaşandı. Fakat Nathan Seiberg'le sicim teorisini doğayla ilişkilendirmek için temel bir engel olduğunu fark ettik. Teorinin –bir şey öngörüyorsa– neyi öngördüğünü gerçekten çözüp çözemeyeceğimizle alakalıydı. Problem Dine-Seiberg problemi olarak bilinir oldu. Konuyu anlamak için kuantum elektrodinamiğine (QED) ve Feynman, Schwinger ve Tomonaga'nın çalışmalarına dönmekte yarar var. Burada hesaplamak istediğiniz herhangi bir şey için atabileceğiniz basit bir ilk adım bulunuyor, sonrasında sorunu iyi bir yüksek lisans öğrencisine verebilir ve birkaç gün içerisinde cevabı bulmasını bekleyebilirsiniz. Daha doğru bir hesaplama yapa-

bileceğiniz bir yöntem daha var. Burada yaptığınız orijinal hesaba yaptığınız düzeltme oldukça küçük, yaklaşık binde bir oranına oluyor. Öğrencinin bunu yapması birkaç ay sürebilir. Daha da hassas –milyonda bir oranında– bir yöntem daha bulunuyor. Bunu tecrübeli bir profesörün ve ortağının yapması birkaç yıl sürebilir. Durum bu şekilde devam ediyor. Yapılan her düzeltmenin bu kadar küçük olmasının sebebi QED'de Yunan harfi α ile gösterilen ve yaklaşık 1/137 orana sahip bir ince yapı sabiti bulunmasıdır. Başlangıçtaki basit hesap α'nın birinci üssünü içerir. Daha zor olan hesaplama α'nın ikinci üssünü içerir ve ilkinden yaklaşık 1.000 kat daha küçük olur ve böyle devam eder. Zayıf etkileşimlerde buna tekabül eden büyüklük yaklaşık 1/30'dur. Güçlü etkileşimler için enerjinin büyüklüğüne bağlıdır. Örneğin LHC'de Higgs üretimi için α_s ile ifade edilen küçük bir değer bulunur ve yaklaşık 1/10 değerindedir. Fakat bu sayılarla ilgili küçük oldukları ve küçüklüklerinin daha hassas öngörülerde bulunmamızı sağlamaları dışında bir şey bilmenize gerek yok.

Sicim teorisinde de sicim çiftlenim sabiti olarak bilinen ve g_s olarak gösterilen bir değer mevcuttur. g_s değeri küçüldükçe daha hassas hesaplamalar yapılabilir. Hesaplamalar ise QED ve Standart Model'de olduğundan daha zordur, Green ve Schwarz çalışmalarının başlangıcında hesaplamalar için Feynman'ınkine benzer kurallar geliştirmişti.

Teorinin en çarpıcı ve çekici özelliklerinden biri kendimiz bulmamız gereken değerlerin teorinin kendisi tarafından belirlenebilmesidir. Standart Model'de ölçmemiz gereken üç adet ince yapı sabiti benzeri değer bulunur. Değerlerin ne olması gerektiğine dair bir teorimiz yok. Büyük birleşik teoriler için durum biraz daha iyi, bir çiftlenim sabiti biliniyor fakat diğer ikisinin ölçülmesi gerekiyor. Sicim teorisinde ise durum farklı. Çiftlenim değerleri teorinin kendisiyle belirle-

nebiliyor. Tüm büyüklükler; kuarkların, leptonların ve Higgs parçacığın kütlesi, kozmolojik sabitin değeri ve ders kitabımızın arkasındaki tabloda (veya internet aramamızda) bulabileceğimiz bütün değerler teorinin kendisinden çıkarılabiliyor. Sicim teorisinin nihai bir teori olma ihtimalinin düşünülmesinin sebeplerinden biri de bu. Buradaki problem herhangi bir şeyi kolayca hesaplamamıza izin verecek küçük bir değer bulunması için bir sebep olmaması. İnce yapı sabiti, g_s'ye benzer bir, üç ya da π gibi evrensel bir büyüklük olması beklenebilir. Seiberg'le birlikte bu argümanı keskinleştirerek g_s'yi belirlemeyi bekleyebileceğimiz dinamiklerin küçük olmayan bir değeri sabitleyeceğini gösterdik.

Diğer problemlerin de bununla alakalı olduğu ortaya çıktı. Başlangıçta Witten tarafından vurgulanan şeylerden biri de karanlık enerjinin daha önce bahsettiğimiz saf tahminler kadar büyük olmasının bekleneceğidir. Bu probleme dair herhangi bir basit cevap bulunamamıştı. Bazı teorisyenler bunlar ve diğer sorunlara gelecek mantıklı cevapların teoriyi yıkabileceğini düşünüyordu. En güçlü –biraz da dalga geçen– itirazlar Nobel ödüllü Sheldon Glashow ve o zamanlar Harvard'da olan, sonrasında Cornell'deyken bilimsel yayınları internet çağına adapte etmesiyle MacArthur Ödülü'ne layık görülen Paul Ginsparg'dan geldi. "Umutsuz Süpersicim Arayışı" adını verdikleri yazılarında sicim programının neredeyse bilimsel olmadığını ve asıl öngörülere zorluk çıkardığını öne sürdüler.

Tüm bu eleştirilere rağmen sicim teorisi çok çarpıcıydı, birleşik teorinin karşısına çıkan engellerin çoğunu aşmayı başarmıştı ve teori üzerine olan çalışmalar sürüyordu. Arkasından gelen yeni çalışmalar fizikçilerin final birleşik teorinin temelini oluşturabilecek bir yapının açıklanmasını sağlayacak fikirler edinmesini sağladı. 1990'ların ortasında "ikililik" adı ve-

rilen büyük bir sıçrama kaydedildi. *İkinci Süpersicim Devrimi* (ilki anomali ihlallerinin keşfiyle gelen hızlı ilerleme sürecine verilen isimdi) 1995'te Los Angeles'taki Southern California Üniversitesi'nde düzenlenen yıllık Sicim Konferansı'nda Ed Witten tarafından duyurulmuştu. Düzenli katıldığım bir konferans değildi fakat o sene katılmış olmam benim için büyük bir şans olmuştu. Hâlâ PowerPoint, Keynote ve benzerlerinden önceki bir çağdaydık. O zamanlar sunumlar için tercih edilen teknoloji karatahta yoksa plastik kâğıtların üzerine fosforlu kalemlerle yapılan çizimlerdi. Yaklaşık bir saat konuşan Witten seksenden fazla dosya göstermişti. Ben ve çoğu meslektaşım öğrencilere eğer bir saat konuşacaklarsa yirmi civarında, en fazla otuz slayt göstermelerini söyleriz. Altmış slayt gösterenler genellikle dinleyici kitlesinin uyuklamasına ve ilgi göstermemesine sebep olur. Bu konuşma böyle değildi. Gösterdiği her slayt tamamen yeni bir şeydi ve topluluğa yeni bir araştırma programı sunuyordu.

Bu çalışmanın önemini takdir edebilmek için konunun konferanstan önce ne durumda olduğunu anlamamız gerekiyor. Beş farklı sicim teorisi vardı. Witten'ın orijinal testini geçen iki adet Tip II teori, Green ve Schwarz tarafından uyumlu bir teori olduğu gösterilen Tip I teori ve Gross'la meslektaşlarının öne sürdüğü iki heterotik teori. Teoriler arasındaki farklar çarpıcıydı. Bazıları ayar simetrisi barındırırken diğerleri barındırmıyordu, bazıları kapalı uçlu sicimlerden oluşurken –kendi üzerine kapanan sicimler– bazıları hem kapalı hem açık uçlu sicimlerden meydana geliyordu. Fakat Witten'ın konuşmasından bu kadar farklı görünen teorilerin bulunmasının sebebinin, hepsinin altında yatan ortak bir teori olması sonucu çıkıyordu. Örneğin küçük çemberlere sıkıştırılan bir teori büyük çemberlere sıkıştırılan diğer bir teoriye eşitti, teorinin birinde küçük bir çiftlenim sabiti varken diğerinde

büyük bir sabit vardı. Sıkıştırıldıklarında iki Tip II teorisi ve heterotik teoriler kendi içlerinde birbirine eşitti.

Tip II teoriler uygun koşullarda heterotik sicimlere de eşitti. Bu ikililik ağı bir şekilde daha sağlanıyordu. On boyutlu görünen Tip IIA teorisi çok büyük bir çiftlenim söz konusu olduğunda on bir boyutlu oluyordu. On bir boyut, bir alan teorisinin süpersimetriyle yazılabileceği en fazla boyut olması özelliğiyle biliniyor. Teoride sicimlerin karşılığı olarak iki boyutlu ince zarlar bulunuyor. Bu zarlar aslında sicimlere eşlik ediyor. Eğer bir boyut küçük bir çemberse ve zar çemberin etrafına sarılı ise, yapı diğer boyutlar açısından sicim gibi görünecektir. Witten bu 11 boyutlu teoriye "M-teorisi" adını verdi. Buradaki M'nin *Mysterious* (Gizemli), *Membrane* (Zar) veya *Magic* (Sihir) kelimelerinden gelmiş olabileceği iddia ediliyor. Her ne anlama gelirse gelsin bu bağlantılar oldukça dikkat çekici görünüyor. Birçoğu için kuantum kütleçekiminin tek bir olası teorisi olduğu öne sürülüyordu. Son derece farklı görünen teoriler tek bir yapının parçalarıydı. Belki de tesadüfen bulduk. Bu aşamada insanların görme engellilerle filin hikâyesindeki gibi olduğunu söyleyebiliriz.*

Witten'ın Los Angeles'taki konuşması büyük bir çalışma fırtınası başlattı. Takiben birkaç dikkat çekici keşif geldi.

Bu gelişmeyle ilgili bazı bakış açıları için biraz geriye gidelim. Bir yüksek lisans öğrencisine vereceğim problemden bahsetmiştim: Özel görelilik ve kuantum mekaniği kuralla-

---

* Bu antik Hint hikâyesine göre daha önce fil görmemiş bir grup görme engelli file dokunarak nasıl bir şey olduğunu anlamaya çalışır. Herkes filin sadece bir noktasına dokunabilir. Bundan dolayı herkes fili başka bir şeye benzetir ve benzetmeleri birbirleriyle tutmadığından diğerlerini yalancılıkla suçlar. Ana fikir insanların kısıtlı bilgileriyle gerçeğe ulaşma eğiliminde olmaları ve diğer insanların deneyimlerini reddetmelerinin yanlış olduğudur. (Çev.)

rına uyan bir sicim teorisi düşünün. Sonrasında ortaya çıkan müthiş şeyleri konuşmuştuk. Sicimlerin birbirleriyle ve (kuantum) genel görelilikteki gravitonlar gibi maddeyle etkileşen kütlesiz, iki spinli parçacıklar olduğu ortaya çıkarılıyordu. Fakat öğrenci –ve profesör– bunun neden doğru olduğuna dair (neredeyse) hiçbir kanıta sahip değillerdir. Bunun kaynaklandığı bir ilkeden bahsetmedik. Aslında cisimlerin noktadan ziyade karmaşıklık açısından bir sonraki seviyede olan sicimler halinde düşünüldüğü bu aptal fikir, olağanüstü bir zenginliğe imkân sağlar. Fakat tam bir tanıma sahip olmamamız sıkıntılı bir durum. Sadece bir grup hesaplama kuralımız var ve bu kurallar ancak teorideki çiftlenim sabiti çok küçük olduğunda çalışıyor. Seiberg'le kafamızı karıştıran şey buydu: Sicim teorisi doğayla gerçekten ilişkiliyse nasıl göründüğünü bilmediğimiz bir formdaydı. Büyük bir resim elde etmek zor olsa da Witten'ın konferansta yaptığı konuşma büyük yapı için ipucu sağlamıştı.

Witten'ın ikililik ağı oldukça inandırıcıydı fakat mantıklı olmalarına rağmen ispatlanmamış argümanlarla doldurulabilen boşluklara sahipti. Austin'deki Teksas Üniversitesi'nden Joe Polchinski sicim teorisinde, büyük birleşik teoride karşımıza çıkan manyetik tek kutuplarla benzer bir role sahip olabilecek D-zarlar dediği cisimler keşfetmişti. Bu cisimlerin tam olarak bu boşlukları doldurabileceğini fark etti. Sicim teorisinin bütün yapısıyla ilgili çok daha inandırıcı bir tasvir ortaya çıkmıştı.

Arkadaşlarım Tom Banks (o zamanlar Rutgers'deydi, ardından UC Santa Cruz'a geçti), Willy Fischler, Steve Shenker (o zamanlar Rutgers'deydi, sonrasında Stanford'a geçti) ve Leonard Susskind, Polchinski'nin keşfinden yola çıkarak 11 boyutlu M-teorisini açıklayan bir teori oluşturdular. Çözülmesi oldukça zor, ancak bilgisayarda özel kuralların uy-

gulanmasıyla sınırlı bir zamanda *çözülebilen* denklemlerden oluşan bir sistemdi. Juan Maldacena'dan (o zamanlar Harvard'daydı, sonrasında İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne geçti) sicim teorisinin belirli şartlar altında, bugüne dek iyi anlamış olduğumuz kuantum alan teorileriyle *özdeş* olduğunu gösteren daha da önemli bir gözlem geldi. Koşullar sicim teorilerinin negatif bir kozmolojik sabite (ve çeşitli boyutlara) sahip evrenlere karşılık gelen uzay-zamanlarda bulunmasıdır. Bu uzaylar genel görelilikçiler tarafından anti-de Sitter uzay-zamanı (Leiden Üniversitesi'nden Willem de Sitter'e ithafen) ya da AdS uzay-zamanları olarak biliniyordu, Maldacena'nın gözlemlerinden sonra alan teorilerine ithafen AdS-CFT (*class of field theories*) olarak bilinir oldu. İkinci Süpersicim Devrimi bugüne dek devam etti.

Bu sonuçlar Seiberg'le birlikte ortaya koyduğumuz problemi tam olarak çözemese de bir anlayış oluşmasını sağladı ve fiziğin diğer alanlarında da yararlı olduğu ispat edildi.

D-zarlar ve Hawking'in Paradoksu

D-zarlar Witten'ın sicim ikililikleri tasvirindeki boşlukları doldurması ve Matriks Modeli'yle Maldacena'nın AdS/CFT fikirlerine altyapı oluşturmasına ek olarak Harvard'daki iki teorisyen Cumrun Vafa ve Andy Strominger'in ellerinde Hawking'in bilmecesine çözüm sağlar hale gelmişti. Temel nokta, keşifleri Polchinski'nin olağanüstü kavrayışına bağlı olsa da D-zarların aslında gayet basit olmasıdır. Tüm hesaplarınızı D-zarları kullanarak güçlü bilgisayarlar yerine kalem kâğıtla yapabilirsiniz. Strominger ve Vafa bazı D-zar topluluklarının kara delik olduklarını ve entropilerini kuantum mekaniği kuralları kullanarak hesaplamanın zor olmadığı-

nı gösterdiler. Bunu yaptığınız zaman tam olarak Bekenstein-Hawking sonucuyla karşılaşıyorsunuz. Bu teori kuantum mekaniği ve görelilik kurallarının tamamına uyar, yani ortada bir paradoks yoktur.*

Bu sonuç soruyu kabaca cevaplasa da çoğu fizikçiyi tatmin etmemişti. Hesaplama bir kara deliği astrofiziksel açıdan tam olarak temsil etmediğinden Hawking'in argümanında neyin yanlış olduğunu anlamak zor. Genel göreliliğin nasıl işlediği konusunda tam olarak anlamadığımız önemli bir şey var. Bu durum Polchinski ve işbirlikçileri tarafından *ateşten set paradoksu* olarak formüllendi. Genellikle büyük bir kara deliğin ufkunda ilgi çekici bir şey olmadığı söylenir. Kara deliğin kütleçekimine düşen bir roketteyseniz uzak bir mesafeden izleyen arkadaşınızın sizin yok olduğunuzu görmesine ve kara deliğin merkezindeki tekillikte kaderinizin son bulacağını bilmesine rağmen siz ufka dair bir şeyi fark etmezsiniz. Ancak kuantum mekaniksel olarak, Hawking paradoksunun nasıl ortadan kaldırıldığına dair belirli varsayımlarla bu doğru olamaz. Polchinski ve ortakları roket gemisinin yüksek-enerjili radyasyondan dolayı patlayarak yok olacağını öne sürdü. Fakat AMPS paradoksu olarak bilinen farklı çözüm seçenekleri de bulunuyor. Konu Banks, Shenker ve Susskind gibi isimlerin çözüm bulma adına yürüttüğü hararetli tartışmalara konu olmaya devam ediyor. Maalesef Joseph Polchinski 2018'de beyin tümöründen dolayı hayatını kaybetti.

Sicim teorisinin ilk günlerinde teorinin *nadide* kütleçekim teorisi olduğuna dair yaygın bir görüş bulunuyordu. İkinci Süpersicim Devrimi bu görüşü daha da güçlendirdi, az bili-

* Analizde bazı incelikler bulunuyor. Aslında D-zar topluluklarının kara delik olduğu hesaplamalar kolay değildir. Ancak sonuçların hem kolay hem zor hesaplamada doğru olduğu anlaşıldı. Asıl hesaplama sistemin entropiyle alakalı enerjisinin kuantum konum sayılarını içeriyor.

nen ama çok farklı görünen teorilerin tek bir teorinin parçası oldukları ortaya çıktı. Fakat soru halen varlığını sürdürüyordu: Genel görelilik ve kuantum teorisini kapsayacak tek bir teori mümkün müydü? Sicim teorisi dediğimiz şey bu teorinin olası gerçekliklerinden biri midir? Bu soru, bir sonraki bölümün konusu olan manzara sisteminde aciliyet kazanıyor.

BÖLÜM 14
GERÇEKLİK MANZARASI

Sicim teorisi oldukça etkileyici. Son derece basit girdilerle, henüz tam anlaşılamayan nedenlerden dolayı, Einstein'ın genel göreliliğini ve Standart Model'i içeren ve özel görelilik ile kuantum mekaniğinin ilkelerine uyan bir yapı ortaya çıkarıyor. Kuantum alan teorisindeki genel görelilik göz önüne alındığında beklenen sonsuzluklarla karşılaşmıyor ve Hawking tarafından ortaya konan problemlere en azından belirli bir seviyede çözüm sağlıyor.

Sicim teorisinin çarpıcı olan başka özellikleri de var. En basit haliyle 10 boyutlu uzay-zamanda ifade edilse de dört boyutta da anlaşılabiliyor. Yalnızca Standart Model'deki ayar parçacıklarını değil, kuark ve lepton nesillerinin tekrarlayan yapısını da gösteriyor. Doğadaki tüm sabitler teori kapsamında hesaplanabiliyor olmalı. Dahası var. Sicim teorisi; büyük birleşik teori, manyetik tek kutuplar ve hiyerarşi problemini çözmesi beklenen süpersimetri yapılarını içinde barındırır ki, tüm bunlar özelliklerinin ancak yarısını oluşturur. Yine de muhtemel nihai teori gibi görünüyor.

Britanyalı teorisyen John Ellis tarafından Her Şeyin Teorisi olarak adlandırıldı. Fazla gösterişçi görünebilir fakat Ellis bu ismi teoriyi aşağılayarak Hiçbir Şeyin Teorisi olarak adlandıran eleştirilere cevap olarak koyduğunu söylüyor. Ne olursa olsun, teori oldukça etkileyici başarılara sahip ve doğa teorisini tamamen –ya da kısmen– anlamak için önümüzde uzun bir yol bulunuyor.

Birkaç problem açığa çıkıyor. Teorinin denklemleri dünyamızı temsil eden çözümler ifade etse de çok farklı özelliklere çözümler sunuyor: Farklı sayıda boyutlar ve ayar alanları, farklı sayıda ve tipte kuarklar, leptonlar ve parçacıklar arasındaki farklı etkileşimler. Teorik açıdan en çarpıcı farklılıklardan biri süpersimetri miktarı. Hiyerarşi problemini çözmek için ortaya atılan süpersimetri, dört boyut barındıran en küçük süpersimetri türüdür. İlginç, çünkü kesin olmak zorunda değildir ve kırılabilir. Süpersimetri doğanın bir simetrisiyse kesin olamayacağından bu kısım önemli hale geliyor. Doğada spin dışında tüm özellikleri elektronla aynı olan başka bir parçacık tipi daha mevcut olamaz. Daha fazla süpersimetriyle kırılma imkânsız olur. Kırık süpersimetri karmaşık ama zengindir, kırık olmayanlar basit ve sıkıcıdır. Sıkıcılık kısmını abartmasam iyi olur, çünkü bir önceki bölümde anlattığımız ikililik fenomeni ancak minimal olmayan, süpersimetrinin koyduğu tüm kısıtlamaları gösteren süpersimetrilerde anlaşılabiliyor. Yine de sicim teorisinde en iyi anlaşılan evrenlerin yaşamak için en sıkıcı olanlar olduğu bir gerçek. Farklılık yaratmak gerekirse, bir fizikçi için altı ya da sekiz boyutlu bir süpersimetriyi anlamak kolaydır fakat buradaki fizik –ve kimya– bildiğimiz türde bir yaşamı ya da yıldız ve galaksileri yaratacak kadar zengin değildir.

Ne kadar hoşlanmasak da bu sıkıcı evrenleri dışlayan bir argümanımız yok. Matematiksel tutarsızlıklara ya da yok

olmalarına sebep olabilecek tuhaf dinamiklere tâbi olamazlar. Aslında sicim teorisinde çevremize gerçekten benzeyen durumların var olması varsayımsaldır. Bunlar ne beni ne de meslektaşlarımı sicim gerçekliği üzerine makaleler yazmaktan alıkoymadı. Maalesef bu makalelerin hiçbirinin sicim teorisinden bir öngörü yaptığı söylenemez. Bunun yerine yazar sicim teorisinin bir çözümünü beğenir ve ayrıt edici bir özelliğini seçip Standart Model'i uygular. Fakat yazar, seçiminin gelişigüzelliğinden bağımsız olarak önerisindeki iki büyük problemi görmezden gelir.

En ilkel problem kozmolojik sabit olduğunu varsayacağım karanlık enerjidir. Sıkıntılı bir problem olmasına rağmen teorisyenler sicim teorisine dek görmezden geliyordu. İyi bir mazeretleri vardı. Kuantum alan teorisinde kozmolojik sabit bir madde ilkesi olarak öngörülemez. Sadece bir sayıdır. Oldukça tuhaf bir sayı olabilir fakat yapacak bir şey yoktur. Bu durum sicim teorisiyle birlikte değişti. Sicim teorisi her şey tahmin edebilmeliydi ve kozmolojik sabitin öngörülmesi gereken ilk şey olduğu anlaşılmıştı. Witten sicim teorisinin ilk günlerinde bile kozmolojik sabitle ilgili bir şeyler çıkarılabilme ihtimalini merak etmişti. Belki de sıfır çıkardı.

Kozmolojik sabitin sicim çözümlerinde süpersimetrinin kırık olmaması durumunda sıfır çıkacağı biliniyordu. Fakat süpersimetri kırıksa kozmolojik sabit için süpersimetri kırılması seviyesinde bir enerji beklenebilirdi. Witten, öğrencisi Ryan Rohm'u bu problem üzerinde çalışması için görevlendirdi. Rohm süpersicim teorilerinin sıkıştırılmasını süpersimetri olmadan çalıştı. Sonuç hem ilginç hem de hayal kırıklığıydı. Kozmolojik sabit hesaplanabilirdi. Fakat saf bir şekilde beklenen kadar büyüktü. Witten bunları sicim teorisinin olağanüstü özellikleri –anomalilerin bozulması, üretimlerin

görünümü, kuantum kütleçekimi bilmecelerinin çözümü– olarak adlandırsa da ortada olağanüstü bir durum yoktu. Takip eden yıllarda çok daha fazla sicim teorileri ve sıkıştırılma çalışmaları yapıldı ancak umut vaat eden herhangi bir şey bulunamadı.

Bunun yerine, kozmolojik sabit problemi için çok daha farklı türden çözümler öne sürüldü. Bunlardan biri fizikçileri rahatsız etse de çarpıcı bir başarı elde etmişti. Büyük laflar etmeden önce basit bir soruyla başlayalım. İnsanlar neden sadece Dünya'nın yüzeyinde yaşıyorlar? Dünya özel bir yer. Yıldızların çevresinde gezegenlerin olduğunu ve bir kısmının yüzeyinde sıvı su ve bildiğimiz türde yaşam için gerekli olan temel elementleri barındırdığını gösteren kanıtlar elde etmeye başladık, ancak bu gezegenlerin yüzeylerinin evrende kapladığı alan inanılmaz derecede küçük. Her yıldızın çevresinde bizimki gibi bir güneş sistemi olsa bile oran ancak 10^{40}'ta bir olur. Çoğumuz için cevap açıktır. Yaşam –hatta aşina olduğumuzdan çok daha farklı formda olanlar bile– neredeyse kesinlikle boş uzayda ya da yıldızların yakınında gelişemez. Ancak Dünya yüzeyi gibi özel yerlerde olabilir. Çok sıcak olamazlar. Sıvı suya gerek vardır. Yeterli miktarda ağır element bulunmalıdır. Bunlar bile ancak minimum koşulları sağlayabilir. Bu tarz gezegenler var olsa bile –bir kısmı zeki yaşama ev sahipliği yapabilir– evrende yaşamın bulunacağı nadide yerler olacaklar.

Weinberg kozmolojik sabit sorununa Banks'in önerisini takiben gezegenlerdeki yaşamı sorgulayarak yaklaştı. Evrenin gördüğümüzden daha büyük olduğunu ve bu "metaevren"in veya "çoklu evren"in farklı noktalarında doğa sabitlerinin, özellikle kozmolojik sabitin farklı değerler alacağını varsaydı. Bu çoklu evrenin hangi noktalarında gözlemci bulabileceğimizi sorguladı. Dünya benzeri gezegenlerde yaşam arayışımı-

za benzer fakat zor olan kısım bu gezegenlerden bulmanızdır. Bunun yerine Weinberg bizimkine benzeyen yasalara sahip olan evrenlerin galaksi ve yıldız oluşumu için hangi kozmolojik sabite sahip olacağını sorguladı. Cevaplanması zor bir soruydu. Doğa yasalarının bizimkiyle aynı, fakat kozmolojik sabitin olmadığı bir evrende yıldızların oluşması büyük patlamadan sonra milyarlarca yıl sürerdi. Kozmolojik sabitin negatif bir değer alması durumunda, bu negatif değer mutlak değer olarak *aşırı küçük* olmadığı sürece evren yerçekimsel bir çökmeye gidecek, yıldızlar ve gezegenler oluşmadan önce devasa bir kara delik benzeri cisme dönüşecekti. Kozmolojik sabitin pozitif olması da farklı bir problem doğuruyordu. Kozmolojik sabit çok küçük değilse, evren yıldızların oluşmasından önce üssel bir hızla, enflasyonda olduğu gibi genişleyecekti. Bir arada olması gereken maddeler bu durumda asla kaynaşamayacaktı.

Weinberg kozmolojik sabitin (ya da karanlık enerjinin) sıfır olduğuna dair popüler görüşü bir kenara bıraktı ve ancak yıldızların oluşmasına yetecek kadar küçük olduğunu öne sürdü. O kadar küçüktü ki, küçüklüğü zaten çok tuhaftı ve daha küçük olması ihtimali oldukça düşüktü. Sonuç daha sonra keşfedilene çok yakındı. Muhteşem bir keşfin *öngörüsü*ydü. Aslında bu argümanın en basit formülleştirilmesinde kozmolojik sabiti keşfedilenden 100 kat daha yüksek tahmin etmişti fakat yine de son derece iyiydi, çünkü:

1. Geleneksel akıl yürütmeyle tahmin edilen sayı 10^{120} kat hatalıydı; yani 10^{2}'lik bir hata müthiş bir gelişmeydi.
2. Sonrasında keşfedilen kozmolojik sabit araştırılandan biraz daha küçük çıkmıştı.
3. Argüman oldukça basitti. Yapılacak düzeltmeler farklılığı açıklayabilirdi.

Muhtemelen büyük bir başarı olsa da (herkes aynı fikirde değildi) Weinberg Pandora'nın kutusunu açmıştı, hem oldukça ilginç bir potansiyele sahipti hem de birçok kişinin görüşüne göre bilim yapma sürecini tehdit ediyordu. Doğa yasalarının gözlemcilerin –yaşamın– varlığı için bu şekilde olması gerektiği görüşü antropik ilke olarak biliniyor. Aslında Weinberg bu ilkenin farklı formlarını keşfetti. En uç noktada bunu dinî bir bakış açısı olarak ele alabilirsiniz: Üst bir güç insanlığın var olabilmesi için bu yasaları koydu. Fakat Weinberg oldukça anti dinci bir yerden bakıyordu. Varlığımız bir kazaydı. Devasa bir evrende inanılmaz derecede küçük bir nokta bile değiliz, fakat evrenin kendisinin evrenler evreninde küçük bir nokta olduğunu düşünüyoruz. Kendimizi bu özel evrende bulmamızın sebebi bu evrenin yıldızlar ve galaksilerin –ve yaşamın– oluşmasına uygun nadir evrenlerden biri olması. Görüşüne *zayıf antropik ilke* adını verdi.

Bilim insanlarının ancak küçük bir kısmının dindar olduğu doğru olduğu olsa da kendilerini tutucu olarak tanımlayan daha küçük bir topluluk da var. Kendilerini dindar olarak tanımlasalar bile dinî görüşlerinin bilimsel araştırmalarını etkilemediğini söylüyorlar. Doğayı önyargısız bir şekilde çalışmaları gerektiğine inanıyorlar. Yine de çoğu bilim insanı, özellikle teorik fizikçilerin çoğunluğu, doğada bir çeşit düzenin ve altında yatan bir basitliğin bulunduğuna inanıyorlar. Einstein'ın da meşhur sözü gibi "Dünyanın ebedi gizeminin anlaşılabilirliği olduğu söylenebilir." Bilimin az sayıda ilke ve toplu denklemlerle geniş bir fenomen dizisini açıklamadaki başarısı göz önüne alındığına bu bakış açısının çok sayıda tarihsel desteği bulunur. *Antropik ilke* çalışıyorsa bu görüşü devirecektir. Sadece kozmolojik sabiti açıklamak bile absürt sayıda –en az 10^{120}, hatta diğer doğa sabitleri söz konusu olursa daha da fazla– farklı evren gerektirir, hatta doğa yasalarının

temel yapısı bile bu şekilde açıklanabilir. Doğa saçma derecede karmaşık olacak ve doğa yasalarının asıl anlamı gizemini koruyacaktır. Birçoğu gerçek bir anlayışa ulaşmaktan vazgeçiliyormuş gibi hissediyor. Kozmolojik sabiti atom özelliklerini hesapladığımız şekilde hesaplayabilirsek çok daha tatmin edici olacaktır.

Sicim teorisi –en azından başlangıcında– tüm doğa yasalarının, doğa sabitlerinin ve altında yatan yapının anlaşılabilmesinin mümkün olduğuna dair bir iyimserlik yarattı. Bilim insanları bir gün gözlemleyebildiğimiz tüm doğa yasalarını, doğa sabitlerini ve öğrenmek istediğimiz her şeyi belirleyebileceklerdi. Birçoğu kozmolojik sabitin uç bir nokta olduğunu ve ileri bir gelecekte çözülebilecek bir problem olduğunu düşünüyordu. Fakat Pandora'nın kutusunu açan şey antropik ilkeyi karşılama ihtiyacıydı. Kozmolojik sabit antropik düşüncelerle belirlenmeyebilirdi fakat doğa sabitlerinin çoğu, hatta belki de tamamı ve yasalar belirlenebilir. Yıldızların varlığı evrenin yeterince yaşlı olmasının yanında birçok başka faktöre bağlıdır. Örneğin zayıf kuvvetin gücü şu ankinden çok farklı olsaydı yıldızlar yanmazdı veya şu andan çok daha hızlı yanardı. Elektron şu ankinden çok daha ağır olsaydı veya atomların, moleküllerin ve katı malzemelerin farklı özellikleri olsaydı bildiğimiz türde yaşamın var olması imkânsız olurdu. Olasılıkların ve muhtemel evrenlerin kaosu farklı koşullarla karşılaştığımızda çok daha uç hale gelirdi.

Sicim teorisi birçok olasılık konumu barındırıyor. Farklı boyutlardan, farklı kuark ve lepton sayılarından bahsettik fakat evrenin bu tarz bir davranışa sahip olduğunu açıklamak için hangi büyüklüklerin gerektiğinden emin değiliz. 10'un üsleri konusunda deneyimliyiz. En az 10^{500} cinsinden sayılar gerekiyor. Trilyon gibi sayıları günlük deneyimlerimizle hayal etmenin zor olduğunu görmüştük. Anlaşılması oldukça

zor. Evrendeki atomların her biri bizim evrenimizin içerdiği miktarda atom içeren küçük bir evren olsaydı, 10^{500} atom yeterli olmayabilirdi. Çevremizdeki dünyayı açıklayacak böyle bir görüşü sindirmek çok zor. Yaşamı oluşturmak için bir yaratıcının minimalist bakış açısıyla bile fazlasıyla karmaşık bir durum. Sonuç olarak Weinberg'in orijinal önerisine tepkim "Ha-Ha! Çok zekice fakat doğanın böyle çalışmadığına eminim" şeklinde olmuştu.

Tom Banks ve Nathan Seiberg'le birlikte kuşkucular olarak bir olasılığın bu kadar yüksek sayılara yol açabileceğini düşünmüştük. Hayal kırıklığı ve rahatlamanın karışımı olarak sicim teorisinde böyle bir şey olamayacağını kendimizden emin bir şekilde söylemiştik. Birkaç yıl daha uyumaya devam edecektik.

Sonrasında Joe Polchinski ve Raphael Bousso (şimdi UC Berkeley'de) daha makul bir açıklamayla geldi. Elektrik ve manyetik yükler hakkında konuşmuştuk, ikisinin de eğer mevcutsa, Dirac'ın tek kutup argümanıyla nicelleştirilebildiğini gördük. 1, 2, 3 şeklinde devam eden, sayılabilen değerler aldıkları anlamına geliyordu. Polchinski ve Bousso sicim teorisinde sıkıştırılmış evrenleri işgal eden birçok tipte, yüzlerce tipte manyetik ve elektrik yükü olabileceğini ekledi. Her biri farklı değer alabilirdi. -5 ile +5 arasında sınırlayacak olsak 500 yük tipi meydana gelir ve hep birlikte 10^{500} yük dağılımı olasılığı oluştururlar. Bu sayılar sıkıştırılmış boyutlarda bulunuyorsa her biri farklı bir evreni temsil eder. İhtiyacımız olan şey bu olabilirdi. Bousso ve Polchinski sürekli bir nokta kümesini pürüzsüz bir şekle sahip bir nesne gibi ele alıp bir süreklilik ile karşılaştırarak, bunun neredeyse bir süreklilik olan ama aslında çok sayıda ayrık noktadan oluşan bir koleksiyon olduğunu düşündüler ve "ayrıklık" adını verdiler. Sonrasında Leonard Susskind buna manzara adını verdi.

Hâlâ kuşkucuydum. Tom Banks ve öğrencisi Lubos Motl'la (şimdi muhafazakâr bir Çek bloğunun sahibi) birlikte Bousso ve Polchinski'nin önerisinin neden sicim teorisinde mümkün olamayacağını anlatan bir grup neden sıralamıştık. Bir süre daha uyudum. Fakat sonrasında Stanford'dan bir grup belirli sicim modellerini dikkatlice inceleyerek Bousso-Polchinski hikâyesinin daha ikna edici bir versiyonunu öne sürdüler. Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde ve Sandip Trivedi'den oluşan grup sicim teorisi, genel görelilik ve kozmolojide uzmandı. Banks ve Motl'la birlikte öne sürdüğümüz neredeyse tüm itirazlara ikna edici cevaplar verdiler. Ben ve diğer birçok kişi bunun gerçek olabileceğine karar vermiştik. Makaleleri isimlerinin baş harfleri olan KKLT kısaltmasıyla alınacak meşhur oldu. Neredeyse 3000 atıf aldı (Sandip Hindistan'ın Mumbai şehrindeki Tata Temel Araştırmalar Enstitüsü'nün (TIFR: *Tata Institute for Fundamental Research*) yöneticiliğini yapıyor).

Sicim teorisinin büyük bir çoklu evren manzarası *sağlayabileceğini* kabul edersek antropik ilkenin sadece kozmolojik sabiti değil, genel olarak tüm doğa yasalarını etkileyeceğini kabul etmek zorunda kalıyoruz. Banks'le birlikte doktora sonrası araştırmacısı Elie Gorbatov (sonrasında finans endüstrisinde başarılı bir kariyere sahip oldu) ile yaptığımız çalışmada bunun ne anlama gelebileceğini sorguladık. Durum nasıl olursa olsun antropik ilkenin ciddi sorunlarla karşı karşıya olduğunu fark ettik. Weinberg'in antropik ilke söylemi kozmolojik sabitin neden beklenenden daha küçük olduğu problemini çözer. Fakat doğada *yaşamın varlığıyla bir alakası yok gibi görünen* çok sayıda küçük değerli sabit bulunuyor. Çarpıcı örneklerden biri güçlü etkileşimlerden bildiğimiz, aşırı küçük, $10^{-10'}$dan daha küçük bir değere sahip olan θ sayısı. Bu değer çok daha büyük olsaydı, hatta bir bile olsaydı, et-

rafımızdaki evren için hiçbir sonucu olmazdı. Diğerlerinde de sonuçlar bu kadar dramatik olmasa da benzer. Bundan dolayı antropik düşünceler en azından bazı doğa sabitleri için cevap sağlamıyor. Tabii ki bu büyüklerden bazılarının antropik ilke tarafından sınırlanan diğer büyüklüklere bağlantılı olma *ihtimali* bulunuyor.

Bazıları umudu kesmişti. Örneğin hiyerarşi problemini ele alalım. Kozmolojik sabit problemine benzer olabilirdi. Sonuç olarak yeterince küçük kozmolojik sabite sahip olanlar arasında kozmolojik sabiti açıklayacak çok sayıda boşluk olduğunu kabul edersek, Higgs kütlesi için çok sayıda farklı değer oluşabilir. Higgs kütlesinin de antropik düşüncelerle seçilebileceğini söylemiştik. Yeterince sıcak ve yaşam barındırabilecek gezegenlere sahip olacak kadar uzun yaşayan yıldızların varlığı bugünküne benzer değerde bir Higgs kütlesi gerektirebilir. Bu görüşte LHC'yi açıklayan hiyerarşiyi açıklayabilecek süpersimetri veya technicolor beklenmez. Meslektaşlarımın arasındaki tartışmalar oldukça hararetli bir hal aldı.

Tüm konu ihtilaflı şekilde kalmaya devam etti. Kimi teorisyenler KKLT çalışmasının bu durumların varlığını ikna edici bir şekilde açıklamadığını iddia etti (kesinlikle kimse matematikçilerin kullandığı *ispatlama* kelimesini kullanmadı). Tom Banks kuvvetli bir şekilde bu fenomenlerin sicim teorisinin gerçek özellikleri olmadığını savunmayı sürdürdü.

Benim de dahil olduğum bazı araştırmacılar antropik manzara düşüncesinin doğru *olabileceğini* geçici olarak kabul etmiş ve neye yol açabileceğini sorgulamıştı. Kuşkuculuğumuzu kenara bırakıp fikrin tamamen hayal kırıklığı olmayacağını düşünmeye karar verdik. Kendi yaklaşımımda şöyle sormuştum: Sözde manzaradaki bazı büyük evren kümelerine özel cevapları olabilecek genel sorular nelerdir? Örneğin, bunlardan biri karanlık madde veya enflasyonun muhtemel

açıklamalarına odaklanabilirdi. Gözlemcilere göre manzaradaki herhangi bir evren için doğru olabilecek basit bir soruya odaklandım. Soru Weinberg'inkinden çok daha ilkeldi. Bousso ve Polchinski'nin yapılarında çoğu evren bütün halinde kararsızdı. Çekirdek ve radyoaktif parçacıklar gibi bozunacaklardı. Saniyenin çok küçük bir kısmında, *son derece* hızlı bir şekilde gerçekleşecekti. Bunun iyi bir şey olmadığını tahmin edersiniz. Evrenin belli bir süreliğine bozunmadan kalabileceğine inanıyoruz. Bu spekülatif soruyla yüzleşmeden önce cevaplayabileceğimiz sorulardan biriyle başlayalım. Bir trilyon yıl sonra ve daha sonrasında evrenimize ne olacak?

Evrenimizin Kaderi

Manzarada evrenler gelip geçiyor. Bu da şöyle bir soruyu doğuruyor: Gözlemlenebilir evrenimizin kaderi nedir?

İnsanlar bana genelde evrene dair bilgimizin beni insanlığın durumuyla ilgili umutlandırdığını mı yoksa umutsuzluğa sürüklediğini mi sürüyorlar. Bazen biraz da çekinerek sordukları sorulardan biri "Tanrı var mı" oluyor. Tatmin edici bir cevabım yok. İnsanların inançlarını bırakmalarını ya da varlığa dair bir peri masalına sürüklenmelerini istemiyorum. Stephen Hawking'in ateizmi bir gurur nişanesi olarak taşıdığını söylemiştim. Benim için herhangi bir sıkıntı yok, Tanrı olsun ya da olmasın herkesin dünyayı geliştirmek için bir araya gelmesi gerektiğine inanıyorum. Einstein benimkine daha yakın bir görüşe sahipti. İnsan davranışlarını etkileyen bir kudretin olduğuna kesinlikle inanmıyordu fakat insanların doğayı anlayabilmeleri adına muhteşem işler çıkarmıştı. Kuantum mekaniğini (ya da müziği, sanatı veya edebiyatı) ayırt edebilme yeteneğimizde yaşama anlam ve değer vermemizin önemli bir yeri olduğunu hissediyorum. Fakat Steven Weinberg bilimi ve evrene dair bilgimizi beni tereddüt ettiren

bir şekilde daha kasvetli bir açıdan anlatıyor: "Evrenin anlaşılırlığı arttıkça daha anlamsız görünüyor."

Korkarım ki, evrenin nihai kaderini düşündüğünüzde kendinizi Weinberg ile aynı görüşte bulabilirsiniz, fakat evren yine de büyüleyicidir. Gökbilimci arkadaşım Greg Laughlin'in (Santa Cruz'da uzun bir süre çalıştı, şimdi Yale'de) verdiği bir seminerde aynı şeyi hissetim. Konuşması ve Michigan Üniversitesi'nden gökbilimci Fred Adams ile yazdığı makalesi "Ölen Evren: Astrofiziksel Cisimlerin Evrimi ve Uzun Süreli Kaderi" başlığını taşıyordu. Başlığının da belirttiği gibi ölümcül görüşlere sahipti. Okuduğunuz kitaptaki serüvenimizin ardından Greg'in öngördüğünden de uzak bir geleceğe bakacağız. İşler daha iyiye gitmeyecek.

10'un üsleri sayesinde zamanın farklı ölçeklerini düşünebiliriz. Büyük patlamadan 13 milyar yıl sonrasındayız. İnsanlık ya da genel olarak yaşam açısından bakarsak altın bir çağdayız. Büyük patlamadan sonraki ilk birkaç milyar yılda evren yaşam için uygun değildi. Fakat ilk nesil yıldızlar karbon, oksijen ve demir gibi daha ağır elementleri ürettiler. Bu yıldızların patlamaları sonucu saçılan tozlar yeni yıldızların ve gezegenlerin oluşmasını sağladı. Bu elementler olmadan bildiğimiz türde bir yaşam var olamaz. Fakat birkaç milyar yıl içinde Güneşimiz yanarak tükenecek ve çevremizdeki yıldızların kaderi de bu şekilde olacak. Bir süre daha yeni yıldızlar oluşmaya devam edecek ancak nihayetinde bu da sona erecek. Evren 10^{14} yaşındayken ışıklar sönecek. Geriye soğuk ve çoğunluğu beyaz cüce olan yıldızlar kalacak. Çarpışıp ışık oluşturabilirler fakat yaklaşık 10^{23} yıl sonra bu çarpışmalar da sona erecek. Aynı zamanda ölü yıldızlar galaksilerden ayrılmaya başlayacak.

Ancak en kötüsü henüz gelmedi. İlk olarak, evrendeki karanlık enerji miktarının üssel bir şekilde artmaya başladığını söylemiştik. 10^{14} yıl sonra evren çok yüksek miktarda, 10^{4000}

oranında büyümüş olacak. Galaksilerin birbirlerine görünemeyecek kadar uzaklaşacakları anlamına geliyor. Bir atomda oturduğunuzda diğer atomun göremeyeceğiniz kadar uzakta olmasına benzer. Daha net bir şekilde söylemek gerekirse, galaksimizden geriye kalanlar birbirlerinden hayal bile edemeyeceğimiz kadar uzaklaşacaklar. Uzay çoğunlukla boş olacak.

Kötüleşme devam ediyor. Bu küçük ölü yıldız adalarının da sonu gelecek. Tüm maddelerin radyoaktif olduğunu, protonun da en sonunda bozunacağını söylemiştik. Ne kadar süreceğini bilmiyoruz ama 10^{33} yıldan uzun sürdüğünü biliyoruz. 10^{35} yıl olacağını varsayalım. Proton bozunması bir pozitron, bir nötrino ve foton üretecektir. Ayrıca pozitronlar elektronlarla çarpışıp imha olduktan sonra yeni foton üretecektir. Süreci izleme şansınız olsaydı bunun tek seferde olmayacağını görürdünüz. Çevrenizdeki fotonların enerjisi oldukça yüksektir fakat kozmik mikrodalga fotonlarında gördüğümüz gibi evren yaşlandıkça enerjileri düşer ve galaksilerin çevrelerindeki boş alanlara saçılırlar.

Artık çevremizde sıradan maddeden eser kalmamıştır. Ancak karanlık enerjideki Hawking radyasyonuyla alakalı *çok* düşük enerjili fotonlar bulunabilir. Ek olarak geriye çoğu galaksinin merkezinde bulunan, enerjisinin büyük bir kısmını Hawking radyasyonu yayarak bozunmasıyla çok düşük enerjilere dönüştüren devasa kara delikler (aktif galaktik çekirdek olarak da bilinir) kalmıştır. Bu olay da *çok* uzun, belki de proton bozunmasından daha uzun bir süre alır. Geriye kalan enerjinin büyük bir kısmı karanlık enerjidir. Kaderi, karanlık enerjinin nelerden oluştuğuna bağlıdır. WIMP'lerden oluşuyorsa zamanla büyük bir çoğunluğu birbiriyle çarpışacak ve enerjisini radyasyona dönüştürecektir. Axionlardan meydana geliyorsa bozunması protonlardan daha uzun bir zaman alacaktır. Fakat bu bozunma da en sonunda düşük

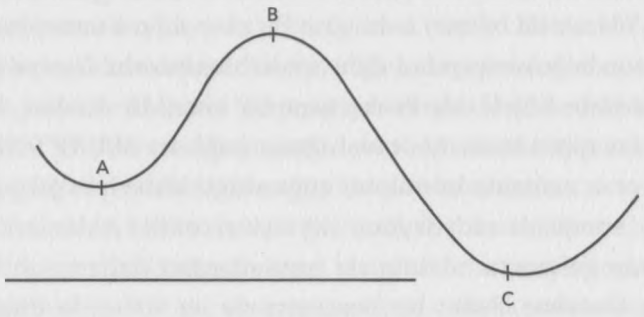
enerjili foton üretecektir. Bir noktaya kadar olaylar bu şekilde gerçekleşecek. Evren 10^{100} yaşındayken –veya bundan trilyon kat daha öncesi ya da sonrasında– her şey yok olacak ve evren sıcaklık bakımından ölü hale gelecektir.

Başka bir deyişle, geleceğimiz iç karartıcı bir şekilde soğuk ve karanlık. Fakat eğer bir manzara varsa hikâye çok daha karmaşık olacaktır. Bu durumda biraz önce tarif ettiğimiz her şey *bizim evrenimiz*in kaderidir. Manzarada da evrenler sürekli doğacak ve ölecektir. Bizimkinin bu kadar uzun süredir ortalıkta dolanıyor olması son derece çarpıcıdır ve neredeyse kesinlikle tüm bunların nasıl çalıştığına dair ipuçları barındırır. Edebiyatta ve sohbetlerimizde bazen insanları mecazen radyoaktif olarak tanımlarız. Çoğu evren için benzer bir durum geçerlidir. Tüm evren radyoaktiftir. Çoğunluğu oluştuktan kısa bir süre sonra bozunurlar. Bu evrenin kendisinin radyoaktif olduğu anlamına mı gelir?

Radyoaktif ve Kararsız Bir Evren

Kuantum mekaniğinin günlük deneyimlerimizi yansıtmadığını görmüştük. Dikkat çekici özelliklerden biri *tünelleme*dir. Şekildeki tepelerde iniş çıkış yaptığınızı düşünün:

Tünelleme



B noktasına varmayı hedefliyorsanız A'ya ulaştığınızda su içip dinlenmek için mola verirsiniz. Tepedeki B noktasına ulaşmak için yüksek çaba harcamanız gerekecek. Vardığınızdaysa iniş yapmak kolay olacak.

Kuantum mekaniğinde ise tepeyi çıkmanıza gerek kalmaz ve direkt olarak tünelleyebilirsiniz. Buradaki nokta kuantum mekaniksel bir parçacığın, örneğin bir elektron ya da alfa parçacığının konumunu, hatta tepede olup olmadığını bile söyleyemiyor oluşunuz, klasik bir parçacık olsaydı bile oraya ulaşacak enerjiye sahip olmazdı. Kuantum mekaniğindeki belirsizlikler parçacığın kısa süreliğine enerji korunumunu ihlal etmesini sağlar. Parçacığın kuyu kazar gibi tepeyi tünellediğini söyleyebiliriz. Parçacığın diğer tarafa geçmesinin ardından enerji korunumu tekrar devreye girer. Elektronik cihazların çalışma prensibini bu fenomen oluşturur. Aynı zamanda Curie'nin çalıştığı radyum radyoaktif bozunmasında da önemli rol oynarlar.

Radyum 88 proton ve farklı sayıda nötronlardan meydana gelir (farklı izotopları bulunur). Örneğin izotoplarından birinde 138 nötron bulunur ve yaklaşık 1.600 yıllık bir yarılanma ömrüne sahiptir. İki proton ve iki nötrondan meydana gelen bir helyum çekirdeği salarak geride daha düşük sayıda proton ve nötron (radon atomu) bırakır. Büyük patlama teorisinin gelişiminde önemli bir rol oynayan George Gamow 1928'de bu bozunmaların teorisini çalıştı. Alfa parçacığının daha küçük çekirdeğe bağlı büyük bir çekirdek olarak düşünülebileceğini fark etti. Alfa parçacığı buradan kaçmak için şekildeki gibi bir enerji tepesi tırmanmak zorundadır. Radyum çekirdeği için bunun meydana gelme olasılığı düşüktür ve bozunma uzun bir zaman alır. Bu şekilde bozunan bir diğer çekirdek önemli bir nükleer yakıt olan ve nükleer reaktörlerde yan ürün olarak üretilen plütonyumdur. Plütonyumun

yarılanma ömrü yüz binlerce yıla tekabül eder. Nükleer yakıtların depolanmasının büyük bir sorun olmasının sebeplerinden biri budur. Bu malzemeleri neredeyse jeolojik zaman süreçleri boyunca güvenli bir şekilde saklamak gerekir.

Manzara fikri doğruysa evrenimiz küçük bir kozmolojik sabit değerine sahiptir. Tepeden tünelleyecek parçacığımız için bizimkinden enerji bariyeriyle ayrılan, daha düşük kozmolojik sabite sahip (düşük enerji) başka evrenler bulunur. (*Evrenler* yerine *durumlar* kelimesini kullanmak daha doğru olur. Diğer evren ancak tünellemeden sonra varlık kazanır.) A noktasında bulunan bir tırmanıcının C noktasından başlamasına benzer. B noktasına varırsa enerjisini –kozmolojik sabiti– düşürebilir. Klasik fizikte bu mümkün değildir. Fakat kuantum mekaniği farklı bir hikâye anlatır. Yine de *evren*in nasıl tünellediğini bilmemiz gerekiyor. Bu nasıl mümkün olabilir? Sürecin teorisi muhteşem bir mizah anlayışına sahip olmasının yanında yaralandığı Albert Einstein'a oldukça benzeyen, zeki, sevilen ve tuhaf Harvardlı profesör merhum Sidney Coleman tarafından geliştirildi. Coleman manzarayı dert etmemişti –fikirlerini çok daha öncesinde geliştirmişti– fakat zaten Standart Model gibi kuantum alan teorilerinde evrenimizin kararsız olma ihtimali bulunuyordu.

Alfa parçacığı için tepeyi tünellersek diğer temel duruma veya "boşluğa" geçebiliriz. Einstein'ın görelilik prensibine göre bunu uzayın her yerinde yapmak imkânsızdır. Uzak bölgeler uyum içinde hareket etmesi gerekirdi. Coleman su kaynamasıyla bir benzerlik kurdu. Ocakta bir cezve su ısıttığınızda su bir noktada buhara –su buharına– dönüşebileceği bir enerji seviyesine sahip olur. Fakat tüm cevzede aynı anda olmaz. Aksine su buharı kabarcıkları üst kısımdan itibaren oluşmaya başlar ve havaya karışır. Cezveyi sıkıca kapatırsanız kabarcıklar çarpışacak ve tüm sıvı buhara dönüşecektir.

Coleman bir evren için kaynayan suyla benzer bir durumun olacağını gösterdi. Bariyeri tünelleyen küçük bölgeler ve "kabarcıklar" –yanlışlıkla çevrili gerçek boşluk bölgeleri– ortaya çıkar. Su buharı kabarcıkları gibi bu kabarcıklar da büyür. Hızlı bir şekilde büyür ve neredeyse ışık hızına ulaşırlar. Birbirleriyle şiddetli bir şekilde çarpışıp arkalarında düşük enerjili bir evren ve kabarcık çarpışmalarından oluşan enkaz (muhtemelen sıcak parçacıklar) bırakırlar.

Standart Model'de bu bir endişe kaynağıdır. Higgs parçacığının kütlesi göz önüne alındığında teoriyi yüksek enerjilerde iyi anladığımızı varsayarsak daha düşük enerji/kozmolojik sabitin olduğu bir durum ortaya çıkıyor. Coleman'ın altını çizdiği metodu kullanarak evrenin yarılanma ömrünü hesaplayabiliriz. Neyse ki ortaya çıkan sonuç evrenin şu anki yaşından çok daha büyük. Bu hesaplama yapılıyorken Higgs parçacığının bilinen özelliklerinden daha fazlasını bildiğimizin varsayılması gerekir. Hâlâ kabul etmemiz gereken bir şey daha bulunuyor. Coleman bu konudaki makalesinde şöyle diyor: "Boşluk bozunması nihai ekolojik felakettir. Yeni boşlukta yeni doğa sabitleri olur, boşluk bozunmasından sonra ise sadece yaşam değil, bildiğimiz türden bir kimyanın oluşması da imkânsız hale gelir. Fakat zaman içinde yeni boşluğun yaşamı bildiğimiz şekliyle olmasa bile, en azından keyif almayı bilen bazı yapıları sürdürebilecek bir hal alacağı, stoacı bir olasılık çizilebilir."

Ancak manzara fikri doğruysa bu problem –yaşadığımız evrenin ölümsüz olmaması– kaçınılmaz olur. Aynı zamanda Weinberg'in temel tasviri bizim kozmolojik sabitimizin pozitif ve negatif değer alabilen kozmolojik sabitlere sahip yüksek sayıda evren arasından, pozitif ve küçük bir değer alabilecek yönde seçildiği şeklindedir. Bunun nasıl olduğuna dair detaylı bir bilgimiz yok. Manzaraya dair güvenilir bir teori elde

etmemiz durumunda sıradaki soru büyük patlamadan önce ne olduğu olabilir. Tüm evren yüksek-enerjili bir evrenin tünellenmesinden meydana gelmiş olabilir.

Bense bu zorlayıcı soruyu bir kenara bırakmayı tercih ederek evrenimizin yarılanma ömrüne odaklandım. Standart Model endişesine gelirsek, yarılanma ömrü evrenin şimdiki yaşından çok daha büyük olsa iyi olur. Onda biri olsaydı bugün burada olma ihtimalimiz sıfır olurdu.

Neden böyle olmalı? Basit bir çıkış yolu var. Tekrar antropik ilkeyi canlandırmayı deneyebiliriz. İnsanların, hatta belki de özellikle bizim varlığımızın gerekliliği için önemli olacaktır. O zaman antropik ilkenin sadece bugün hayatta olmamızı gerektireceğinden ve yarının belirsiz olmasından endişelenirdim ki bu durumda sonumuz yakın olabilirdi. Kulağa saçma gelecek ama bugün evreni gözlemleyebilmek için kendimin hayatta olmasını gerektirebilirdim. Bunun yerine manzara öngörüsünü gerçekleştirebilecek bir açıklama yapmayı tercih ettim. Bunu anlamak için Coleman'ın çalışmasına dönmekte yarar var. Öğrencisi Frank De Luccia ile yazdığı makalesinde genel görelilikte tünelleme problemini sorguladılar. İki farklı seçenek bulunuyordu. Bizimki gibi neredeyse sıfır kozmolojik sabit değerine sahip bir evrenle başlarsak ve negatif kozmolojik sabitli bir evrene bozundurursak evren genel görelilikçilerin tekillik (muhtemelen kara deliğe benzer) adını verdiği yıkıcı bir sona gidecekti. Aslında Coleman'ın şakasının bir kısmını atlamıştım. "Keyif almayı bilen" yapılar için umudunu dile getirdikten sonra şöyle yazmıştı: "Artık bu ihtimal ortadan kalktı."

Fakat Coleman ve De Luccia bir olasılık daha keşfetti. Bazı koşullar altında karışıma kütleçekim eklendiğinde bozunma gerçekleşmiyordu. Doğanın süpersimetrik olması durumunda kararlı evren koşulu sağlanıyordu. Doğa kesinlikle tam sü-

persimetrik değildi fakat uygun bir bakış açısında yakın olma ihtimali vardı. Doktora sonrası araştırmacısı Guido Festuccia ve öğrenci Alex Morisse'le birlikte hiyerarşi problemi üzerine konuştuğumuz süpersimetriyle, evrenin yarılanma ömrü inanılmaz derecede uzun, 10^{100} yıldı. 10^{gugol} yıllık bir yarılanma ömrüne sahip olabilirdi. İşte bu sayı googolplex olarak biliniyordu. İlk kez inek bir lise öğrencisi olduğum zamanlarda duymuştum. Sonunda kullanma şansı yakalamıştım.

Antropik İlkenin İlkesel Bir Kullanımı mı?

Bu durum antropik ilkenin mantıklı bir kullanımı ve aynı zamanda manzarayla ilkenin kullanımından doğan bir öngörü gibi görünüyor. Sorun şu ki, bu tek başına LCH'de görülebilecek bir süpersimetri öngörüsü değildir. Daha fazla girdi gerektirir. Şu an bu soruyla uğraşan bazılarımız herhangi bir şekilde bir çözüm sunamıyor. Süpersimetrinin keşfinin eli kulağında olmasına dair bir öngörü heyecan verici olurdu.

Cevap hiyerarşi probleminin kendisinde saklı olabilir. Önceden de bahsettiğimiz gibi, zayıf etkileşim kuvveti yaşam için önemli olabilir. Ölçeği belirleyen Higgs alanı –ve aslında kütlesi– belki de manzarayla alakalıydı ve antropik ilke sadece düşük kozmolojik sabiti değil, düşük Higgs kütlesini de seçiyordu. Belki de düşük Higgs kütlesine sahip durumların çoğu aynı zamanda düşük bir süpersimetri ölçeğine de sahiptir. Çoğu teorisyene makul görünse de Rutgers Üniversitesi'nden Scott Thomas'la birlikte bunun doğru olması gerekmediğine işaret etmiştik. Karanlık madde yoğunluğu gibi diğer koşulların da antropik ilke tarafından seçilmesi mümkündü ama bunu ortaya süren argümanlar –en azından şimdilik– ikna edici değildi.

Manzara bakış açısına yönelik diğer sorunlar varlığını sürdürüyordu. Sonuç olarak durum hiç tatmin edici değildi.

Manzara hipotezi çoğu fizikçinin yaptığı gibi çirkin, desteksiz, hatta bilimsel olmamakla itham edilip reddedilebilirdi. Bunlar alternatif açıklamalarımızın olmadığı sorulardır ancak böyle bir hipotezin varlığını kabul etmemiz için gereken özelliklere sahip teorik yapılarımız (sicim teorisi) mevcut. Alternatif olarak manzara bakış açısı benimsenebilir, fakat o zaman herhangi bir bilimsel araştırma yapabilmek için bu noktada eksiksiz bir teorik çerçeveye sahip olmadığımızı ve bu bakış açısıyla gerçeklerin uzlaştırılmasının zor olduğunu kabul etmek gerekir. Ben bu durumu oldukça sıkıntılı buluyorum.

BÖLÜM 15
TEORİK FİZİK ZARINI ATMAK

Doğayla ilgili inanılmaz derecede büyük ölçeklerden küçük ölçeklere dek olan sorularımızı cevapladığımız yolculuğumuzun sonuna geliyoruz. Sayfalar boyunca birçok zorlayıcı fikirle karşılaştık. Okuyucuların karmaşık anlattığım kısımlar için beni affedeceğini umuyorum. Evrenin belli açılardan iyi anlaşılmış özelliklerini, deneylerle desteklenmiş iyi teorilerimizi, mantıklı açıklamalar sunan ve gelecekte uygun deneylerle çalışılması umulan deneylerimizi ve pek mantıklı olmayan, spekülasyon sayılabilecek teorileri anlatmaya çalıştım. İnsanlığın gelecek yıllarda listemizdeki soruları cevaplayabileceği konusunda iyimserim.

Bunların arasından kütle oluşumu ve hiyerarşi problemini parçacık hızlandırıcılar çözebilir. Fizikçilerin kullandığı enerjiler büyüdükçe ve çalışılan mesafeler kısaldıkça hızlandırıcılar daha büyük ve pahalı bir hale geliyor. Yirminci yüzyılın ikinci yarısında dünya çapında ancak birkaç hızlandırıcı vardı. Birleşik Devletler'de Long Island'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda, Chicago yakınlarındaki Fermilab'da ve Menlo Park'taki Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nde

bulunuyordu. Diğerleri ise Cenevre'deki CERN'de, Tokyo yakınlarındaki KEK'te ve Pekin'deydi.

Yıllar boyu hızlandırıcı temelli parçacık fiziği araştırmalarının öncülüğünü yapan ABD, Chicago yakınlarındaki Fermilab'da bulunan son parçacık hızlandırıcısını 2008'de kapattı. LCH çalışır durumdayken bu çalışmalara büyük kaynak ayırmak mantıklı değildi. Bunun yerine laboratuvar, CERN'deki ABD aktivitelerinin yürütüldüğü birkaç merkezden biri oldu. Şu an dünya çapındaki parçacık fiziği deneylerinin büyük bir çoğunluğu Cenevre, İsviçre'deki LHC'de yapılıyor. 10 milyar dolarlık bir yatırıma ve yıllık bir milyar dolarlık bir bütçeye sahip (resmî sayılar İsviçre frankı cinsinden veriliyor). LHC programı üç büyük deneyden oluşuyor. İki deneyde yaklaşık 3.000'er kişi çalışıyor. CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) projenin asıl fonlayıcısı ve yöneticisi. CERN yirmi üç üye ülkeden ve Türkiye, Hindistan ve Pakistan'ın da dahil olduğu işbirlikçilerden oluşan bir konsorsiyum. Birleşik Devletler ve Rusya gözlemci statüsünde bulunuyor. Birleşik Devletler masrafların bir kısmını ödüyor, ekipman ve personel konusunda ayni katkı sağlıyor.

LHC programı en az yirmi yıl daha devam edecek. Hızlandırıcı, Higgs parçacığının özelliklerinin Standart Model'de öngörülen ile uyumlu olup olmadığını anlamak adına geliştirilmeye devam edilecek. Hiyerarşi problemine çözüm sunabilecek süpersimetri ve diğer seçenekler geliştirilmiş teknolojiyle aranmaya devam edecek. Fakat fizikçiler gittikçe daha yüksek enerjilere ihtiyaç duyuyor. Kullanılan enerjinin 10 kat veya daha fazla artırılması durumunda süpersimetrinin tespit edilebileceğine dair argümanlar var. CERN, şu anki yöneticisi Fabiola Gianotti'nin önderliğinde daha yüksek enerjilere ulaşılacak büyük planlara sahip, ilk aşama için 2040 yılı hedefleniyor. Diğer büyük cihazlar Çin ve Japonya'da bulunuyor.

Onlar da fonlama ve bilimsel üyelik kapsamında uluslararası projeler. Giderler paylaşılsa bile son derece masraflılar ve her ülkede fon isteyen başka büyük proje teklifleri de bulunuyor.

Nötrinoyla ilgili sorular önümüzdeki yıllarda Birleşik Devletler'de gerçekleştirilecek deneylerin çoğunluğunu oluşturuyor. Fermilab'da üretilen nötrinolar South Dakota'daki Homestake madeninde bulunan ve DUNE (*Deep Underground Neutrino Experiment*: Derin Yeraltı Nötrino Deneyi) olarak bilinen büyük bir detektör tarafından tespit edilecek. Nötrinoların evrendeki madde antimadde asimetrisinin üretilmesinde kritik bir rol oynama olasılığına yönelik bir kanıt bulunabilir.

Astrofizik ve kozmolojide karanlık madde doğasını anlamak ve karanlık enerjinin kozmolojik sabit olup olmadığını tespit etmek için gözlemsel ve deneysel çalışmalar sürdürülecek. Galaksiler ve kozmik mikrodalga arkaplan ışımasına yönelik yapılacak çalışmalar evrenin tarihiyle ilgili daha detaylı bilgi edinmemizi sağlayacak. Şu an bazı bilmecelerimiz bulunuyor. Örneğin, evrenin yaşı konusunda küçük de olsa çelişkiler var. Deneylerdeki sistematik bir hatadan kaynaklanıyor olabilir fakat kozmik tarihteki bir faktörü gözümüzden kaçırıyor olduğumuzu da gösterebilir.

Teorik ilerlemeler için iyi umutlar olduğu konusunda iyimserim. Teorik çalışmalar hızlandırıcı bazlı fizik ve büyük ölçekli astrofizik ve kozmolojik çalışmalara kıyasla coğrafi olarak daha yaygın. ABD'de çoğu ülke genelindeki üniversitelere yayılmış olsa da bazı ulusal laboratuvarlar bulunuyor. Bu durum teorisyenlerin daha düşük maliyetle çalışmasından kaynaklanıyor. Dünya genelinde her kıtada (Antarktika hariç demeliyim), birçok ülkede teorik fizik alanında bilim insanları çalışıyor.

Teorik faaliyetler çeşitli yönlerde ilerler. Genel giderler düşük olduğundan dolayı teorisyenler geniş çaplı düşünebilir-

ler. Fakat bireysel çalışan bir teorisyenin denemeye değer bir deney vaat eden veya saf teorik açıdan iyi bir fikir geliştirme ihtimali çok yüksek değildir. Gerçek ve deneylerle doğrulanabilen bir fikir sahibi olmak ancak birkaç teorisyenin ulaşabileceği bir başarıdır.

Teorisyenlerin çalışmaları şu anda gerçekleşmekte olan, gelecek için planlanan veya en azından gelecekte mümkün görünen deneyleri planlama veya yorumlamayla ne kadar yakın bağlantılı olduklarına göre sıralanabilir. Bu sıralama deneylerin geliştirilmesine ve yorumlanmasına katkı sağlamak için kullanılabilir. İlk sınıf LHC ve gelecekte yapılması muhtemel diğer hızlandırıcılardaki Standart Model süreçlerinin ve süpersimetri olasılıklarının tespit edilmesi şansının hesaplanmasını içerir. Şimdiki ve gelecekteki deneylerde karanlık maddenin direkt veya dolaylı tespitine yönelik birçok çalışma var. Özellikle hızlandırıcı deneylerinde Standart Model ile uyuşmazlıklar olduğunda, bazı durumlarda muhtemel yeni fenomenler açısından açıklamalar sunarken diğerlerinde Standart Model'in öngörülerinin gerçekten güvenilir olup olmadığını sorgular. Santa Cruz'daki meslektaşım Wolfgang Altmannshofer mezonlarda b kuarklarına bağlı anomaliler üzerine çalışmalarını yoğun bir şekilde sürdürüyor. Karanlık madde deneyleri için de oldukça benzer bir durum var. Meslektaşım Stefano Profumo karanlık madde modelleri üzerine büyük bir ilgi duymakla beraber öncelikle karanlık madde adaylarının keşiflerini açıklayacak astrofiziksel bir olgunun dışlanması gerektiğini düşünüyor. Meslektaşım Stefania Gori karanlık maddenin ilginç formlarını arayabilecek deneyler önerdi.

Çoğu teorisyen daha çarpıcı işlerle uğraşıyor ve önceden de söylediğim gibi soru listemizin farklı noktalarında gezebiliyor. Kütleçekim ile kuantum teorisinin uzlaştırılmasında

önemli bir ilerleme kaydetmemizi bekliyorum ve evrenin yapısını, büyük patlamanın önemini ve karanlık enerjinin doğasını daha iyi anlayacağımıza inanıyorum. Biz teorisyenlerin ayrıcalığı var. Bir gün erken evrende axion üretimi sorunlarına odaklanırken başka bir gün kuark kütlelerinin belirlenmesini ya da manzaradaki durumların kararlığını düşünebiliyoruz. Araştırmam sırasında çok yüksek paralar harcama gibi endişelerim yok ve farklı araştırma programlarına sahip olmak iş beklentilerimi ve güvenliğimi artırmamı sağlıyor. Fakat gelecekte ilginç ve anlamlı bir hipotez bulma ve geliştirme ihtimalim pek yüksek değil. Böyle bir doğa hipotezinin doğru çıkma olasılığı da düşüktür. Fakat karşıma çıkan tüm şanslar için minnettarım.

NOTLAR

BÖLÜM 1. EVRENİ GÖZLEMLEMEK

19 **Newton üzerine:** Abraham Pais, *Subtle is the Lord: The Science and the Life od Albert Einstein*, 1982, tekrar baskı 2005, 14. (Türkçe: Abraham Pais, *Albert Einstein'ın Bilimi ve Hayatı*, Alfa Yay., 2021.)

BÖLÜM 3. *EVRENDEN* KASTIMIZ NE?

41 **Stephen Hawking'in 2007'deki meşhur uçuşu:** https://www.youtube.com/watch?v=OhIpdSZQZlI adresinden izleyebilirsiniz.

56 **Gökbilimciler fraksiyonları ölçüyor:** Bazı çekirdekler için –örneğin lityum– anlaşmazlıklar var. Bunun izotopların miktarlarının ölçümünden ya da hesaplamadan kaynaklanan bir hata mı olduğu, yoksa keşfedilecek daha önemli bir şeyin mi olduğu tartışması sürüyor.

BÖLÜM 4. KUANTUM MEKANİĞİ GELECEĞİ TAHMİN EDEBİLİR Mİ?

64 **Atomik hipotezin durumu:** Pais.

65 **Yunanlar gibi:** Pais.

66 **Çalışan bilim insanı:** Pais.

67 **1902'deki mektup:** Pais.

69 **Deneyimi:** Pais.

72 **Lakabı üzerine:** Graham Farmelo Dirac üzerine ismini lakabından alan muhteşem bir biyografi yazdı. *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac*, 2009, basımı 2011. (Türkçe: Graham Farmelo, *Paul Dirac*, İş Bankası Yay., 2014.)

73 **Schrödinger'in dalga fonksiyonu:** Sanal ya da karmaşık sayılara aşina olanlarınız için dalga fonksiyonunun aslında bir karmaşık sayı olduğunu söyleyeyim, gerçek ve sanal kısımlardan oluşuyor. Gerçek ve sanal kısımlarının karele-

rinin toplamı olasılığı veriyor. Bu da farklı garip etkilere yol açıyor.

76 **Anderson'ın saygısızlığı:** Pais.

84 **Schrödinger'in hayal ettiği durum:** Schrödinger'in formülleştirmesinin bir kısmını almayı tercih ettim fakat temelinin anlaşıldığına inanıyorum.

BÖLÜM 5. NÜKLEER ÇAĞIN MEYVELERİ

92 **Benzer şekilde, doğa umursamaz:** Uzay boşluğunda yol aldığınızı varsayılır, yolunuza bir dağın çıkması size sorun çıkarabilir fakat altında yatan yasalar için bir şey ifade etmez.

BÖLÜM 6. EN KÜÇÜK ŞEYLERİN KÜTLESİ

112 **Doğanın simyası için önemlidir:** Zayıf etkileşimi ilk kez bilim yazarı Nigel Calder'in hazırladığı bir televizyon programında kozmik simyacı tabiriyle duymuştum.

112 **Bu kadar uzun süre:** Süre nötron ve proton arasındaki küçük kütle farklılığından dolayı bu kadar uzundur.

BÖLÜM 8. NEDEN HİÇLİK YERİNE BİR ŞEYLER VAR?

152 **O zamandan beri yapılan:** Bu konunun bu bölümde bulunmasının sebebi Standart Model etkileşim kuvvetlerinin daha iyi ölçülmeye başlaması ve bu etkileşimlerin birleşiminin süpersimetri teorilerinde süpersimetri olmayanlardan daha iyi çalışılmasıydı.

BÖLÜM 9. "BÜYÜK SAYI PROBLEMİ"

159 **Belirsizlik ilkesine göre:** Güçlü etkileşim teorisinde proton kütlesinin Planck kütlesine oranı, proton kütlesiyle QCD'de iki kuark arasındaki 10^{-32} cm mesafede etkiyen kuvvetin gücünü tanımlayan üssel seviyede küçük sayının çarpımıyla temsil edilir.

166 **Daha hafif olmalı:** Kararlı parçacıkların bulunmadığı geçici çözümler mevcuttur, fakat bunlar deneysel sonuçlarla çatışma içinde olma eğilimindedir ve genellikle bilinen gerçeklerle uyuşmaz.

168 **Çalışma büyük bir etki yarattı:** Nathan Seiberg bu alandaki çalışmalarından dolayı MacArthur Fellowship, Breakthrough ve daha birçok ödül kazandı. Öncesinde

MacArthur ve Fields Madalyası kazanmış olan Edward Witten ise sonrasında Breakthrough Ödülü'nü ve Amerikan Fizik Birliği'nin Özel Araştırma Başarı Madalyası'nı kazandı.

BÖLÜM 13. KOLTUĞUMUZDAN KALKMADAN BİR FİNAL TEORİSİ OLUŞTURABİLİR MİYİZ?

247 **Daha zor olan hesaplama:** Düzeltmenin ilk terimden yaklaşık 1.000 kat daha küçük olmasının sebebi düzeltmelerin sadece α terimini içermesi değil, aynı zamanda 4π'ye bölünmesidir.

BÖLÜM 14. GERÇEKLİK MANZARASI

261 **Birçoğu gerçek bir anlayışa:** David Gross konferansta bu sözü kullanırken Winston Churchill'in İkinci Dünya Savaşı sırasındaki "asla, asla pes etmeyin" sözünden alıntı yapmıştı.

265 **Fakat Steven Weinberg:** *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature* (1993, Vintage tekrar baskı 1994) adlı kitabından.

TEŞEKKÜRLER

Bu kitabı fikir aşamasından gerçeğe dönüştürmek, birçok insana çok şey borçlu olduğum bir süreçti. Uzun bir süre UC Santa Cruz'da Bilimsel Yazım Programı'nın yürütücülüğünü yapan Robert Irion'la içtiğimiz bir kahve, bende bir fikrin nasıl geliştirilip geniş bir okuyucu kitlesine hitap eden bir kitaba dönüştürüleceği konusunda farkındalık yaratmıştı. Üç muhteşem kitabı bulunan Graham Farmelo'ya kitap önerim ve yazım stratejileri konusunda verdiği tavsiyeler için teşekkürü borç bilirim. Ayrıca kitap önerimi yeterince ilgi çekici bulmasının ardından beni temsilcisi Toby Mundy ile tanıştırması benim için çok değerliydi. Önerime yaptığı geliştirmelerden ve kitabımın çok daha iyi bir ilk taslağa sahip olması yolundaki rehberliğinden ötürü Toby'ye teşekkür ederim. Yayınevindeki editörüm Stephen Morrow da önerimi incelemesinin ardından çok faydalı tavsiyelerde bulundu. Sonrasında verdiği geniş revizyonlarla bana çok yardımcı oldu. Çocuklarıma söylediğim gibi, kendilerine yıllarca yaptığım eleştirilerin bedeli olarak editörümden yüzlerce yorum almıştım.

Ian Affleck, Nima Arkani-Hamed, Tom Banks, Ann Davis, Savas Dimopoulos, Willy Fischler, Dimitra Karabali, Chiara Nappi, merhum Ann Nelson, Yossi Nir, Lisa Randall, mer-

hum Bunji Sakita, Nathan Seiberg, Yael Shadmi, Yuri Shirman, Mark Srednicki, Leonard Susskind, Scott Thomas ve Ed Witten'ın aralarında olduğu bilimsel ortaklarıma bana bu konuları öğrettikleri ve yaptığım işleri eleştirdikleri için teşekkür ederim. Santa Cruz'daki meslektaşlarım –George Blumenthal, Sandy Faber, Raja Guhathakurta, Howard Haber, Joel Primack, Hartmut Sadrozinski, Abe Seiden ve diğerleri– bilim insanı ve öğretmenlik kariyerime birçok açıdan katkı sağladılar ve bu kitaptaki konuların çoğu hakkında beni bilgilendirdiler. Bu yıllarda doktora sonrası araştırmacılarım, lisansüstü ve lisans öğrencilerim işimden zevk almamı ve tatmin olmamı sağladılar. Bana hem bilim hem de iletişim konusunda yardımcı oldular.

Son olarak; ailemin, eşim Melanie Aron ve çocuklarım Aviva, Jeremy ve Shifrah Aron-Dine ile Matt Fiedler'ın sevgisi ve desteği olmadan bunları yapamazdım. Tüm çalışmalarıma yaptıkları keskin fakat kibar eleştirileri dikkatli ve dürüst olmamı, bilimde ve hayatta neyin önemli olduğuna odaklanmamı sağladı.

DİZİN

A

Affleck, Ian 154, 168, 244, 285
Alpher, Ralph 54, 55, 57, 58
anti madde (karşıt madde) 180
antropik ilke 260, 263, 264, 273
Axion 182, 183, 188, 189, 190
Axion Karanlık Madde Deneyi (ADMX) 188

B

Bahcall, John 130, 131, 132, 135, 136, 173
baryon 141, 142, 143, 144, 145, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154
belirsizlik ilkesi 159, 212, 227
Bethe, Hans 78, 79, 80, 128, 129, 130
beyaz cüce 199, 200, 266
Birinci Süpersicim Devrimi 244
Bohr, Niels 70, 71, 72, 74, 75, 77, 81, 82, 219, 222, 223, 235
Born, Max 72, 73, 75, 81, 219, 222
Bousso, Raphael 262, 263, 265
boyut 35, 52, 160, 225, 239, 240, 242, 243, 245, 250, 256
Brookhaven Ulusal Laboratuvarı 99, 117, 120, 131, 169, 275
büyük patlama 9, 16, 17, 53, 54, 147, 148, 211, 230

C

CERN 14, 96, 117, 118, 123, 127, 140, 149, 161, 162, 276
Coleman, Sidney 103, 105, 270, 271, 272
CP simetrisi 142
Curie, Marie 65, 66, 67, 73, 87, 93, 269

Curie, Pierre 66
çiftlenim sabiti 247, 249, 251

D

dalga fonksiyonu 73, 281
De Broglie, Louis 72, 77, 81, 219
Derin Yeraltı Nötrino Deneyi (DUNE) 277
Dirac, Paul 72, 75, 76, 77, 79, 81, 110, 139, 157, 158, 159, 208, 209, 219, 236, 262, 281
dolanıklık 83
düşünce deneyi 40, 232
Dyson, Freeman 81, 103, 158, 227

E

Einstein, Albert 13, 16, 18, 19, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 59, 63, 64, 68, 70, 71, 74, 75, 77, 80, 82, 83, 88, 91, 119, 139, 142, 155, 163, 174, 192, 193, 196, 200, 206, 207, 208, 213, 218, 219, 220, 221, 222, 224, 225, 228, 230, 231, 255, 260, 265, 270, 281
ekstra boyut problemi 245
enflasyon teorisi 153
en hafif süpersimetrik parçacık (LSP) 166
entropi 144, 147, 229, 230
EPR paradoksu 82

F

Faraday, Michael 30, 31, 64, 183
Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı (Fermilab) 14, 117
Feynman 23, 45, 78, 80, 81, 82, 96, 102, 103, 104, 105, 146, 147, 148, 161, 227, 238, 246, 247
Final Teorisi (Her Şeyin Teorisi) 5, 220
Fischler, Willy 186, 187, 195, 251, 285
fotino 164, 175
foton 68, 71, 75, 77, 82, 84, 98, 113, 114, 126, 140, 141, 142, 143, 145, 150, 176, 180, 182, 188, 189, 210, 223, 224, 226, 237, 267, 268

G

Galileo 22, 27, 28, 39, 40, 41, 90, 217
Gamow, George 54, 55, 57, 58, 269
Gell-Mann, Murray 100, 101, 102, 164, 235
genel görelilik 25, 33, 36, 38, 41, 45, 163, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 227, 228, 230, 238, 240, 255, 263
Glashow, Sheldon 115, 116, 117, 118, 119, 150, 166, 248

glüon 114, 150, 160, 176
graviton 223, 226, 227
Green, Michael 240, 241, 243, 244, 245, 247, 249
Gross, David 103, 104, 105, 107, 244, 246, 249, 283
Guth, Alan 206, 207, 210, 211, 215, 216
güçlü etkileşim 150, 159

H

hadron 102
Heisenberg, Werner 72, 73, 75, 77, 78, 81, 82, 88, 94, 95, 219, 236
heterotik teoriler 250
Higgs parçacığı 115, 149, 160, 162, 187
Higgs, Peter 16, 114, 115, 117, 120, 122, 125, 126, 127, 149, 150, 151, 159, 160, 161, 162, 164, 165, 167, 175, 187, 211, 221, 247, 248, 264, 271, 273,
hiyerarşi problemi 159, 162, 168, 182, 273
homojenlik 210, 212
Hooft, Gerard 't 104, 107, 117, 149, 153, 162, 164, 184, 227
Hubble, Edwin 52, 53, 55, 170, 193, 196
Hubble sabiti 52

I

İkinci Süpersicim Devrimi 249, 252, 253
İleri Araştırmalar Enstitüsü 13, 80, 93, 97, 135, 186, 241, 244, 252
izotropi 210, 213

K

kara delik 35, 47, 48, 49, 50, 129, 192, 200, 225, 226, 229, 230, 234, 252, 253, 259
karanlık enerji 200, 201, 213, 266
karanlık madde 173, 174, 175, 176, 179, 180, 181, 182, 183, 187, 188, 189, 190, 193, 196, 197, 205, 213, 215, 264, 277, 278
kızıla kayma 45, 46, 57, 200
kiral simetri 98, 99, 168
Kopenhag yorumu 74
kozmik ışınlar 132
kozmik mikrodalga arkaplan ışıması 57, 58, 59
kozmolojik sabit 193, 195, 196, 197, 198, 200, 201, 221, 257, 258, 259, 270, 272, 277
kuantum alan teorisi 102
kuantum elektrodinamiği (QED) 84, 87, 158
kuantum kronodinamiği (QCD) 87, 105
kuantum kütleçekimi 187, 223, 258
kuantum mekaniği 36, 45, 46, 73, 77, 81, 82, 83, 85, 91,

92, 94, 119, 149, 193, 194, 208, 215, 221, 222, 233, 234, 250, 252, 253, 270
kuark 100, 101, 102, 104, 105, 107, 115, 117, 118, 119, 142, 145, 168, 176, 221, 245, 255, 261, 279, 282
küresel küme 196
kütleçekim 18, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 48, 49, 88, 91, 95, 107, 113, 129, 156, 157, 158, 163, 192, 207, 208, 221, 222, 224, 227, 228, 240, 253, 272

L

lepton 115, 118, 145, 151, 153, 176, 245, 255, 261
LHC 15, 16, 120, 123, 124, 125, 127, 132, 161, 165, 166, 167, 168, 227, 247, 264, 276, 278
LIGO 224, 225, 226

M

manyetizma 18, 29, 30, 37, 64, 65, 88, 91, 93, 96, 114, 217, 218, 223
manzara 254, 262, 264, 268, 271, 272, 274
Maxwell, James Clerk 18, 29, 31, 32, 33, 34, 37, 39, 65, 67, 71, 72, 77, 84, 92, 119, 183, 208, 218, 223, 224
mezon 103
Mills, Robert 95, 96, 103, 104, 114, 117, 150, 242
Müon 89

N

Nambu, Yoichiro 96, 97, 98, 99, 114, 115, 235, 236
Newton, Isaac 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 48, 63, 64, 65, 66, 68, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 84, 90, 91, 93, 94, 95, 119, 144, 158, 162, 172, 183, 217, 224, 228, 232, 241, 281
nötrino 19, 56, 111, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 142, 151, 153, 178, 185, 200, 267
nötron 46, 47, 48, 49, 55, 56, 94, 95, 98, 99, 101, 107, 111, 112, 129, 135, 140, 141, 142, 143, 147, 155, 171, 192, 200, 225, 226, 228, 269, 282
nükleosentez 56, 157

O

Oppenheimer, J. Robert 13, 48, 80, 81, 97
özel görelilik 18, 33, 37, 85, 139, 221, 236, 255

P

parçacık hızlandırıcı 186
pion 101, 107
Planck kütlesi 158, 159

Planck, Max 68, 71, 72, 74, 75, 77, 158, 159, 160, 213, 227, 282
proton 56, 73, 87, 94, 98, 99, 100, 101, 102, 107, 109, 111, 113, 120, 125, 131, 134, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 151, 153, 154, 156, 158, 160, 167, 171, 176, 209, 267, 269, 282

R

renk ayar teorisi 106
Rutherford, Ernest 67, 69, 70, 71, 73, 87, 102, 110, 219

S

Sakharov, Andrei 143, 144, 145, 146, 148, 149, 152, 154
Schrödinger, Erwin 77, 81, 83, 84, 208, 209, 219, 233, 236, 281, 282
Schwarz, John 238, 239, 240, 241, 243, 244, 245, 247, 249
Schwinger, Julian 78, 80, 81, 82, 96, 227, 246
Seiberg, Nathan 13, 168, 244, 246, 248, 251, 252, 262, 282, 286
selektron 164
sicim teorisi 164, 209, 238, 241, 244, 245, 248, 249, 251, 263, 274
skuark 164
Standart Model 85, 87, 91, 93, 96, 105, 110, 115, 118, 119, 120, 126, 127, 142, 143, 145, 148, 149, 150, 152, 153, 159, 161, 185, 186, 198, 220, 221, 227, 241, 242, 243, 245, 247, 255, 257, 270, 271, 272, 276,
Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi (SLAC) 12, 14, 102, 134, 275
Süper iletken Süper Çarpıştırıcı (SSC) 15, 120

T

takyon 239
technicolor 160, 162, 264
tekillik 49, 53, 231, 272
Tomonaga, Sin-Itiro 79, 80, 81, 82, 96, 227, 246

U

uzay eğriliği 115, 116, 117, 118, 119, 151, 159, 185, 186, 198, 200, 207, 238, 258, 259, 260, 262, 263, 265, 266, 271, 283
uzay-zaman 105, 192, 201, 236, 240
üst kuark 118

W

Weinberg, Steven 115, 116, 117, 118, 119, 151, 159, 185, 186, 198, 200, 238, 258, 259, 260, 262, 263, 265, 266, 271, 283

Wilczek 103, 104, 105, 185, 186, 188
Witten, Edward 13, 130, 168, 176, 177, 178, 185, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 248, 249, 250, 251, 252, 257, 283, 286

X

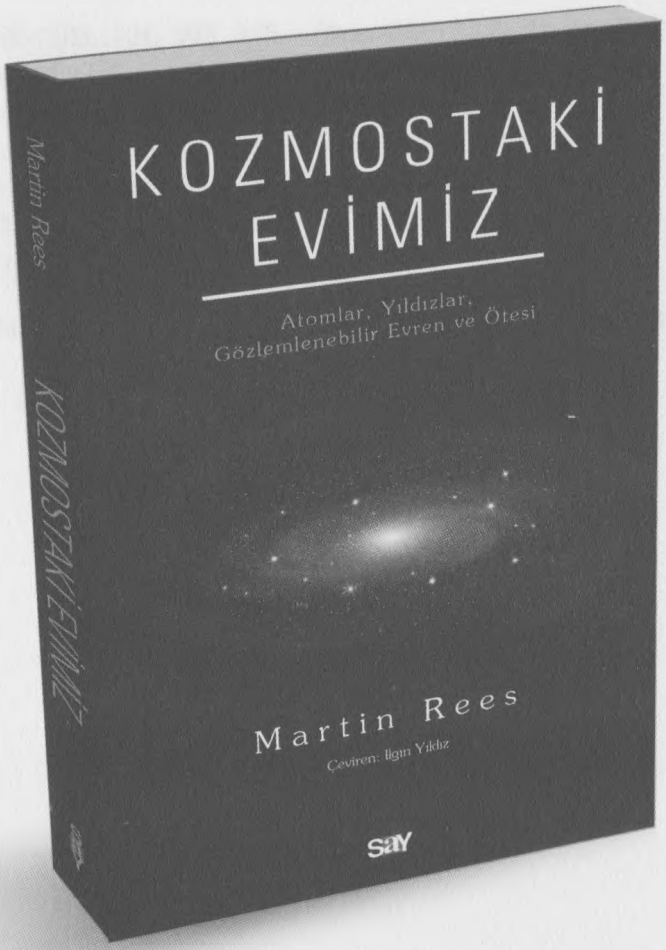
X ışınları 30

Y

Yang, Chen-Ning 88, 89, 93, 95, 96, 103, 104, 107, 114, 117, 150, 242
Yang-Mills teorileri 103
yansıma simetrisi 90

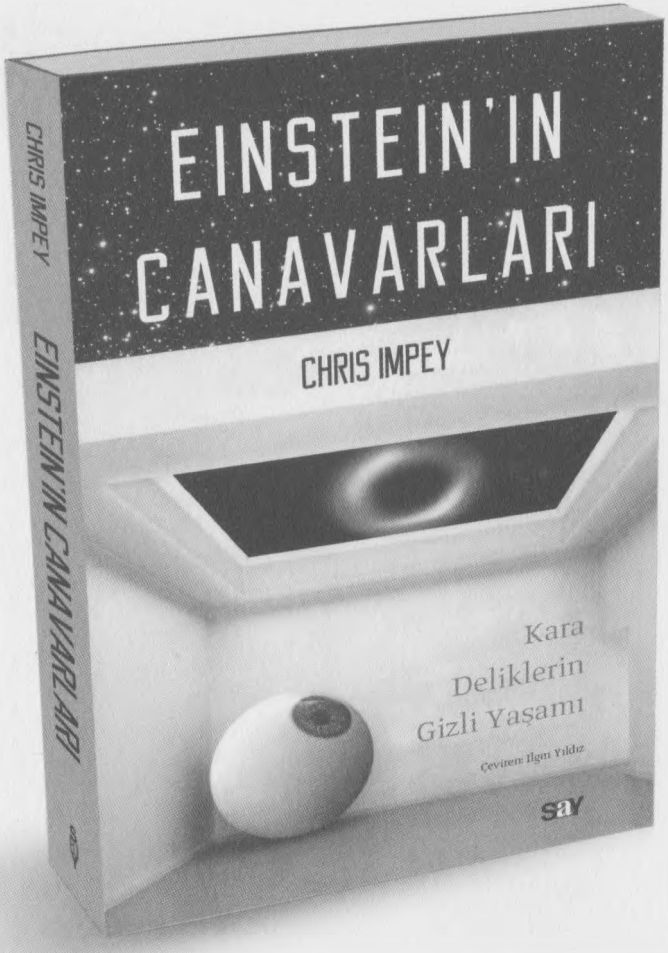
Z

zayıf antropik ilke 260
zayıf etkileşimler 112, 115, 119
zayıf etkileşimli büyük kütleli parçacıklar (WIMP) 175



KOZMOSTAKİ EVİMİZ

10 milyar ışık yılından daha uzakta, yani gözlemlenebilir evrenin sınırlarının ötesinde neler olduğunu hiç merak ettiniz mi? Peki, bu sınırın ötesinde bir yerlerde Dünya'nın, hatta güneş sisteminin, hatta hatta Samanyolu'nun bir kopyasının var olabileceğini, hele de evren sonsuz ise buna neredeyse kesin gözüyle bakılabileceğini hiç düşündünüz mü?



EINSTEIN'IN CANAVARLARI

Kara delikler bilinen evrendeki en aşırı niteliklere sahip ama teleskoplara çok sık takılan cisimlerdir. Her büyük yıldız ölünce bir kara deliğe dönüşür ve her galaksinin merkezinde devasa bir kara delik bulunur. Şayet kara deliklere yaklaşabilseydiniz zaman yavaşlardı; "olay ufkunu" geçmeniz halinde bir daha geri dönemezdiniz.

Evrene Bir De Böyle Bakın, gerçekliğin doğasını en küçükte, en büyükte ve günlük yaşamlarımızdaki ölçekte ortaya çıkaran şaşırtıcı, devam eden bilimsel araştırmalara bir övgüdür. Profesör Michael Dine'ın tartıştığı gizemler, evrenin sınırına yapılan fantastik bir yolculuktaki işaret noktaları gibidir.

Büyük Patlama, Karanlık Madde, Higgs Bozonu –şu anda fizikteki en ileri nokta– hakkında nereden bilgi edinilebileceği sorulduğunda, Dine'ın önerebileceği tek bir kitap yoktu. Bu kitap onun bu soruna anlaşılabilir, yetkin ve güncel cevabıdır. Lise düzeyinde eğitim almış herkesin anlayabileceği, neredeyse hiç denklem içermeyen bu kitapla Dine, sizi bu muhteşem yolculuğa çıkaracak daha iyi bir yazar bulunmadığını kanıtlıyor.

***

"Modern fiziğin en büyük ustalarından biri tarafından yazılan bu kitap evren ve onu kontrol eden yasalar hakkında bildiklerimiz, bilmeyi umduklarımız ve bilmediklerimize yapılan olağanüstü bir yolculuk. Bu konudaki diğer kitapların aksine yazar size kendi teorisini satmaya çalışmıyor. Modern fiziğin yüzleştiği en önemli problemleri ve bunların muhtemel çözümlerini açık ve tarafsız bir şekilde ortaya koyuyor."

— Leonard Susskind, Stanford Üniversitesi'nde teorik fizik profesörü, *Kozmik Manzara* & *Akıllı Tasarım Yanılgısı* ve *Sicim Kuramı*, *Kuramsal Başlangıç* ve *Kuantum Mekaniği* kitaplarının yazarı.



internet satış
saykitap.com

ISBN 978-605-02-0934-1

9 786050 209341

SAY YAYINLARI

sayyayincilik.com
facebook.com/sayyayinlari
twitter.com/sayyayinlari
instagram.com/sayyayinlari