HİDROJEN

Temel Element



JOHN S. RIGDEN

ODTÜ YAYINCILIK

HİDROJEN

HİDROJEN

Temel Element

John S. Rigden

ODTÜ YAYINCILIK

HYDROGEN
The Essential Element
John S. Rigden
Copyright © 2002 by the President and Fellows of Harvard College
All rights reserved

HİDROJEN
Temel Element
ISBN: 978-605-5164-18-8

ODTÜ Geliştirme Vakfı
Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayınları
ODTÜ Yayıncılık

© Tüm yayın hakları ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.'nindir. Yayıncının izni olmaksızın, hiçbir biçimde ve hiçbir yolla, bu kitabın içeriğinin bir bölümü ya da tümü yeniden üretilemez ve dağıtılamaz.

Genel Yayın Yönetmeni
Levent GÖNÜL

Çeviren
Umut UĞUR

Editör
Doç. Dr. Hüseyin OYMAK

Sayfa Düzeni ve Kapak Tasarımı
Emrullah ÖZ

1. Basım Şubat 2013
Ayrıntı Basım Yayım ve Matbaacılık Hiz. San. Tic. Ltd. Şti.
İvedik Organize San. 770. Sok. No: 105 Ostim-ANKARA
Tlf.: (312) 394 55 90 Faks: (312) 394 55 94
Sertifika no: 13987

ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
Öveçler 1042. Cad. No: 57/1 Çankaya-ANKARA
Tlf.: (312) 480 15 97 - 480 15 98
Faks: (312) 480 15 99
Sertifika no: 15723
E-posta: odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr
İnternet: www.odtuyayincilik.com.tr

İçindekiler

Giriş 1

1 *Başlangıçta: Hidrojen ve Büyük Patlama* 7
2 *Hidrojen ve Maddenin Birliği: Prout Hipotezi* 13
William Prout, 1815
3 *Hidrojen ve Kimyasal Elementlerin Spektrumları:* 20
İsviçreli Lise Öğretmeni Bir Düzen Buluyor
Johann Jacob Balmer, 1885
4 *Hidrojenin Bohr Modeli:* 28
Atomların Yapısına Bir Örnek
Niels Bohr, 1913
5 *Görelilik Hidrojen Atomunda Kuantum ile Buluşuyor* 44
Arnold Sommerfeld, 1916
6 *İnce-Yapı Sabiti:* 54
Evrensel Öneme Sahip Tuhaf Bir Sayı
Arnold Sommerfeld, 1916
7 *Kuantum Mekaniğinin Doğuşu: Hidrojen Atomu* 61
"Can Alıcı Soruyu" Cevaplıyor
Werner Heisenberg ve Wolfgang Pauli, 1925-26
Paul Dirac, 1925-26

8 *Hidrojen Atomu: Dalga Mekaniğinin Doğumundaki Ebe*
Erwin Schrödinger, 1926 76

9 *Hidrojen Atomu ve Dirac'ın Elektron Teorisi*
Paul Dirac, 1928 89

10 *Hidrojen Nükleer Fizikçilere Kılavuzluk Ediyor: Döteryumun Keşfi*
Harold Urey, 1932 98

11 *Gurur Hidrojenle Buluşuyor: Protonun Manyetik Momenti*
Otto Stern, 1933 105

12 *Manyetik Rezonans Metodu: Manyetik Rezonansla Görüntülemenin Temeli*
I. I. Rabi, 1938 114

13 *Yeni Nükleer Kuvvetler Aranıyor: Döteryumun Dörtlü Momentinin Keşfi*
Norman F. Ramsey ve I. I. Rabi, 1939 126

14 *Kütleli Maddede Manyetik Rezonans (NMR)*
Edward M. Purcell ve Felix Bloch, 1946 137

15 *Hidrojenin Dirac Teorisiyle Mücadelesi: Prototip Fizik Teorisi Olarak Kuantum Elektrodinamiği*
Willis Lamb, 1947 150

16 *Hidrojen Atomu Elektrondaki Bir Anomalinin Haberini Veriyor*
I. I. Rabi, John E. Nafe ve Edward B. Nelson, 1946 161

17 *Hidrojen Galaksinin Haritasını Çıkartıyor*
Edward M. Purcell ve Harold Ewen, 1951 171

18 *Hidrojen Maser: Yüksek Duyarlılıklı Saat*
Normal F. Ramsey ve Daniel Kleppner, 1960 183

19 *Rydberg Sabiti: Temel Bir Sabit*
Johannes Robert Rydberg, 1890
Theodor W. Hänsch, 1992 196

20 *Döteryumun Bolluğu: Big Bang Kozmolojisine Bir Bakış*
David N. Schramm, 1945–1997 210

21 *Antihidrojen: İlk Antiatom* 221
22 *Hidrojen İçin Bose-Einstein Yoğuşuğu* 232
Satyendranath Bose, 1924; Albert Einstein, 1925; Eric A. Cornell ve Carl E. Wieman, 1995; Daniel Kleppner ve Tom Greytak, 1998
23 *Hidrojen Benzeri Egzotik Atomlar: Teoriden Teknolojiye* 240

Sonsöz 250

Notlar 253

Teşekkür 265

Teşekkür Edilen Kurumlar 267

Dizin 269

Giriş

Hidrojen evrenin en önemli bileşenidir.
—Gerhard Herzberg

Bu kitabın kahramanı doğanın en basit atomu olan hidrojen atomudur. Sadece bir tek istisna dışında -helyum atomu-, hidrojen bütün atomların ve moleküllerin anasıdır. Hidrojen atomu tek bir elektron ve tek bir proton içerir; proton hidrojen atomunun çekirdeğidir ve elektronun tutucusu olarak hizmet görür. Evren tıka basa hidrojenle doludur. Uzayda yer alan cisimlerin arasını dolduran karanlık boşluğun her santimetre küpü, özellikle bilinen diğer bütün maddelerden[1] hiçbirini içermezken, mutlaka birkaç hidrojen atomu ihtiva eder. Bir diğer uç örnek de, Jüpiter gezegeninin iç hacmindeki her bir santimetre küpün on milyon kere milyar kere milyar (10^{25}) hidrojen atomu içeriyor olmasıdır. Ve her bir yıldız, uzun süren yaşamı boyunca saçtığı ışıkla kozmik komşularını aydınlatırken, bunu, bünyesinde barındırdığı maddeler arasında en fazla miktarda olanını yakarak yapar; yani hidrojeni.

Bu kimyasal element basitliğine bakılarak göz ardı edilmemelidir. Aslında hidrojen atomunun söz konusu basitliği, bilim insanlarının doğadaki gizemlerin bazılarını çözebilmelerini sağlamıştır. Bu mütevazı atom, doğal dünyayı anlamamıza katkıda bulunan en saygın (ve en kendine güvenli) bilim insanlarını tutarlı bir biçimde şaşırtmayı sürdüre gelmiştir.

Bu kitap sadece hidrojen atomuna dair teknik bir kitap olmaktan daha fazlasıdır; genel okuyucu için yazılmış, başrol oyuncusu büyüleyici hidrojen atomu olan bir dramadır. Kitabın her bir bölümü, hidrojenin bilim insanlarını yeni bilimsel kavrayışlara yönlendirmesindeki bir diğer aşamayı ortaya çıkarır.

Bir bütün olarak, kitabın ilerleyen sayfalarında yer alan yirmi üç bölüm, bilimin ilerleyişini de ortaya çıkartmaktadır. Bir bakıma bu öykü, söz konusu basit atomun dünyanın en büyük bilim insanlarının zihinlerinde on dokuzuncu yüzyılın başlarından günümüze dek açtığı çığırlara odaklanmıştır. Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Otto Stern, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Harold Urey, I. I. Rabi, Norman Ramsey, Edward Purcell, Felix Bloch, Willis Lamb, Daniel Kleppner ve Theodor Hänsch gibi bilim insanlarının tümü, fiziksel dünyaya dair geliştirdikleri ve rafine ettikleri bilgileri hidrojen atomuna duydukları hayranlık üzerinden yürütmüşlerdir.

Diğer yandan, hidrojen atomunun hikâyesi bilimin nasıl geliştirildiğini de ortaya çıkarır. Fizik teorileri, gözlemlenen dünyanın sayısal hassasiyetlerle anlaşılabilmesi için açıklayıcı bilgiler sunmayı hedefleyerek yaratılmışlardır. Bilim insanlarının çabalarıyla ortaya çıkartılmış olan söz konusu bu teoriler, doğal dünyanın içeriğine yönelik yeni kavramlara ulaşabilmeye ve daha detaylı tahminler yapabilmeye olanak sağlamıştır. İyi teoriler, farklı alanlardaki deneyimleri bir araya getiren basit teorilerdir. Fizik teorileri daima deneysel verilere ihtiyaç duyar. Deneysel gerçeklik inkâr edilemez. Eğer üretilen bir teori deneylerle test edilemiyorsa, o teori daima bir soru işaretini de beraberinde barındıracaktır. Teoriler, özellikle de iyi teoriler çabucak çürütülemezler. İyi bir teoriyi rafine etmek için büyük gayret sarf edilir ve böylece deneysel gerçekler açıklanabilir. Son tahlilde, yeniden ve yeniden test edilen deneysel sonuçlar, bağımsız deneysel yöntemlerle de doğrulandıktan sonra nihai kural hali-

ne gelirler. Dirac'ın teorisi son derece şık ve güzelken, Lamb ve Rabi'nin deneysel verileri karşısında zayıf kalmıştır. Onların bu deneysel verileri de, daha sonra çok daha güçlü bir teori olarak ortaya çıkan kuantum elektrodinamiği *(quantum elekctrodynamics)* teorisinin motivasyon kaynağı haline gelmiştir.

Kitabın bölümlerinde anlatılan hidrojen atomu üzerine deneyler, hassas ölçümlerin ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Her ne kadar bilim insanları, belirsizlikleri minimum düzeye indirmek amacıyla deneysel süreci rafine etmenin koşullarını ararlarsa da, yüzde birkaç belirsizlik daima tipik bir sonuçtur. Gelin görün ki, teori içindeki yetersizlikleri ortaya sermek ve teorinin sınırlarını test etmek için genelde hassas sonuçlar gereklidir. Hidrojen atomu, teorik kurgu çıkartma mücadelesinde daima başat bir fiziksel sistem olmuştur ve araştırma konusu hidrojen atomu olduğunda isabetli ölçüm yapmak 'olmazsa olmaz' bir şarttır. Dahası, isabetli ölçümler bazen beklenmeyen sonuçlar da gösterebilirler. Örneğin Rabi tarafından yapılan ve protonla döteronun manyetik momentlerini *(magnetic moments)* ölçmeye yönelik bir dizi deneyde belirsizlikler yüzde 26'dan binde 7'ye düşmüştür. Hassasiyetin bu denli artışıyla birlikte, çekirdeğe ait yeni bir özellik olan kuadrupol moment *(quadrupole moment)* kavramı ortaya çıkmıştır (ç.n. *quadrupole:* dört kutupluluk, iki tane artı ve iki tane eksi kutup).

Hidrojen örneğinden, temel bilimin pratik uygulamalara nasıl öncülük edebileceğini de görmüş bulunuyoruz. Temel bilimler tipik olarak, buluşların derhal teknolojik uygulamalara dönüştürülmesi düşüncesinden çok uzak çalışırlar. Temel bilimin hedefi dünyanın nasıl işlediğini öğrenmektir. Temel araştırmalar aracılığıyla doğal dünyayı incelemek yönünde elde edilen bilgi ve geliştirilen yöntemler, sıklıkla pratik ve memnuniyet yaratan gündelik kullanım imkânlarını da ortaya çıkartma potansiyeli barındırırlar. Rabi tarafından keşfedilen manyetik rezonans yöntemi ve buna bağlı olarak öğrencileri Purcell ve Bloch'un daha sonra geliştirdikleri, nükleer manyetik rezonans, güçlü bir tıbbi tarama imkânı veren manyetik rezonans (ç.n. MR) yoluyla görüntüleme tekniğinin gelişmesine öncülük etmiştir. Ramsey ve Kleppner'in geliştirdikleri hidrojen maser saati, günümüzde yaygın kullanımı olan global konumlandırma teknolojisinin temel dayanağı olarak kullanılmaktadır.

Doğanın nasıl çalıştığı anlaşıldığında, elde edilen bilginin iyiye de, kötüye de, barışa da, savaşa da yarayan uygulamaları bunu takip eder. Hidrojen füzyonunu düşünün. Temel fiziğin en büyük teorilerinden biri olan Einstein'ın görelilik teorisi nükleer füzyonun nasıl büyük bir enerji açığa çıkartabildiğini gösterdi. Bu bulgunun nasıl kullanılabileceği de kısa sürede anlaşıldı. Bir yandan, örneğin hidrojen füzyonunun Güneş'te meydana geldiği ve açığa çıkan enerjinin Dünya'daki yaşamı beslediği anlaşıldı. Diğer yandan, hidrojen füzyonunun bir bombada da kullanılabileceği ve ortaya çıkan enerjinin korkunç bir hasara yol açabileceği de anlaşıldı. Hidrojen bombası hidrojenin öyküsünde önemli bir yer tutar ve bu kitapta da bir bölüm başlığı olarak yer alabilirdi. Ancak ben iki sebepten dolayı buna karşı durdum: Birincisi, kitabın ilerleyen sayfalarındaki bölümlerde benimsenen belirgin temanın hidrojen atomunun temel bilimsel bilgiye nasıl öncülük ettiği olması ve füzyon bombasının bu temaya hizmet etmiyor olması; ikincisi de, hidrojen bombası üzerine zaten muazzam bollukta kaynak bulunması ve bu konuda bir kere daha yeni bir bölüm açmanın gereksizliği.

Bilim, bu kitabın içinde gayet net olarak anlatıldığı üzere, uluslararası bir alandır. Her ne kadar toplumlar kültürleri, dini inanışları, sanatsal dışavurumları ve politik mücadeleleri bakımından büyük farklılıklar gösterseler de, dünyanın bütün bu çeşitliliği içinden gelen insanlar bilim alanında ortak bir paydada bir araya gelirler. Örneğin bir Alman bilimi, Asya bilimi veya Hint bilimi yoktur. Bose bir Hintli idi ve Einstein de bir Alman; ikisi bilim insanları olarak bir araya geldiler ve maddenin yeni bir formu ile ilgili bir görüş ileri sürdüler –Bose-Einstein yoğuşuğu *(Bose-Einstein condensate)*. Daha sonra bu görüşün doğruluğu Amerikalı bilim insanları tarafından denendi ve onaylandı.

Bu kitap aynı zamanda bilimin onyıllar boyunca nasıl değiştiğini göstermeyi hedefliyor. Başlangıçta yer alan bölümler tipik olarak bu konuyla ilgili başlıklar içeriyor. Eski zamanlarda bilim, tek başına birinin çalışıp kayda değer katkılar geliştirmesi üzerine kuruluydu. Deney aparatları göreceli olarak daha basit, tek başına bir bilim insanının geliştirebileceği ve laboratuar masasına yerleştirebileceği özelliklere sahipti. Yirminci yüzyıla geldiğimizde ise bilim öylesine bir gelişme kaydetmişti ki,

deney aparatlarının çok daha karmaşık yapılara sahip olması kaçınılmaz bir hal almıştı. Artık deneyleri birden fazla dehanın yürütmesi gerekiyordu ve bilim bir grup faaliyeti halini almıştı. Birçok bilim insanı, örneğin, Rydberg sabitini tekrar hesaplamıştı ve Hänsch ile birlikte adları anılıyordu. Dört deneysel fizikçinin de adları Bose-Einstein yoğuşuğunun keşiyle anılırken, bugün anti-hidrojen atomunun keşfiyle ilintilendirilen tek bir isim yok artık çünkü bu konuyla ilgili birçok laboratuarda çalışan birçok bilim insanı var.

Hidrojen atomu fizikçilerin en çok ilgisini çeken konulardan biri çünkü atomik yapısının basitliği bir kavramsal model yaratmaya ve testler sonucunda daha özel deneysel veriler elde etmeye olanak sağlıyor. Kavramsal modelin özündeki mantık matematiksel olarak ifade ediliyor ve hidrojen atomunun basit yapısı söz konusu bu matematiksel ifadelerin daha kesin sonuçlar vermesine ve deneysel verilerle daha doğrudan karşılaştırılabilmesine izin veriyor. Fiziğin en doğru sonuçlara ulaşabilmesi sağlanabiliyor.

Fizik tarihi boyunca bir çok kez fizikçilerin artık doğanın son sırrını da çözme noktasına ulaşıldığına inanma eğilimi olmuştur. Bu kronik hastalığa karşı geçmişte, "H harfi hidrojeni simgeler... Ve tevazuyu da."[2] (ç.n. *Humility*: tevazu) başlıklı kısa bir yazı yazmıştım. (Bu yazı, bana söylendiğine göre, bir süre İsviçre'nin Cenova kentinde yer alan CERN yüksek enerji fiziği laboratuarının ofis duvarında asılı kalmış.) Söz konusu uyarı niteliğindeki yazıda ileri sürdüğüm görüş, giderek bütün fiziksel etkileşimleri açıklayan "büyük birleşik teoriye *(grand unified theory)*" mi yaklaştığımız, yoksa evrenin nasıl başladığına yönelik anlık bir soruyu mu tam olarak anlamaya yaklaştığımızdı. "Hidrojen atomu hâlâ bize el sallıyor" diye yazmıştım.

1

Başlangıçta: Hidrojen ve Büyük Patlama

Eğer Tanrı Dünya'yı bir söz ile yaratmış olsaydı, bu söz 'hidrojen' olurdu.
—Harlow Shapley

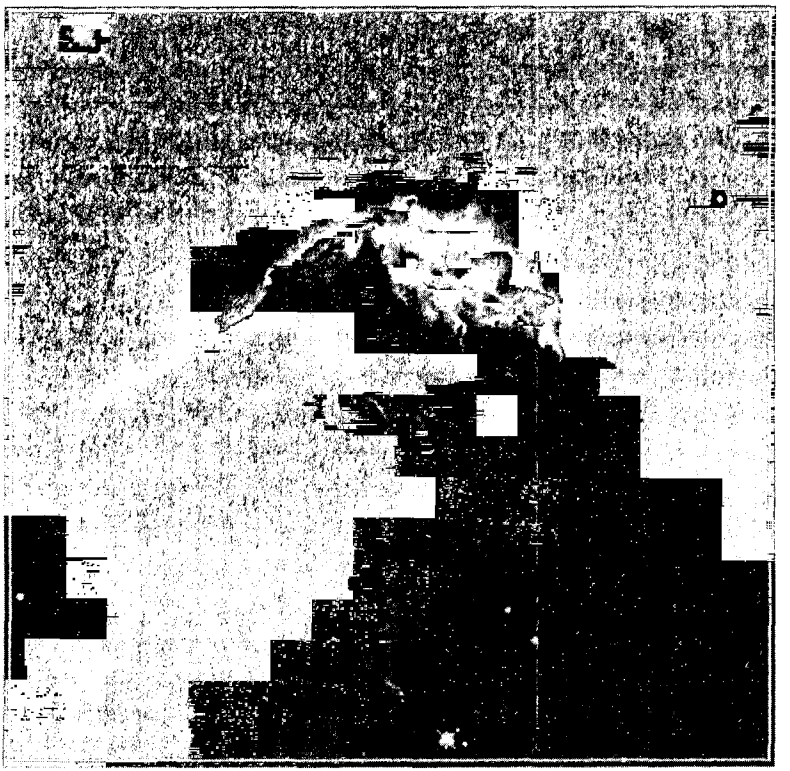
Hidrojenin hikâyesi etrafta onu fark edecek hiç kimse olmadan önce başlar. Dünya ve ilişkili olduğu gezegenlerin ortaya çıkışından çok önce, daha Güneş ve hatta Samanyolu Galaksisi bile yokken ve oksijen, sodyum, demir ve altın gibi diğer kimyasal elementler dahi henüz ortaya çıkmamışken hidrojen atomu çoktan ortaya çıkmıştı.

Günümüz modern bilimine göre, içinde bulunduğumuz evren yaklaşık 15 milyar yıl önce sonsuz bir yoğunluk ve sonsuz bir sıcaklık noktasından başladı. Bu nokta zamanında başlangıcıydı, bu nokta uzayın orijini idi. O andan beri söz konusu orijin, var olan evrenin sınırlarına ulaşacak şekilde her yöne doğru genişlemekte. Evren bu genişlemesini sürdürürken kozmik saatin tıktıkları sürmekte ve sıcaklık giderek düşmekte: Büyük

Patlama'dan *(big bang)* 0,01 saniye sonra sıcaklık 100.000 milyon Kelvin derece; 0,12 saniye sonra 30.000 milyon Kelvin derece; 1,10 saniye sonra 10.000 milyon Kelvin derece; 13,83 saniye sonra 3.000 milyon Kelvin derece... Evren toplam dört dakika yaşlandığında, o andan sonra gerekli olacak bütün temel malzemeler hazırlanmış ve bu malzemelerin birbirleriyle ilişki kurmada yararlanacakları temel formlar ortaya çıkmıştı. Sahne daha sonra gelecek her şey için hazırdı.[3]

Hidrojen atomların en basitidir. Evrende bulunduğu normal formunda hidrojen bir elektron ve bir proton barındırır; daha ender rastlanan ve 'ağır hidrojen' *(döteryum)* adı verilen formundaysa üç parçacık bulunur: Bir elektron, bir proton ve bir de nötron. Oysa en basit molekül olan suda yirmi sekiz parçacık mevcuttur: On elektron, on proton ve sekiz nötron. Hidrojen ve döteryum ile karşılaştırıldığında, su molekülü oldukça karmaşıktır. İşte hidrojenin bu basit yapısıdır ki, evrenimizin 15 milyar yıllık hikâyesinde onun en etken element olmasını sağlar. Evrenimizin başlangıcından yaklaşık 300.000 yıl sonra sıcaklık yaklaşık 3.000 dereceye düşmüş ve hidrojenle döteryum atomları karakteristik formlarını almışlardır. Söz konusu erken evrede bile evrenin özel bir konuma kavuşmuş olması kaçınılmazdı; niyayetinde bu evren yaşam için uygun bir cennet haline gelecekti.

Atomlar yapılarını ilk olarak almaya başladıklarında, ortamda bulunan malzemeler bir hayli kısıtlıydı. Fotonlar (ışık parçacıkları), nötrinolar ve maddeyi oluşturan temel parçacıklar, yani elektronlar ve protonlar (hidrojenin çekirdeği bir protondur) mevcuttu. Ayrıca adına döteron ve alfa parçacıkları denilen temel parçacık bileşikleri vardı. *Döteron* bir proton ve bir nötrondan oluşur ve bu kitapta anlatılan hikâyede özel bir yer tutar, zira bu bileşik ağır hidrojen atomunun, yani döteryumun çekirdiğini oluşturur. Alfa parçacıkları iki proton ve iki nötron ihtiva ederler; helyum atomunun çekirdiği bir alfa parçacığıdır. Evren 300.000 yaşına geldiğinde nötrinolar çevreleriyle ilişkilerini kesmiş, artık yeni atomların doğumuna katkıda bulunmayı durdurmuşlardı ve fotonlar da atom oluşturma sürecindeki önemlerini kaybetmişlerdi. Özetlersek, evrenimizde yer alan ilk atomların oluşum sürecinde ortamda sadece elektronlar, protonlar, döte-



RESİM 1.1 Hubble Uzay Teleskopu tarafından görülen, yıldızların içinden doğduğu sütunlar halindeki kozmik bir hidrojen bulutu. Bulutun içinden çıkan kürecikler yıldızları oluşturuyor. M16'da görülen bu bulut resmi, 1995 yılında John Hester ve P. Scowen tarafından çekildi.

ronlar ve alfa parçacıkları vardı. Bu karışımdaki protonların sayısı alfa parçacıklarının sayısını on bire bir oranında geçmiş bulunuyordu. Döteronlarsa söz konusu karışımda seyrek olarak serpiştirilmişti. Atomlar oluşurken ortamda bulunan malzeme bir tür çiftleşmeyle hidrojen ve helyum atomlarını meydana getirdi ve evrende bu iki maddenin bulunma oranları yüzde 92 hidrojen, yüzde 8 helyum ve gerçekten çok az oranda da döteryum olarak şekillendi. Bugün, hidrojen ve helyum atomlarının

ilk oluşmaya başlamalarından 15 milyar yıl sonra, bu iki element hâlâ kozmosta en bol bulunan elementler olmayı sürdürüyor; hidrojen yüzde 90 oranında ve helyum da yüzde 9 oranında.

Peki, hidrojen ve helyum atomları için gerekli malzemeler -elektronlar, protonlar ve nötronlar- evrenin ilk evrelerinden itibaren ortamda bulundukları halde, atomların ortaya çıkması için neden 300.000 yıl gibi bir süre geçmesi gerekti? Geçen onca yıl boyunca ısının düşmesi, çılgın bir hızla hareket eden proton ve elektronların birbirlerini elektriksel çekimleriyle etkileyebilecekleri hızlara kadar yavaşlamalarını sağladı ve bağımsız hareketlerini sona erdirip bir araya gelebilmelerine ve kararlı atomlar oluşturmalarına imkân tanıdı. Aslında, doğanın en güçlü kuvveti olan nükleer kuvvet bile, evrenin ilk zamanlarında çılgınca hareket eden proton ve nötronları bir araya getirip çekirdek oluşturmak için yeterince güçlü değildi. Evrendeki ilk çekirdeği oluşturan alfa parçacıkları da ancak Büyük Patlama'dan on dört saniye sonra kayda değer büyüklükte bir genişleme ve sıcaklık düşüşünün ardından ortaya çıkabildi. Alfa parçacıklarının bu erken oluşumu onların kararlılığını da göstermektedir. Döteronlar alfa parçacıklarından daha basit yapılara sahip olmalarına karşın o kadar da kararlı değillerdir. Evren dört dakika yaşlanmadan önce döteron oluşumu gerçekleşmedi.

Nükleer sentezlemenin başlangıç aşaması evrenin dört dakika yaşlanmasıyla tamamlanmıştı. Helyum atomlarının çekirdeklerinden daha ağır olan çekirdekler -berilyum, bor ve karbon atomlarının çekirdekleri gibi örneğin- şekillenmemişti. Çünkü bu ağır çekirdekler helyum çekirdeğinin özündeki kararlılık nedeniyle başka formlarda oluşumlarını tamamlayamıyorlardı. Evrenin başlangıcından dört dakika sonra gelinen noktada hâlâ bütün özgür nötronlar ya helyum çekirdeği ya da ağır hidrojen çekirdeği olacak şekilde kendilerini kurtarabiliyorlardı.

Bugün evrende bulunan ağır hidrojenin tamamı, kozmos zamanının ilk dakikalarında oluştu. Ontario'daki Sudbury Nötrino Gözlemevi'ndeki havuza doldurulan bin ton ağır su, Güneş'ten gelen nötrinoları saptamak için kullanılıyor. Her bir molekülünde bir oksijen atomu, bir hidrojen atomu ve bir de döteryum atomu bulunan bu ağır suyun burada topladığı döteryum, evrenin oluşumundan sonraki dördüncü dakikada oluşan

döteryumdur. İçinde ağır su bulunan bir tüpü elinizde tuttuğunuzda, Büyük Patlama'nın ilk dakikalarında ortaya çıkmış ve öylece kalmış olan ilkel atomları tutuyorsunuzdur aslında.

Büyük Patlama'dan sonra 473 milyon kere milyar saniyeye karşılık gelen günümüzde evren, mutlak sıfırdan üç derece yukarıda bir sıcaklığa kadar düşmüş bulunuyor. Böylesine soğumuş çevre koşullarında, gözlemlenebilir evren içerisinde birbirinden alabildiğine uzak konumlanmış galaktik sistemler bulunuyor. Her bir galaksi içerisinde yıldızlar ve kozmik toz bulutları barındırıyor. Ve bütün bu galaksilerin içindeki yıldızlar ve kozmik toz bulutları da bünyelerinde yüzde 90 hidrojen ve yüzde 9 helyum atomu ihtiva ediyor. İşte bu yaklaşık 15 milyar yıl (ya da 473 milyon kere milyar saniye) önce ortaya çıkmış kompozisyonda hâlâ yıldızlar kırpışıyor ve Güneş ışıyor.

Güneş tipik bir yıldızdır. Güneş'in ihtiva ettiği kompozisyon da (tıpkı diğer yıldızlar gibi) aynı kozmik bolluğu yansıtıyor: Güneş'i oluşturan atomların da yaklaşık yüzde 90'ı hidrojendir. Ve hidrojen füzyonu Güneş'in yegâne yakıtıdır. Güneş'in içinde her saniyede 600 milyon ton hidrojen füzyonla helyuma dönüşüyor ve yavaşça iç kısımlardan Güneş yüzeyine çıkarken muazzam bir enerji açığa çıkarıyor, 5.800 Kelvin derecelik bir ısınmaya neden oluyor. Güneş'ten 92 milyon mil uzaktaki Dünya ise, işte bu yaşam kaynağı sıcaklıkla ısınıyor.

Yaklaşık 3,5 milyar yıl önce evrende bir yıldızın yörüngesindeki en az bir gezegende yaşam vücut buldu. Doğal olarak, Dünya'dan başka gezegenler de yaşama ev sahipliği yapıyor olabilir; şimdilik bunu bilemiyoruz. Dünya gezegeninde hidrojen yüzyıllar boyunca gizlice varlığını sürdürdü. Paracelsus (doğduğunda adı Theophrastus Bombast von Hohenheim idi) on altıncı yüzyılın başlarında asitlerin metalle temas etmesi durumunda açığa yanıcı bir gaz çıktığını fark etmiş ve bilmeden hidrojeni ilk gözlemleyen kişi olmuştu. Tarih boyunca diğer kimyagerler ve fizikçiler de hidrojeni açığa çıkartmayı başarmışlar ve 1671 yılında Robert Boyle ilk kez olarak hidrojenin özelliklerini tarif etmişti. Hidrojenin keşfi de, bilimde sıklıkla görülen biçimde bir "keşfin" nasıl tanımlandığı gerçeğine uygun olarak bu kişiye atfedilmiş. Hidrojenin ayrıştırılarak karakterize edilmesi başarısı da, 1776 yılında hidrojenin yoğunluğunu hesapla-

mayı başaran Henry Cavendish'e atfedilmiş. Ve 8 Mayıs 1794'te başı giyotinle kesilen Fransız bilim adamı Antoine-Laurent Lavoisier de hidrojene ismini veren kişi olarak tarihe geçmiş.

Bilebildiğimiz Dünya, Büyük Patlama'dan dakikalar sonra oluşan hidrojen çekirdeklerinin sayısıyla helyum çekirdeklerinin sayısı arasındaki dengenin bir sonucu. Belki de Dünya'nın söz konusu hidrojen ve helyum karışımını üreten temel kanunların bir sonucu olduğunu söylemek daha doğru olur. Acaba doğanın kanunları evrenin başlangıcından önce de var mıydı? Doğanın kanunları var olan formlarını Büyük Patlama anında mı aldı? Büyük Patlama'dan saniyenin bir milyonda biri kadar sonra, mesela? Bunu kimse bilemez. Geriye bakarak söyleyebileceğimiz şudur: Eğer zayıf kuvvet biraz daha zayıf olsaydı, serbest nötron biraz daha yavaş biçimde bozunur ve bunun sonucunda evren ağırlıklı olarak hidrojen yerine helyumla başlardı serüvenine. Hidrojensiz bir Dünya susuz bir Dünya, karbonhidratsız bir Dünya proteinsiz bir Dünya -yani yaşamın olmadığı bir Dünya demek olurdu.

Şimdi seçiminizi yapın: Dünya'nın bu biçimde olmasının nedeni doğa kanunlarının böyle olmasıdır diyebiliriz; ya da Dünya'nın bu biçimde olmasının nedeni hidrojenin böyle olmasıdır diyebiliriz. Hangi şıkkı seçerseniz seçin, biri veya diğeri olması tamamen tercih meselesidir. Her iki tercihte de küçük hidrojen atomu, evrenimizin eğlenceli uzun dramasında, galaksilerin, yıldızların, gezegenlerin ve yaşamın hikâyesinin sergilendiği sahnenin hâkimidir.

2

Hidrojen ve Maddenin Birliği: Prout Hipotezi

William Prout, 1815

Hidrojen sanki şöhretli tarihinin farkındaymış gibi görünüyor, zira bu atom bir kral edasıyla davranıyor.

—Daniel Kleppner

Hepimiz, çocuklardan en bilge kişilere kadar, etrafımızdaki dünyanın farkındayız. Bu farkındalığın genişliği ve derinliği kişiden kişiye büyük değişiklikler gösterse de, aslında gözlemlenen dünya hep aynı dünya. Sadece gözlerimizle bakmayıp, zihnimizle ve ruhumuzla da bakacak olursak başka dünyalar görebiliriz.

Örneğin, dünyayı çeşitlilik barındıran bir yer olarak ifade edebiliriz: Yığınla insanın her birinin yüzleri birbirinden farklı ve tektir; alfabenin bütün harfleri belirgin biçimde birbirinden farklıdır; güneş sistemindeki her bir gezegenin kendine has ölçüleri ve Güneş'in etrafında ailenin diğer fertleriyle birlikte döndüğü belli bir yörünge vardır. Diğer yandan aynı Dünya'ya

baktığımızda bu defa birlik görebiliriz: Gözler, burun ve ağız bir araya gelip bedensel bir birlik yaratır ki, bu da insan yüzüdür; alfabenin harfleri anlamlı biçimde ardı ardına getirildiklerinde fonksiyonel bir birlik oluştururlar ki, bu dildir; ve gezegenlerin tümü -büyüklükleri ve ihtiva ettikleri maddeler veya Güneş'ten uzaklıkları dikkate alınmaksızın- küresel bir şekil sergilerler ve fizik kurallarının birliğini doğrulayarak eliptik bir yörünge üzerinde hareket ederler.

Çeşitlilik mi, birlik mi? Cevap, algılama fenomeni ve zihnin sihrine bağlıdır. Dr. William Prout'a göre (1785-1850) bu sorunun yanıtı birliktir ve birlik hidrojen atomunu temel alır.

Prout'un bütün maddelerin birliği fikrinin altını çizen düşüncesi öğrencilik yıllarına dayanır. Bu düşünceyi ortaya çıkaran etkiler tam olarak tanımlanamaz. Acaba bu düşünce dini temelli midir? Güçlü dini inançları olan Prout'un yazısı, *Yaratılışta Tecelli Ettiği Şekliyle, Tanrı'nın Gücü, Bilgeliği ve İyiliği Üzerine* başlığını taşıyor. Müzikten mi etkilendi acaba, zira kendisi tanınmış bir org virtüözü. Yoksa tıp biliminden mi etkilendi? Çünkü Prout aynı zamanda üroloji ve hazım bozuklukları alanlarında uzman bir hekim. Belki de diğer bilim insanlarının işlerinden etkilendi. Özellikle Britanyalı kimyagerler Sir Humphry Davy (1778-1829) ve John Dalton'dan (1766-1844) etkilendiği biliniyor. Sonuçta ulaştığı kanaatin kaynağı her neyse, Prout, daha analitik, birleşmiş bir kimya bilimi geliştirmeyi umut etti. Ve böylece bilimsel araştırmalarına yaklaşımını doğal fenomenleri anlamada doğru bir yol arayışıyla sağlam ve derin kanaatlerden güçlü biçimde etkilenerek sürdüren diğer bilim insanlarının arasında kendine yer edinmeyi başarmış biri oldu.

Prout, kökene dair ilk maddenin -temel malzemenin- evreni oluşturan maddi nesnelerin çeşitliliği altında yattığına inandı ve bu temel malzeme hidrojendi. Kökene dair ilk madde düşüncesi yeni bir düşünce değildi. 2.400 yıl önce Milet Adası'nda yaşamış olan Thales, suyun bütün maddi nesnelerin formlarını değiştirme özelliğine sahip olduğunu söyledi. Söylediğinin doğru olup olmadığını tartışmıyorum ama bu düşünce son derece tahrik ediciydi. Thales'den bir yüzyıl sonra yaşayan ve dünya hakkında düşünen Eski Yunan'ın atom bilimcileri olan Leucippus ve Democritus, maddenin birliği altında yatan aynı

entelektüel arayışı devam ettirdiler. Yüzyıllar boyunca ve günümüze dek bu arayış sürdü. Prout da aynı geleneğin bir parçasıydı.

Prout, 1811 Haziran'ında Edinburgh Üniversitesi'nden tıp derecesini aldığında, zamanın kimyagerleri atom fikriyle flört etmekteydiler. Hiçbiri atomu görmüş değildi, hiçbiri bir atomun doğasını bilmiyordu ve zamanın ünlü bilim insanları atom fikrini topyekûn reddediyorlardı. Fakat kimyagerler şunu görüyordu: Belli bir madde belirli sabit özellikler ihtiva ediyorsa, o özellikler söz konusu maddeyi tanımlamalıydı. Böylesine tutarlı nitelikteki maddeler kimyasal elementlerdi. Elementleri birbirinden ayıran bu belirgin özelliklerin temelinde atomların olup olmadığı meselesiyse çözülmemiş bir konu olarak kalmıştı. On dokuzuncu yüzyılın başlarında Dalton, atom temelli felsefesini atomla ilgili deneylere dönüştürdü ve böylece ortaya çok etkileyici deliller çıkarttı; sonunda maddenin atomik yapısı üzerine güvenilir bir teoriyi destekleyen güçlü bir düşünce yarattı.

Dalton'un çağdaşı Prout da deneysel kimyagerlerden biriydi. O zamanlar henüz kimyasal elementlerin periyodik tablosu yoktu ve birçok element de daha bilinmiyordu bile. Ancak kırk kadar element biliniyordu -Prout'un kararlılığına sahip biri için kimyasal elementlerin çeşitliliğindeki birliği aramak yolunda gayet yeterli bir sayıydı bu da. Bulduğu sonuçları bir tabloda ifade ettiğinde, Prout düşüncesini ilk olarak toplam kırk iki elemente uygulamıştı.

Her bir kimyasal elemente ait atomlar ağırlıklarına göre karakterize edilmişlerdi; belli bir elementin bütün atomları aynı ağırlıktaydı ama farklı elementlerin atomlarının ağırlıkları başka başkaydı. Örneğin oksijen atomları azot atomlarından daha ağırdı. Bütün atomların en basiti olan hidrojen atomu ise en hafif atomdu. Prout, eğer hidrojen temel yapı taşı olarak alınırsa, bütün elementlerin atomlarının hidrojen atomunun tam katları kadar ağırlığa sahip olması gerektiğini düşündü ve bu tezi ispatlamak üzere çalışmaya başladı.

Prout kendisini tam anlamıyla deneysel bir bilim insanı olarak görmüyordu ama buna rağmen iyot, fosfor, sodyum, demir, civa, potasyum ve berilyum gibi elementlerin atom ağırlıklarını belirlemek için deneyler tasarladı ve tatbik etti. Diğer elementle-

rin atom ağırlıkları konusundaysa, güvenilir bulduğu başka bilim insanlarının bulgularını kabul etti. Bu çalışmadaki en kritik öneme sahip atom ağırlığı hidrojene ait olanıydı ki, Prout bu konuda Davy'nin ölçtüğü değeri kullandı. Prout elindeki bu verilerle daha ağır elementlerin hidrojenin ağırlığının tam katları olduğunu bir tabloda göstermeyi hedefledi. Örneğin, karbonun ağırlığı hidrojenin ağırlığının yirmi katıydı, azotun ağırlığı hidrojenin ağırlığının on dört katıydı, potasyumun ağırlığı hidrojenin ağırlığının kırk katıydı ve iyodun ağırlığı hidrojenin ağırlığının 124 katıydı. Prout bu yolla diğer elementleri de test etti. Ona göre çıkarttığı sonuçlar gayet ikna ediciydi. "Başka kimyasal elementler olduğundan kuşkusuz söz etmemiz gerek," diyordu 1815 yılında kaleme aldığı bir yazısında. "Ama ben yine de meseleyi kimyagerler dünyasının dikkatine sunuyorum." 1816 yılında Prout "Gaz Halindeki Maddenin Özel Kütle Ağırlığı ve Atomlarının Ağırlıkları Arasındaki İlişki Üzerine" başlığını taşıyan iki yazısını isimsiz olarak yayınladı.[4] Kısa süre sonra Prout kendisini iki yazının da yazarı olarak ortaya çıkarttı ve düşüncesi Prout hipotezi olarak bilinir hale geldi.

Prout, kendisine ait bu hipotezi, görüşlerine karşı çıkan ve kimyasal elementlerle ilgili çalışmalara nasıl yaklaşılması gerektiği üzerine katı düşüncelere sahip kimi üyeleri bulunan bilim dünyasına ulaştırmıştı. Meslektaşları arasında, kimya biliminin tamamen gerçeklere dayalı olması ve dikkatli deneyler sonucunda çıkan düşüncelere odaklanması ve maddenin doğası üzerine derin çalışmaların varsayımsal spekülasyonlardan uzak tutulması gerektiğine inananlar vardı. Bu düşünceleri ileri sürenler arasında Dalton ve İsveçli kimyager J. J. Berzelius (1779–1848) gibi birinci sınıf kimyacılar da bulunuyordu. Diğer yandan, böylesi bir genellemeyle elementlerin birliğini tutarlı bir madde teorisi haline getirmenin gayet cazip olduğunu söyleyenler de vardı. Özellikle fizikçiler ve fizikçi yaklaşımına sahip kimyagerler genel olarak bu ikinci grupta yer alıyordu. Örneğin Michael Faraday, William Crookes'e, "Yeni bir element keşfetmek gayet olumlu bir şey ama eğer bir elementi bileşenlerine ayırabiliyorsan ve nelerden oluştuğunu bize söyleyebiliyorsan, bu gerçekten keşfetmeye değer bir iş olur,"[5] diyordu. William Herschel ve James Clerk Maxwell gibi on dokuzuncu yüzyılın birçok bilim

insanı, "atomların yapma parçalarla açıklanmayı kaldıracağına" inanıyordu.[6] Cevaplanması gereken soru, "Bu 'yapma' atomlar hangi hammaddeden yapılmıştı?" Prout'a göre bu ham madde hidrojendi.

Bilim insanları arasındaki kamplaşma bir yana, Prout hipotezi, lehindeki ve aleyhindeki bilim insanları tarafından yürütülecek ve onlarca yıl sürecek araştırmaların başlamasına neden oldu; amaç Prout'un fikrini test etmekti. Kimyasal elementlerin atom ağırlıklarını elden gelen en büyük dikkatle ölçmek yönünde deneyler yapıldı. Yeni elementler keşfedildikçe Prout'un tablosundaki yeri tekrar tekrar test edildi. Birinci Dünya Savaşı yıllarına doğru ilerlerken Prout hipotezi ne tam anlamıyla kanıtlanmış ne de çürütülebilmişti. 1886 yılında, yani Prout hipotezinin yayınlanmasından altmış yıl sonra, Crookes kendi tezini Britanya Bilimsel Gelişim Derneği kimya bölümünün önüne getirdi. Bu tezde Prout hipotezi ve bilinen atom ağırlıkları arasındaki farklar irdeleniyordu. "Bütün bunlara rağmen," diyordu Crookes, "hiç de azımsanmayacak miktarda atom ağırlığı, burada karşılaştırılan varsayımsal yaklaşımın sonuçlarına öylesine yakın ki, bunun sadece kaza sonucu ortaya çıkmış bir rastlantı olduğunu düşünmek zordur."[7]

Atomları yapılandırırken kullanılan asıl ham maddenin ne olduğu yönündeki ilk ipucu, J. J. Thomson'un 1897'de elektronu keşfetmesiyle geldi. Bundan on dört yıl sonra Ernest Rutherford atom çekirdeğini keşfetti. Rutherford'un, atomların negatif elektrik yüklü elektronlar ve pozitif elektrik yüklü protonlar tarafından oluştuğu yönündeki 1911 tarihli bulguları kısa sürede büyük bir kabul gördü ve ardından süratle yeni keşifler geldi. Ama önce, bir kaç yıl geriye gidip bilim tarihindeki bir diğer tartışmaya bakmamız gerekiyor.

Thomson'un elektronu keşfetmesinden bir yıl önce, 1896 yılında, Antoine Henri Becquerel radyoaktiviteyi keşfetti. Bu buluşla birlikte, uzun zamandır inanılan atomun bölünmezliği düşüncesi savunulamaz hale geldi. Bundan sonraki on yıl ve ötesinde birçok fizikçi parçalanan atomun çıkarttığı ürünleri analiz etti ve 1910 yılında parçalanmış radyoaktif atomun ortaya çıkarttığı "yavru" atomlar bulundu. Bunlar bazen "anne atom" ile kimyasal olarak aynı ancak atom ağırlığı bakımından

farklıydı. Böyle atomlar -kimyasal davranışı aynı ama fiziksel karakterleri onu üreten atomdan farklı- Frederick Soddy'nin 1913 yılında Nature dergisinde yayınladığı yazısında izotop olarak adlandırıldı.[8] Acaba izotoplar radyoaktif sürecin bir sonucu muydu, yoksa izotoplar daha genel bir durum muydu? Diğer bir deyişle, radyoaktif olmayan atomlar da farklı izotoplar halinde olabiliyorlar mıydı? Büyük savaş bu son sorunun yanıtını geciktirdi ama savaş sırasında Thomson, yanılmaz bir hassasiyetle atomları ölçebilen yeni bir alet geliştirdi; ya da aletin böyle olduğunu sandı. Savaştan sonra Thomson'un meslektaşı Francis William Aston ilk "hassas" kütle spektrografını inşa etti ve 1920 yılında kararlı bir element olan neonun 20 ve 22 atomik kütleli iki ayrı izotopu olduğunu gösterdi. Aston tekniğiyle ilave elementler incelendiğinde, ağır elementlerin atom ağırlıklarının hidrojenin atom ağırlığının tam katları olmadıkları anlaşıldı.

Böylece Prout'un varsayımsal hipotezi laboratuar masasında inkâr edilemez kanıtlarla çürütülmüş oldu. Bu kitabın kahramanı hidrojen, diğer bütün atomların yapı taşı olma kaderine sahip değildi. Ama 1815 yılında hidrojenin basitliği onu deneysel madde teorisinin en görünen temel taşı haline getirmişti; yine de hidrojen fikir üretiminde ve fikirlerin dışavurumundaki ayrıntıları açıklamakta üstün özellikler göstermişti. Madde dünyasının yapısında daha fazla bölünemeyen temel bir şey var mı? Bu soru ebediyyen çekiciliğini koruyacak bir sorudur. Thales'in su konusunda yaptığı saptama yanlıştı; Heraklit'in cevabı olan ateş de yanlıştı. Antik dünyanın dört elementinin -toprak, su, hava ve ateş- yetersizliği ispatlanmıştı. Prout'un hidrojeni, onlarca yıl sonra ortaya çıkan kanıtlarla cevap olmaktan çıktı. Elektron ve proton bir süreliğine maddenin kutsal kâsesi muamelesi gördü ama yakından incelendiğinde proton giderek kendisine atfedilen ayrıcalıklı statüyü kaybetti.

Temel şey nedir? Acaba cevap elektronlar ile birlikte protonu ve nötronu meydana getiren kuarklar ve gluonlar mı? Kimse bu sorunun kesin yanıtını bilmiyor ama arayış sürüyor. Ve arayış, Thales'i de Prout'u da zorlayan aynı güçlü arzu tarafından itekleniyor: Madde dünyasının çeşitliliğinde bir birlik görme arzusu. Aynı arzu Isaac Newton'u Dünya üzerindeki hareketin ortak noktasını ve gece gökyüzünde izlediğimiz ağır hareketliliği gör-

me noktasına getirdi. Aynı arzu Maxwell'i elektriğin, manyetizmanın ve ışığın hareket çeşitliliği içinde bir birliğe sahip olduğu noktasına getirdi. Maxwell sentezlerinde böylesine bir birliği yakaladı. Günümüzde çağdaş fizikçiler, izlenebilir evrende şahit olduğumuz bütün fiziksel muhteşemliğin sorumlusu olduğuna inandıkları dört temel kuvvet arasında aynı tür bir birlik arayışı içindeler.

Birlik arayışı, fiziğin bir nevi zımbasıdır. İlerleyen bölümlerde, basit hidrojen atomunun bu arayışta çok önemli bir varlık olduğunu göreceğiz.

3

Hidrojen ve Kimyasal Elementlerin Spektrumları: İsviçreli Lise Öğretmeni Bir Düzen Buluyor

Johann Jacob Balmer, 1885

Tarihsel olarak, basit ve düzenli Balmer spektrumu ilham verici... yoldan çıkarıcı keşifler.
—Theodor W. Hänsch

Johann Jacob Balmer, 1859 yılından başlayarak, yetmiş üç yaşında ölümüne dek İsviçre'nin Basel kentindeki bir kız okulunda lise öğretmeniydi. Akademik olarak ilgilendiği temel disiplin geometri idi ama 1880'li yılların ortalarından itibaren dört adet sayının büyüsüne kapıldı: 6.562,10 - 4.860,74 - 4.340,1 ve 4.101,2. Bunlar o kadar da hoş sayılar değildi aslında ama bir matematikçi olan Balmer için bu sayılar fena halde cazip bir yapboz haline geldi. Matematiksel olarak betimlenebilen bir düzen mi vardı bu dört sayı arasında? Balmer'in dikkatini alıp götüren söz konusu bu sayılar, muhtemelen incelemiş olduğu birçok sayıdan sadece dördüydü. Seçilen bu dört sayı özeldi çünkü hidrojen atomuyla ilintiliydiler. Biraz sonra bu sayılara tekrar döneceğiz.

Gündelik bir nesnenin önemi, genelde görünen basitliğinin çok ötesine geçebilir. İğnesi anlaşılmaz biçimde kuzey güney hattını gösteren küçük bir oyuncak pusula, genç Albert Einstein için bir ilham kaynağı olmuştu -içindeki hayranlık duyma dürtüsünün ona ilham vermesi durumu asla azalmadı. Cam bir prizma, Güneş'in parlak ışıklarını ya da fersiz yanan bir mumun aydınlığını içine alıp onu şaşırtıcı bir güzellikte etrafa saçar. Böylesine basit bir cam prizmayla Isaac Newton, Güneş'in beyaz parlak ışığının hiç de göründüğü gibi olmadığını göstermişti; gerçekte bu parlak ışık birçok saf rengin karışımıydı.

Güneş sisteminin efendisi Güneş'ten, Dünya'nın yer kabuğunu oluşturan minerallere kadar evrenin maddi görüntüsü hakkında bildiklerimizin pek çoğu, atomların ışığı nasıl soğurduğu ya da yaydığı, yakından ve detaylı bir biçimde incelenerek görülebilir. Atomların özelliklerini öğrenmek için ışığın kendine has dalgaboyunu inceleyecek bir yol bulunması gerekir. Güneş ışınları gibi birçok kaynaktan gelen ışık, aslında pek çok dalgaboyunun bileşimidir ve buradaki zorluk o ışığı her biri ayrı dalgaboyundaki bileşenlerine ayırabilmektedir. Cam prizmanın güneş ışığı karşısında başardığı işte budur. Bir kristal avizenin prizmalarından birini alıp elinizde tuttuğunuzda, maddenin atomik doğasını ölçen bir alete sahipsiniz demektir.

Güneş ışınlarının dar demeti cam prizmaya bir kenarından girdiğinde, demet biraz bükülür ve diğer yandan gök kuşağının renkleriyle çıkar: Kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi ve mor. Bütün bu renklere karşılık gelen farklı dalgaboylarıyla -daha uzun dalgaboyuna sahip kırmızıdan, daha kısa dalgaboyuna sahip mora kadar- görünür bir *spektrum* sunar. Ama bu renkler Güneş'ten saçılarak gelen enerjinin sadece küçük bir bölümünü içerir. 1800 yılında Uranüs gezegenini keşfeden William Herschel (1738-1822) bir termometre kullanarak farklı renklerdeki ışıkların ısıtma etkisini anlamaya çalıştı. Vardığı sonuç, termometreyi mor ışıktan kırmızıya doğru uzaklaştırdığında sıcaklığın yükseldiğini gözlemlemek oldu ama daha ilginç olan, termometreyi kırmızıdan öteye, karanlık alana yanaştırdığında sıcaklığın hâlâ arttığını fark etmekti. Bu sonuçtan hareketle, haklı olarak, görünmeyen bir ışığın var olduğu neticesine ulaştı. Bu alana günümüzde spektrumun kızılötesi bölgesi *(infra-red*

region) adını veriyoruz. 1801 yılında Alman fizikçi Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) spektrumun mor ışığa yakın diğer ucunda bir başka görünmez ışıma keşfetti; buna da günümüzde morötesi *(ultraviolet)* diyoruz.

On dokuzuncu yüzyılın başından itibaren bilim insanları cam prizmaya optik deneylerde kullanılan aktif bir eleman olarak güvendiler. Herschel ve Ritter'in keşiflerinden sonraki yıllarda Britanyalı bilim adamı William Wollaston (1766-1828) yeni ufuklar açan bir başka keşif yaptı ki, bu keşfe dayalı terminoloji bugün de bilim insanları arasında kullanılmakta. O güne kadar bilim insanları Newton'un örneğini takip ederek, güneş ışığını ışık geçirmez bir yüzeyin ortasındaki yuvarlak delikten geçirerek çalışıyorlardı. Delikten geçen güneş ışığı huzmesinin kesiti de, aynı deliğin şekli gibi yuvarlaktı. Wollaston bunu değiştirdi. Işığın önüne koyduğu yüzeyde bir yarık açtı ve bu yarıktan geçen kurdele misali ışık huzmesi kesitini cam prizmaya düşürdü. Sonuçları incelediğinde, Güneş'in görünür spektrumunda karanlık çizgiler olduğunu farketti. Wollaston'un vardığı sonuç, bu karanlık çizgilerin güneş ışığı içindeki belirli dalgaboylarını temsil ettiği ve bu kayıp dalgaboylarının spektrum içerisinde kendilerini ışıksız alanlarda karanlık çizgiler olarak gösterdikleri oldu. Güneş ışığının spektrumunda görülen bu karanlık çizgilere de spektrum çizgileri *(spectral lines)* adını verdi.

Wollaston'un keşfettiği karanlık çizgiler kısa süre içerisinde diğer bilim insanlarının da dikkatini çekti. Joseph Fraunhofer (1787-1826) güneş ışığı spektrumunda tam 574 karanlık çizgi gözlemledi ve en belirgin olanlarının haritasını çıkartıp onları isimlendiren bir çalışma yaptı. Daha sonra, çok daha değerli olarak Fraunhofer, güneş ışını spektrumunda "D" adını verdiği iki karanlık *(Dark)* çizgiyi buldu ve laboratuarında kullandığı sodyum lambasının ışığında da aynı noktaları tespit etti. Aslında Fraunhofer özellikle bu iki gözlemini birbirine bağlamayı düşünmüyordu ama güneş ışığıyla dünya kaynaklı bir ışık arasında beliren bu rastlantı bir açıklama bekliyordu. Fraunhofer biraz daha ilerledi: Gezegenlerden gelen ışığı inceledi ve güneş ışığının spektrumunda gördüğü spektrum çizgilerinin aynılarını orada da gördü. Sirius yıldızından gelen ışığı ve diğer parlak yıldızların ışık spektrumlarını da inceledi ve gözlemlediği spektrum çizgilerindeki benzerlikler ve farklılıkları tespit etti.

O zamana kadar bilim insanları olabildiğince değişik kaynaktan gelen ışık huzmeleri üzerine yoğun çalışmalar yapmışlardı. 1822 yılında İskoç bilim adamı David Brewster (1781-1868) bir araç keşfetmiş, alev marifetiyle küçük miktardaki maddeleri buharlaştırabiliyordu. Daha sonra, buharlaşan maddeden çıkan ışık incelenebilirdi. Böylelikle Brewster, Fraunhofer ve diğer bilim insanlarının keşfettiği spektrum çizgilerine 1.600 adet yeni spektrum çizgisi ekledi. Aynı yıl içerisinde, 1822 yılında, William Herschel'in oğlu John Herschel (1792-1871) çeşitli metalik tuzları buharlaştırarak çıkan ışığı gözlemlemek yoluyla, bu çok az miktardaki maddelerin içindeki metalleri tespit edebildiğini gördü. Birkaç yıl sonra, William Talbot (1800-1877) her bir kimyasal elementin spektrumunun kendine has ve tek olduğunu gösterdi ve kimyasal elementleri spektrum çizgileri aracılığıyla tespit etmenin mümkün olduğunu ispatladı.

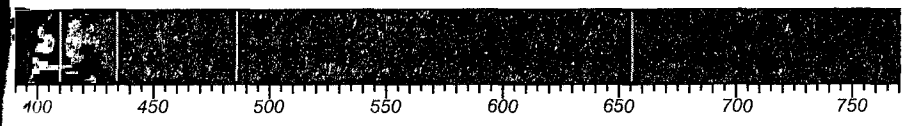
Deneysel verilerin anlaşılması ve sonuçlar çıkarılıp uygulamaya konması genelde zaman alan bir konudur. Fraunhofer'in önceden yaptığı gözlemleri sonucunda keşfettiği D-çizgilerinin sodyum lambanın spektrum çizgileriyle örtüşmesi, bir diğer önemli deneyin yapılmasının önünü açmıştı. 1849 yılında, Parisli fizikçi Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) beklenmedik bir keşifte bulundu. Güneş ışınlarını sodyum buharının içinden geçirdi ve D-çizgilerinin daha koyu göründüğünü gözlemledi. Vardığı sonuç, sodyum buharının "bize öyle bir ortam sağlıyor ki, bu ortam kendi hesabına D-ışınları yayıyor ancak dışarıdan gelen D-ışınları da soğuruyor,"[9] olduğuydu. Foucault'un deneyi daha sonra daha ikna edici biçimde Sir William Thomson (sonradan Lord Kelvin oldu) tarafından açıklandı. Şöyle net bir sonuca ulaşıyordu: "İki çizgiden oluşan D, ister karanlık olsun ister aydınlık, sodyum buharının bir sonucu... Fraunhofer'in çift karanlık D-çizgisi, Güneş veya başka yıldız ışıklarının spektrumlarından kaynaklanıyor olsun, Güneş'in atmosferinde de, gözlem yapılan yıldızın atmosferinde de sodyum buharı olduğunu gösteriyor."[10]

Thomson'un Güneş'ten gelen karanlık D-çizgilerini sodyumun aydınlık çizgileriyle bir şekilde ilişkilendirmesi ve her iki durumu da sodyum elementinin ortamdaki varlığına bağlaması

astrofiziğin başlangıcı oluyordu. Ancak 1859 yılında Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) ve Robert Bunsen (1811-1899) tarafından spektrum ölçüm aletinin yapılmasıyla teknik değişti. Kirchhoff, Fraunhofer'in önceden yaptığı deneyi tekrar etti (üstelik de Fraunhofer'in bu deneyi yaptığını bilmeden) ve güneş ışığını sodyum buharının içinden geçirdi. O da Fraunhofer'in gördüğü güneş ışığının sodyum buharından geçerken oluşan spektrumundaki karanlık çizgileri gördü. Kirschhoff ve Bunsen sonunda spektroskopi biliminin üzerine kurulduğu prensipleri anlaşılır bir dille açıkladılar: Aynı fiziksel koşullar altında bir elementin ışık yayma olayı da (deney, parlak çizgilerin daha belirginleşmesiyle sonuçlanıyordu) ve aynı elementin ışığı soğurması olayı da (bu deney de, karanlık çizgilerin daha karanlık olmasıyla sonuçlanıyordu) tamamıyla aynı dalgaboylarda spektrum çizgileri üretiyordu.

Bu spektrum çizgilerinin dalgaboylarının temsil ettiği büyük miktarda sayı bir açıklama gerektiriyordu. Acaba bütün bu görüntünün arkasında belirgin bir düzen mi vardı? Eğer öyleyse, bu gözlemlenen spektrum çizgilerinden oluşan deseni ortaya çıkartırken atomun içinde neler oluyordu? George Johnstone Stoney (1826-1911) 1868 yılında bir makale yazdı ve spektrum çizgilerinin, atomun içinde süre giden periyodik bir çeşit hareketliliğin sonucu olduğunu söyledi. Arthur Schuster (1851-1934) Stoney'in bu görüşünü 1881 yılında çürüttü ancak bunu yaparken de şöyle bir sonuca ulaştı: "Büyük ihtimalle henüz keşfedilmemiş bazı kanunlar işliyor."[11]

Bu son yorum bizi tekrar lise matematik öğretmeni Balmer'e döndürüyor. Bütün bunlar olup biterken Balmer aynı problemle ilgilenmeye başladı; birçok elementin spektrumu üzerine çalışmalar yapılmış ve her kimyasal elementin kendine has ve tekil bir spektrum çizgileri grubu yarattığı net olarak görülmüştü. Balmer kendini Pisagor'a adamış biriydi: Ona göre doğanın gizemlerinin ardında basit sayılar vardı. Gerçi Balmer'in ilgisi ne çok az bilgisi olduğu spektrum konusuna yönelikti ne de atomun içinde gizlenmiş ve spektrum çizgilerine neden olan gizli fiziksel mekanizmayı keşfetmeye; Balmer sayıların kendileriyle ilgileniyordu. Bu sayıların karşılık geldiği bir düzen mi vardı? 1880'li yılların ortalarında Balmer hidrojen spektrumuna ait dört sayıyla ilgili incelemesine başladı. Bu sayılar Balmer'in ricasıyla



RESİM 3.1 Hidrojenin görülebilir spektrumu Balmer Serisi olarak adlandırılır. Spektrum çizgilerinin dalgaboyları soldan sağa doğru 4.101,2 - 4.340,1 - 4.860,74 ve 6.562,10 Å.

Anders Jonas Ångström (1814-1874) tarafından ölçülmüş dört rakamdan ibaretti: 4.101,2 - 4.340,1 - 4.860,74 ve 6.562,10. Sayılar, Resim 3'de görülen dört adet görünür hidrojen spektrum çizgisinin dalgaboylarını temsil ediyordu ve birimleri angstrom (Å)[12] idi.

Balmer'in bu sonuçlara ulaşmak için kaç tane başarısız formülle uğraşmak zorunda kaldığını kimse bilmiyor. Bütün bildiğimiz, Balmer'in 1885 yılında bir makale yayınladığı ve orada doğru formulasyonu bilim dünyasıyla paylaştığı. Bu makalede Balmer, söz konusu dört dalgaboyunun aşağıdaki formül yoluyla elde edildiğini yazıyordu:

$$\lambda = b \frac{m^2}{m^2 - n^2}$$

Bu formülde dalgaboyunu temsil eden λ'nın birimi angstrom (Å) ve b sembolü Balmer'in "temel hidrojen sayısı" olarak adlandırdığı ve değeri 3.645,6 Å olan bir sayı. n sembolü bir tamsayı ve Balmer buna 2 sayısını vermiş. m sembolü bir diğer tamsayı ve Balmer bu sayıya sırasıyla önce $m = 3$, sonra $m = 4$, 5 ve 6 sayılarını vermiş. Yani önce 3 değeriyle bir dalgaboyu bulmuş, sonra 4 ve böylece devam etmiş. Balmer'in hesabı muhteşem sonuçlar çıkartıyordu.

m değeri	*Balmer'in bulduğu dalgaboyu*	*Angström'ün ölçtüğü dalgaboyu*
$m = 3$	6.562,08 Å	6.562,10 Å
$m = 4$	4.860,80 Å	4.860,74 Å
$m = 5$	4,340,00 Å	4,340,10 Å
$m = 6$	4.101,30 Å	4.101,20 Å

Balmer tarafından hesaplanan ve Angström tarafından ölçülen değerlerin birbirine yakınlığı formülün doğruluğunu açıkça gösteriyor. Balmer hedefine ulaşmış görünüyor. Öyle bir matematik formülü bulmuş ki, "muazzam bir hassasiyetle hidrojen spektrumunun dalgaboylarını hesaplayabiliyor."[13] Ancak Balmer'in bilim için yaptığı basitçe bir formülle hidrojen spektrum çizgilerinin dalgaboylarını bulan bir formül icat etmek değildi. Aynı zamanda hidrojen spektrumunda ilave başka spektrum çizgilerinin de olabileceğini söylüyordu. Balmer formülünü $m = 7$ için de çalıştırıyor ve yeni bir dalgaboyu olan 3.969,65 Å değerini buluyordu. Balmer'in bilebildiği kadarıyla bu spektrum çizgisi aslında yoktu; dolayısıyla Balmer bir tahmin üretiyordu. Balmer'in haberinin olmadığı şey, Angström'ün bu dalgaboyunu da ölçtüğü ve 3.968,10 Å değerini bulduğuydu. Diğer spektrum çizgilerini de hesaplayıp tahmin çıkaran Balmer'in ardından başka bilim insanları da ölçümler yaparak onu doğruladılar.

Angström hidrojenin spektrum çizgilerinin dalgaboylarını ölçtü ama Balmer'in gösterdiği şey bu dalgaboylarının hiç de rastgele değerler olmadığıydı; tersine, dalgaboylarının değerleri bir matematik formülünün sonuçlarıydı. Bu formül fizikçiler için değerlerin hiyerarşisini gösteriyordu; ölçülerek bulunmuş değerlerin ardında yatan matematiksel bir düzeni keşfetmek genellikle ölçüm değerlerinden çok daha değerlidir.

Balmer'in formülü atomik spektrum çizgilerini bilimsel araştırmalarla bulan toplulukta büyük etki uyandırdı. Her şeyden önce, bilim insanlarının spektrum çizgileri üzerine düşüncelerini geliştirdi. Balmer formülünü ve sonuçlarını yayınlamadan önce, bilim insanları müzik harmonileri ve spektrum çizgileri arasında bir benzerlik yapıyorlardı. Basit harmonik oranlarla spektrum çizgilerinin frekansları arasında bir ilişki olduğu varsayılıyordu. Balmer'in başarısından sonra bilim insanları spektrum çizgilerinin de sayısal bir ilişki içinde olduğunu gördüler. Dahası, Balmer'in başarısı bilim insanlarına, spektrum çizgilerinin kafa karıştıran yapısının altında bir düzen olduğu konusunda ilham verdi.

Formülün verildiği makalenin kapanış paragrafında Balmer, diğer kimyasal elementler için bu temel sayıyı bulmanın büyük

zorluklar içerdiğini yazıyor. Özellikle de oksijen ve karbon elementlerinden söz ediyor. Eğer burada hidrojenden farklı bir element seçmiş olsaydı, belki de Baselli bu öğretmenden hiç haberimiz olmayacaktı. Başarısını işte bu öngörülü seçime borçlu çünkü hesaplarını yaptığı element, kimyasal elementlerin en basit olanı. Formülün başarısı sadece atomik spektrum çizgilerinin hesaplanmasına değil, görünmeyen atom içerisinden kaynaklanan spektrum çizgilerinin tam olarak anlaşılmasına da yaradı.

Balmer farkında olmaksızın fizik literatürüne tiktaklayan bir saatli bomba yerleştirmiş oldu -bir bomba ki, yirmi sekiz yıl boyunca dokunulmadan kaldı. Formülü bulduktan sonra Balmer yine bilim dünyasından kaybolup, kız öğrencilerine matematik öğretmeye devam etti. Ne kendi ne de öğrencileri, hidrojen atomunun spektrumunu hesaplamanın onu bilimsel ölümsüzlüğe ulaştıracağını anlamadı. Bu formül günümüzde Balmer serisi olarak biliniyor.

4

Hidrojenin Bohr Modeli: Atomların Yapısına Bir Örnek

Niels Bohr, 1913

[Bohr modeli] hidrojen atomunun gözlenen spektrumuna ait temel özellikleri hesaplamada büyük bir başarı yakaladı.

—Bretislav Friedrich ve Dudley Herschbach

Balmer formülünü görür görmez her şey bir anda gayet açık bir hale geldi. Balmer'in basit formülü, gökten zembille iner gibi, nasıl oluyor da Bohr'un hidrojen atomu modelini bu kadar doğrudan etkileyebiliyor? Maalesef, sıkı mantık gerçek olup bitenler karşısında kenara çekilmeyi bilmek durumunda. Bohr, Balmer formülünü gördü, onun üzerine yorum da yazdı ve hidrojen atomu modelini de çabucak tamamladı. Balmer formülü Bohr'un önüne geldiğinde hidrojen atomunun modelini yapabilmek için büyük bir çaba içindeydi. Bohr'un Balmer formülüne verdiği özel değer hazırlıklı zihne klasik bir örnek.

Niels Henrik David Bohr 7 Ekim 1885'de Danimarka'nın Kopenhag şehrinde doğdu. Babası Christian Bohr, Kopenhag Üniversitesi'nde fizyoloji profesörüydü ve annesi Ellen Adler de seçkin bir Yahudi ailesinin kızıydı. Niels'in Jenny adında bir ablası ve bir de küçük erkek kardeşi vardı: Harald. Evleri, Profesör Bohr'un üniversiteden meslektaşlarıyla bir araya gelinen, hararetli fikir tartışmalarının yaşandığı ve genç Niels'in de içinde bulunduğu bir ortamdı. Doğum tarihi tam olarak bilinmiyor. Niels Bohr 1911'de doktorasını tamamladığında, fizik dünyası büyük bir potansiyele gebeydi.

Eve gelenlerden biri de, keşifleriyle Bohr'un ve diğer meslektaşlarının ilgi alanının açılmasını sağlayan J. J. Thomson'du (1856–1940). 1884 yılında 28 yaşında olan Thomson, Cambridge Üniversitesi'nde deneysel fizik profesörü olarak çalışıyordu. Kendisinden önce aynı bölümün başında olan James Clerk Maxwell (1831–1879) ve Lord Rayleigh (1842–1919) gibi isimlerin devamı oldu. 1897 yılında J. J. Thomson "yeni bir haldeki madde" keşfini yaptı ve bu keşifle "maddenin alt grupları konusunda oldukça ilerlendi," diyordu.[14] Thomson'un bulduğu maddenin yeni alt durumu zamanla elektron olarak tanımlandı ve fizikçilerin çoğu atomun iç parçacıkları olduğunu anladı. Thomson'un deneysel ölçümleri basit bir sayı çıkarıyor ve bu sayı elektronun kütlesinin (m) elektrik yüküne (e) bölünmesiyle (m/e) bulunuyordu. Böylelikle Thomson elektronun kütlesiyle ayrı, elektrik yüküyle ayrı uğraşmak zorunda kalmıyordu. Thomson'un verileri iki önemli ipucu verdi. Hidrojen bunlardan biriydi. Thomson'un sonuçları hidrojen atomunun kütlesinin elektrik yüküne oranını veriyordu. Deneyler elektroliz yoluyla yapılıyordu ve m/e oranı atomun kendisi için elektrona göre 1.000 kat büyük çıkıyordu. Bu durum Thomson'un şöyle bir sonuca ulaşmasını sağladı: Elektronun küçüklüğü m/e formülüne göre ya en küçük m değerine ya da en büyük e değerine sahip olmaya bağlanıyordu (ya da ikisinin uygun bir kombinasyonuna). İkinci ipucu, m/e oranı negatif bir değer veriyordu. Kütle daima pozitif bir değer olduğundan, sonucun negatif çıkmasının nedeni elektronun negatif elektrik yüküne sahip olmasıydı.

Elektronun keşfinden önce birçok kişi, davranışı atomun davranışına benzeyen bir atom modeli çıkartmaya çalışıyordu. 1871 yılında açılış töreninde Bilim Geliştirme Derneği üyeleri huzurunda yaptığı konuşmada Sir William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) "Atom, şekli, hareketi ve hareket kanunları olan bir madde parçacığıdır ve bilimsel araştırmalar açısından akla dayalı açıklamalar gerektiren bir konudur,"[15] diyordu. "Atomun hareket kanunları," Balmer serisinde olduğu gibi spektrum ışımalarının karakteristikleri üzerine ayrıntılı açıklamalar yapmayı gerektirdiğinden bu konuya fazla değinmeden geçti.

Thomson'un negatif yüklü elektronlar keşfiyle fizikçiler, ilk defa üzerinde çalışabilecekleri somut bir atom bileşenine sahip olmuşlardı. Böylece, belki de tahmin edilebileceği üzere, Prout'un atomların belli bir ortak değer etrafında inşa olduğu düşüncesi ciddi bir önem kazanmıştı. Prout'a göre söz konusu ortak değer hidrojendi; ancak 1897 yılını takiben bu ortak değer hızla elektron halini aldı; hem de çok sayıda elektron. 1900 yılına gelindiğinde, örneğin, George F. Fitzgerald (1851-1901), hidrojen atomunun "500 kadar elektrona sahip olduğunu" ileri sürdü ve bundan üç yıl sonra da J. J. Thomson, hidrojenin "yaklaşık bin elektron içerdiğini" iddia etti.[16]

Bu bol elektronlu erken dönem atom modelinin iki temel problemi bulunuyordu. Birincisi, atomların elektrik yükü bakımından yüksüz olmalarıydı. Elektronların negatif elektrik yüklerini nötralize etmek için gerekli pozitif yükü sağlayan neydi? Bu anlamda kesin hiçbir kanıt olmadığından, fizikçilerin başlangıçta yoğun olarak üzerinde çalıştığı soru bu olmuştu. Modelle ilgili ikinci problem, böylesine bol elektronlu bir modelin iç doğasında meydana gelmesi olası kararsızlıktı. Atomlar son derece kararlı yapılar olduğundan, savunulabilir bir atom modelinin her bakımdan bu kararlılığı destekleyen özellikte olması gerekliydi. Bünyesinde her biri diğerlerini iten 1000 elektron barındıran bir atom, kararlı yapıya aykırı çalışan bir sistem olacaktı.

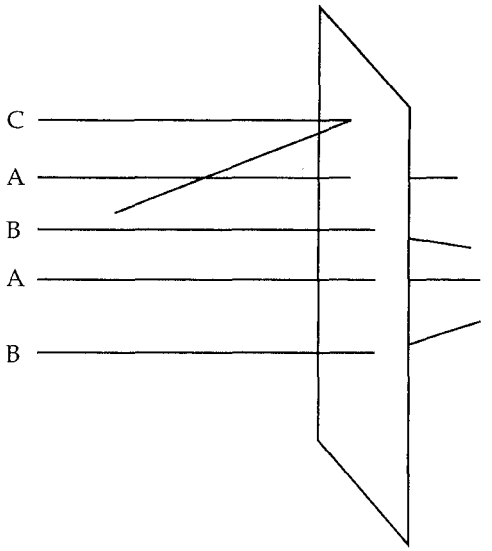
"Atomun içindeki pozitif yükün kaynağı nedir?" sorusu, bir diğer soruyu da beraberinde getiriyordu: "Bu pozitif yükün şekli nedir ve negatif yüke göre atomun neresinde bulunuyor?"

1902 yılında Lord Kelvin, atomun pozitif yüklü bir küre olduğunu ve elektronların da bu küre içerisinde gömülü bulunduğunu önerdi. Bir yıl sonra J. J. Thomson, Kelvin'in bu düşüncesini, böylesi bir düzenlemenin kararlılık meselesiyle bağlantısını göz önünde tutarak bir adım öteye götürdü ve muhtemelen atom modellemesiyle ilgili doğru bir yön bulmadaki arzusu nedeniyle, kararlılığı bir ipucu olarak ele alan bir yaklaşım buldu. Bu konudaki bütün gelişmelerde Thomson'un adı, "üzümlü kek *(plum pudding)*" olarak değerlendirilen bu modelle anılır oldu: Negatif elektronlar, küresel bir pozitif yük hamurunu mayalıyorlardı.

1906 yılında Thomson, bir atom modeli geliştirme yolunda belki de en büyük katkısını ortaya koydu. Birçok nedensel açıklama geliştirerek sonuca ulaştırdığı model önerisinde Thomson, bir atomun içindeki elektron sayısının yaklaşık olarak atomun atomik ağırlığına eşit olduğunu söylüyordu. Bu bağlamda, hidrojen atomunun içinde bir tek elektron olacaktı. Bu iddiasını temellendirdiği ana nedenleri de hidrojen atomunun kendisine dayandırmıştı; tek atomlu *(monoatomic)* bu gazın kırılma indeksine dayalı teorik bir açıklama türetti ve hidrojen için elde ettiği sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdığında elde ettiği bulgular da, tek bir hidrojen atomu içindeki elektron sayısının bire eşit olması gerektiğini gösterdi.

İçinde minik negatif parçacıklar gömülü olan bir pozitif yük hamuru şeklinde ifadelendirilen üzümlü kek modeli, bir elektron demetinin ince bir metal yüzeyden herhangi sapmaya uğramadan geçtiğini gösteren deneylerin sonuçlarıyla tutarlı görünüyordu. Diğer bir deyişle, Philipp Lenard'ın (1862-1947) 1903 yılında çıkarttığı sonuca benzer olarak bu görüş, atomun içinde büyük ölçüde boş bir alan olduğunu gösteriyordu. Söz konusu bu veriler ve atomun içyapısına yönelik daha ayrıntılı sorular, Ernest Rutherford'un (1871-1937) bu konuda yaptığı en tahrik edici deneyler silsilesine kılavuzluk etti. Söz konusu tarihi deneyler, Rutherford'un 1907 yılında araştırmacı fizik profesörü olarak görev yapmaya başladığı Manchester Üniversitesi'nde, göreve başlamasından kısa bir süre sonra onun sorumluluğunda ilerletildi.

Rutherford alfa parçacıklarını çok sevdi. Ne de olsa onları 1898 yılında kendisi keşfetmişti. 1908 yılına gelindiğindeyse,



RESİM 4.1 Altın plaka üzerine soldan gelen alfa parçacıkları deneyi. Parçacıkların pek çoğu, A örneğinde görüldüğü gibi, plakadan doğrudan geçer. Birkaç parçacık, B örneğinde olduğu gibi, hafifçe bükülür. Daha az parçacıksa, C örneğinde gözlemlendiği gibi, plakanın yüzeyinden sekerek geri döner.

alfa parçacıklarının çift pozitif elektrik yüklü olduğunu buldu. Öyle görünüyor ki Rutherford, çok daha önceleri deneylerle ispat etmiş olduğu bu pozitif yüklü alfa parçacıklarının helyum atomuyla ilişkili olduğunu biliyordu.

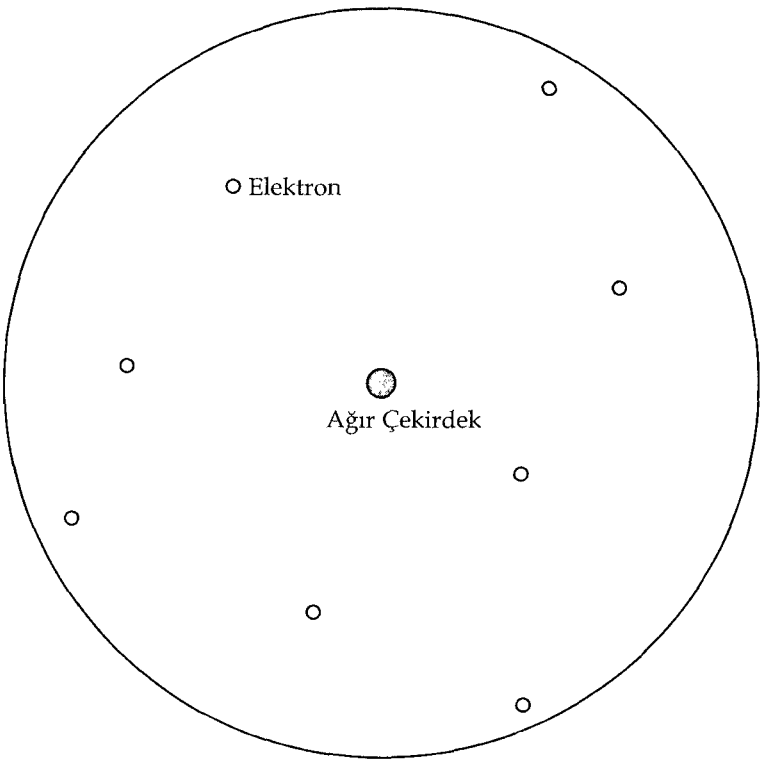
Rutherford ve asistanı Hans Geiger, çok ince alüminyum ve altın plakalar üzerine son derece düzgün ve belli bir biçimde alfa parçacıkları demeti gönderdiler. Alfa parçacıklarının çoğunluğu plakadan dosdoğru geçerken (RESİM 4.1'de görülen A demeti gibi), bazılarıysa, özellikle altın atomlarından oluşan plakada, yüzeyin diğer tarafından küçük bir açıyla saparak saçıldı (RESİM 4.1'de görülen B demeti gibi). Altın atomlarının pozitif yüklü bulutları ve minik elektronları arasından süratle geçen çok daha iri alfa parçacıklarının yüzeyin diğer tarafından belli bir açıyla bükülüp saçılmasına neden olan nedir? Rutherford,

okulun lisans öğrencilerinden olan ve Geiger'e yardım eden Ernest Marsden'e bir öneride bulundu ve bu öneri yaklaşık olarak şöyleydi: "Bazı alfa parçacıklarının yüzeyin diğer tarafından biraz daha büyük açılarla saçılıp saçılmadığına bakar mısın?" (RESİM 4.1'de görülen C demeti gibi) Geiger'in şaşkın bakışları önünde genç Marsden, Rutherford'un kendisinden istediğini yerine getirdi ve sonuç muazzamdı: Bazı alfa parçacıkları altın plakadan sekiyor ve geldikleri yöne doğru saçılıyorlardı. Bu davranışı sergileyen parçacık sayısının oranı oldukça düşüktü: 8.000 alfa parçacığından sadece biri yüzeyden sekip geri dönüyordu. Ancak gözlemlenen bu düşük orandaki davranışın işaret ettiği gerçek oldukça netti: Alfa parçacıkları atomun içinde bulunan kayda değer büyüklükte bir şeye çarpıyordu.

Rutherford söz konusu saçılma deneyinin sonuçlarını 1909 yılının ortalarında yayınlar yayınlamaz, nükleer atomun keşfiyle ilgili yayınlar da ardı ardına gelmeye başlamış gibi görünüyor. Ancak üzümlü kek modeli, atomun işleyen modeli olarak kalmaya devam ediyordu. 1909 yılının kalan kısmı ve 1910 yılı boyunca Rutherford çalışmalarına aralıksız devam etti.

Bu dönemde Rutherford'un derin düşüncelerinin detaylarını tam olarak izleyemiyoruz ama 1909 yılının sonlarına doğru Britanya Bilim Geliştirme Derneği'ne hitaben yaptığı bir konuşmasında, alfa parçacıklarının metal plakadan geçerken yön değiştirmesi konusunda vardığı kaçınılmaz sonucu açıklıyor ve "atom yoğun bir elektrik alanı barındıran bir yapıdır," diyor. Bir noktada Rutherford, atom içerisindeki tek bir şeyle alfa parçacıkları arasmdaki karşılaşmayı düşünmeye başladı. Düşünsel yolculuğu her nasıl bir seyir izlediyse, bildiğimiz kadarıyla 1910 yılı sonlarına doğru Rutherford'un yeni atom kavramsallaştırması belirgin biçimde şekillenmişti. 1911 yılı başlarında Geiger ile karşılaşan mutlu Rutherford ona, "Atomun nasıl göründüğünü biliyorum," diyordu.[17]

Rutherford'un atomu, atomun kendisinden yaklaşık 10.000 kez küçük pozitif yüklü bir merkez parçacık içeriyordu. Bu merkez, atomun kütlesinin büyük bir bölümünü oluşturuyordu. Altın atomu için Rutherford, merkezdeki elektrik yükünün elektronun yükünden yaklaşık 100 kat fazla olduğunu buldu (Bkz.



RESİM 4.2 Rutherford'un nükleer atomu. Elektronlar, göreli olarak devasa çekirdek etrafındaki küresel hacim içinde dağılmış durumdalar. Elektron yörüngeleri belirtilmemiş durumda.

RESİM 4.2). 1911 yılının Mart ayında bu yeni atom modeli bilim dünyası ile paylaşıldı. Daha sonra, 1912 yılının Ekim ayında Rutherford ilk kez olarak çekirdek *(nucleus)* terimini kullandı.

Rutherford, 1911 güz döneminde Cambridge'de verdiği bir seminerde kendisinin yeni atom modelini tarif etti. J. J. Thomson da semineri dinleyenler arasındaydı ama Rutherford 'nükleer' modeli destekleyen alfa parçacıklarının sapmasıyla ilgili verileri sunarken orada değildi. Bu seansta orada başka bir fizikçi vardı; Niels Bohr da söz konusu semineri izleyenlerden biriydi.[18] Bohr, o sıralarda Cambridge'de Thomson'un danışmanlığında doktora sonrası araştırmalar yapmaktaydı.

Bohr kalabalık Cavendish Laboratuarları'nda çalışmaktan pek de memnun olmadığından Manchester'a gitmiş ve Rutherford ile çalışmaya başlamıştı. Rutherford'un teşvikiyle Bohr, Thomson'la detayları ayarlayıp Cambridge'i terk etmiş ve Manchester'a geçmişti. Bohr'un amacı deneysel radyoaktivite tekniklerini öğrenmekti. 1912 yılının Mart ayında Manchester'a ulaştı ve alfa parçacıklarının alüminyum tarafından soğurulmaları üzerine çalıştı. Doğrusu, gönlünde yatan şey deneysel yöntemler değildi. Başka fikirler dikkatini cezbetmekteydi. Dört ay sonra (Temmuz'da) evine dönmek üzere Manchester'i terk ettiğinde bu fikirler iyice olgunlaşmaktaydı.

Başkalarından çok daha fazla, başka fizikçilerden daha fazla, Bohr, kuantum devriminin yönlendirici ruhuna sahipti. Kendisi 1920'li yılların ortalarında kuantum mekaniğini yaratan fizikçilerden biri değildi. Bohr gerekli formal matematik yapıyı yaratacak ustalığa sahip değildi. Diğer birçok fizikçinin tersine Bohr'un ünü tamamen yazdığı makalelerden kaynaklanmıyordu. Yine de, Bohr'un yirminci yüzyıl fiziğine katkıları, birçok fizikçi tarafından sadece Albert Einstein ile karşılaştırılacak ve ismi ondan sonra anılacaktı.

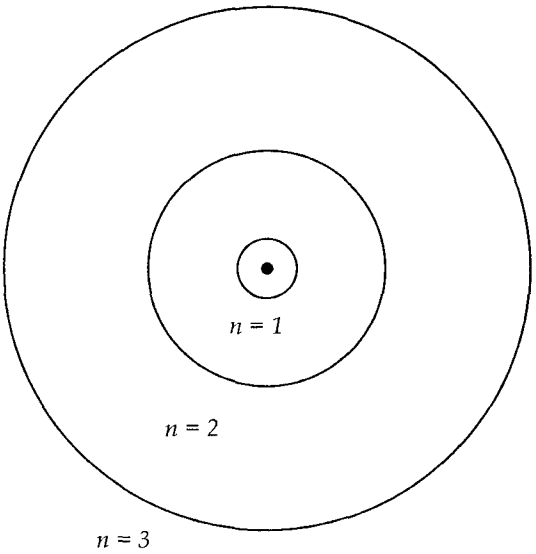
Bohr'un önemi, her şeyden önce, kendisinin hidrojen atomu modeli üzerinden belirecekti. Günümüzde 'üçleme' olarak anılan üç makalelik yazı dizisinde Bohr, atomun yapısı üzerine bir kuantum teorisi kuracaktı. Üçleme, 1913 yılında *Philosophical Magazine* dergisinde yayınlanacak ve bu üç makale Bohr'un ününün temellerini oluşturacaktı.[19]

Hidrojen: Bir negatif elektron ve bir pozitif çekirdek. Bunlar nasıl bir araya geldi? Bohr hidrojene odaklanarak, doğrudan Thomson'dan kalma problemler ve Rutherford'un nükleer modelinin karşısına çıktı. İlk problem, hem Thomson'un üzümlü kek modeli ve hem de Rutherford'un nükleer modelinin, ne mekanik ne de elektromanyetik olarak kararlı olmamalarıydı. Thomson'un pozitif bulutunun içinde veya Rutherford'un çekirdeği etrafında hareket eden elektronlar, elektromanyetik enerjinin radyasyonu içerisinde sürekli enerji kaybediyorlardı. Bu enerji kaybı bir felaketti: Nihayetinde atomlar çökecek ve yok olacaklardı.

Bohr, Rutherford'u izleyerek hidrojen atomunu "bir adet çok küçük boyutta pozitif yüklü çekirdek ve bir de onun etrafındaki yakın yörüngelerde dönen elektron," olarak tanımladı. Bohr, bir enerji ışıması olmadığını öne sürdü ve yerleşik on dokuzuncu yüzyıl elektromanyetizma ilkesini sekteye uğratarak "sabit yörüngeler" terimini kullandı. Bohr, on yedinci, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıllarda coşkuyla karşılanmış ve güzel tasarlanmış kanunların atom için uygulanamayacağını anladı. Büyük bir dobralık ve açık sözlülükle, fiziğin bilinen kurallarının bazılarını göz ardı etti. Bohr, üçlemesinin ilk makalesinde, "Elektronun hareket kanunları üzerine geliştirilmiş bulunan her ne düşünce varsa," diyordu, "bunların belli bir bakışla sunumu gereklidir ... bu bakış, hareketin temel kuantumudur." Bu cümleyle Bohr, atomun dinamiğini yeni bir temele oturtuyordu: Kuantum bir temele...

Bohr'un hidrojen atomu, eski fizik kanunları üzerinde kuantum koşullarının belirlediği sınırlarla yeni bir fizik düşüncesi üzerine kuruluyordu. Bohr negatif elektronla pozitif çekirdek arasında etkin olan bir elektrik çekim kuvvetini kabulleniyordu. Bohr aynı zamanda, çekirdek etrafındaki bir yörüngede dolanan elektronun fiziğin Newton Kanunları bağlamında belli bir enerjiye sahip olduğunu da kabul ediyor ve bu enerjiyi açıklayabiliyordu. İşte Bohr'un başlangıç noktası buydu ve bu düşüncelerini hiç vakit kaybetmeden, söz konusu enerji üzerine kuantum bir koşul getirerek uygulamaya koydu; yani, söz konusu ortamda sadece belli enerjilere izin verildiğini ileri sürdü. İzin verilen bu enerjileri de hidrojen atomunun enerji düzeyleri olarak tanımladı.

Kuantum koşulu, ortamdaki olası enerjileri ve elektronun olası yörüngelerini sınırlandırıyordu. Sadece belli yörüngelere izin veriliyordu. Hidrojen atomunun enerji seviyesi büyüdükçe, elektronun yörüngesi de genişliyordu. Bohr'un hidrojen atomunu, çekirdek çevresinde aralıklı yörüngeler ailesi olarak resmedebiliriz. En dar yörünge, enerji seviyesi en düşük yörüngeydi; dışarı doğru ondan sonraki yörünge biraz daha yüksek bir enerji seviyesine sahipti ve bu böyle devam ediyor, daha dıştaki bir yörünge daha yüksek bir enerji seviyesine sahip oluyordu.



RESİM 4.3 Bohr'un hidrojen atomu modeli. Bu modelde elektron yörüngelerinin çapları açıkça gösterilmiştir.

RESİM 4.3'de, Bohr'un hidrojen atomun modelinin temel elemanları gösterilmiştir.

Hidrojen atomunun en kararlı durumu, en düşük enerji seviyeli olanıdır. Hidrojen atomu normal olarak en düşük enerji seviyesindedir; böylelikle, söz konusu enerji seviyesine karşılık gelen yörünge hidrojen atomunun büyüklüğünü belirler. Bu modelde Bohr, çeşitli olası yörüngelerin genişliklerini hesaplayabiliyor, buradan hareketle en küçük yörüngenin yarıçapına ulaşabiliyor, sonra da hidrojen atomunun çapını hesaplayıp büyüklüğünü bulabiliyordu. Bohr'un bu model uyarınca hesapladığı hidrojen atomunun boyutu 1.1 Å (1.1×10^{-8} cm) idi. Deneyler aracılığıyla bulunan hidrojen atomunun çapı da yaklaşık 1 Å (1×10^{-8} cm) olarak gözlemleniyordu! Bohr, bulduğu bu sonuçtan dolayı kutlanmalı ve cesaretlendirilmeliydi, çünkü önerdiği bu model aracılığıyla yaptığı hesaplamaların sonuçları deneysel gözlemlerle ölçülen hidrojen atomu çapıyla örtüşüyor-

du. Bohr, söz konusu model üzerinden iyonlaşma potansiyelini de hesaplayabiliyor, elektronu çekirdekten tamamen çekip uzaklaştırmak için gerekli olan enerjiyi saptayabiliyordu. Bu çalışmanın sonuçları da deneysel verilerle örtüşüyordu: Bohr üçlemesinin ikinci makalesinde belirtildiği üzere, deneysel gözlem sonuçları gerekli iyonizasyon potansiyeli için on bir volt olarak gösterirken, model üzerinden hesapladığı değer on üç volt çıkıyordu.

Bir diğer önemli sonuç da Bohr modelinden çıktı. Hidrojen spektrumunun dalgaboylarını hesaplayan Balmer formülünde görülen "hidrojen temel sayısı" (formülde *b* sembolüyle yer alıyordu) 3.645,6 Å değerine sahipti. Kitabın 19. Bölümünde göreceğimiz gibi, Balmer'in bu değeri Johannes Robert Rydberg tarafından 1890 yılında genelleştirilmiş ve çok önemli bir fizik sabiti haline gelmişti. Hidrojen atomuna Bohr'un yaklaşımındaysa bu sabit, basit bir sayı olmaktan çıkıp, Planck sabiti, elektronun kütlesi ve yükü ile ilgili bir sayıya dönüştü. Bohr, 6 Mart 1913 tarihli mektubunda Rutherford'a bu sayıyla ilgili, "muazzam ve beklenmedik bir gelişme" diye bahsediyor.[20] Kısa bir süre sonra (4 Eylül 1913), Arnold Sommerfeld Bohr'a şöyle yazıyordu: "Bu sabiti hesaplamış olmak kuşkusuz büyük bir katkı."[21]

Bohr kendisinin hidrojen atomu çözümlemesine bir tane daha basit fikir getirdi; bu fikir gerçekten müthiş ve mucizevî idi: Atomun spektrumuyla ilgili bir mekanizma sunuyordu. Fikir tam olarak kendi atom modelinin doğrudan bir uygulamasıydı. Max Planck'ın 1900 yılında gerçekleştirdiği çalışmaların ışığında Bohr, hidrojen atomunun kendi modelinde izin verilen iki farklı enerji seviyesi arasındaki enerji farkını Planck sabiti ve ışımanın frekansı cinsinden ifade etti. Bu süreç için Bohr, on dokuzuncu yüzyıldan gelen fizik kanunlarının bel kemiği olan enerjinin korunumu kanununu uyguladı. Diğer bir deyişle, yüksek enerji seviyesi ile düşük enerji seviyesi arasındaki enerji farkı tam olarak salınan ışığın enerjisine eşitti. Bu kuantum geçişi aşağıdaki gibi ifade ediliyordu:

$$E_2 - E_1 = hf$$

Burada E_2 yüksek enerjiyi, h Planck sabitini ve f de salınan ışığın frekansını gösteriyor.

Bunun üzerine Bohr, hidrojen atomunda izin verilen enerji seviyelerindeki özel enerji miktarlarıyla ilgili net bir ifade geliştirdi:

$$E_n = - \frac{2\pi^2 me^4}{n^2 h^2}$$

Burada m = elektronun kütlesi = 8,85 x 10^{-28}; e = elektronun elektrik yükü = 4,7 x 10^{-10}; h = Planck sabiti = 6,5 x 10^{-27}; ve n = bir tam sayı = 1, 2, 3, ... Bu enerji formülünün negatif olması, elektronun enerjik olarak çekirdeğe bağlı olmasına işaret ediyor.

Böylelikle Bohr'un iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı formülü, yukarıdaki net ifade cinsinden yazıldığında şu hali alıyor:

$$E_{n_3} - E_{n_2} = \left[\frac{2\pi^2 me^4}{n_3^2 h^2}\right] - \left[\frac{2\pi^2 me^4}{n_2^2 h^2}\right]$$
$$= \frac{2\pi^2 me^4}{h^2}\left[\frac{1}{n_3^2} - \frac{1}{n_2^2}\right]$$

Bu çalışmaları sürdürürken belli bir aşamada Balmer formülü Bohr'un dikkatini çekti ve Balmer formülü "o anda netleşti."

$$\lambda = b \frac{m^2}{m^2 - n^2},$$

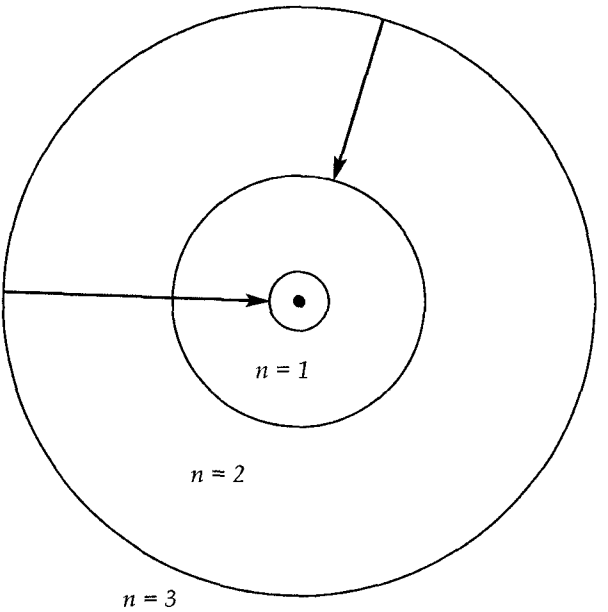
Burada Bohr'a ipucu veren etmen pekâlâ, n^2 ifadesinin Balmer formülünde de kendi formülünde de paydada yer alması olabilir. Hidrojen atomu ışıma yapıp Balmer serisindeki özel çizgiler ortaya çıktığında, bu ışımadaki enerji miktarının -hf olarak ifade edilen- izin verilen iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkına eşit olduğu, Bohr için net bir hâl almıştı.

Bohr'un yaratıcı hayal gücünün bir özel durumda nasıl hata yaptığını görmek oldukça ilginçtir. 1905 yılında yayınlanan bir makalesinde Einstein, ışığı kuantum açısından ele alıyor ve ışığın doğada parçacık olarak bulunduğunu tartışıyordu. Birçok diğer fizikçi gibi Bohr da Einstein'ın bu ışık-kuantumu fikrini

reddetti ve itirazları 1920'li yılların başına kadar da sürdü. Yani Bohr, bir yandan Planck'ın kuantum fikrini kendi çalışmalarına adapte ederken diğer yandan Einstein'ı reddediyordu. Eğer Bohr ışığın parçacık olduğu görüşünü o zaman kabul etseydi, fiziksel olarak çok daha güzel resmedilmiş bir model yaratmış olacak ve böylelikle de birkaç yıl içinde, 1913 yılında yayınlanan kendi modelinin aldığı yeni biçimi öngörebilmiş olacaktı. Örneğin daha sonra, 1913 yılında, Bohr modelinin bir gösterimi ortaya çıkmış ve Arnold Sommerfeld'in 1919 yılında atomik yapı ve atomik spektrum üzerine çalışmalarını topladığı yazılarında temel olarak bu gösterim kullanılmıştır. Aynı kaynak daha uzun yıllar boyunca da temel referans olarak kullanılmıştır. Sommerfeld, söz konusu diyagramın, hidrojen atomunun Bohr modelini "özetlediğini" yazıyordu. Sommerfeld'in çizimi, aynı RESİM 4.4'deki çizim ve RESİM 4.5'deki enerji seviyeleri diyagramı gibi, çağdaş fizikçiler tarafından kuantum değişimlerini temsilen hâlâ temel olarak kullanılan diyagramlardır. Aslında Sommerfeld de ışığın parçacık olduğu görüşü karşısında bocalamıştı. Her ne kadar Einstein'ın görüşüne arka çıkmışsa da, tam anlamıyla bu görüşü doğruladığını söylememişti.

Birçok diğer çağdaşı gibi Bohr da Einstein'ın güçlü düşüncesini kabul etmek konusunda isteksiz olmuşsa da, bilime katkıları gerçekten muhteşemdir. İlk teorik atom modelini yaratmış ve atoma dair fiziksel özellikler konusundaki ilk aslına yakın sonuçların alınmasını sağlamıştı: Atomun büyüklüğü ve iyonlaşma potansiyeli konularında. İlk teorik atom modelini yaratmış ve spektrum çizgilerini ortaya çıkaran mekanizmayı açıklamış, bu alanda da aslına yakın sonuçlar alınmasının önünü açmıştır. Her durumda, Bohr modelinden hesaplanan değerlerle deneysel ölçüm değerleri arasında birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

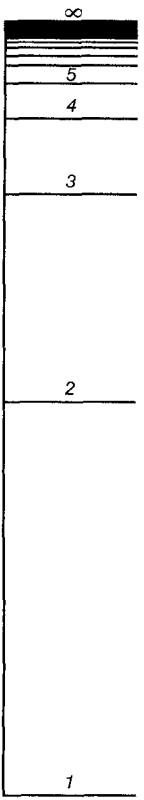
Bohr modelinin bunca başarısına rağmen, birçok fizikçi Bohr'un fikirlerinden entelektüel olarak bir adım geride durmuşlardır. Otto Stern, eğer "o çılgın Bohr Modeli" doğru çıkarsa fizik dünyasını terk edeceği tehditlerini savurmuştur.[22] (Kitabın 11. Bölümü'nde Stern'in fizik dünyasında kaldığını göreceğiz.) Tahmin edilebileceği üzere, daha yaşlı fizikçiler Bohr modelinden uzak durmuş ve kendilerine aşina gelen eski fizik



RESİM 4.4 Arnold Sommerfeld'in 'Atomik Yapı ve Spektrum Çizgileri' çalışmasında kullanılan haliyle, hidrojen atomunun Bohr modeli uyarınca gösterildiği bir diyagram. Diyagramda resmedilen $n = 2$ ve $n = 3$ yörüngelerinin yarıçapları, $n = 1$ yarıçapının, sırasıyla dört ve dokuz katı kadar büyüktür. $n = 4, 5, 6$ ve ardılları daha da büyüktür. Spektrum çizgileri de, elektronların bir enerji seviyesinden (örneğin $n = 3$) diğerlerine ($n = 2$ ve $n = 1$) geçişleri sırasında oluşur.

anlayışını seslendirmekte daha özgüvenli olmuşlardı. Bir insanın kendini adadığı herhangi bir anlayış çerçevesinden bir diğerine geçmesi, hem entelektüel ve hem de duygusal kökten değişiklikler içerebildiğinden, bu durum din değiştirmekle karşılaştırılabilir.

Bohr'un dikkate değer başarısını tanımış olan bazı fizikçiler bile, onun modelindeki geleneksel fikirlere yönelik yapısal karşı duruşun farkındaydılar. Örneğin, bilim, sebep ve etki temelinde, yani nedensellik prensibiyle çalışır. Daha Bohr'un makalesi *Philosophical Magazine* dergisinde yayınlanmadan önce taslak



RESİM 4.5 Bohr modelinin enerji seviyeleri diyagramı Balmer serisinin bir açıklamasını sunar. Burada gerçek orantılarla gösterilmemiştir.

çalışmayı inceleyen Rutherford, neden-sonuç ilişkili şu soruyu soruyordu: Elektron bir enerji seviyesinden ayrılırken nereye gittiğini nasıl biliyor? Rutherford bu sorunu "vahim zorluk" olarak görüyordu.

Bohr'un modeline gösterilen tepki anlaşılabilirdi. Ortaya attığı atom modeli, daha önceki fizik kanunlarına kuantum anlayışının ilave edilmesi üzerine kuruluydu. Bu yaklaşım gerçekten de her şeyi altüst eden bir yaklaşımdı. Ancak söz konusu model, spektrum çizgilerinin neden oluştuğu meselesinin gayet net biçimde resmedilebilmesini ve Balmer serisinden çıkan dalga-

boylarının aynı biçimde hesaplanabilmesini sağlıyordu. Gelin görün ki bu model, hidrojenden sonraki en basit atom olan helyum için çalışmıyordu. Eğer Bohr, dikkatini hidrojenden başka herhangi bir atoma yöneltseydi, düşüncesi başarısız olacaktı.

Bohr modelinin bir tane daha kusuru bulunuyordu. 1891 yılında Albert Abraham Michelson, H_α adı verilen ve dalgaboyu 6.562 Å değerine sahip ilk Balmer çizgisinin tek bir aydınlık çizgi olmadığını ancak neredeyse eşit dalgaboylarda ve birbirlerine çok yakın iki çizgiden oluştuğunu keşfetti. Bu keşif, Michelson'un geliştirmiş olduğu oldukça ileri bir optik metotla Balmer spektrum çizgilerini incelemesi sonucunda yapılabilmişti. Balmer'in H_α çizgisinde görülen söz konusu çift yapı Bohr modelinden elde edilemiyordu.

Bohr modelindeki eksikliklere rağmen, Bohr atomunun ardında bıraktığı miras oldukça nüfuzlu hale gelmiştir. Bugün hâlâ atomdaki enerji seviyelerinden söz ediyoruz. Atomik ve moleküler ışıma konusundaki temel anlayışımız da, Bohr'un enerji seviyeleri arasındaki kuantum geçişler düşüncesi üzerine kurulu. Ve yeni bir atom fiziği geliştirmek için ihtiyaç duyulan açılım da Bohr'un hidrojen atomu modelindeki başarısıyla gerçekleşmiştir.

Bohr üçlemesinin yayınlanmasından sonra kendisinin ünü devasa biçimde yaygınlaşmış, ancak bu ün, sadece yazdığı makaleler nedeniyle değil, diğer fizikçiler üzerinde bıraktığı ciddi etkiler sonucunda oluşmuştur. 1925-26 yıllarında atom dünyasına getirilen yeni bir anlayış olan kuantum mekaniği yaratılmıştır. Bohr, söz konusu bu anlayışın merkez üssü halini almış, dünyanın her tarafındaki laboratuarlardan bilim insanları Bohr tarafından yönlendirilmek için Kopenhag'a gelmişlerdir. "Fiziğin bu muazzam döneminde", diye yazıyor Victor Weisskopf, "Bohr ve adamları... evrenin sinirine... dokundular."[23]

5

Görelilik Hidrojen Atomunda Kuantum ile Buluşuyor

Arnold Sommerfeld, 1916

Fizikçilerin çalışmalarında bu denli başarılı olmalarının bir nedeni var; hidrojen atomunu ve helyum iyonunu inceliyorlar ve sonra duruyorlar.
—Richard Feynman

Bohr'un hidrojen atomu modelinde kullandığı kuantum düşüncesi 1900 yılında doğmuştu. O yıllarda Berlin Üniversitesi'nin öncü profesörlerinden biri olan Max Planck (1858–1947), daha sonra kendi adıyla anılacak Planck sabiti h değerini, evrensel bir sabit olarak tanımlamıştı. Bu sabit, kuantum fenomeninin ölçeğini gösterir. h değerinin aşırı küçük bir değer olması, neden kuantum etkilerin atom büyüklüğünde gelişen olaylar dışında maskelenmiş olduğunu açıklar.

Sıcak nesneler parlar. Bunun nedeni, uzun dalgaboyunda sıcaklık ve daha kısa dalgaboyunda görülebilir ışık salıyor olma-

larıdır. 1900 yılında hiçbir fizikçi, sıcak bir nesnenin enerjiyi dışarıya salma yolunun çeşitli dalgaboylarına dağılarak gerçekleştiğini hesaba katamazdı. Planck bu duruma bir açıklık getirdi ve çalışmaları sırasında kuantum devrimini yarattı. Kuantum düşüncesiyle, enerjinin farklı dalgaboylarına dağılımını deneysel olarak da büyük bir isabetle izleyebildiği bir fizik teorisi geliştirdi. Başarmış olduğun işin öneminin de gayet farkındaydı. Planck'ın oğullarından birinin anlatımıyla, Berlin'in banliyölerinden biri olan Grunewald bölgesinde çıktıkları bir yürüyüş sırasında babası ona, belki de Newton'un keşifleriyle karşılaştırılabilecek büyük bir keşifte bulunduğunu anlatmıştı.[24] Aynı zamanda, çalışmalarının eski fizik anlayışına ters düşmüşlüğünden rahatsız olan Planck, gayet başarısız biçimde, kuramını o dönem için hâlihazır geleneksel fizik anlayışının içinde konumlandırmayı denedi. Planck'ın ardılı olan ve o yıllarda otuz dört yaşında bulunan Bohr ise kuantum düşüncesine ihtiyaç olduğunu gördü ve onu hidrojen atomu modeliyle ilişkilendirdi.

Eskinin değerleriyle yaşanan ikinci büyük kopma da, 1905 yılında, İsviçre'nin Bern şehrinde yirmi altı yaşındaki patent memuru Einstein'ın aklından çıkan özel görelilik *(special relativity)* kuramıyla yaşandı. Hiçbir yirminci yüzyıl bilim insanı, diğer bilim insanları ve sıradan insanlar tarafından Albert Einstein kadar takdir ve saygıyla karşılanmamıştır. 1915 yılında görelilik kuramını genelleştirdikten ve bu kuramın öngörülerinden biri olan, ışığın büyük nesneler tarafından büküldüğü iddiasını ortaya attıktan sonra (ki bu iddia, Arthur Eddington'un dönence keşifleri sırasında doğrulanmıştı) Einstein, dünyaca ünlü bir bilim insanı haline geldi.

Kuantum düşüncesi ve görelilik kuramının öngörüleri ilk olarak 1915 yılında Arnold Sommerfeld'in (1868-1951) çalışmalarında buluştu. Münih Üniversitesi'nde fizik profesörü olan Sommerfeld, fizik araştırmaları konusuna katkılarıyla yaygın biçimde tanınıyordu. Aynı zamanda iyi bir eğitmen olarak da biliniyordu. Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg ve Hans Bethe gibi yirminci yüzyılın ünlü fizikçilerinin birçoğu Sommerfeld'in öğrencisiydi ve fizik öğrencileri için yazdığı ders kitaplarından faydalanmışlardı. *Atomik Yapı ve Spektrum Çizgileri* (İng.: *Atomic Structure and Spectral Lines*) adlı kitabı (1919), atomla ilgilenen fizikçilerin temel bir başvuru kaynağıdır.

Her ne kadar Bohr'un hidrojen atomu modeli muazzam bir başarıysa da, onun düşünceleri de hemen kolayca kabullenilmemişti. Dönemin fizikçileri bu kuramla ilgili ciddi şüphelerini dile getirmişlerdi. Bohr'un üçleme olarak bilinen üç makalesi 1913 yılı ilkbaharı ve yazında yayınlanmıştı. Aynı yılın Eylül ayında Sommerfeld Bohr'a samimi bir mektup yazmış ve yeni hidrojen atomu modeliyle yakından ilgilendiğini belirtmişti. Bohr modelinin bir sorunu da, sadece hidrojen atomuyla sınırlı kalmasıydı. Model, bir sonra gelen en basit atom olan helyumu betimlemekte başarısızlığa uğruyordu. Zaten bu fikirler, hidrojen atomunu bile tam olarak betimlemekte yetersizdi. Bohr'un teorisi, spektrum çizgilerinin Balmer serisiyle hesaplanması konusu üzerinden gelişmişti. Teori, ilave olarak, hidrojen atomunun kızılötesi ve morötesi frekanslarında görülen diğer spektrum serilerinin de büyük bir hassasiyetle bulunmasını sağlıyordu. Ancak daha sonraları, 6.562 Å değerindeki Balmer çizgisi olan H_α yakından gözlemlenmiş, yapısı netlik kazanmış ve tek bir çizgi değil, aslında birbirine çok yakın iki çizgiden oluştuğu saptanmıştı. Bohr'un 1913 yılına ait modeli bu tür ilave karışıklıkları bünyesine alamıyordu. Sommerfeld'i heyecanlandıran da, söz konusu karışıklığa kendisinin bir açıklama kazandırıp kazandıramayacağıydı.

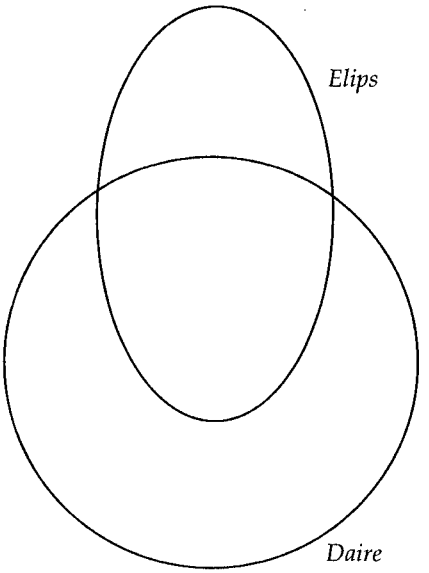
Rutherford ve Bohr'un geliştirdiği atomun nükleer modeli, güneş sistemiyle büyük bir benzerlik gösteriyordu. Her ikisinde de merkezde yer alan devasa çekirdek, kendisinden çok daha küçük kütleleri yörüngesinde döndürecek biçimde etkiliyordu. Hem güneş sisteminde ve hem de atomda, yörüngede dönenle merkezi çekirdek arasındaki çekim kuvveti, aralarındaki mesafenin karesi oranında azalıyordu. Güneş sisteminde yer alan gezegenlerin yörüngeleriyle ilgili çalışmayı on yedinci yüzyılın başlarında, doğruluğundan emin olduğu gözlem verileri ışığında yapan kişi -ki gözlem yapma izni verilen de ilk kişiydi- Johannes Kepler'di.

Kepler yaygın olarak tanınmasını sağlayan çalışmaya başladığında, güneş sisteminin yapısı o günlerin en belirgin entelektüel ve duygusal tartışma konusuydu. Kopernik ile uyumlu olarak Kepler, gezegenlerin Güneş etrafında döndüklerini düşünüyordu -ki bu görüş 1600'lü yıllarda hiç de popüler bir görüş

değildi. Dönemin hâkim ve muhafazakâr görüşü, Dünya'nın evrenin merkezindeki hareketsiz ve her şeyi kontrol eden ayrıcalıklı çekirdek olduğu ve Güneş'le diğer gezegenlerin de hep birlikte Dünya'nın etrafında döndükleri şeklindeydi.

1600'lü yılların başlarında Kepler, Prag'da bulunan rasathanesinde çalışmalarını sürdüren astronom Tycho Brahe'ye katıldı. Kısa bir süre sonra da, kendisini Mars gezegeninin uydusunu saptama problemine kaptırdı. Söz konusu uyduyu tespit etmek için Kepler, gözlemler aracılığıyla muazzam miktarda veri topladı. Bu veriler, bir yıl boyunca Mars gezegeninin tam olarak gözlemlenmiş değişik pozisyonlarını gösteriyordu. Tycho Brahe tarafından yapılan gözlemler, o güne kadar Mars gezegenine yönelik yapılmış en kapsamlı gözlem verilerini çıkartmıştı ortaya. Dünya'yı Güneş'in ve diğer gezegenlerin etrafında döndüğü merkez çekirdek olarak gören dönemin muhafazakâr görüşüne göre, kutsal nesnelerin izleyebilecekleri en uygun yörünge de dairesel bir yörüngeydi. Kepler de kendini Kopernik gibi bu muhafazakâr görüşe kaptırmış olduğundan, Dünya'yı ve gezegenleri Güneş etrafında dairsel yörüngelere oturtmuştu. Kepler'in dokuz yılı, Brahe'nin gözlem sonuçlarını, Mars'ın dairesel bir yörüngede döndüğü bilgisiyle ümitsizce örtüştürmeye çalışmakla geçti. Hata üzerine hata çıkıyordu. Nihayet, artık sabrının sonuna geldiği sıralarda, Kepler dairesel yörünge saplantısını bir kenara bıraktı ve kısa süre sonunda da Brahe'nin gözlemleriyle Mars'ın öngörülen yörüngesini saptadı. Söz konusu yörünge daire değil elipsti. Daha sonra bu sonuç, Kepler'in gezegen hareketleriyle ilgili ilk kanunu olarak genellendi: Gezegenler Güneş'in etrafında eliptik yörüngelerde hareket ediyorlardı ve Güneş elipsin bir fokusundaydı.

Kepler gibi, Bohr da çekirdek etrafında dönen elektronların yörüngelerini dairesel kabul etmişti. Ancak Bohr bunu Kepler gibi muhafazakâr görüşün etkisi altında değil, hesaplamada kolaylık sağladığı için yapmıştı. Fakat spektrum çizgilerinde görülen tek çizginin aslında birbirine çok yakın iki çizgi olması -hatta daha fazla- nasıl açıklanabilirdi ki? İşte Sommerfeld'in hikâyeye girdiği yer burasıydı. Sommerfeld, Bohr modelini daha genel bir yörünge anlayışıyla, yani eliptik olarak düşünüp genelledi. Çekirdek tarafından yaratılan kuvvetlerin etkisi altın-



ŞEKİL 5.1 Sommerfeld, Bohr modelindeki dairesel yörünge için gereken özel koşulları bulmaya çalışmaktan vazgeçip, çekirdek etrafında eliptik yörüngelerde dönen elektronlar olabileceğini düşündü.

da hareket eden elektronun yörüngesinin eliptik olması daha muhtemel görünüyordu. Aynı durum, bir yörünge boyunca dönüş hareketi yapan gezegenler için de doğruydu. Gezegenler, çok özel koşulların gerçekleşmesi durumunda dairesel bir yörüngeye de sahip olabilirlerdi ancak muhtemelen böyle bir şey olamazdı. Bu düşünce Sommerfeld'i dairesel yörünge için gereken özel koşulları bulmaya çalışmaktan vazgeçirip, çekirdek etrafında eliptik yörüngelerde dönen elektronlara yöneltti.

Elips şekli Sommerfeld'e ilave bir özgürlük alanı yaratmıştı. Dairenin sadece bir tek yarıçapı varken, elipsin iki yarıçapı vardı (Bkz. Resim 5.1). Elipsin bir uzun ekseni, *a*, ve bir de kısa ekseni, *b*, vardır. Bohr modelinde varsayılan dairesel yörüngenin yarıçapı, kuantum bir değer olan *n* tarafından tanımlanıyordu. Bu durumda, eliptik yörünge için iki adet kuantum değer gerekir: Biri uzun ekseni tanımlayan ve ikincisi de kısa ekseni tanımlayan kuantum değerler. Daha önceki Bohr modelinde kullanılan

kuantum sayısı ilkini ve yeni bir kuantum olan k ikinciyi, yani kısa ekseni tanımlıyordu. Sommerfeld, Bohr'un elektron sayısı yörüngeleri için olan kuantum koşulunu, kuantum değerler olan n ve k ile genelleştirdi.

Kuantum alanı, izin verilen özel durumların sürekli olmamasıyla karakterize edildiğinden, yukarıdaki kuantum sayıları, ele alınan kuantum alanın temel taşlarıdır. Belli bir kuantum sayısının katları, atom gibi kuantum bir sistemin fiziksel özelliklerine karşılık gelen sayısal değerleri verir. Çevremizde gözlemlediğimiz dünyada, bir insanın kilosu gibi fiziksel özellikler sürekliliği olan bir değerler kümesine karşılık gelir. Söz gelimi, bir insanın ağırlığı, diyelim 70 kilo seviyesinden 73 kilo seviyesine bir kuantum sıçramayla geçmez ancak bu kişinin ağırlığı 70 kiloyla 73 kilo arasındaki bütün değerleri alabilir. Ağırlıktaki değişme süreklidir, kesikli değil. Ancak atom söz konusu olduğunda kuantum prensipler belirleyicidir ve bir atomun enerji seviyeleri gibi fiziksel özellikler kesiklidir. Atomik enerji seviyelerinin değerleri ayrıktır, sürekli değil. E_1 seviyesinden E_2 seviyesine, E_2'den E_3'e ve diğer bütün seviyelere sıçramalar kuantum değerlerle belirtilir.

Bohr'un hidrojen atomu modelindeki dairesel yörünge, kuantum bir değer olan n ile gösterilir; daha doğrusu, kuantum değer n'nin karesiyle. Bu modelde başka hiçbir yörüngeye izin verilmez. Sommerfeld, söz konusu yörüngeyi dairesel olmaktan eliptik olmaya değiştirmekle ikinci bir yarıçap değeri elde ediyor, böylece oynayabileceği bir değişken daha yaratmış oluyordu. Böylelikle de Bohr'un elektron yörüngesi için ortaya attığı kuantum koşullarını iki adet kuantum değerle açıklıyordu: n ve k. Bu analizi onu, söz konusu iki kuantum değer arasında bir ilişki kurmaya itti. Kuantum sayısı n, diğer bir kuantum sayısı olan k'nın üst sınırını belirliyordu ve k, aşağıdaki önermeler uyarınca daha küçük değerlere de sahip olabiliyordu:

$n = 1$ olduğunda, kuantum sayısı $k = 1$;
$n = 2$ olduğunda, kuantum sayısı $k = 2$ ve 1;
$n = 3$ olduğunda, kuantum sayısı $k = 3$, 2 ve 1;

ve bu durum n'nin daha yüksek değerlerinde de aynı biçimde devam ediyordu.

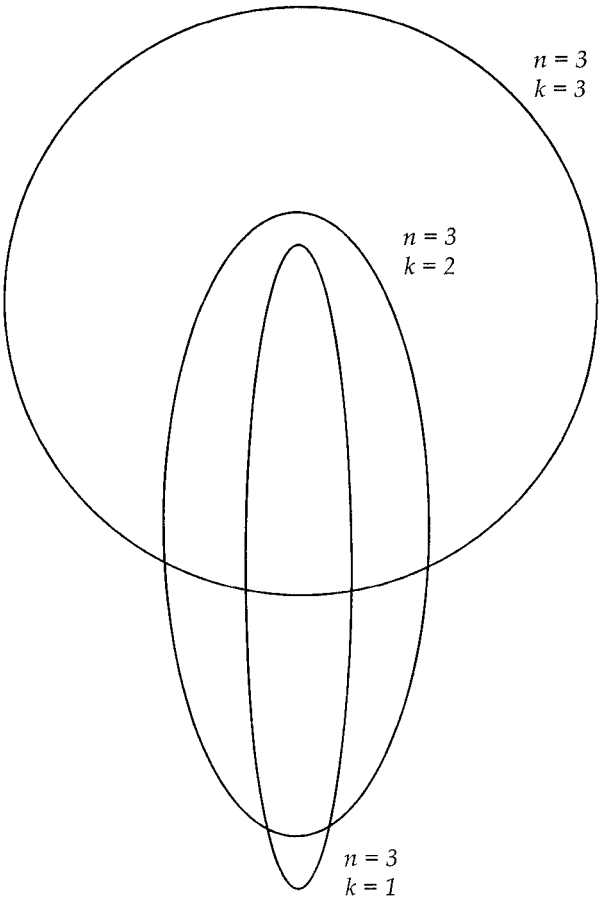
Bu yeni kuantum değerlerle, hidrojen atomunun yörüngesi nasıl bir hale geldi?

$n = 1$, $k = 1$ için: Yörünge bir dairedir ($a = b$) ve yarıçap $r = r_1$;
$n = 2$, $k = 2$ için: Yörünge bir dairedir ve yarıçapı $n = 1$ olduğundaki yarıçap değerinin dört katı büyüktür;
$n = 2$, $k = 1$ için: Yörünge bir elipstir, $a = 4r_1$ ve $b = 2r_1$;
$n = 3$, $k = 3$ için: Yörünge bir dairedir ve yarıçapı $n = 1$ olduğundaki yarıçap değerinin dokuz katı büyüktür;
$n = 3$, $k = 2$ için: Yörünge bir elipstir, $a = 9r_1$ ve $b = 6r_1$;
$n = 3$, $k = 1$ için: Yörünge bir elipstir, $a = 9r_1$ ve $b = 3r_1$;

ve kuantum sayısı n'nin daha yüksek değerlerinde de durum böylece devam ediyordu (bkz. ŞEKİL 5.2).

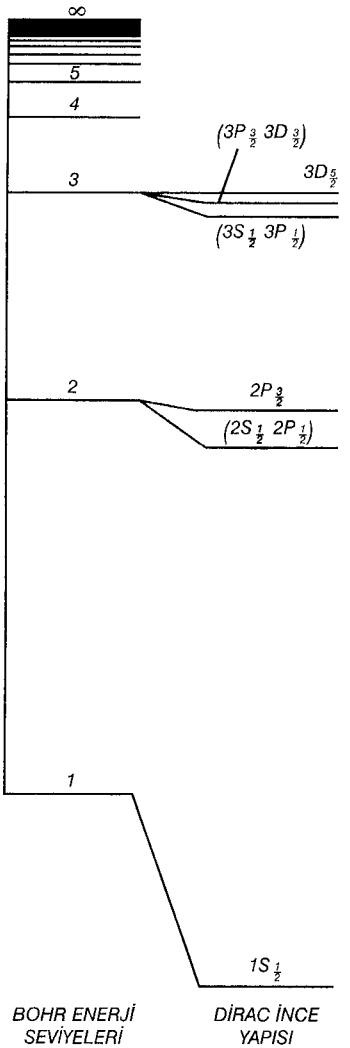
Bunlar hidrojen atomunun Sommerfeld yörüngeleriydi. Atom $n = 2$ halinde olduğunda, elektron ya dairesel bir yörüngede ($k = 2$) ya da eliptik bir yörüngede ($k = 1$) hareket edebilirdi. $n = 3$ halindeyse elektron üç değişik yörüngede hareket edebilirdi.

Nihayet görelilik kuramı sahneye çıkıyor. Görelilik kuramına göre, bir nesnenin kütlesi hızıyla birlikte artar. Ancak bu artış, hız çok büyük değerlere ulaşmadığı sürece farkedilebilir bir artış değildir. Elektron eliptik bir yörüngede çekirdeğe doğru yaklaşırken hızı kayda değer biçimde artar ve bu hız artışıyla birlikte elektronun kütlesinde de bir artış eğilimi olur. Elektronun kütlesindeki bu görelilik artışı ihmal edilemez. Elektron, eliptik yörüngenin çekirdeğe en yakın olduğu noktadan geçerken, eliptik yörünge ve iki değişik enerji seviyesine bağlı olarak küçük bir enerji değişimine neden olur. Bohr modelinde, $n = 2$ değeriyle tanımlanan enerji seviyesi sadece bir taneyken, Sommerfeld'in aynı model üzerinden geliştirdiği durumda, $n = 2$ enerji seviyesinde iki yörünge bulunuyordu; $k = 2$ ve $k = 1$. Ve $k = 1$ eliptik yörüngesindeki göreli kütle artışı nedeniyle, $k = 2$ dairesel yörüngesindeki enerji seviyesi biraz farklıdır. Enerji seviyesindeki bu küçük fark, her bir Balmer geçişinde iki spektrum çizgisi olmasına ve böylelikle H_α spektrum çizgisinin ve bütün diğer çizgilerin çift görünüm vermesine de bir açıklık getirmektedir (bkz. ŞEKİL 5.3).



ŞEKİL 5.2 Hidrojen atomunda $n = 3$ durumu için kuantum değerler n ve k ile belirlenen elektron yörüngeleri

Sommerfeld'in çalışması, hidrojen atomunun Bohr modeli üzerine kuruluydu. Bu çalışmada Sommerfeld, görelilik kuramı ve kuantum düşüncesini bir araya getirme fikrini ortaya atmış ve hidrojen spektrumunun ince yapılarını açıklamayı başarmıştı. 1916 yılında Sommerfeld, bu çalışmayı anlattığı makalesini yayınladıktan sonra Niels Bohr'dan bir mektup aldı. Bu mektup-



ŞEKİL 5.3 Bohr, Sommerfeld ve Dirac'a göre hidrojen enerji seviyeleri. Ölçekli olarak resmedilmemiştir.

ta Bohr, "Hayatımda, bu güzel çalışmanızdan daha keyifli bir şey okuduğuma inanmıyorum,"[25] diye yazıyordu.

Bohr'un hidrojen atomu modeli gibi, Sommerfeld'in teorisi de fazla filizlenmedi. 1925 yılında kuantum mekaniğinin yaratıl-

ması ve elektronların kendi etraflarındaki spin hareketinin keşfini, 1928 yılında Paul Dirac'ın teorisi izlemişti. Bu güvenilir teori, hidrojen spektrumunun ince yapısını ortaya koymak üzerine kuruluydu. Yine de Sommerfeld'in Bohr modelinin genişletilmesiyle sağladığı başarı, Bohr'un düşüncesindeki yararlılığı güçlendirdi ve 1916 yılından sonra atom fiziğinde kullanılan kuantum koşullar Bohr-Sommerfeld yasaları olarak adlandırıldı.

6

İnce-Yapı Sabiti: Evrensel Öneme Sahip Tuhaf Bir Sayı

Arnold Sommerfeld, 1916

Bu konuda [ince-yapı sabiti konusunda], π sayısını hesaplamak için silindirin etrafına ip sarmak durumunda olan insanların pozisyonlarındaki bir aşağılanmayla karşı karşıyayız.

—Edward M. Purcell

Fizikte pek çok sabit vardır ama bunlardan sadece birkaç tanesi temel sabitlerdir ve gerçekten çok özeldirler çünkü evrensel öneme sahiptirler. Her ne kadar bu bölümün konusu ince-yapı sabiti *(fine structure constant)* olsa da, anlatımımıza doğadaki diğer altı temel sabiti tanıtmakla başlayalım. Bu altı sabit, en son ulaşılmış değerleriyle şunlardır:

Yerçekimi sabiti, $G = 6{,}67259 \times 10^{-11}$ metre^3/kilogram saniye (m^3/kg s)
Işık hızı, $c = 2{,}99792458 \times 10^8$ metre/saniye (m/s)
Planck sabiti, $h = 6{,}6260755 \times 10^{-34}$ joule saniye (J s)

Elektronun elektrik yükü, $e = 1{,}60217733 \times 10^{-19}$ coulomb (C)
Elektronun kütlesi, $m_e = 9{,}1093897 \times 10^{-31}$ kilogram (kg)
Protonun kütlesi, $m_p = 1{,}6726231 \times 10^{-27}$ kilogram (kg)

Burada hemen bir gözlem öne çıkıyor: Bu sabitler yaklaşık değerlere sahip değiller. Aşırı derecede bir hassasiyetle ölçülmüş değerlere sahipler. Her birinin virgülden sonraki son hanesiyle ilgili (ki yukarıda açıkça gösterilmemiştir) bir belirsizlik vardır; örneğin Planck sabitinin ve elektronun elektrik yükünün virgülden sonraki son hanesi... Buna karşın, bu halleriyle de gerçek değerlerine oldukça yakındırlar. Buradaki sabitlerin hassasiyetle hesaplanmış olmaları kazara ortaya çıkmış bir durum değildir. Bu sayıları büyük bir hassasiyetle bilmemizi gerektiren sebepler vardır. Bu yüzden de söz konusu sabitlerin olası en hassas ölçümleri, geçmişte olduğu gibi günümüzde de, en yaratıcı deney yöntemleriyle hâlâ tekrar tekrar yapılmaktadır.

Bu sabitlerin önemleri çok yönlüdür. Söz gelimi, bunlar gerçekten sabit midirler? Ya da, evrenin yaşamı boyunca hiç değişiklik göstermişler midir? Acaba hâlâ da değişiyor olabilirler mi? Değişiyor bile olsalar, insanlığın tarihi boyunca göstereceksekleri değişim gerçekten çok küçük olacaktır ve bu değişimi bizim tespit etmemiz için de tek yol, sabitleri daha hassas biçimde saptamak için bilgi seviyemizi zorlamaktır.

Söz konusu sabitlerin en büyük özelliği de evrensel olmalarıdır. Görünmez yerçekimi kuvvetinin etkisi, her bir galaksi için, içinde yer alan yıldızların nasıl dağıldığının önemi olmaksızın, ışık yılları boyunca sürer, yıldızları yıldızlara bağlar ve galaksiye şeklini verir. Yerçekimi kuvvetinin evrende her yerde aynı olduğu yönündeki sonuca ters düşecek tek bir kanıt yoktur. Yerçekimi sabiti, $G = 6{,}67259 \times 10^{-11}$ $m^3/kg\ s$, Dünya'yı Güneş'e bağlayan ve Samanyolu Galaksisi'ni bir arada tutan kütle çekim kuvvetinin etkinliğini belirler. Evrendeki her bir yıldızın, hangi galakside yer aldığının önemi olmaksızın, saçtığı ışık aynı hızda, $c = 2{,}99792458 \times 10^8$ m/s, yayılır. Evrendeki her bir atomun, hangi maddenin içinde yer aldığının önemi olmaksızın, büyüklüğü ve davranışı Planck sabiti olan $h = 6{,}6260755 \times 10^{-34}$ Js ile belirlenir. Evrendeki bütün elektronlar aynı elektrik yüküne ve

aynı kütleye sahiptirler. Aynı durum, evrenin bütün protonları için de geçerlidir.

Sabitlerin asıl sayısal değerleri, ifade edildikleri birime bağlıdır. Örneğin, eğer uzunluk birimi olarak metrik sistem yerine İngiliz sistemini kullanıyorsak, yerçekimi sabiti G değerinin $2{,}35640 \times 10^{-9}$ ft^3/kg s olarak alınması gerekecektir. Dolayısıyla, bu sabitler, işlemde kullanılan birimlere bağlıdırlar. Yani, ola ki X galaksisinde yaşayan gelişmiş bir uzaylı ile söz konusu birimleri karşılaştırmanın bir yolu olsa, onların da bu sabitlere atadığı rakamlar, sayısal olarak bizimkilerle aynı olurdu.

Yukarıdaki listede yer alan ilk üç sabit, G, c ve h, değerlerini dört büyük teoriden alırlar: Newton'un yerçekimi kanunu, Maxwell'in elektromanyetik kanunu, Einstein'ın görelilik kanunu ve kuantum mekaniği kanunları. Söz konusu sabitlerin asıl değerleri, bu teoriler açısından bir anlama sahiptirler. Sonraki üç sabitse e, m_e, ve mp, değerlerini maddenin kendi doğasından alırlar. Bu sabitler, maddi dünyamızın doğasını belirlerler. Örneğin, elektron üzerindeki elektrik yükünün iki kat daha fazla olduğunu varsayalım. O durumda hidrojen atomu, hâlihazır büyüklüğünün dörtte biri kadar olacaktı. Bütün diğer atomların da büyüklükleri belli oranda küçülecek ve standart 240 santimetrelik tavan yüksekliği 60 santimetreye düşecekti.

Son üç sabit, elektron ve protonun elektrik yükleri ve kütlelerini gösteren özel değerler, neden tam olarak anlaşılmıyor? Neden elektronun kütlesi $9{,}1093897 \times 10^{-31}$ kg ve başka bir şey değil? Bu alan, araştırmaların etkin biçimde devam ettiği bir alan. Görüşlerden biri, bu değere yönelik ortaya koyduğu neden için en azından bir rasyonellik sunuyor: Eğer gözlemlenen değerler söz konusu sabitten çok da farklı olsaydı, gözlemleri yapan insanlık burada yaşamıyor olurdu. Böylesi bir nedenselleştirme, belli fiziksel ve biyolojik süreçlerin yaşam için gerekliliğini ortaya koyarken, sabitlerin öngörülen değerlere sahip bulunmasının da söz konusu yaşam formlarını desteklemesi gerektiğini dile getirir. Diğer bir deyişle, tavan yüksekliği 60 santimetre olan ve bu durumun standart olarak adlandırıldığı bir ortamda minik Bohr ve Sommerfeld var olup çalışamazlardı.

İnce-yapı sabiti de *(fine structure constant)*, ilk olarak Sommerfeld'in hidrojen atomu üzerine çalışmalarında kendini

gösteren bir diğer temel sabittir. Değeri, α = 0,00729735308 dir. Bu sabit sıklıkla aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\alpha = \frac{1}{137.0359895}.$$

İnce-yapı sabiti sadece bir sayı olmaktan öte bir değere sahiptir. Diğer sabitler cinsinden de ifade edilebilir:

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc}.$$

İnce-yapı sabiti adını geldiği olaydan alır. İlk olarak Sommerfeld'in hidrojen spektrumunun ince detaylarını açıkladığı çalışmasında ortaya çıkmıştır. Bohr'un hidrojen atomu modelinin spektrumların kaynaklarına yönelik mekanizmayı ortaya çıkarışını hatırlayalım; bir enerji seviyesinden diğerine yapılan kuantum sıçrama. Bu model, hidrojen spektrumunun temel özelliklerini başarıyla betimleyen bir modeldi. Meseleye daha yakından bakıldığında, H_α spektrum çizgisinin aslında belirgin biçimde ayrık çizgilerden oluştuğu görülüyordu. Sommerfeld, böylesine ince bir yapıyı, Bohr'un dairesel yörüngelerine eliptik yörüngeler ekleyerek açıkladı. Söz konusu eliptik yörüngelerde hareket eden elektronları görelilik kuramıyla ele alınca, Sommerfeld ince bir yapı gözlemledi. Hidrojen atomu içindeki enerji seviyelerini ifade ettiği α sabiti, daha sonra ince-yapı sabiti olarak adlandırıldı.

Bu sabit hidrojen atomunun spektrum görünümlerini açıklamaktan daha öte bir değere sahiptir. Fizik sabitlerinin en önemlilerinden birisi olarak görülmektedir. Örneğin, ince-yapı sabitinin fotonlarla elektronlar arasındaki etkileşimin şiddetini ölçmeye yaradığını biliyoruz. Kısaca bu sabit, elektrik yüküne sahip parçacıkların kuantum ve görelilik özelliklerinin açığa çıktığı durumlarda görünür. Eğer elektronlar ve ışık herhangi bir etkileşime girmeseydi, ince-yapı sabiti sıfır değerine sahip olurdu.

İnce-yapı sabitine çok özel bir diğer özellik daha bahşedilmiştir: O boyutsuzdur; birimi yoktur.[26] Bu bağlamda α, tıpkı bir diğer boyutsuz sabit olan, dairenin çember uzunluğunun çapma oranı π sabitine benzer: $2\pi r/2r$ = 3.14159.... İnce-yapı sabiti α, birimi m/s olan ışık hızı ya da birimi coulomb olan elektronun

elektrik yükü sabitlerine benzemez. O birimlerden bağımsızdır. Evrenin her yerindeki gelişmiş varlıklar bu sabit için aynı sayısal değeri kullanırlar. Diğer bir galaksideki gezegenin vatandaşları ışık hızını başka bir değerle ifade ediyor olabilirler çünkü onların birimleri bizim birimlerimizle aynı olmayabilir, ama ince-yapı sabitinin değeri her zaman aynıdır: 1/137,0359895.

İnce-yapı sabitinin bir diğer mistik karakteri de aynı zamanda her yerde mevcut olma özelliğidir. Her biri bu boyutsuz sabitin sayısal karşılığının isabetli değerlendirilmesine olanak tanıyan bazı fiziksel durumlar, ince-yapı sabitinin ortaya çıkmasını sağlarlar. Örneğin:

(a) h/m_n ölçümlerinden (burada h Planck sabiti ve m_n de nötronun kütlesidir) $\alpha = 1/137{,}03601082$ değeri çıkar.
(b) Bir süper-iletken eklem yerindeki alternatif akım Josephson etkisinin ölçümlerinden $\alpha = 1/137{,}0359770$ değeri çıkar.
(c) Kuantum Hall etkisinin e^2/h ölçümlerinden (burada e elektronun elektrik yüküdür) $\alpha = 1/137{,}0360037$ değeri çıkar.
(d) Elektron ve pozitronun manyetik momentinin ölçülmesinden $\alpha = 1/137{,}03599993$ değeri çıkar.
(e) Çekirdeğinde muon[27] ve yörüngesinde bir elektron bulunan muonium "atomu"nun enerji seviyelerinin ölçümünden $\alpha = 1/137{,}0359940$ değeri çıkar.
(d) Helyum spektrumunun ölçümlerinden $\alpha = 1/137{,}035853$ değeri çıkar.[28]

Yukarıdaki sonuçları veren deneylerin detayları burada üzerinde duracağımız bir öneme sahip değildir. Bizim için önemli olan, her bir ölçümün (ki bunların hepsi de burada anlatılmayan deneysel belirsizlikler içerir) farklı bir fiziksel sistemden çıkıyor olmasıdır. Görüldüğü gibi, söz konusu deneyler sonucunda elde edilen ince-yapı sabitinin değeri temelde birbirleri ile uyumludur.

Deneysel ölçümlerde daha büyük bir hassasiyet ve isabet yönündeki arayış, sadece fizik alanında değil, kavramsal modeller veya teorik sistemler arasında da birleştirici bir rol oynar.

Bilimin test edilmesinin yegâne yolu deney yapmaktır. Kavramsal modeller bilim insanlarının akıllarını büyüler ve duygularını allak-bullak eder. Bilim insanları teorik bir düşünceyi öylesine güzel ve tahrik edici bulabilirler ki, doğanın sırlarına yepyeni bir pencere açacağı yönünde büyük beklentilere girebilirler. Ama söz konusu model veya teori, kendisinin doğruluğunu kanıtlamak yönünde deney yapılmasına imkân vermiyorsa, en inatçı bilim insanı bile, başlangıçta ne kadar heveslense de, sonunda onun peşinden gitmeyi bırakır. Ve işte ince-yapı sabitinin öne çıktığı nokta da burasıdır.

Kuantum elektrodinamiği (QED) fizik yasalarını birleştirme yönündeki en başarılı teorilerden biridir. Aslında, QED teorisi, listelemiş olduğum bütün deneylerin altında yatar. Dahası, fizikçiler QED ve ince-yapı sabiti ile birçok fiziksel parametrenin değerini büyük bir hassasiyetle elde edebilirler. Bu nedenlerden dolayı, QED fizikçiler arasında revaçta bir teoridir. Ancak tıpkı diğer bütün fizik teorileri gibi QED de daima tenkide açıktır. Yukarıda listelenen deneylerin tümünün altında yatan QED teorisi olduğundan, bu farklı deneyler sonucunda ölçülen ince-yapı sabiti aynı değere sahip olmalıdır. Eğer bütün bu deneyler az da olsa farklı α değerleri veriyor olsalardı, hemen QED'nin ne kadar doğru bir teori olduğu sorgulanmaya başlanırdı. Fizik ve diğer sayısal bilimler bu şekilde çalışırlar.

İnce-yapı sabiti kötü isimlendirilmiş bir sabittir. Her ne kadar hidrojenin ince yapısı üzerine bir çalışmanın ürünü olsa da, sabitin önemi, başlangıçta olduğundan çok daha yüksekler-dedir. Elimizde, ince-yapı sabitini tahmin edecek ya da hesaplayacak hiçbir teori yok. Edward M. Purcell, "α sabiti konusunda, π sayısını hesaplamak için silindirin etrafına ip sarmak durumunda olan insanların pozisyonlarındaki bir aşağılanmayla karşı karşıyayız," diye yazıyordu.[29] İnce-yapı sabitinin anlamını bulma çabaları hayal mahsülü fikirleri ve mistik derin düşünceleri harekete geçirmiştir. Bütün bu başarısız çabalar karşılığında da, "Birinci sınıf bir fizik dergisinin editörünce ağızdan kaçırılmış ve gelmiş geçmiş en iyi fizik fıkrası olduğu tartışma götürür" nitelemesiyle hedef haline getirilmiştir.[30] Bu sataşma, Cavendish Laboratuarı'nda çalışan ve doktora tezlerini yazmakta olan üç genç tarafından ortaya atılmıştı. Bunlardan biri olan

Hans Bethe, on bir yıl sonra Los Alamos Laboratuarı'nın teorik çalışmalar bölüm başkanlığına getirildi. Bethe ve iki arkadaşı yayınladıkları makalede ince-yapı sabitinin tam olarak 1/137 değerine sahip olduğunu iddia ediyorlardı. Elbette bu makale anlamsızdı ve *Naturwissenschaften* adlı derginin editörü bunun ne olduğunu bilmeden basmıştı dergisinde. Olayın patlak vermesinden sonra editör anlaşılır biçimde çok kızgındı ve üç gençten özür dilemelerini istedi. 1 Mart 1931 tarihinde dergide özür yazısı göründü. "Söz konusu not," diye yazmışlardı, "ciddiye alınması beklenmeyen bir durumdu. Gerçekte amaç, yakın geçmişte yayınlanan belli teorik fizik yazılarını karakterize etmekti. Bunlar tamamen spekülasyon ve yapay sayısal değerler üzerine oturtulmuş yazılardır."[31]

İnce-yapı sabitinin anlamı, "yapay sayısal değerler üzerine oturmuş," değildir. Belki de uzaydan bir mesaj alıp yazı kodunu çözerek 137,0359895 değerini bulsaydık, uzayın derinliklerinde başka bir yerde yaşayanların fizik bilgilerinin bizimkinden gelişmiş olup olmadığını düşünecektik. Böylesine tahrik edici bir sinyal alınmış olsaydı ve bizler o sırada henüz bu sabiti basit prensiplerden yola çıkarak türetmeyi öğrenmiş olmasaydık, uzaylıları, bize evrende neler olup bittiğini anlatmaya ikna etmeye çalışırdık.

7

Kuantum Mekaniğinin Doğuşu: Hidrojen Atomu "Can Alıcı Soruyu" Cevaplıyor

Werner Heisenberg ve Wolfgang Pauli, 1925–26
Paul Dirac, 1925–26

Yepyeni bir teorinin can alıcı sorusuna gelmiş bulunuyoruz: Bu teori hidrojen atomunun özelliklerine bir açıklama getirebilecek mi?

—Max Born

1960'lı yıllarda fizikçilerden, o güne kadar yaşamış en büyük fizikçiyi saptamaları istendi. Listenin başında Isaac Newton ve Albert Einstein çekişiyordu. Üçüncü sıradaysa, milattan önce üçüncü yüzyılda yaşamış Archimedes bulunuyordu. Birçok sebepten dolayı, Newton ve Einstein bu onuru hakediyorlar. Newton, büyük bir özgüvenle bütün kütlelerin aynı yasalara tabi olduklarını gösterdi ve böylelikle de fizik yasalarının evrenselliğini kurarak gökyüzü ve Dünya'yı bir araya getirdi. Einstein, özel ve genel görelilik kuramları ile mekansal ve zamansal sahnede olayların fiziksel evrende oynadığı rolu temelden değiştirdi. Görelilik kuramı, yirminci yüzyılda ortaya

atılmış ve fizik dünyasında devrim yaratmış iki büyük düşünceden biriydi. Diğeri de kuantum mekaniğiydi.

Newton ve Einstein adlarındaki bu fizikçiler, bütün zamanların en iyi fizikçileri olarak hangi fizik teorisinin fizikçilerin dünyayı anlamalarında en etkili rolü oynadığı sorusuyla karşılaşsalardı, kuşkusuz ikisi birden kuantum mekaniği cevabını verirdi. Görelilik kuramı doğa olaylarının anlaşılması yönünde uzay-zaman arenasını yeniden inşa ettiyse de, kuantum mekaniği, bu tür olayların tabi oldukları fiziksel kanunların karakterini kökten değiştirdi.

Kuantum düşüncesi ilk olarak 1900 yılında Max Planck'ın ellerinde ortaya çıktı. Teorinin çerçevesi Einstein tarafından kabul gördü. 1900 yılından hemen sonra kuantum teorisini anlamak için kolları sıvamış olduğunu hatırlayan Einstein, durumu şöyle yorumluyordu: "Sanki bastığım yer altımdan çekiliyordu."[32] Fizikçilerin çalışmalarını üzerine kurdukları katı gerçeklik, Planck'ın kuantum fikriyle gerçekten yerle bir olmuş ve o tarihten sonraki yirmi beş yıl boyunca da fizik bilimi bu kriz havasından çıkamamış, paradoksların topukları üzerinde kuralsız bir yolculuk yaşanmıştı.

Laboratuar dolusu gözlem verisi formundaki kanıtlar fiziğin kazancıydı. 1900 ve 1925 yılları arasında toplanan kanıtlar, atomik seviyelerdeki davranışları ortaya çıkarıyor, fizikçileri şaşkınlıklar içinde bırakıyordu. Bir yandan *lokalize* davranışlar gözlemleniyordu. Örneğin, 1905 yılında Einstein, dalga davranışı gösterdiği uzun zamandır bilinen ışığın, yolu üzerindeki atomlar ve elektronlarla, sanki parçacıklardan oluşmuş gibi, etkileşime girdiğini ortaya koydu. Bundan daha dramatik olarak, Arthur Compton 1923 yılında ışığın minik bilardo topları gibi elektronlara çarpıp sektiğini gösterdi. Aynı şekilde elektronların da bir detektör ekranının belli bölgesine çarptıkları ve bu davranışın bir su birikintisinin yüzeyine düşen çakıl taşlarına benzer olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla, hem ışık ve hem de elektronlar, bir parçacığın *lokalize* davranış karakterlerini sergiliyorlardı.

Diğer yanda, hem ışık hem de elektronlar *lokalize olmayan* hareketler de sergiliyorlardı. Işık uzun yıllardır dalga olarak ele alınıyor, dalgaboyu ve frekans parametreleri ele alınarak, kırınım ve girişim özelliklerine yönelik hassas hesaplamalar yapıla-

biliyordu. 1923 yılında Louis de Broglie, Einstein'ın 1905 yılında ortaya attığı parçacık-benzeri özellikleri ışığa uygulama teorisinden esinlenerek, dalga-benzeri özellikleri elektronlara ve diğer parçacıklara uygulayarak, dalga-parçacık ikiliğinin *(wave-particle duality)* evrenselliğine gönderme yapıyordu. De Broglie'nin cesur fikri 1927 yılına dek deneysel olarak kanıtlanamamış olsa da, Bohr'un hidrojen atomu modelindeki varsayımlardan birine fiziksel bir temel oluşturmayı sağladı. Einstein, H. A. Lorentz'e yazdığı bir mektubunda, "Bence [de Broglie'nin bu fikri] fizik dünyasındaki en beter muammalara yöneltilmiş, cılız da olsa, ilk ışık hüzmesidir," diyordu.[33]

Işığın ve elektronların ikili dalga-parçacık karakterleri, Einstein'ın dediği üzere, gerçekten bir muammaydı. Doğada parçacıklar ve dalgalar birbiriyle ters düşen özelliklere sahiplerdi. Çakıl taşları tanımlı konumlara sahipken, su dalgaları sahir değildir. Çakıl taşı su yüzeyine doğru havada giderken ve sonrasında su altına batarken belli yollar izler ama su dalgalarının böyle belirgin bir yolu yoktur. Çakılların daha büyük bir hızla ilerlemesi sağlanabilirken, dalgalar hızlandırılamaz -dalgalar, dalgayı taşıyan ortama bağlı tek bir hıza sahiplerdir. Parçacık bazında *lokalize olmanın* ve dalga bazında *lokalize olmamanın* aykırı doğaları, bu iki oluşumun bir araya getirilmesi karşısında bir engel olarak görünüyordu. 1924 yılında Einstein, allak bullak olmuş fizikçileri yine can damarlarından vuruyordu: "Böylece, şimdi elimizde ışığa dair iki teori bulunuyor ve her ikisi de mantıksal bağlantılar kurulmaksızın göz ardı edilemez nitelikte - itiraf edilmeli ki, teorik fizik alanında yirmi yıllık muazzam yoğunlukta bir çaba var."[34] Einstein aynı cümleleri parçacıklar hakkında da yazabilirdi aslında.

Lokalize olma *kesintililik* fikrini, lokalize olmama ise *süreklilik* fikrini ifade eder. Atomları, elektronları ve fotonlarıyla kuantum dünyası *kesintililikle* karakterize edilir. Bunu tersine, yaşayan dünya, yani bizim tecrübe ettiğimiz dünya, *süreklilikle* karakterizedir. Kuantum dünyasını anlamaya çalışırken yaşadığımız handikap, hayal gücümüzün kendi yaşam tecrübelerimizin ürünü olmasıdır. Bizim düşünce biçimimizde, lokalizasyon (kesintililik) ve delokalizasyon (süreklilik) birbirine karşıt olgulardır. Ancak gerek elektron ve gerekse ışık, bizim algı handika-

pımıza karşın yapmaları gerekeni yaparlar. Elektron elektrondur, ışık da ışık. Buradaki mücadele, bu birbirinden ayrı iki dünya arasında kavramsal bir köprü kurmaktır. 1925 yılında genç Alman fizikçisi Werner Heisenberg, böyle bir köprü üzerine çalışmaya başladı.

1925 yılının yaz aylarında Heisenberg çağ açıcı nitelikteki makalesinin ilk taslağını yazdı. O sırada sadece yirmi üç yaşındaydı ama Arnold Sommerfeld'in liderliği altında çalışmalarını sürdürdüğü Münih Üniversitesi'nde doktorasını tamamlamıştı. Bir yıl kadar da Göttingen'de Max Born ile çalışmıştı. Ayrıca, birkaç ay da Kopenhag'da Bohr ile yakın bir işbirliğine girmişti. Her ne kadar genç biri olsa da, Heisenberg dünyaca ünlü fizikçilerden eğitim almış ve onlarla işbirliği yaptığı projelerde çalışmıştı.

Heisenberg mükemmel bir teorik görüş yeteneğine ve matematik zekâya sahip müthiş bir öğrenciydi. Laboratuarda çok becerikli değildi ve bu nedenle de kendini, 23 Temmuz 1923 tarihinde Münih'teki Teorik Fizik Enstitüsü'nün seminer odasında buldu. Profesörler burada toplanmış, doktorasıyla arasındaki son engeli aşması için Heisenberg'i sözlü sınava tabi tutuyorlardı. Odada Sommerfeld ve deneysel fizik bölümünün başkanı Willy Wien de vardı. Yirmi iki yaşındaki Heisenberg birbirinden zorlu teorik sorular karşısında soğuk terler döktü. Ve nihayet doktora adayına sorular sorma sırası Wien'e geldi. Heisenberg hata yaptı ve Wien'in sorusuna doğru yanıt veremedi. Sommerfeld ve Wien birbirlerinden oldukça farklıydılar ve Wien, Sommerfeld'in gözde öğrencisine doktorasını vermeyi reddediyordu. Teorik ve deneysel fizik üzerine göreli meziyetlerin konuşulduğu yoğun tartışmaların ardından bir ortak noktaya varıldı: Heisenberg ikinci dereceden bir akademik notla doktorasını alacaktı. Böylesine bir aşağılama karşısında, Heisenberg derhal Münih'i terk ederek Göttingen'e gitti. Orada, Teorik Fizik Enstitüsü'nün yöneticisi olan Max Born'un asistanı olabileceğini varsayıyordu.

Ekim 1922'de Göttingen'e ulaşan Heisenberg, kendisini Münih'tekinden çok daha değişik bir entelektüel ortamda buldu. Göttingen, aralarında Richard Courant ve David Hilbert'in

de olduğu dünya çapında matematikçilerin yurdu olmuştu. Göttingen'deki fizik çalışmaları, matematik ağırlıklıydı. Sommerfeld de bir dönem matematiksel bir yaklaşım benimsemiş ancak bu yaklaşımı engin fiziksel detay bilgisi karşısında etkili olmamıştı. Sommerfeld'in matematiği daha ziyade yararcı bir doğaya sahipti. Born ise matematiksel metotlarla daha ilgiliydi ve onda da Sommerfeld'in fiziksel fenomenler hakkındaki bilgisi yoktu. Born'un matematiksel fizik yaklaşımının ön kabule dayalı bir karakteri vardı ve matematiksel inceliklere bayılıyordu. Born matematiksel ispatlarla, fiziksel ispatlardan daha çok ilgileniyordu. Heisenberg'in daha sonra diyeceği üzere, "Göttingen'in bütün ruhu bir şekilde matematikle şekillenmişti."[35]

Heisenberg Göttingen'deki ortamdan oldukça faydalandı ve Hilbert ve Courant tarafından verilen derslere devam ederek yeni matematiği öğrendi. Fizik tarafındaysa, kuantum prensiplerini genişleterek ikinci en basit atom olan helyuma uygulamak için uzun ve sıkı bir çalışmaya girdi. Ancak iki numaralı atom helyum, hidrojen gibi değildi ve Heisenberg'in onca çabası karşısında boyun eğmedi. Dahası, helyumu anlamak için yoğun çabalarla geliştirdiği prensipler Wolfgang Pauli ve Bohr tarafından amansızca eleştirildi.

Sommerfeld'in gözde öğrencisini 12-22 Haziran 1922 tarihleri arasında Bohr'un Göttingen'de verdiği seminerler dizisine sokmasıyla, Heisenberg, Bohr'un ilgisini çekmeyi başarmıştı. Seminerlerden birinde Heisenberg, Bohr'un düşüncelerinden birine itiraz edince iki adam tanışıp bir yürüyüşe çıkmışlardı. Bu yürüyüş sırasında Bohr, Heisenberg'i Kopenhag'a gelmeye ikna etti. Böylece 1924 yılının baharında Heisenberg, Bohr'un Kopenhag'daki enstitüsüne kısa bir ziyarette bulundu. Her şey öyle yolunda gitmişti ki, Bohr Heisenberg'i güz döneminde yine Kopenhag'a gelip, kış dönemini onun öğrencisi olarak geçirmeye davet etti. Born ise Heisenberg'le birlikte çalışmak konusunda isteksizdi; 1924 yılının Nisan ayında Bohr'a yazdığı bir mektupta, "Elbette onu özleyeceğim (şahane, her şeye değer, çok akıllı bir adam; yüreğimde onun yeri başkadır) ama ilgi duyduğu alanlar benimkilerden çok ilerde ve benim için belirleyici olan sizin dileğinizdir," diyordu.[36]

Göttingen Münih'den farklı bir kentti; Kopenhag ise her ikisinden de farklıydı. Bohr'un genç Heisenberg üzerindeki etkisi abartılabilecek düzeyde değildi. Ama Pauli, Heisenberg'in eksik olduğu alanlarda genç adama Bohr'un yardımcı olabileceğini biliyordu. Pauli'nin Bohr'a yazdığı bir mektupta, Heisenberg'in atom fiziği üzerine daha felsefi bir tarza ihtiyacı olduğunu belirtiyordu. "... Basit varsayımların ve eski teorilerle bağlantıların net bir formülü" burada önemli rol oynamalıydı.[37] Bohr saplantılı biçimde düşüncelerin netliğiyle ilgileniyordu. Ona göre, herhangi bir teorik açıklamaya girişmeden önce, fizik probleminin tam olarak anlaşılması gerekiyordu. Sonraları Heisenberg de Bohr ile geçirdiği zamanlar üzerine konuşacaktı:

> Bohr problemlere asla matematiksel bir bakışla yaklaşmazdı; onlara fiziksel görüş açısından bakardı. Bohr'dan herkesten öğrendiğimden fazlasını öğrendim; yeni tip teorik fizik artık teorik olmaktan çok deneylere dayalı çalışmalara yönelmişti. Probleme uygun içerik bulma yoluyla deneysel durumu da kapsayan önermeler yapmak gerekiyordu. Daha sonra, söz konusu içerik matematiksel bir form haline getirilmeliydi. Ancak bu işlem aşağı yukarı önemsiz bir süreçti ama aşılması gerekiyordu. Burada asıl önemli olan, anlaması son derece güç olan fiziksel tuhaf durumları anlatan doğru kelimelerin ve içeriğin bulunmasıydı.[38]

Heisenberg 1925 yılının Nisan ayında Göttingen'e dönmek üzere Kopenhag'dan ayrıldığında, öğrencilik yıllarını artık geride bırakmıştı. 21 Nisan'da Bohr'a yazdığı bir mektupta, Kopenhag'da kaldığı günlerde kendisine gösterdiği misafirperverlik için teşekkür ediyordu. "Bilimle ilgili konulara gelince," diye yazıyordu Heisenberg, "son altı ayım bir öğrenci olarak hayatımın en güzel zamanlarıydı. Gelecek yıllarda çaresizce kendi başıma çalışmak zorunda olmaktan dolayı üzgünüm."[39] Heisenberg kendi çalışmalarını ortaya çıkartmak üzereydi. Büyük yalnızlığı içinde kuantum mekaniği ile ilgili çalışmasının ilk versiyonunu hızla tamamladı.

Gençlik için yükümlülük geleceğe yönelikti, geçmişe değil. Bu nedenle de genç fizikçiler geçmişle bağlarını net olarak kopartabiliyorlardı. Aynı zamanda, mücadele genelde genç bilim insanlarının aklına yeni düşünceler getiriyor, yeni bir temel prensip görüyorlar, öğrenci olarak ve danışmanları ve meslektaşlarıyla iyi ilişkilerini koruyarak öğrendiklerinden faydalanıyorlardı.

Heisenberg, kuantum mekaniğinin temellerini anlattığı eserini tamamlamadan bir ay kadar önce Bohr'a bir mektup yazarak, "Son zamanlarda hidrojenin [spektrum çizgilerinin] yoğunluklarıyla ilgileniyorum.... Hâlihazır durumda, yoğunlukları elde edebilmem için koşullar hâlâ tamamen hazır değil,"[40] demişti. Heisenberg'in yorumunun altında yatan entelektüel kapsam hidrojen atomunun Bohr-Sommerfeld modeliydi. Özellikle de ışığın spektrum geçişlerinde parlak mı yoksa sönük mü salındığıyla ilgileniyordu.

Niçin hidrojenin Balmer serisi yoğunlukları Heisenberg'in zihnini meşgul ediyordu? Cevabın bir parçası, o zamanlarda bu konunun oldukça revaçta olmasıydı. Birkaç fizikçinin aklına bu konu düşmüş, 1924 yılının güz aylarından 1925 yılının bahar aylarına kadar ciddi bir derin bunalıma girmelerine neden olmuştu. Bunlar, canla başla atom fiziğini rasyonel bir kuantum temeline oturtmaya çalışıyorlardı. 24 Eylül 1924 tarihli Alman Bilim İnsanları ve Fizikçileri Kongresi'nde Hendrik Kramers atomik teorinin başına bela olan ana çelişkileri net biçimde ortaya koymuştu:

> Hidrojen spektrum teorisi başarısını, kararlı hallerdeki *(stationary states)* hareketlerin klasik elektromanyetik teorinin yardımıyla tanımlanmış olmasına, ya da -başka bir anlatımla- Coulomb çekim yasasının temel alındığı mekanik çözümlemelere borçludur. Bohr'un temel ön kabulleri açık biçimde klasik elektrodinamik ile çelişkiler barındırdığından, kendi ispatını sağlayamaması mümkündür. Kararlı haller arasındaki tuhaf geçişler, ister radyasyon, ister çarpışma etkileriyle olsunlar, prensip olarak klasik metotlarla tanımlanamazlar; hidrojen atomunda bile...[41]

Fizikçiler büyük entelektüel zahmetlerle yeni fikirleri işliyorlar, kısa bir süre için denemeler ümit veriyor ama biraz daha derin bir analize girişilince eksik görünüyorlardı. Tekrar tekrar ümitler soluyor ve sonra yeniden yeşeriyordu.

Böylesine sıkıntılı bir ortamda, 1925 yılının bahar aylarına gelindiğinde Heisenberg'in düşüncelerinde yeni bir yaklaşımın temelleri şekillenmeye başlıyordu. Spektrum geçişlerinin yoğunlukları yeni yaklaşımının bir parçasıydı. Neyin gözlemlenebilir ve neyin doğası nedeniyle gözlemlenemez olduğunu düşünmeye başlamıştı. Bohr'un hidrojen modeli gözlemlenemez büyüklükler üzerine kuruluydu. Örneğin, hidrojen atomunun içindeki elektron gözlemlenemezdi. Dolayısıyla Heisenberg, bu teoriyi verimsiz bir fikir olarak bir kenara koymuştu. Aynı şekilde elektron yörüngeleri de gözlemlenemezdi ve atomik yörüngeler tezi de böylece yok varsayılacaktı. Heisenberg tüm dikkatini gözlemlenebilir niceliklere yöneltmiş, kuantum devrimini ortaya çıkartan temel verilere odaklanmıştı; yani, spektrum geçişlerinin frekansları ve yoğunluğuna... Spektrum frekansları ve yoğunlukları deneysel olarak gözlemlenebilir niceliklerdi. Elektronun ve yörüngelerin koordinasyonu deneyler aracılığıyla gözlemlenemezdi. Heisenberg bu noktada bir sonuca ulaştı: Atom fiziği sadece gözlemlenebilir terimler aracılığıyla anlatılmalıydı.

7 Haziran 1925 günü Heisenberg Göttingen'i sağlık nedeniyle denebilecek bir sebepten terk etti. Başı dönüyordu; sadece kafasında dönen düşünceler nedeniyle değil, polen alerjisi nedeniyle de. Sonraki iki hafta boyunca Kuzey Denizi'ndeki kayalık Helgoland Adası'nda yaşarken kuantum mekaniği çalışmasının ilk versiyonunu hızlı bir şekilde tamamladı. Bu çalışmasında Heisenberg, gezegenler için ölçülebilir pozisyon değişkenlerini, spektrum geçişlerinin frekansları ve yoğunluklarıyla yerli yerine yerleştirdi. Bunlar atomlar için ölçülebiliyordu. Diğer bir deyişle, atomun elektron pozisyonu olan x'i devre dışı bıraktı ve yerine tanımlanabilir yeni bir değişken yerleştirdi. Bu değişken iki enerji seviyesi arasındaki ya frekansla ya de spektrum geçişlerinin yoğunluğuyla ilişkiliydi. Yeni değişkenleri için bazı ilişkiler geliştirdikten sonra, temel Newton fiziği üzerinden bu değişkenlerin zamanla nasıl değiştiklerini tanımladı. Bir atom,

her biri farklı yoğunlukta pek çok spektrum geçişi potansiyeline sahip olduğundan, Heisenberg'in kuantum mekaniği bir sürü eşitlik içeriyordu.

Heisenberg'in Helgoland'da bitirdiği çalışması oldukça tahrik ediciydi ancak henüz tamamlanmamıştı. 20 Haziran gibi bir tarihte Heisenberg Helgoland'dan ayrıldı ve Pauli'yi ziyaret ettiği Hamburg üzerinden tekrar Göttingen'e dönüş yolculuğuna başladı. Heisenberg Pauli'ye Helgoland sonuçlarını anlattı ve Pauli'nin eleştirileriyle değil de cesaretlendirici sözleriyle karşısında çok şaşırdı. Ondan sonraki iki haftada boyunca Heisenberg sıkı çalışarak Helgoland çalışmasını yayına uygun hale getirdi. 9 Temmuz 1925'de nihayet taslağı bitirdi.

Bu aşamada Heisenberg'in çalışması ne doğru ne de yanlış denebilecek bir durumdaydı. Yeni teorisini hidrojen atomuna uyguladı ancak sonuç alamadı. Bu başarısızlık Heisenberg'in cesaretinin kırıldığı nokta oldu ve meseleye yeni yaklaşımının nasıl olacağı konusunda kararsız kaldı. Yine de düşünceleri kâğıt üzerinde gayet tahrik ediciydiler. Kendi kendine yeni fikirlerinin nasıl bir etki yaratacağını hesaplayamadığından, bağımsız bir eleştirmene ihtiyacı olduğuna karar kıldı. Bu iş için arkadaşı Wolfgang Pauli'den daha uygun kimse bulamazdı. (bkz. RESİM 7.1 ve 7.2)

En başından beri Pauli ve Heisenberg arasında özel bir ilişki vardı. Sosyal anlamda arkadaş değillerdi aslında -zira yoğun yaşam tarzları böyle bir arkadaşlığı sürdürmeyi imkânsız kılıyordu- ancak onları bir arada tutan yakın bir iş arkadaşlıkları vardı ve birbirlerinin entelektüel kapasitesinden ziyadesiyle haberdardılar. Pauli Münih'e gelmiş ve Sommerfeld'in öğrencisi olarak doktorasını yapmıştı. Son derece saygılı biri olmakla birlikte, meslektaşlarının ve arkadaşlarının entelektüel ürünlerinin sıkı bir eleştirmeni olarak ün salmıştı. Pauli, kendisinden daha genç olan Heisenberg'in bir ev ödevini değerlendirmek üzere okuduktan sonra, "Sen tam bir çatlaksın!" demişti. Heisenberg ise Pauli'nin bütün afra tafrasına rağmen yoğun çalışmasına devam ederdi.

Yeni teorisinin istediği sonuçları vermemesi karşısında Heisenberg, Pauli'nin değerlendirmesine ihtiyaç duydu. 1925 yılının Temmuz ayında bütün çalışmayı Pauli'ye aktardı. Çalış-



RESİM 7.1 Werner Heisenberg



RESİM 7.2 Wolfgang Pauli

manın yanında gönderdiği mektupta Heisenberg, ya bu çalışmasını tamamlayıp yayınlamak istediğini, ya da tamamını yakacağını yazıyordu. Kararını verebilmesi yönünde en sıkı eleştiriyi istiyordu arkadaşından. Birkaç gün içinde Heisenberg istediği tepkiyi aldı; Pauli sevinç içerisindeydi. Uzun süre sonra Heisenberg'in çalışmasını görmüş ve atom fiziği konusunda rasyonel bir ilerleme kaydettiğini düşünmüştü.

Pauli'nin de desteğiyle Heisenberg, Temmuz ortası gibi çalışmasını Born'a götürdü ve ondan bu çalışmayı yayınlayıp yayınlamaması hakkında kendisine fikrini söylemesini istedi. Born, Heisenberg'in çalışmasından öylesine etkilendi ki, ".... Bütün gece neredeyse hiç uyumadı." Uykusu, gün yüzüne çıkmayı reddeden hayal meyal bir hatırayla bölündü. Kendini Heisenberg'in çalışmasına alabildiğine verdiği günler boyunca düşündükleri, söz konusu hayal meyal hatırayı da saklandığı gölgeli köşelerden dışarı çıkartmıştı. Born, Heisenberg'in ardı ardına gelen spektrum frekansları ve yoğunluk denklemlerine baktıktan sonra, bunların aslında matris matematiği aracılığıyla ifade edilebileceğini gördü. Çalışmayı, o günlerin en çok izlenen fizik yayını olan *Zeitschrift für Physik* dergisine yayınlanması için gönderdi ve Born, Pasqual Jordan ile birlikte, Heisenberg'in düşüncelerine güç katacağını düşündüğü matematik uygulamaları geliştirdi. Dört aydan kısa bir sürede, kuantum mekaniğinin matematiksel temellerinin açıklandığı iki makale -ilki Born ve Jordan tarafından, ikincisi de Born, Heisenberg ve Jordan tarafından- tamamlanmıştı.

28 Temmuz günü Heisenberg, Cambridge Üniversitesi'nde bir konuşma yapması amacıyla davet edilmiş ve çalışmalarını kritik vermesi amacıyla Born'a verdikten hemen sonra bu seminer için şehirden ayrılmıştı. Heisenberg, söz konusu seminerde yeni bitirmiş olduğu çalışmasından söz etmemiş, ancak semineri izleyenler arasında bulunan Ralph Fowler, kendisinin son çalışmalarıyla ilgili söylentileri duymuştu. Fowler, o günden birkaç hafta sonra Heisenberg'in çalışmalarını gözleriyle gördüğünde de, ilk işi bunları öğrencisi Paul Dirac'a göndermek olmuştu. Dirac o yıllarda fizikçiler arasında henüz tanınmamıştı çünkü elektrik mühendisliği eğitimine henüz başlamış ve

sadece yirmi üç yaşındaydı. Ancak kısa bir süre sonra Dirac da elit fizikçiler cemaatinin bir üyesi haline gelecek ve kuantum mekaniğinin temellerini kuranlardan biri olacaktı.

Bir hafta içinde Dirac, Heisenberg'in makalesinin atoma yeni bir anlayış getiren derin bir temel içerdiğini gördü. Dirac'ın Heisenberg'in makalesinden yola çıkarak yaptığı ilk çalışma, görelilik düşüncesini işin içine sokmak oldu. Bu çalışma başarısız olmuştu. Çalışmanın tıkanma noktası, bir Ekim ayı Pazar yürüyüşünde, Dirac'ın aldığı derslerde öğrendiği matematik çözümlemeleri hatırlamasıyla aşıldı. Hatırladıkları gerçekten verimli sonuçlar verdi ve Dirac, kısa bir süre sonra bununla ilgili makalesini yazdı: *Kuantum Mekaniğinin Temel Denklemleri* (İng.: *The Fundamental Equations of Quantum Mechanics*). Makale, üç hafta sonra *Proceedings of the Royal Society* dergisinin 7 Kasım sayısında yayınlandı ve kısa sürede bir klasik halini aldı. Dirac makalenin el yazması bir kopyasını Heisenberg'e göndermiş, Heisenberg de cevaben, bu "kuantum mekaniği üzerine muazzam güzellikteki makale" için kendisini kutlamıştı.[42]

1925 yılının sonlarına doğru, kuantum mekaniğinin temel olarak iki versiyonu bulunmaktaydı: Heisenberg'inki ve Dirac'ınki. Her iki tezde de fizik üzerine düşünceler soyut ve tuhaftılar. Kullanılan matematik çoğu insana yabancıydı. Büyük İtalyan fizikçisi Enrico Fermi bile bu düşünceleri yabancı bulmuştu. Kuantum mekaniği düşüncesinin etkisini tam olarak anlatabilmek için gereken bir uygulama icat etmek lazımdı. Amerikalı fizikçi J. H. Van Vleck, "Birinin çıkıp, hidrojen atomunun orijinal Bohr teorisindekiyle aynı enerji seviyelerine sahip olduğunu gösterdiğini görmek için sabırsızlıkla bekliyorum, zira bu yapılmazsa, yeni teori bir kuruntudan öteye geçmeyecektir," demişti.[43]

Bir kez daha hidrojen atomu işaret ediliyordu. Hem Pauli ve hem de Dirac bağımsız olarak, yeni teori için hayati öneme sahip testlere başlamışlardı bile. Bu teori acaba hidrojen atomunun spektrumunu açıklayabilecek miydi? Pauli muazzam bir matematik bilgisine sahipti ancak içini kemiren bir endişeyle, Born'un karmaşık matris matematiğinin fizik alanındaki fikirlerin bütün gelişimini -ki en önemlisi bu gelişmeydi- yavaşlatacağı hatta bozacağından rahatsızdı. Aslında Pauli, Born'un geliş-

tirdiği matematiksel sistemde ona yardımcı olmayı reddetmişti. Heisenberg'in düşüncesini matris matematiği çerçevesi içine yerleştiren Born ve Jordan, hidrojen atomuna yeni bir biçim vermeye yeltenmişlerse de, başarısız olmuşlardı.

Bütün kuşkularına rağmen Pauli de hemen matris matematiğinin karışık yapısını öğrenmiş ve hidrojen atomunun kuantum mekaniği üzerine geliştirilen yeni Heisenberg versiyonuna bunu uygulamıştı. Üç haftadan kısa bir sürede Pauli, 1913 yılında Bohr'un elde ettiği formülü elde etmeyi başarmıştı, ancak bu defa formüle giden yol daha uyumlu ve mantıklıydı ki bu da yeni bir kuantum mekaniği teorisiydi. "Burada gösterilen," diye yazıyordu Pauli, "yeni kuantum mekaniğinin Balmer terimlerini doğrudan çıkartabiliyor olduğudur."[44] Böylesine ciddi bir gösterimi başaran kuşkucu Pauli de böylece Born, Heisenberg ve Jordan'ın matris matematiği formulasyonlarına inanan biri haline geliyordu.

Haberleri ilk alan Heisenberg'di. Çok mutlu olmuş fakat teorisine Pauli'nin bu denli hızla ve böylesine büyük bir katkıda bulunmuş olmasından dolayı, bu adamın yetenekleri karşısında korkuyla karışık bir hayranlık duymuştu. Bohr da havadisleri neredeyse Heisenberg kadar çabuk almıştı. "Büyük bir mutlulukla," diye yazıyordu 13 Kasım tarihli mektubunda Pauli'ye, "haberlerinizi alıyorum.... Balmer formülüne ulaşmanız büyük bir başarı."[45] Bohr'un bu kadar mutlu olmasının bir sebebi vardı; kendisinin Balmer formülüne yaptığının aynısını, Pauli de kuantum mekaniği teorisi üzerinden yapıyordu.

Bir süre sonra Dirac, kendi versiyonu olan yeni kuantum mekaniği teorisini hidrojen atomu üzerinde uyguladı. Hidrojen atomuna Dirac'ın yaklaşımı çok farklıydı ve Pauli'nin metodundan daha genel bir yaklaşımdı. Bu yaklaşım da hidrojen atomunun Balmer spektrumunu açıklamakta başarılı olmuştu. Dirac'ın hidrojen atomu üzerine yazdığı ve *Proceedings of the Royal Society* dergisinde yayınlanan makale, Pauli'nin makalesinin *Zeitschfift für Physik* dergisinde yayınlanmasından kısa bir süre önce gerçekleşmişti ve bunun nedeni de, İngiliz dergisinin daha hızlı yayma girme becerisiydi. Heisenberg mutluluktan uçuyordu ve Dirac'a 1926 yılının başlarında yazdığı mektubunda, "Sizi tebrik

ederim. Çalışmanızı okuduğumda çok heyecanlandım," diye yazıyordu.[46]

1925 yılının güz döneminde Born, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Massachusetts Institude of Technology bünyesinde ders veriyordu. Kendisini izleyenlere, "Hidrojen spektrumunu açıklıyor olmak Bohr'un teorisinin ilk büyük başarısıydı," diyerek durumu hatırlatıyordu. Ve sonra şöyle ilave ediyordu: "Eğer yeni teori bu alanda [yani hidrojen atomunun spektrumunu açıklamakta] başarısız olsaydı, her ne kadar kavramsal avantajlara sahip olsa da, terk edilmek durumunda kalacaktı. Ancak Pauli'nin bize gösterdiği gibi, yeni teori bu testi başarıyla geçmiştir."[47]

Hidrojen spektrumunu açıklamış olmakla, yeni teori kuantum mekaniği hayati bir testi geçmiş bulunuyordu. Geriye, sayısız detay kalıyordu.

8

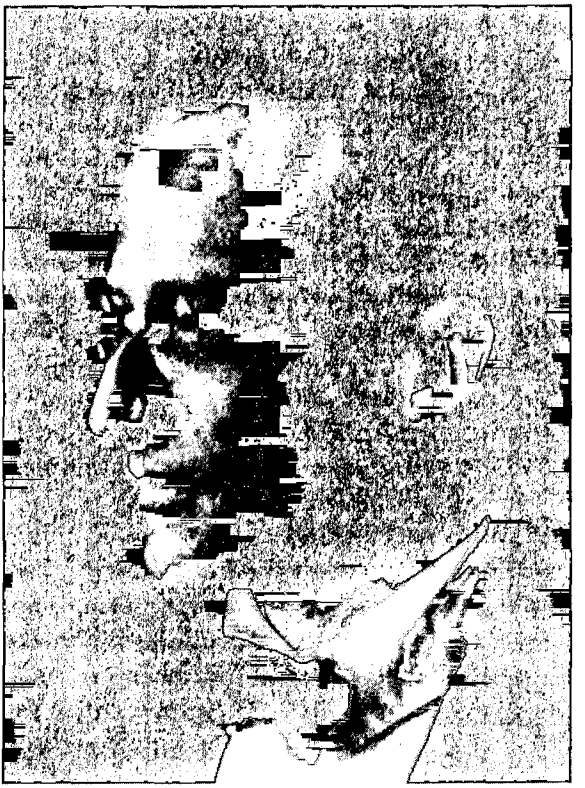
Hidrojen Atomu: Dalga Mekaniğinin Doğumundaki Ebe

Erwin Schrödinger, 1926

Atomların en basiti olması nedeniyle oynadığı özel rolde hidrojen, bilim tarihindeki bazı önemli olaylarda sahnenin yıldızı olmuştur.

—Daniel Kleppner

Fizikte sayılar öylesine önemlidir ki, sadece gerçel sayılar yeterli olmayıp, denklemlerde sıklıkla sanal sayıların da kullanıldığı olur. Fizikçiler sayılara sevdalı insanlardır, dolayısıyla sanal sayıları kullanmak o kadar da şaşırtıcı sayılmaz. Ancak fizik biliminin içinde görülen sanal bir kedi elbette şaşırtıcıdır. Söz konusu kedi, Erwin Schrödinger'in kedisidir. Bu hayali kedi, Erwin Schrödinger'in kendi kuantum mekaniği teorisini yaratırken yararlandığı ve teoriden yapılan çıkarımları araştırmak amacıyla 1935 yılında tasarladığı bir düşünce deneyinin bir parçası olarak icat edilmiştir. Ve kuantum mekaniğinin yorumunun son derece merak uyandırıcı olmasından ve meseleleri anlamak akılları sürekli kurcaladığından, Schrödinger'in



RESİM 8.1 Erwin Schrödinger

hayali kedisi de hâlâ yaşamaktadır. Yakın geçmişte bu kedi hayal âleminden çıkarılıp laboratuar ortamına alınmıştır. Schrödinger'in kuantum mekaniğinin keşfindeki rolünü ele aldıktan sonra, bu meraklı kedinin öyküsüne yeniden döneceğiz.

1925 yılının ortalarından 1926 yılının ilk aylarına kadar kuantum mekaniği ile ilgili başarılar hızlı bir gelişme göstermişti. Atomik sistemler üzerine yapılan deneysel ölçümlerden alınan sonuçları açıklayabilen tutarlı bir kuantum teorisi yaratmak için yıllar süren yoğun çabalar sonucunda entelektüel çıkmazlar ortadan kaldırılmış ve çağ açar nitelikteki sonuçlar oluk oluk

akmaya başlamıştı. 1926 yılının başlarında kuantum mekaniğinin temel olarak iki versiyonu bulunmaktaydı. 27 Ocak 1926 günü, saygın Alman fizik dergisi *Annalen der Physik* editörleri tarafından, kuantum mekaniğinin üçüncü versiyonunu içeren bir makale teslim alındı. Makalenin yazarı, Zürih Üniversitesi'nde teorik fizik profesörü olarak çalışan Erwin Schrödinger'di (bkz. Resim 8.1). Bu makale, 1926 yılının ilk altı ayında Schrödinger'in yoğun yaratıcı faaliyetlerinin fışkırması niteliğinde ardı ardına ortaya çıkan altı makalenin ilkiydi. Bütün makaleler yapısal anlamda önemliydi ama bu ilk makale çok özeldi. Söz konusu ilk makalede Schrödinger, hidrojen atomunun yardımıyla kuantum mekaniği teorisinin kendi versiyonunu geliştiriyordu.

Schrödinger'in klasik makalesini ortaya çıkartma sürecinde yaşadıklarının izini sürmek iki sebepten dolayı zordur. İlk olarak, Pauli ve diğer fizikçilere yazdığı mektuplar yoluyla konuyu herkese açan Heisenberg'in tersine, Schrödinger böylesine mektuplar yazıp kendini hiç açık etmemişti. Çıkan dergilerin tümünü tutmuş, ancak bu dergilerin de en önemlileri kaybedilmişti. Schrödinger hiçbir zaman ünlü sonuçlarına nasıl ulaştığını anlatan kronolojik bir açıklama yayınlamamıştı. İkinci olarak ise, Schrödinger'in görüşlerini geliştirdiği dönemin son derece kısa bir zaman dilimine sıkışmış olması ve düşünce sürecinin evrimini yeniden yapılandırmaya kalkışmasının son derece güç oluşuydu. Bütün bunlara rağmen, söz konusu sürece ait birkaç bilgiye sahibiz.

Örneğin, 1925 yılının sonlarında Schrödinger'in Louis de Broglie'nin makalesini okuduğunu biliyoruz. Bu makalesinde genç Broglie, parçacıkların daima kendilerine has dalgaboyları olduğu tezini ortaya atıyordu. Schrödinger, Einstein'a yazdığı 3 Kasım tarihli mektubunda, "Birkaç gün önce Louis de Broglie'nin son derece zekice yazılmış tezini büyük bir ilgiyle okudum ve sonunda ciddi biçimde kendimi kaptırdım," diye yazıyordu.[48] Bir de, Schrödinger'in Zürih'teki meslektaşı Peter Debye'nin, kendisinden Broglie'nin makalesi üzerine Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü'nde (E.T.H.) bir seminer vermesini istediğini biliyoruz. Bu seminer muhtemelen Kasım ayında,

Schrödinger'in Einstein'a yazdığı mektuptan sonra gerçekleşti. Ve dahası, Schrödinger'in madde dalgaları içerikli Broglie çerçevesini görelilik kuramı açısından ele alarak genellemeye çalıştığını biliyoruz. Aslında, bulgular öyle gösteriyor ki, Schrödinger ünlü dalga denklemi formülünün ilk formuna görelilik kuramını uygulayarak ulaşmıştı. Ancak bulduğu bu sonucu sonra kendisi reddetmişti çünkü eldeki deneysel veri sonuçlarıyla örtüşmüyordu. Eğer elektronun spin özelliğinden haberi olsaydı -ki kısa bir zaman önce keşfedilmişti- görelilik esasına göre çıkarttığı sonuçlar gerçekten çok cesaretlendirici nitelikte olacaklardı. Maalesef elimizde Schrödinger'in bu görelilik esaslı versiyonunu anlatan hiçbir makalesi yok. Bir başka bildiğimiz de, Schrödinger'in dalgaların sürekliliğini ve matematiksel olarak ifade edilişlerini felsefi olarak ilgi çekici bulduğudur. Son olarak bildiğimiz de, Schrödinger'in 1925 yılbaşı tatilinden kısa bir süre önce bir seyahate çıktığı ve 1926 yılının Ocak ayına kadar da evine geri dönmediğidir.

Schrödinger'in Arosa'daki Villa Hervig'de geçirdiği bu tatil çok özeldi. Beraberindeki genç kadının kimliği tam bir gizem olarak kaldı. İşte bu romantik dönem, Schrödinger'in kuantum mekaniği üzerine kendi versiyonuna ulaştığı zamandı. Söz konusu versiyon, Heisenberg'in kuantum mekaniği teorisinden ayrılsın diye bir süre dalga mekaniği olarak adlandırıldı. O yılın Ocak ayında Schrödinger, konuyla ilgili makalesini yayınlanmak üzere ilgili yerlere gönderdi.

Schrödinger'in klasik makalesi şu ilk cümleyle başlıyordu: "Bu makalede ilk olarak, en basit atomik yapıya sahip hidrojen atomunu ele almayı ve alışılagelmiş kuantum koşullarının, içine 'tam sayılar' kavramının yerleştirilmediği diğer bir varsayımla yer değiştirilebileceğini göstermeyi arzuluyorum."[49] Bu cümlede dikkat edilmesi gereken iki konu vardır. İlki, hidrojen atomuna ait bir açıklamanın Schrödinger'in dalga mekaniği teorisine net bir şekilde temel teşkil ettiğidir. İkincisi de, bu ilk cümleyi izleyen satırlarda, hidrojen atomunun Bohr modelinde bir biçimde özel bir amaca hizmet eder gibi görülen kuantum sayılarının ("tam sayıların"), Schrödinger'in fiziksel ve matematiksel yaklaşımında doğal bir sonuç olarak ortaya çıktığıdır.

Schrödinger'in makalesinde yer verdiği matematik, fizikçilerin aşina oldukları bir matematikti. Schrödinger denklemi olarak bilinen ünlü dalga denklemi, bugün modern bilimin her yerinde bulunur:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}[E - V(x, y, z)]\,\psi = 0.$$

Schrödinger bu dalga denklemini hidrojen atomu için uygun bir formda -yani bir negatif yüklü elektronun, bir pozitif yüklü proton (çekirdek) yörüngesinde olması formunda- kurmuştu. Bu denklemde Schrödinger'in özellikle ilgilendiği değişken *E*, veya enerji, hidrojen atomunun enerji seviyelerini veriyordu. Denklemi çözdüğünde, hidrojen atomunun enerji seviyelerinden dışarı salınan enerji için Schrödinger, "Dolayısıyla buradan, Balmer terimlerine karşılık gelecek şekilde düzenlenmiş ve gayet iyi bilinen Bohr enerji-seviyeleri elde edilir," diyordu.[50] Bohr'un öngördüğü üzere, bu enerji seviyeleri arasındaki kuantum geçiş, ya da Schrödinger'in adlandırdığı gibi, Balmer terimleri, deneylerle gözlemlenen Balmer serileri ile aynı frekanslara sahiptiler. Bu metotla enerji seviyelerinin elde edilmesi sürecinde Schrödinger, "Bana burada hayati öneme sahip gibi görünen, 'tam sayılar' varsayımının kuantum yasalarına artık gizemli biçimde girmek durumunda olmadığı..." gerçeğinin altını çiziyordu.[51]

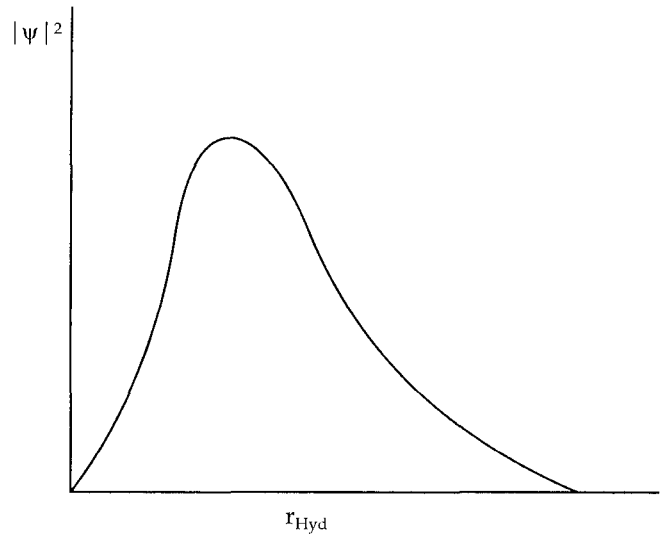
Schrödinger'in makalesi, *Annalen der Physik* dergisinin 13 Mart sayısında yayınlandı. Makalenin yayınlanmasından kısa bir süre sonra Pauli, her zamanki açık sözlülüğüyle meselenin içine dalıyor ve Pasqual Jordan'a yazdığı mektubunda, "Bu makalenin son zamanlarda yayınlanmış en önemli tezlerden birini içerdiğini hissediyorum. Lütfen dikkatle oku ve ciddi olarak kendini ver," diyordu.[52] Einstein, 16 Nisan tarihli mektubunda Schrödinger'e, "Bu çalışmanın üzerine oturduğu düşünce, gerçek bir dehanın filizlenmesi," diye yazarken, on gün sonra yazdığı diğer bir mektupta, "Kuantum koşulu formulasyonunla kararlı bir gelişmeye imza atmış olduğundan hiç kuşkum yok," diyerek onu kutluyordu.[53]

Pauli ve Einstein'ın süratle göstermiş oldukları pozitif reaksiyon, yeni fikirleri kucaklayan yeni matematiksel biçim üzerine

kayda değer sezgilerini açıkça göstermeleri bakımından önemliydi. Aslında Schrödinger'in makalesinin tam anlamı ve önemi öyle hemen görülebilecek cinsten değildi. Bir dalga denklemi yazıldığında, "Dalgalanan nedir?" sorusu gayet meşru bir soruydu. Bir su dalgasında, tepeler ve çukurlar su yüzeyindeki "dalgaları" meydana getiriyordu. Fakat Schrödinger'in dalga denkleminde bu tepeler ve çukurlar nasıl ifade edilmişti? Bu soru, Schrödinger'in eşitliğindeki ψ parametresinin ne olduğunu sormakla aynıydı. Söz konusu ψ parametresi üzerine Schrödinger'in de açıklamaları vardı ama 1926 yılının Haziran ayında ψ parametresine gerçek anlamını kazandırıp, böylece kuantum fiziğine çağ atlatan kişi Max Born olmuştu. 1954 yılında yaptığı Nobel Ödülü konuşmasında Born, "Bu yılın Nobel Ödülü'nü alma onurunu bana sağlayan yayınlanmış çalışmam, doğanın yeni bir fenomeninin keşfini değil, doğanın fenomenlerini düşünürken kullanılabilecek yeni bir düşünce biçiminin temellerini içermektedir," diyordu.[54]

Born, ψ parametresine yaptığı yoruma ulaşmasında -ki bunu dalga fonksiyonu olarak adlandırıyordu- Einstein'ın gayet anlaşılır biçimde ışığın dalga-parçacık ikiliğini açıklamak için benimsediği yoldan etkilenmişti. Ayrıca Born, Göttingen'deki meslektaşı James Frank'ın atomik saçılma deneylerinden de etkilenmişti. Born'a göre bu deney, parçacık doğasını kesin olarak açıklıyordu. "Frank ve yardımcısının elektron çarpışmaları üzerine gerçekleştirdiği her deney," diyordu Born, "bana, elektronun parçacık doğasına sahip bulunduğunun bir ispatı olarak görünüyor."[55] Bir elektron, atomdan ayrılıp dışarı saçıldığında, çarpışmanın doğasına bağlı olarak herhangi bir yöne doğru fırlayabilir. Born ψ değerini, daha doğrusu $|\psi|^2$ değerini, elektronun belli bir açıyla saçılması olasılığı ile eşitliyordu. $|\psi|^2$ değerinin büyük olduğu durumdaki açıda, elektronun bu açıda algılanma olasılığı da büyük oluyordu. $|\psi|^2$ değerinin sıfır olduğu açıdaysa elektron tespit etme olasılığı da sıfırdı.

Sözü geçen kuram hidrojen atomuna uygulandığında, $|\psi|^2$ değerinin sayısal karşılığı, elektronun en olası bulunabileceği yeri işaret eder: $|\psi|^2$ değerinin yüksek olduğu yer, elektronun tespit edilmesi olasılığının en yüksek olduğu yerdir. Resim 8.2'de çizilen $|\psi|^2$ grafiği, hidrojen atomunun merkezinden,



RESİM 8.2 $|\psi|^2$ değerinin sayısal karşılığı, bir bölgede elektronun bulunma olasılığını temsil eder. Söz konusu değer r_{Hyd} noktasında maksimum sayısal karşılığını bulur ki bu da hidrojen atomunun yarıçapıdır.

yani r = 0 noktasından dışa doğru uzaklaşmayı gösteriyor. $|\psi|^2$ değerinin en büyük sayısal karşılığını atomun merkezinden belli bir yarıçap uzaklığında aldığı görülüyor ki burası, elektronun zamanının büyük bölümünü geçirdiği yerdir. Schrödinger'in kuantum mekaniği bu yarıçapı 0,529 Å olarak ortaya çıkartır. Söz konusu 0,5 Å değeri sadece Bohr'un hidrojen atomu modeliyle örtüşmekle kalmaz, aynı zamanda bilinen hidrojen atomu büyüklüğünü de -yaklaşık 1 Å- doğrular. Schrödinger'in teorisi ve Born'un yorumu uyum içindedir.

Bu başlangıçtan, ψ fonksiyonu olasılıkla ilişkilendirilir hale gelir ki, bu da fizikçilerin alışık olduğundan değişik bir yaklaşımdır. Born'dan önce olasılık, dikkate alınmayan bir sonuçtu. Bir kumarbaz zarları fırlattığında, zarların fırlatılış detayları, zarların kendi özellikleri ve fırlatılan zeminin ayrıntıları tam olarak bilinmez ve dikkate alınmayan bütün bu değerler zarların göstereceği sayıların tam olarak tahmin edilmelerini engeller. Eğer bütün bu değişkenler tam bir hassasiyetle bilinmiş olsa,

zarların hangi sayıları gösterecekleri hatasız bir şekilde hesaplanabilirdi. Bu detayları dikkate almayışımız nedeniyle, sadece belli değerlerin denk gelebilmesi, mesela altı-altı gelme ihtimali verilebilir.

Born'un ψ fonksiyonuna yönelik olasılıkla ilgili yorumu kökten değişik bir yaklaşımdı. Atomik olayların meydana gelme olasılığı, örneğin tek bir nötronun bozunma olasılığı, dikkate alınmayacak bir olasılık değildir. Aksine, bozunma sürecini belirleyen kuantum kanunları, özünde olasılıklara bağlıdır. Burada detayların bilinmemesi söz konusu olmadığı gibi, bu ihtimali dikkate almamak da mümkün değildir. Kuantum sürecinin en temel karakteri olasılıklara bağlı olmasıdır. Bir nötronun ne zaman bozunacağını söyleyebilmemizin hiçbir yolu yoktur; nötronla ilgili bütün söyleyebileceğimiz, önümüzdeki on veya yirmi dakika içinde nötronun bozunarak bir protonla bir elektrona dönüşmesinin ancak belli bir olasılık dahilinde gerçekleşebileceği olacaktır.

ψ fonksiyonuna yönelik bu yorum fizik dünyasına büyük bir dönüşüm getirdi. Kuantum mekaniği öncesi fizik kanunları kesinliğin kanunlarıydılar. Örneğin, fizikçiler güneş tutulmalarının ne zaman olacağını kesin olarak tahmin edebiliyorlardı. Yine de bu kesinlik *ölçeğin* bir sonucuydu: Güneş, Dünya ve Ay öyle büyük kütlelerdi ki, bu hacimlerin kuantum davranış sonuçları, genel davranış yasalarına kıyasla çok çok küçüktü. Ama gene de, doğanın en temel seviyesinde, maddi dünyayı oluşturan temel bloklarda, doğa kanunları daima olasılığa bağlıdır. Einstein bunu kabul edemedi ve yaygın olarak bilinen yorumu, Tanrı'nın zar atmayacağı görüşü, onun, kuantum davranışlara yönelik olasılığa bağlı yaklaşımı nasıl reddettiğini gösterdi. Schrödinger de kendi çalışmasının filizi olan kuantum olasılık yaklaşımını asla kabul etmedi. 1926 yılının Ağustos ayında Willy Wien'e yazdığı mektupta Schrödinger, "Bugün itibariyle, Born'un düşüncesi olan, herhangi bir sürecin 'tamamen rastlantısal', yani topyekûn belirsiz olduğu yönündeki varsayımından artık hoşlanmıyorum. Böyle bir kavramsal yaklaşımın bize pek fazla katkı sağlayacağına inanmıyorum," diyordu.[56] Böylece Schrödinger, doğrudan kastetmediği halde, fiziksel gerçekliğin doğasını kökten değiştirmiş bulunuyordu.

Fizikçiler Schrödinger'in kuantum mekaniğinin işaret ettiklerini hemen kabul etseler de etmeseler de, bu düşünceler neden sonuç ilişkileri açısından tutarlıydı (pragmatikti) ve yeni matematiksel biçimin doğasındaki fırsatlar görülmek durumundaydı. Elektronların spin hareketlerini keşfeden ekibin üyesi olan George Uhlenbeck, "Schrödinger teorisi büyük bir ferahlık yarattı," diyecekti.[57] Heisenberg'in kuantum mekaniği teorisine hizmet eden tuhaf matris matematiğiyle karşılaştırıldığında, Schrödinger'in kullandığı matematik, fizikçilerin daha aşina olduğu ve nasıl kullanıldığını bildiği bir matematikti. Ve bu matematiği kullandılar da. Bir yandan da deneysel sonuçlar üretilmeye devam ediliyor ve Schrödinger denklemi atomik problemlerde muhteşem sonuçlar vererek uygulanıyordu.

Heisenberg ve Schrödinger, teorilerini tam olarak aynı amaca yönelik yaratmışlardı: Atomlar üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçlarını açıklayan teorik bir çerçeve sunmak. Her iki bilim adamı da teorilerinin geçerliliğini hidrojen atomu örneği üzerinden başarıyla kanıtlamışlardı. Her ne kadar benzer bir motivasyonla hareket ettilerse de, ulaştıkları sonuçlar gerek kavramsal ve gerekse matematiksel açıdan radikal biçimde farklıydı. Heisenberg'in kuantum mekaniği kendisini matrisler, değişmez değerler ve tuhaf hesaplama kurallarıyla ifade etmişti. Buna karşın Schrödinger'in kuantum mekaniği kendisini kısmi türev eşitlikleri ve bilinen metotlarla çözülebilen Schrödinger denklemi ile gösteriyordu. Heisenberg'in kuantum mekaniği kesintililik ve parçacık esasına göre kuramsallaştırılırken, Schrödinger'in kuantum mekaniği süreklilik ve dalga esasına göre kuramsallaştırılmıştı.

Bu iki teori arasındaki farklar Schrödinger'i düşündürmüş ve aynı yılın Şubat ayı sonlarına doğru bunları incelemeye başlamıştı. Mart ayında da, *Annalen der Physik* dergisinde analizlerinin sonuçlarını içeren makalesi yayınlandı. Söz konusu makalenin ilk cümlesi sahneyi kuruyordu: "İki başlangıç noktası arasındaki muazzam farklar ve Heisenberg'in kuantum mekaniği kavramları ve daha önce yine burada açıklanmış bulunan 'dalga' veya 'fiziksel' mekaniği açıklayan teori düşünüldüğünde, bu iki teorinin bilinen gerçekler ışığında birbirleriyle örtüşüyor olması çok tuhaftır."[58] Makalenin devamında da Schrödinger, kendi

teorisiyle Heisenberg'in teorisinin örtüşmesini kanıtlarıyla gösteriyordu.

Örtüşme bir yana, Heisenberg ve Schrödinger'in yaklaşımları arasındaki farklar, her ikisinin de birbirinin teorisini eleştirmesine meydan veriyordu. Bir yanda Schrödinger, Heisenberg'in yaklaşımındaki soyutluğa karşı baş kaldırıyor, teorinin sezgisel temellerden ve göz önüne getirilebilirlikten yoksunluğunu vurguluyor, bunun da yaratıcı uygulamalarda ortaya çıkartacağı zorluklara değiniyordu. Schrödinger, Heisenberg'in yaklaşımındaki zor metotların "bıktırıcı" olduğunu yazıyordu. Diğer yanda atomik alanı kesintili gören Heisenberg, Schrödinger'in yaklaşımının süreklilik ilkeli doğasını acıklı buluyordu. 1926 yılının Haziran ayında Pauli'ye yazdığı bir mektupta Heisenberg, "Schrödinger'in teorisinin fiziksel yönünü her düşündüğümde, onu daha da dayanılmaz buluyorum. Kendi teorisiyle ilgili görselleştirilebilirlik bağlamında yazdıklarını... çok saçma buluyorum,"[59] diyordu.

Heisenberg iki yaklaşım arasındaki derin farklılıkların çözümlenmesi gerektiği görüşündeydi. Schrödinger ile tarafsız bir ortamda yüz yüze yapacakları bir tartışma, bu konuda bir sonuca varılmasını sağlayabilirdi. Böyle bir tartışma için, Bohr'un da tartışmaya katılabileceği Kopenhag'dan daha uygun neresi olabilirdi ki? 11 Eylül 1926 günü Bohr, Schrödinger'e bir mektup yazarak, onu dalga mekaniği konusunda bir seminer vermek ve "sadece enstitü bünyesinde çalışanlardan oluşan daha dar kapsamlı bir katılımcı kitleyle atomik teori üzerine ucu açık bazı soruların derinlemesine açıklığa kavuşturulabileceği tartışmalar yapmak" üzere Kopenhag'a davet etti.[60] Söz konusu dar kapsamlı katılımcı kitlede diğerlerinin yanı sıra Bohr, Heisenberg ve Dirac da bulunuyordu.

Schrödinger Kopenhag'a 1 Ekim günü ulaştı ve Heisenberg'in ifadesiyle, "Bohr'un Schrödinger ile tartışması daha tren istasyonunda başladı ve her gün sabahın erken saatlerinden gece yarılarına kadar devam etti. Schrödinger Bohr'un evinde kaldı, dolayısıyla tartışmalarını hiçbir şey kesintiye uğratmadı."[61] Schrödinger kuantum sıçramaları görüşüne saldırdı; Bohr, bu sıçramaların göz önüne getirilemez olduğunu kabul etti ama onları savunmayı sürdürdü. Schrödinger atomun içinde neler

olup bittiğini bilmek istedi; Bohr bu soruyu, gündelik tecrübelerle oluşturulan kavramların atoma uygulanamayacağını iddia ederek karşıladı. Bu tartışmalar, Schrödinger sonunda hasta düşene kadar hiç durmadan devam etti. Bayan Bohr, hastalanan Schrödinger'e yiyecek ve çay getirirken, Niels Bohr hâlâ yatağın ayakucunda oturmuş tartışmayı sürdürüyordu.

Bohr ve Heisenberg, Schrödinger'le temel felsefi kanaatlerde ayrışıyor ve atom düşüncesinde bir türlü ortak bir noktaya ulaşamıyorlardı. Her biri aynı deneysel kanıtları kabul ediyor ve kullanıyordu ama bu kanıtların kavramsal anlamları konusunda asla anlaşamıyorlardı. Schrödinger doğal dünyaya bakıyor ve süreklilik görüyor, dolayısıyla enerji seviyeleri ve kuantum sıçraması teorilerini entelektüel bir aşağılama olarak algılıyordu. Bohr'a, "Eğer şu kahrolası kuantum sıçramaları gerçek olsaydı, kuantum teorisine bulaştığım için gerçekten çok pişman olurdum," diyordu.[62]

Neyse ki Schrödinger kuantum teorisine bulaşmıştı. Arosa'ya gittiği yılbaşı gezisinden 1926 yılının ortalarına kadar Schrödinger altı tane makale yazmış ve bu makaleler gelecek on yıllar boyunca hem fizik ve hem de kimya alanlarının şekillenmesine kılavuzluk etmişlerdi. İlk makalede hidrojen atomu belirgin bir rol oynamıştı. Schrödinger'in ilk makalesinde hidrojen atomuna yaklaşımı o günden günümüze dek pek çok ders kitabında yer almıştır. Makaleler serisinin üçüncüsünde Schrödinger yeniden hidrojen atomuna dönmüş, kuantum mekaniği yaklaşımını Stark etkisi olarak bilinen fenomene uygulamıştı. Hidrojen atomları bir elektrik alan içerisine yerleştirildiğinde, Balmer serisi ile ilişkilendirilen spektrum çizgileri değişir. Daha belirgin söylersek, her bir spektrum çizgisi birbirine çok yakın çizgi gruplarına ayrışır. Schrödinger, Stark etkisi adı verilen bu ayrışmayı hidrojen atomunu kullanarak başarıyla açıklar.

Schrödinger, kendisine ait kuantum mekaniği teorisiyle atomları ve molekülleri anlamada güçlü bir yöntem geliştirmişti. 1930'lu yıllar boyunca bu teori fizikçiler tarafından tercih edilen bir yaklaşım oldu. Ama yine de yıllar geçtikçe, fizikçiler Heisenberg kuantum mekaniğinin temelini oluşturan matris matematiğinde de hâkimiyetlerini artırarak, bazı problemlerin matris yaklaşımıyla daha doğal biçimde çözüldüğünü keşfetti-

ler. Günümüzde her iki yaklaşım da eşit ağırlıkta kullanılmaktadır.

Fizik problemlerine yaklaşımda kuantum mekaniğinin kullanılması, günümüzde çoğu fizikçi için rutin bir uygulama haline gelmiştir. Bugün artık deneylerin tasarımı ve sonuçlarının açıklanmasında kuantum mekaniği gündelik bir kullanıma kavuşmuştur. Bu teori yoluyla yapılan tüm öngörüler ziyadesiyle isabetli hale gelmiştir. Söz konusu muazzam başarılı fizik teorisi artık bütün fizikçiler tarafından anlaşılmıştır. Kuantum mekaniğinin doğal dünya ve gerçekliği anlamak için yeni ve alışılmışın dışında bir düşünüş biçimi gerektirdiği en başından beri açıkça kendini göstermiştir. Bu durum da bizi tekrar Schrödinger'in kedisine getirir.

Schrödinger, kuantum mekaniği yorumunun zaman içerisinde kazandığı yaygın kabulden dolayı giderek rahatsızlık duymaya başlamıştı. Bu yorum, hiç de şaşırtıcı olmayan bir biçimde, ağırlıkla Bohr'dan etkilenmiş ve adına da Kopenhag yorumu denmişti. Kopenhag yorumunda, eğer bir fiziksel sistem birden fazla durumda var olabiliyorsa, diyelim iki durumda birden var olabiliyorsa, söz konusu fiziksel sistem iki durum arasında "yayılmış" olmalıydı. Kuantum mekaniği jargonunda bu husus, sistemin iki durumunun üst-üste binmesi *(superposition)* olarak tarif ediliyordu. Schrödinger bu belirsizlikten hoşlanmıyordu. Entelektüel anlamda yaşadığı rahatsızlığı açıklamak için de, hayali kedi fikrini ortaya attı. Farazi olarak, kedi içinde radyoaktif bir madde bulunan bir odacığın içine konulmuştu. Radyoaktif bir madde öyle bir seçilmişti ki, belli bir zaman içinde bir bozunmaya uğraması olasılığı yüzde elliydi. Bozunma olursa, kedi ölecek; olmazsa, kedi yaşacaktı. Dolayısıyla, kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumuna göre kedi, aynı zamanda her iki durumda birden bulunacaktı. Yani, ne yaşıyor olacak, ne de ölmüş olacak, ama yarı yaşıyor ve yarı ölmüş olacaktı -bu durum da net olarak bir paradokstu.

Kedi paradoksu, Schrödinger'in 1935 yılında yazdığı *Kuantum Mekaniğinin Hâlihazır Durumu* (İng.: *The Present Situation in Quantum Mechanics*) başlıklı bir makalesinde ele alınmıştı.[63] O günden beri de Schrödinger'in bu hayali kedisi birçok ateşli tartışmanın kaynağı halini almıştır. Elbette bu kedi mese-

lesinin çelişkili doğası, en azından kısmi olarak, elektron benzeri atom altı nesnelerin davranışlarını anlamak üzere tasarlanmış kavramların, kedi benzeri makroskopik nesnelere de uygulanması tartışmasına zemin hazırlamıştır. Herşeye rağmen, bu durum değişmektedir: Kedinin hayal dünyasının bulanık âleminden sıyrılıp ortaya çıktığı görülüyor. David Wineland ve ekibi tarafından zekice tasarlanmış bir deneyde, atom altı ve makroskopik ölçek arasındaki farkları ortaya koyan bir sistem geliştirilmişti. Bu sistem, elektron dünyasıyla, insan ölçeğindeki büyük nesneler dünyası arasındaki anlaşılması güç sınırlara ışık tutmayı vaat ediyordu.[64] Söz konusu deney, hayali bir odacıktaki hayali kedi üzerine derinlemesine bir analoji içeriyordu. Deneyin sonuçları hâlâ tartışma konusudur ve sözü geçen paradoks hâlâ geçerliliğini sürdürmektedir. Bu konuda daha ileri düzeyde deney ve dikkatli incelemeler yapılması gerekmektedir. Şimdilik fizikçiler kedinin atomik bir versiyonunu yaratabilmiş olmasalar da, kuantum benzeri yavrular yaratmayı başarmaya çok yaklaşmışlardır.

Hidrojen atomuyla Schrödinger'in kedisi arasında bağlantı kurmak biraz zorlama gibi görünse de, kuantum mekaniğinin gelişiminde hidrojen atomunun oynadığı birleştirici rol ortadadır. Kuantum mekaniği, fizikçileri, çözüm üretmek anlamında entelektüel bir tartışmayla yüz yüze getirmiştir. Gizemli kedinin de bu tartışmaların bir parçası olması hiç şaşırtıcı değildir.

9

Hidrojen Atomu ve Dirac'ın Elektron Teorisi

Paul Dirac, 1928

Görelilik ve kuantum mekaniği bazında antimadde, modern fiziğin genel çerçevesinin bir parçasıdır.

—Maurice Jacob

Bir fizikçinin şöhretinin çalışmaları üzerine inşa edilmesi öylesine önemlidir ki, bu şöhret bir araştırma alanını tanımlar hale gelir ve söz konusu alanda çalışan diğer bütün araştırmacıları da etkiler. Ya da bir fizikçi, herhangi bir araştırma konusunda öylesine belirgin bir makale yazabilir ki, o fizikçinin kimliği çığır açan o makalesiyle anılır olur. Her ne kadar Britanyalı fizikçi P. A. M. Dirac, 1926 yılından başlayarak kuantum mekaniği üzerine birçok önemli makale kaleme almışsa da, 1928 yılında yayınlanan elektron üzerine yazdığı makale, Dirac'ın adı anıldığında hemen hemen bütün fizikçilerin aklına gelen ilk makaledir. *Elektronun Kuantum Teorisi, 1* (İng.: *The Quantum Theory of the Electron, I*) başlıklı bu makale, yirminci yüzyıl fiziğinin en önemli tezlerinden birini içerir.

Makale, "Yeni kuantum mekaniği teorisi noktasal electron yüküne sahip atomlara uygulandığında, deneysel ölçümlerle birebir örtüşmez," cümlesiyle başlar. "Bu uyuşmazlık, 'çift katlılık' *(duplexity)* fenomeni içermekte ve atom içindeki elektronun gözlemlenen kararlı seviyelerinin sayısı, teori tarafından verilen sayının iki katı çıkmaktadır."[65]

Dirac'ın burada işaret ettiği teori kuantum mekaniği teorisidir ve bu teori atomik yapıya ilişkin hem analiz ve hem de sentez yapmak için kavramsal bir çerçeve sunar. 1925 yılında kuantum mekaniği Heisenberg ve Schrödinger tarafından yaratıldığında, aynı yılın Ekim ayında keşfedilen elektronun bir temel özelliği ne kesinlikle Heiseng tarafından, ve ne de muhtemelen Scrödinger tarafından biliniyordu. Elektronun bu özelliği, doğasında bulunan açısal momentum, ya da 'spin' özelliğiydi ki, elektronun manyetik moment üreten minik bir mıknatıs çubuk gibi davranmasına neden oluyordu. [(ç.n.) 'Spin' hareketi, günlük deyimle, elektronun kendi etrafında dönmesi olarak tarif edilebilir.]

Spin, elektron bir manyetik alan içinde dönerken, yani bir manyetik moment halinde iken, kendini gösterir; kendini manyetik alanla aynı yönde (alana paralel) ya da ters yönde (alana antiparalel) konumlandırır. Söz konusu iki konumlandırmayla (paralel veya anti paralel) ilişkili enerjiler de çok az da olsa birbirlerinden farklıdırlar. Elektronun spin hareketi, tek bir enerji seviyesinin iki farklı enerji seviyesine ayrışması ve böylece tek bir spektrum çizgisi yerine sıklıkla iki spektrum çizgisi görünmesi etkisine sahiptir. Elektron spininin etkisini gözlemleyebilmek için oldukça gelişmiş spektroskopik ölçüm aletleri gerektiğinden, geçmişte bu etki gözden kaçmıştır. İşte bu etki, Dirac'ın ortaya attığı "çift katlılık fenomeni"dir *(duplexity phenomena)*.

Kuantum mekaniği teorisi geliştirilir geliştirilmez fizikçiler, kuantum mekaniği ile görelilik kuramı arasında bir bağlantı kurma zorluğuyla karşı karşıya kalmışlardı. Heisenberg ve Pauli, diğer birçok fizikçi gibi, söz konusu bağlantıyı bulmayı denemiş, ancak yaklaşımları hep Sommerfeld'in görelilik kuramını Bohr modeline uygulama çabalarını andırmıştı; yani, görelilik kuramına bir eklenti muamelesi yapılmış, her iki teorinin köklerinden filizlendirileceği yerde, görelilik kuantum mekani-

ğine aşılanmıştı. Gençliğinden beri görelilik kuramından çok etkilenen Dirac'ın aklındaysa başka bir yol vardı. O, genel prensiplerinin görelilik ve kuantum mekaniği teorilerinin üzerine dayandığı bir sentez istiyordu. Dirac, 1927 yılında Brüksel'de yapılan Solvay Konferansı'na katıldı ve Cambridge'e dönüşünde de, dikkatini bu iki büyük fizik teorisini bir araya getirmeye odakladı.

Paul Dirac alışılmışın dışında biriydi. Belki bunun nedeni, babasının genç Dirac'dan kendisini ana dili olan İngilizce yerine Fransızca olarak ifade etmesini talep etmesiydi. Sonuçta genç Dirac düşüncelerini Fransızca olarak ifade edemediğinden, çocukluğu boyunca sessiz kalmayı alışkanlık haline getirmişti. Sebep her neyse, yetişkin Paul Dirac alabildiğine sessiz bir kişiliğe sahipti. Dirac'ın sessizliği o denli belirgindi ki, fizikçiler arasında münasebetsiz şakalara bile neden olmuştu. Fizikte, zaman veya uzunluk gibi fiziksel değerlerin birimleri önemlidir. Fizikçiler arasında da sessizliğin birimi şaka yollu 'dirac' olarak adlandırılır olmuştu.

Dirac ile ilgili hikâyeler efsanevi niteliktedir. Bunlardan birinde, yaptığı bir konuşmanın ardından gelen yoruma karşılık, Dirac hiçbir şey söylememişti. Nihayet süre giden sessizlik artık dayanılmaz bir uzunluğa eriştiğinde, seminere liderlik eden kişi Dirac'a bu yoruma karşılık söyleyeceği bir şey olup olmadığını sormuştu. Dirac'ın tepkisiyse, ortada bir soru olmadığı yönündeydi. Kelimelere karşı tepkisinde çok katıydı; kelimeleri kendi kullanımındaysa son derece isabetli seçimler yapıyordu. Bir keresinde Bohr'a, bir cümlenin nasıl biteceğini bilmeden cümleye başlanmaması gerektiğini söylemişti. Cümlelerini öylesine bir titizlikle kuruyordu ki, kendisine bir soru sorulduğunda, genellikle daha önce kurduğu aynı cümleleri harfiyen tekrar ederdi. (bkz. Resim 9.1)

Dirac'ın sessiz kalma eğilimi beraberinde başka etkiler de yaratıyordu. Yalnız çalışıyordu. 1932 yılında Cambridge'de, bir zamanlar Isaac Newton'un işgal ettiği mevki olan Lucasian Profesörlüğü pozisyonuna atandıktan sonra pek çok araştırma öğrencisini bölüme kabul etmemişti. Meslektaşları, Dirac'ın neyle uğraştığı hakkında, çalışmaları tamamlanıp yayınlanana kadar çok az bilgiye sahip olabiliyorlardı. Dirac'a ancak çevre-



RESİM 9.1 Paul Dirac

sindeki herkes kadar yakınlaşabilen meslektaşı Nevill Mott, "Dirac'ın bütün keşifleri bitmiş halleriyle önümüze geliyordu. Bu keşifler hakkında önceden konuştuğunu veya konuşulan ortamlarda bulunduğunu hiç duymadım. Keşifler sanki gökten zembille inerlerdi."[66]

Dirac temel sorulara cevap arıyordu. Yalnızlığa duyduğu ihtiyaca ilave olarak, Dirac'ın öğrenci kabul etmedeki isteksizliği de belki temel sorunlara yönelik yoğun ilgisinden kaynaklanıyordu. Nihayetinde öğrenciler süre giden araştırma konula-

rıyla boğuşmak konusunda yeterli olgunluğa sahip olmayacaklar, yapısal konular üzerine boş gevezelikten başka bir şey yapamayacaklardı. Zorlu ve ilginç problemleri çözmek üzere bile, fizik teorilerini uygulamak yönünde zaman harcamaya eğilimli değildi. Bunun yerine, doğal dünyanın işleyişini sağlayan yapısal kanunlarla ilgileniyordu. Ona göre, bir teorinin matematiksel ifadesindeki güzellik, o teorinin geçerliliğine işaret ediyordu. Bu inancı, düşünceleriyle deneysel sonuçlar örtüşmediğinde moralini asla bozmamasının önemli bir sebebiydi. Kendi deyişiyle:

> Temel fizik kurallarının muazzam güzellikte ve güçlü matematiksel teorilerle ifade edilmesi, doğanın yapısal özelliklerinden biri gibi görünüyor. Bu ifadelerin anlaşılabilmesi için gayet yüksek standartta matematik bilgisi gereklidir... Sadece matematik üzerine çalışarak, geleceğin fiziğine hizmet edecek bir matematiğin nasıl olacağı konusunda tahminler yapmayı umabiliriz... Fizikte yaşanacak gelişmeler pekâlâ şu çizgide olabilir: İnsanlar önce denklemler keşfedecekler ve sonra bu denklemlerin ardındaki fizik düşüncesini geliştirmek için birkaç yıl çalışacaklardır.[67]

Kılavuz bir prensip olarak matematiksel güzelliği benimseyen Dirac, 1927 yılının Ekim ayında görelilik ve kuantum mekaniği teorilerini bir araya getirme çabalarına başladı. Aynı yılın sonunda da bunu başardı.

Dirac, elektron için hem görelilik ve hem de kuantum mekaniğinin gereklerini yerine getiren bir dalga denklemi bulma çabası uyarınca, çalışmasına büyük beklentiler yüklemişti. Çalışmasının başından sonuna kadar izleyeceği mantıksal yolu karıştıracak rastgele varsayımlar kullanmak istemiyordu. Elbette bu yolda ortaya koyması gereken entelektüel bir mücadele sürdürmek zorundaydı. Mücadele alanlarından biri, Pauli'nin daha önce tanımlamış olduğu elektron spini düşüncesini kullanmaya kalkıştığında karşısına çıkacaktı. Çalışmasındaki temel açılım, Pauli yaklaşımının kendi düşüncesine gereksiz bir sınırlama getirdiğini anlamasıyla geldi. Bu sınırlamaları ortadan kaldırdığında, istediği sonuçlara hızla ulaşmıştı -serbest elektron için bir

dalga denklemi bulmuştu. "Elektronun Kuantum Teorisi" başlıklı makalesi, *Proceedings of the Royal Society* editörlerince 2 Ocak 1928 tarihinde alınmış ve bir ay sonra da yayınlanmıştı.

Yüksek standartlara sahip bilim insanlarının çalışmaları genelde amacından, planlanandan ve beklenenden daha fazlasını içerirler. Dirac'ın elektron teorisinin durumu da böyleydi: Beklenmeyen sonuçlar doğal olarak ortaya çıkıyordu. Dirac'ın çalışmasının bir sonucu kesinlikle planlandığı gibi gelişmişti -eğer çıkarımları doğru olmasaydı, bütün teori çökecekti. Dirac'ın teorisinden doğal olarak çıkan ve hiçbir rastgele varsayım içermeyen sonuç, Sommerfeld'in on üç yıl önce geliştirmiş olduğu sağlam yapılı formüldü. Ancak Dirac'ın teorisi daha fazlasını da içeriyordu: Elektron spinlerinden çıkan sonuç, hidrojen atomunun doğru enerji seviyelerini ve spektrum çizgilerinin gerçek yapılarını veriyordu. Dirac'ın biyografisini yazan Helge Kragh, hidrojen atomunun spektrum detaylarının "Dirac denkleminin bir gösterisi" olduğunu belirtiyor.[68] Kitabın 15. ve 16. Bölümleri'nde göreceğimiz gibi, hidrojen spektrumu hâlâ bir tartışma konusu olurken, 1928 yılında Dirac denklemi, hidrojen atomunun ayrıntılarını başarıyla ortaya çıkartarak hayati bir testi geçiyordu. (bkz. Resim 5.3)

Dirac'ın elektron teorisi, hidrojeni tarif etmek konusundaki başarısından daha fazlasını da yapıyordu. Dirac elektrona ilk prensiplerden (from *first principles*) yaklaşıyordu, elektronun spin hareketini en baştan probleme dahil etmemişti. [(ç.n.) Fizikte bir problemin çözümüne hiçbir ön şart öne sürmeden, hiçbir sınırlama olmaksızın yaklaşmaya, "ilk prensiplerden yaklaşım" (approach from *first principles*) denir.] Elektronun doğru spini, Dirac'ın bulgularının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkıyordu. Elektron teorisi hidrojen spektrumunu net biçimde saptarken, aynı zamanda elektron spinini de tarif eder nitelikteydi. Elektronun manyetik özelliği, yani spini, elektronun elektrik yükü ve kütlesi cinsinden veriliyordu. Böylece görelilik ve kuantum mekaniğinin genel prensiplerinden spin anlaşılabiliyordu. Dirac, "Elektron spinini dalga denklemi içerisine getirmekle ilgilenmedim ve bu soruyu hiç düşünmedim bile... Bunun nedeni, asıl ilgilendiğim problemin kuantum mekaniğini görelilik kura-

mıyla birleştirmek olmasıydı... Daha sonra, en basit olası durumun bile spin içerdiğini keşfetmiş olmak gerçekten büyük bir sürprizdi,"[69] diyordu. Göttingen'deki fizikçiler Dirac'ın başarısını öğrendiklerinde hayretler içinde kalmışlardı. Léon Rosenfeld, Dirac'ın sonuçları ellerine ulaştığında Max Born ile birlikte çalışıyordu. Spin çıkarımı için Rosenfeld, "Bu buluş bir mucize olarak değerlendirildi," diyordu. "Genel görüş, Dirac'ın hak ettiğinden fazlasına sahip olduğu yönündeydi! Bu şekilde bir fizik kuramcılığı daha önce hiç görülmemişti! ... Ama Dirac denklemi daha görüldüğü anda bir *çözüm* olarak algılandı. Gerçekten harika bir iş olarak karşılandı."[70] 13 Şubat 1928 günü Heisenberg, Dirac'a yazdığı mektubunda, "Spin üzerine son çalışmanızı gerçekten büyük bir hayranlıkla karşıladım," diyordu.[71]

Dirac'ın görelilik ve kuantum mekaniğini birleştirme çalışmasından bir başka çok önemli ve tamamen beklenmeyen sonuç daha çıkıyordu. Bu sonuç sadece beklenmeyen nitelikte olmakla kalmıyor ve öylesine büyük bir problem yaratıyordu ki, Dirac'ın makalesinin yarattığı bütün hayranlığa rağmen fizikçilerin sinirli tepkilerine yol açıyordu. Söz konusu sonuç, Dirac denkleminin sıradan, negatif yüklü elektronu hedef almasına karşın, denklemin çözümünün bazı pozitif yüklü parçacıklara ilişkin de sonuçlar vermesiydi. Dirac'ın makalesinin yayınlanmasını izleyen üç yıl boyunca bu "pozitif parçacıklar" çeşitli yorumlara konu olmuştu. Yorumlardan biri de Dirac'ın kendisi tarafından geliştirilmiş ve "pozitif parçacıkların" aslında elektronlar arasındaki boşluklara karşılık geldiği belirtilmişti. Dirac, bu boşlukların "negatif elektron denizi" içerisinde pozitif göründüklerini söylüyordu. Daha sonraları Dirac, sözü geçen pozitif parçacıkları protonlar olarak tanımlamış, ancak J. Robert Oppenheimer bu saptamanın dayanıksız olduğunu göstermişti. Sonunda, 1931 yılının Mart ayında Dirac, geliştirdiği denklemden çıkan pozitif parçacığın, pozitif yüklü elektron olduğu düşüncesini ortaya attı -yani antielektron. Dirac, 1931 yılında yayınlanan bir makalesinde, "Boşluk denen şey -eğer böyle bir şey varsa- deneysel fiziğin henüz bilmediği, elektronla aynı kütleye sahip ve elektronun ters elektrik yüküne sahip yeni bir parçacık olsa gerektir," diye

yazıyordu.[72] İzleyen yılda, Dirac'ın "yeni bir çeşit parçacığı," California Teknoloji Enstitüsü'nden Carl Anderson tarafından keşfedildi. Pozitron adı verilen bu yeni parçacık, keşfedilen ilk antiparçacıktı *(antiparticle)*. Pozitronun keşfinde asıl önemli olan, antimaddenin *(antimatter)* düşünüldüğünden çok daha yaygın biçimde var olduğuydu.

Aslında Dirac antielektronun varlığını tahmin etmemişti. Fizikçilerden pozitronu keşfetmek için tasarlanmış deneyler yapmalarını da istememişti. Bu durumun, Dirac'ın keşiflerini yapış karakterinin bir parçası olduğu da tartışılabilirdi. Dirac söz konusu karaktere uygun biçimde sessizce bekledi. Diğer birçok fizikçi böylesi bir keşiften sonra dikkatleri üzerlerine çekmek için kendileri öneriler geliştirecekken, Dirac geliştirdiği teoriyle ortaya çıkan söz konusu parçacığın varlığıyla fazla ilgilenmemişti. Onun heyecanı, teorisinin güzelliğiyle ilgiliydi daha ziyade.

Dirac'ın elektronu sayesinde, bugün bütün evreni oluşturan parçacıkların antiparçacıklara sahip olduklarını biliyoruz. Antimaddenin varlığı, Dirac'ın muazzam denkleminin ortaya çıkarttığı bir diğer beklenmeyen sonuçtu. Matematik öylesine güçlü bir biçimde kullanılabilirdi ki, doğa kanunlarının içeriğini ifade eder hale gelebilirdi. Matematik, aklın bir ürünüdür ve dış dünyadan bağımsızdır; yani, matematikçiler muhteşem bir yeni matematik sistemi yaratabilir ve bunu yapmak için de gezegenlerin yıldızlar etrafında nasıl döndüğünü, ışığın prizmadan nasıl geçtiğini, atomların moleküller halinde nasıl bir araya geldiğini, moleküllerin tek hücreli canlılar içinde nasıl bir dayanışmayla bulunduğunu, genç birinin beynindeki nöronların nasıl sinyal ateşlediğini düşünmek zorunda değillerdir. Bazen kullanılan matematik son derece basit de olabilir; bazen de anlaşılması güç bir karışıklığa da sahip olabilir. Fizik ve matematik arasındaki bu gizemli ilişki, James Jeans'in söylediği gibi de düşünülebilir: Evrenin Büyük Mimarı bir matematikçidir.

Dirac'ın matematiksel denklemi tek bir satırda yazılabilir:

$$\frac{ih}{2\pi}\frac{\partial|\psi\rangle}{\partial t} = (c\vec{u}\cdot\vec{\mathrm{P}} + \beta mc^2)|\psi\rangle.$$

Bu küçük denklemin çözümünden hidrojen atomunun ayrıntıları, elektronun spini ve antimaddenin varlığı çıkar. Şairlerin doğru kelimeleri ardı ardına getirerek bize yepyeni bir kavrayış kazandırmaları gibi, Dirac da doğru sembolleri yan yana getirerek bize yepyeni bir kavrayış kazandırdı.

Dirac'ın eşi Margit'e göre Dirac'ın hayatta gazeteciler kadar korktuğu çok az şey vardı. Eğer mümkünse onları daima kendinden uzak tutardı. Pozitronun keşfinden bir yıl sonra, 1933 yılında Schrödinger ile birlikte Nobel Ödülü'nü aldığında bile basını atlatmayı başarmıştı. Bu ödül Dirac'a, kuantum mekaniğinin geliştirilmesi ve yaratılmasındaki katkıları nedeniyle verilmişti. Londra kökenli bir gazete, ödüllerin veriliş haberinde Dirac için, "Bir ceylan kadar ürkek ve Viktoryan bir bakire kadar alçakgönüllü," ifadesini kullanıyordu. Londralı gazeteci sadece doğruyu söylüyordu.

10

Hidrojen Nükleer Fizikçilere Kılavuzluk Ediyor: Döteryumun Keşfi

Harold Urey, 1932

Kendine has özellikleri nedeniyle döteryumun evrendeki dağılımı, maddenin gelişim tarihi hakkında güçlü bir ipucu teşkil eder.

—David N. Schramm ve Robert V. Wagoner

Fiziksel dünyamızı oluşturan neredeyse bütün kimyasal elementler farklı izotop formlarında bulunurlar. Ciğerlerimize çektiğimiz her nefes, oksijeni üç değişik izotop halinde vücudumuza sokar: O^{16}, O^{17} ve O^{18}. Bu oksijen atomlarının her biri, çekirdeğindeki 8 protonun yörüngesinde 8 elektron ihtiva eder. İlaveten, O^{16} çekirdeği sekiz, O^{17} dokuz ve O^{18} de on nötron barındırır. İçeriğindeki sekiz proton ve sekiz elektron, oksijenin periyodik tablodaki konumunu belirler ve bu sekiz elektron da kimyasal davranışlarını ortaya çıkarır. Oksijenin her bir izotopunun kimyasal davranışı da büyük ölçüde birbirine benzerdir. Ancak, oksijen izotoplarının ağırlıkları, çekirdeklerindeki nötron sayısının değişik olmasından ötürü birbirlerinden

farklıdır. Bu kütlesel eşitsizlik, göreceğimiz gibi, oksijen izotoplarının fiziksel davranışlarını etkilemektedir.

İzotopların keşfi, 1910 yılında Frederick Soddy tarafından yapılmıştır. Soddy daha önceleri Ernest Rutherford ile McGill Üniversitesi'nde birlikte çalışmış ve beraber *Radyoaktivitenin Nedeni ve Doğası* (İng.: *The Cause and Nature of Radioactivity*)[73] başlıklı, radyoaktiviteyi anlamanın temellerini ortaya döken bir makale yazmışlardı. Montreal'deki çalışmalarını takiben Soddy önce bir yıllığına Londra'ya gitmiş, ardından, izotop -1913 yılında ortaya attığı bir terimdir-^{74} keşfini yaptığı Glasgow Üniversitesi'ne geçmişti.

Soddy ve Rutherford, radyoaktif dönüşüm sürecinde bir kimyasal elementin atomlarının tamamen değişerek başka bir kimyasal elementin atomları haline gelebildiğini göstermişlerdi. Buna ilaveten, radyoaktif dönüşüm sonucu ortaya çıkan bazı atomların ağırlıklarının farklı olmasma rağmen özelliklerinin aynı kaldığı da Soddy'ye açıkça belli olmuştu. Bu atomlar, aynı kimyasal elementin izotoplarıydılar.

Soddy'nin izotop keşfi, Prout'un hidrojen atomunun kimyasal elementlerin temel inşa malzemesi olduğu yönündeki sıra dışı düşüncesini, bilim tarihinin aktif olmayan arşivine yerleştirmişti. Kimyasal elementlerin gözlemlenen ağırlıklarının izotopları nedeniyle farklılıklar gösteriyor olması, Prout'un inandığı üzere, diğer bütün element ağırlıklarının hidrojenin katları olduğu görüşünü doğrulamaya engel teşkil etmişti. Örneğin, oksijenin atomik ağırlığı 15,9994 ve klorun ağırlığı da 35,453 olarak saptanmıştı.

Döteryum hidrojenin izotopudur ve sıklıkla ağır hidrojen olarak anılır. Hidrojenin en bol miktarda bulunan izotopu, çekirdeğindeki bir proton ve yörüngesindeki bir elektronla H^1'dir. H^2, yani döteryumda ise, çekirdekteki protona bir de nötron katılmıştır. Doğadan alınan bir hidrojen örneğinin %99,985'i H^1 içerirken, sadece %0,015'i H^2 içerir; dolayısıyla, sıradan hidrojen (H^1) çok bol iken, ağır hidrojen (H^2) son derece nadirdir.[75]

Döteryumun keşfi, bu keşfe öncülük eden deneylerde bizzat yer almış fizikçilerden birine göre, bir "kaçırılmış fırsatlar ve hatalar hikâyesidir."[76] 1913 yılında iki bilim insanı New York Üniversitesi'nde suyun yoğunluğunu büyük bir hassasiyetle

ölçerken, döteryumu keşfettiler. Suyun yoğunluğunun aldıkları örneklerde değişik değişik çıktığını buldular ve saf suyun tutarlı bir tek yoğunluğa sahip olmadığı sonucuna vardılar. Aldıkları sonuçların farklılığı, ölçtükleri örneklerdeki döteryum miktarının farklı olmasından kaynaklanıyordu. Bu, döteryumun varlığına ilişkin ipucunun ortaya çıktığı ilk deneysel kanıttı. Eğer o bilim insanları, saf su üzerinde elde ettikleri deneysel sonuçları farklı moleküler ağırlıklara yorsalardı, döteryumun varlığını yirmi yıl önce pekâlâ keşfetmiş olabilirlerdi ama söz konusu keşif ellerinden kayıp gitmişti.

1929 yılında, Harold Urey ve Berkeley'in kimyacılarından Joel Hildebrand otellerinden çıktılar, bir taksiye atladılar ve katılacakları konferansın yolunu tuttular. Ferdinand G. Brickwedde de onlarla birlikteydi ve aralarındaki konuşmaya şahit oldu. Hildebrand Urey'e, Berkeley'deki kimyacıların oksijenin izotopları olan O^{17} ve O^{18}'i keşfetmiş olduklarını haber veriyordu. Hildebrand, "Bundan daha önemli bir elementin izotoplarını keşfedemezlerdi," dediğinde Urey'in tepkisi, "Hayır, hidrojenin izotoplarını keşfetmedilerse o kadar da önemli sayılmaz," olmuştu.[77] 1931 yılında, Urey hidrojene ait bir izotop olup olmadığına yönelik yaptığı deneylere başlamadan hemen önce, Berkeley'de iki fizikçi, atomik ağırlığa temel teşkil eden fiziksel ve kimyasal etmenleri araştırıyorlardı. İki yaklaşım, küçük farklarla ortaya konan sonuçlara öncülük etti. Bu araştırmalardan, hidrojenin bir izotoplar karışımı olduğu sonucu çıkarıldı -çoğunlukla H^1 ve küçük bir miktarda da ağır formu. Söz konusu çalışma, 1 Temmuz 1931'de *Physical Review* dergisinde yayınlandı. Urey dergiyi aldığında, derhal araştırmalarına başladı.

Urey'in araştırmaları iki parçadan oluşuyordu. İlk olarak, içinde 7.000 H^1 içeren her hidrojen örneği yaklaşık olarak bir tane döteryum, H^2, içerdiğinden incelenecek örnekte ağır izotop konsantrasyonunu yükseltecek bir yöntem geliştirmek gerekiyordu. İçeriği döteryum bakımından bir şekilde zenginleştirilmiş bir örnek, döteryumun masalsı varlığını tespit etmek ve sonuçların daha kesin olmasını sağlamak anlamında işi kolaylaştıracaktı. İkinci olarak, döteryumun varlığını tespit edecek deneysel bir yöntem geliştirmek gerekiyordu. Deneyin planı belirlenmişti: Yoğunlaştırma ve tespit etme.

Urey ilk olarak, şişelenmiş hidrojen örneği kullanarak içinde döteryumu tespit etmeyi denedi. Columbia Üniversitesi'nde profesör olan Urey, meslektaşı George Murphy'yi de yanına aldı ve birlikte, hidrojen üzerinde dikkatli bir spektroskopik çalışma yapmak üzere aparatlar hazırladılar. Özellikle, Balmer serisi spektrum çizgilerini elde edebilecekleri bir deney tasarladılar. İki hidrojen atomu, hafif olan ve ağır olan, aslında aynı spektrum çizgilerini verecek, ancak ağır izotopla ilişkili spektrum çizgilerinin dalgaboyları, hafif izotopunkilere göre biraz sapma gösterecekti. Yaptıkları hesaplamalara göre, dalgaboyu konumlarında belli belirsiz çizgiler görmeyi bekliyorlardı. Gerçekten de hesaplarının tahmin ettiği dalgaboylarında çok zayıf çizgiler gördüler. Buradan yola çıkarak, gördüklerinin hidrojenin ağır formuna kanıt olabileceğine inandılar. Ama daha güçlü kanıtlar bulmak istiyorlardı. Olası rastlantısal sapmalar ya da bazı alet hataları tarafından yönlendirilmek istemiyorlardı. Bu aşamada Urey, incelenen örnekteki döteryum konsantrasyonunu arttırmaya yönelik bir metot bulunması gerektiğine karar verdi.

Bu meseleye yönelik Urey, Ulusal Standartlar Ofisi'ne gidip, orada Brickwedde ile konuştu. Urey'in düşüncesi, sıvı hidrojeni damıtmak ve böylece içindeki ağır hidrojen konsantrasyonunu arttırmaktı. Döteryum konsantrasyonunu arttırmak için öngörülen bu metot, iki izotop arasındaki kütle eşitsizliğinin yarattığı fiziksel davranış farklarına dayanıyordu. 20,4 Kelvin veya -252,6 santigrat derecenin altında, moleküler hidrojen, yani H-H veya H_2, sıvı haldedir. Moleküllerin büyük çoğunluğu iki sıradan hidrojen içerir: H-H. Moleküllerin çok küçük bir kısmındaysa, bir sıradan hidrojen, bir de ağır hidrojen bir araya gelir: H-D. Sıvıda H-H molekülleri H-D moleküllerinden biraz daha hızlı hareket ediyorlardı çünkü daha hafiftiler. Sıvı yavaşça buharlaştırıldığında, hızlı hareket eden H-H molekülleri muhtemelen sıvının yüzeyinden daha önce ayrılacak ve H-D molekülleri de muhtemelen geride kalacak, böylece sıvı hidrojen, H-D molekül konsantrasyonu biraz daha artmış bir hale gelecekti. Urey'in planı, 6.000 cm^3 (altı litre) kadar sıvı hidrojeni 2 cm^3 kalana kadar buharlaştırmak ve böylece kalan sıvıyı hidrojenin ağır izotopları bakımından zengin bir konsantrasyona ulaştırmaktı.

Bu Urey'in Brickwedde'ye önerisiydi. Brickwedde yardımcı olmayı kabul etti. İlk girişiminde Brickwedde, sıvı hidrojeni 20 Kelvin derecede buharlaştırdı. Ancak bazı işlem hataları amaçlanan sonuca ulaşılmasına mâni oldu ve Urey, Balmer spektrum çizgilerinde artmış döteryum varlığını tespit edemedi. Brickwedde ikinci denemesinde, sıvı hidrojeni daha düşük bir sıcaklıkta, 14 Kelvin derecede buharlaştırdı. Bu damıtma sonucunda elde edilen hidrojen örneği, gerçekten de ağır izotoplar bakımından daha zengindi ve döteryuma dair Balmer spektrum çizgileri de altı ile yedi kat daha yoğundu. Bu deneyin ışığında Urey, hidrojen izotopu olan döteryumun gerçekten var olduğu sonucuna ulaştı.

Bu keşfi rapor eden makaleler 1932 yılının başlarında yayınlandı. 1934 yılında Urey, kimya dalında, döteryumun keşfi ile Nobel Ödülü'nü aldı.

Harold Urey sıra dışı bir kimyacıydı. Fakir bir çiftçi ailesinin çocuğu olarak Montana'da büyümüştü. Liseyi bitirdikten sonra, küçük bir taşra ilkokulunda üç yıl boyunca öğretmenlik yaptı. Montana Devlet Üniversitesi'nde zooloji ve kimya okuyup, 1917 yılında mezun oldu. Eğitim masraflarını karşılamak için yaz aylarında ülkenin kuzey batısındaki demiryolu raylarının döşenmesi işinde çalıştı. Akademik dönem boyunca Urey çadırda yaşadı.

Döteryumu keşfinden kısa bir süre sonra Urey'in özverili olağanüstü kişiliği kendini göstermişti. Bu başarısından dolayı Carnegie Vakfı kendisini ödüllendirmiş, 7.600 dolar para vermişti -ki bu para 1930'ların başında oldukça yüklü bir meblağ idi. O günlerde pek sık rastlanmayan bir bonkörlükle Urey, paranın yarısını, kendi deyişiyle, gelecek vadeden bir fizikçi meslektaşı olan I. I. Rabi'ye verdi. Rabi daha sonra bu olayı şöyle hatırladı: "Urey hayal edilebilecek en olağanüstü şeyi yaptı. Bana paranın yarısını verdi. Keşifle hiçbir alakam yoktu. Ne müthiş bir büyüklüktü Harold Urey'in bu yaptığı. Böyle bir şey yapmak ne muazzam bir yüce gönüllülüktür."[78] Urey'den aldığı para, Rabi'nin moleküler ışın deneylerini geliştirmesi ve genişletmesine olanak sağlamıştı. Kitabın 11, 12 ve 13. Bölümleri'nde göreceğimiz gibi, Urey'in Rabi'nin potansiyeliyle ilgili öngörüsü gerçekten de doğruydu.

Nobel ödülünün bir keşiften sonra bu kadar çabuk verilmesi sıra dışı bir durumdu. Ancak basitliğinden dolayı hidrojen dikkat çekiyordu. Urey'in keşfi, araştırma faaliyetlerinin hız kazanmasına neden olmuştu. Bu keşiften sonraki iki yıl içerisinde, hidrojenin yeni izotopu üzerine yüzü aşkın makale yayınlandı. 1934 yılında da, döteryumla ilgili yine yüzden fazla makale yayınlandı. Her ne kadar fizikçiler ve kimyacılar hidrojenin bu yeni izotopundan etkilendilerse de, döteryumla en uzun süre ilgilenecek olanlar nükleer fizikle uğraşan bilim insanları olmuştu.

Döteryumun çekirdeği döteron olarak adlandırılır. Atomla ilgilenen fizikçiler için hidrojen atomu neyse, çekirdekle ilgilenen fizikçiler için de döteron aynıdır. Hidrojen atomu en basit atomdur; döteron da en basit çekirdek bileşimidir. Elbette hidrojen atomunun çekirdeği tüm çekirdeklerin en basitidir ama yalnız başına bir protona sahiptir ve daha büyük çekirdeği bir arada tutan kuvvetleri oyuna sokmaz. Döteron, bir proton ve bir nötronun bir araya gelmiş şekliyle, döteryum atomunun çekirdeğidir. Nükleer fizikçileri heyecanlandıran soru şudur: Proton ve nötronu bir arada tutan kuvvetin doğası nedir?

Hidrojen atomuyla döteron arasındaki paralellikler oldukça tahrik edicidir. Her ikisi de iki-parçacıklı sistemdir: Hidrojen atomu bir elektron ve bir proton barındırırken, döteron, bir proton ve bir nötron içerir. Her ikisi de aynı biçimde ele alınabilir. Ama aralarında kayda değer bir de fark vardır. Hidrojen atomundaki protonla elektron arasındaki kuvvet, iyi bilinen Coulomb kuvvetiyken, protonla nötron arasındaki kuvvet, yirminci yüzyılın başlarındaki on yıllarda henüz bilinmiyordu. Nükleer parçacıklar arasındaki bu kuvvetin doğasını anlama ihtiyacı, basit döteronun nükleer fizikçilerin oyun alanı haline gelmesine neden oldu. Aslında, döteron üzerine yapılan çalışma diğer bütün çekirdeklerden fazla olmuştur ve bu basit çekirdek aracılığıyla kazanılan sezgi, daha karmaşık çekirdeklerle uğraşan fizikçilere kılavuzluk etmiştir. Kitabın 14. Bölümü'nde göreceğimiz üzere, döteron zaman içerisinde, nükleer kuvvetler üzerine geliştirilen düşünme biçiminin topyekûn yeniden gözden geçirilmesini zorunlu kılmıştır.

Bir kez daha hidrojen atomu bir ilham kaynağı olmuştu -bu kez kimya alanında. Döteryumun Harold Urey tarafından keşfi, atomik çekirdeğin içinde rol alan kuvvetleri araştıran fizikçilerin düşünme ve deney yapma biçimlerine kılavuzluk etmiştir.

Yeni keşfedilen hidrojen izotopuna isim vermek, Urey'in deneylerinden çok daha fazla zaman alan bir iş olmuştu. Normalde, yeni keşfedilen izotopu isimlendirme onuru kâşifine verilmelidir; yani Harold Urey'e. Ama Earnest Lawrence, G. N. Lewis, Ernest Rutherford, R. A. Millikan ve diğer dönemin birçok önde gelen fizikçisi (hatta iki de Yunanca profesörü; biri Columbia, diğeri Berkeley'den) bu tartışmaya müdahil olmuştu. Onca akla rağmen, döteryum ismi üzerinde fikir birliğine varmak bu kişilerin ve hatta daha da geniş bir topluluğun iki yılını almıştı; sonunda kabul edilen isim de Urey'in seçimiydi.[79]

Döteryum hikâyesi açıklayıcı bir örnektir. Sıkı kanıtlar üzerine oturmuş fizik, bilim insanlarının bir fikir birliğine ulaşmasını kolaylaştırır. Ama bir şeyin adlandırılması, duygusallığı ve çıkar hesaplarını açığa çıkararak anlaşmazlıkları ve dostlukların bozulmasını bile tetikleyebilir. Döteryumun keşfi görece olarak daha doğrudan bir süreçti; ama bunun adını koymak başka bir meseleydi.

11

Gurur Hidrojenle Buluşuyor: Protonun Manyetik Momenti

Otto Stern, 1933

Otto Stern 1930'ların başında protonun momentini ölçtüğünde, kendisine bununla fazla uğraşmaması salık verilmişti -temel teori, sonucun nükleer manyeton olacağı yönündeydi. Neyse ki Stern, temel teoriyle sağlıklı bir itiraz ilişkisi içindeydi.

—Daniel Kleppner

Otto Stern ismi, kuantum fiziği alanında en tuhaf ve etkili deneylerden biriyle anılır. Stern-Gerlach deneyi, kuantum mekaniğinin yaratılmasından önce gerçekleştirildi ve özellikle bazı fizikçiler için bu deney gayet ikna edici biçimde on dokuzuncu yüzyıl fiziğini temsil ediyordu; her ne kadar güçlü sonuçları olsa da, atomların tuhaf davranışlarını açıklayamıyordu. Stern ve Walther Gerlach'ın deneyi gerçekleştirdiği 1922 yılına kadar birçok fizikçi, Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr ve Arnold Sommerfeld gibi fizikçilerin çalışmalarında benimse-

dikleri kuantum fikirlerin dalga geçilecek nitelikte olduklarının kanıtlanacağı yönündeki önyargılı ümitlerini yitirmediler. Bohr'un hidrojen atomunun kuantum modeline istinaden Stern ve yine tanınmış bir fizikçi olan arkadaşı Max von Laue, eğer Bohr'un çılgın modeli doğruysa, fizikle uğraşmaktan vazgeçecekleri yönünde bir uzlaşmaya vardılar.[80]

Stern-Gerlach deneyi hidrojeni doğrudan değil, dolaylı olarak işin içine alıyordu. Çığır açan Stern-Gerlach deneyi, Sommerfeld'in hidrojen atomu üzerine çalışmalarının bir sonucu olarak öne sürdüğü alan (uzay) kuantumlaşmasının *(space quantization)* fiziksel gerçekliğini gösterdi. Bu çalışmasında Sommerfeld, atoma bir manyetik alan etkidiğinde, elektron yörüngelerinin uzayda sadece belli konumlar alabileceği görüşünü oturtmuştu. Tıpkı demir talaşlarının manyetik alan çizgileri boyunca kendilerini konumlandırdıklarının gözlemlenmesi gibi, benzer bir yaklaşımla, elektron yörüngeleri de uzayda kendilerini konumlandırıyorlardı. Daha açık söylemek gerekirse, Sommerfeld, uygulanan manyetik alanın konumsal yönelimine bağlı olarak sadece belli konumlara izin verildiği sonucunu çıkarıyordu. Sommerfeld, alan kuantumlaşmasının varlığını, manyetik alan içindeki hidrojenin spektrum çizgilerindeki ayrışmayı açıklamak için ispatsız olarak kabul etti. Bu ayrışma, 1896 yılında manyetik alanın ayrıştırma etkisini keşfeden Pieter Zeeman'ın onuruna, Zeeman efekti olarak adlandırıldı.

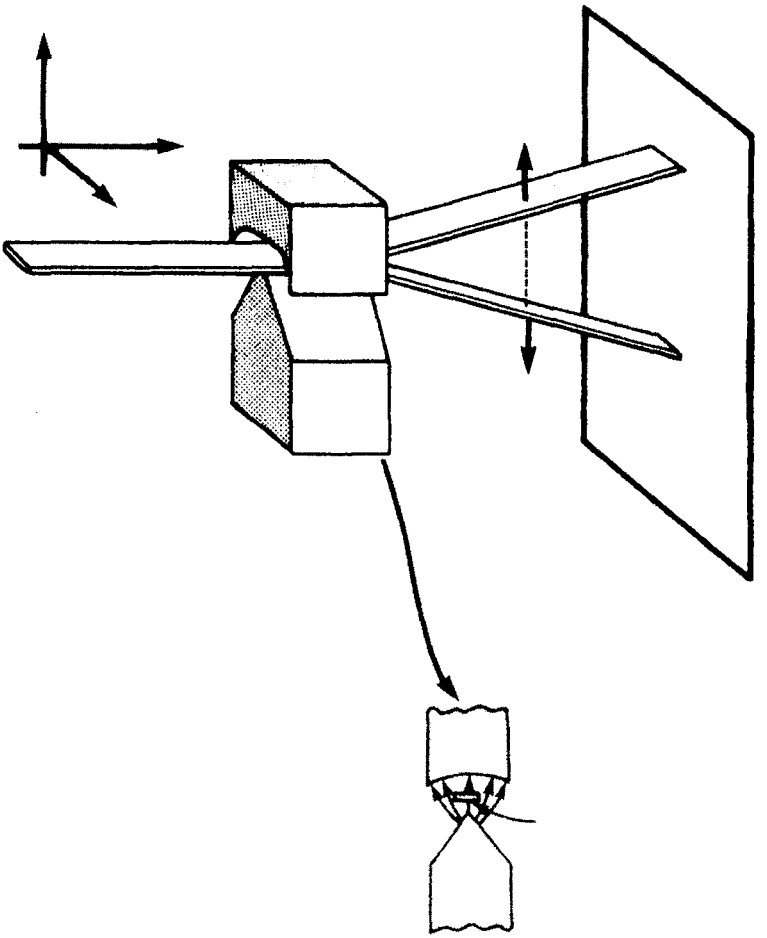
Bohr hidrojenin enerji seviyelerine kuantum koşullarını uyguladı; sadece belli seviyelere izin veriliyordu. Sommerfeld de elektron yörüngelerine kuantum koşullarını uyguladı; uygulanan manyetik alana bağlı olarak sadece belli konumsal yönelimlere izin veriliyordu. Stern ve Gerlach'ın deneyi ise, Sommerfeld'in Zeeman efekti açıklamasını, yani, alan kuantumlaşmasını test etmek üzere tasarlanmıştı.

Stern'in deneyi kavramsal olarak basitti ve kendince bir güzelliğe sahipti. Yaklaşımı, moleküler ışınlar metodunu temel alıyordu. Moleküler ışın metodu 1911 yılında Louis Dunoyer tarafından geliştirilmişti. 1921 yılında görece olarak hâlâ alışılamamış bir deney yöntemiydi. O zamandan beri de moleküler ışın metodu fiziksel araştırmalarda muazzam üretken sonuçlar veren bir yöntem olagelmiştir ve kitabın ilerleyen bölümlerinde

görüleceği üzere, atomik özellikler hakkında net ve ayrıntılı bilgiler vermektedir. Bu metotta atomlar büyük oranda içi boşaltılmış silindir biçimindeki bir haznenin bir ucundaki kaynaktan dağılır, silindir ekseni boyunca ilerler ve diğer uçta tespit edilirler. Çıkış kaynağına yakın dar yarıklar dizisi, atomların şerit gibi dar bir güzergâhta geçişini hizalar veya paralel hale getirir. Çıkış kaynağından atomların yayılması yavaştır, bu yüzden ışın içinde az miktarda atom bulunur. Böylece tek tek kaynaktan dağılan atomlar birbirlerinden oldukça ayrı ve izole olarak, silindirin vakumlanmış haznesinde hareket ederler. Moleküler ışın metodunun güzelliğine temel teşkil eden de budur -basitliği ve etkinliği bir araya getirir. Işın içindeki her atom izole olmuştur ve böylece diğer atomlardan kaynaklanan dış etkilerinden tamamen arınmıştır. Atom ışınının silindir boyunca geçişi sırasında, her bir atoma hassas biçimde bilinen kuvvetler uygulanarak çeşitli etkiler tasarlanabilir. Atomun, bu önceden bilinen etkilere verdiği tepki, silindirin diğer ucundaki bir dedektör aracılığıyla ölçülebilir.

Stern-Gerlach deneyinde, silindirden geçen atomlarla etkileşen unsur manyetik alandı. Atomlar son derece soğuk cam yüzeye sahip detektöre çarptıklarında, ardı ardına bu soğuk yüzeyde birikerek bir kayıt bırakırlar (bkz. Resim 11.1). Bazı fizikçiler, alan kuantumlaşması fikrini test etmeye yönelik Stern'in planını gayet saçma buldular. Birçok fizikçi, alan kuantumlaşmasını "gerçek" olarak değerlendirmedi; daha ziyade bunu, Sommerfeld'in sadece belli verileri açıklamak için geliştirdiği bir hesaplama aracı olarak değerlendirdiler. Peter Debye'nin tam olarak düşündüğü buydu. Stern'e dedi ki, "Ama eminim, atomların konumsal yönelimlerinin fiziksel bir gerçeklik olduğuna inanmıyorsundur; bu yaptığın sadece hesaplama için bir reçete, elektronlar için de bir zaman çizelgesi olabilir."[81] Stern yolundan dönmedi, çalışmalarma azimle devam etti.

Stern deneyi için gümüş atomlardan oluşan bir ışın kullandı. Gümüş atomları dedektöre doğru akarken, hareketleriyle doğru açılı olacak biçimde ve uygulanan manyetik alanın etkisiyle dağılarak birbirlerini itip kakıyorlardı. Ancak dedektör, gümüş atomunun hafifçe genişleyen ışınını "gördü". Debye gibi kuşkucular, ışını oluşturan atomların sürekli olarak genişleyen boyut-



RESİM 11.1 1922 yılında yapılan Stern–Gerlach deneyi. Atom ışını soldan manyetik alana giriyor ve sağ tarafta iki ışına ayrılıyor.

larda dağılacağını beklediler. Stern ve Gerlach ise dramatik biçimde farklı bir şey buldular: Atom ışını, hafifçe birbirinden ayrı iki bölgede yoğunlaşıyordu. Dedektörün üzerinde iki silik alanda birikme oluşmuştu. Belli ki gümüş atomları zorlanmışlardı: Hedeflerine ulaşan yolu seçmek konusunda özgür değil-

lerdi. Ya bir alana veya diğerine yönelmek durumunda kalmışlardı. Sonuçların alan kuantumlaşmasını varsaymaktan başka bir açıklaması yoktu. Zor bir deneydi ama 1921 yılının sonlarında Stern ve Gerlach, alan kuantumlaşmasının "gerçek" olduğu yönünde geri dönüşsüz kanıtlar çıkarttılar. Bu sonuçla doğa, Stern'e ve diğer fizikçilere bir şaka yapmıştı: Stern'in bulduğu sonuçlar alan kuantumlaşmasını doğrularken, aslında kendilerini konumlandıranlar, Sommerfeld'in ileri sürdüğü gibi, yörüngeler değildi. İronik olarak, alan kuantumlaşma teorisi doğruydu fakat bunun nedeni, 1922 yılında henüz bilinmeyen elektronun bir özelliğiydi, bu elektronun spiniydi: Kendisini konumlandıran elektronun spin hareketi veya manyetik momentiydi, elektronun yörüngesinin değil.

Stern-Gerlach deneyinin kavramsal basitliği, sonuçlarının doğrudanlığı ile iyi bir ikili teşkil etmiş, kuantum teorisi için kesin bir kanıt sunmuştu. I. I. Rabi, Stern'in sonuçları açıklandığında Columbia Üniversitesi'nde lisansüstü öğrencisiydi. Stern deneyi, onun kuantum mekaniği üzerine düşüncelerini sonsuza dek değiştirecekti. "Bu deney beni tamamen ikna etti," diyordu Rabi, sonraları. "Usta işi klasik mekanik bitmiş ve yüzleşmek zorunda olduğumuz bir gerçek olarak kuantum fenomeni, tamamen yeni bir konumlandırmaya ihtiyaç gösteriyordu."[82]

Stern-Gerlach deneyi sonuçlarının bilimsel literatürde görünmesinden kısa bir süre sonra Stern, Hamburg Üniversitesi'nde 1922 yılından 1933 yılına kadar deneysel işlerini yürüttüğü fakültenin kadrosuna katılmak yönünde bir davet aldı. 1932 yılında da moleküler ışın metodunu ürkütücü bir deneye uyarlamaya karar verdi: Hidrojen atomunun çekirdeğinde bulunan protonun manyetik momentini ölçecekti. Kendisine bu cesaretli girişimde Otto Robert Frisch de katılacaktı.

1932 yılına gelindiğinde, spin hareketinin elektron ve protonların temel bir özelliği olduğu anlaşılmış bulunuyordu. Bu elektrik yüküne sahip parçacıklar kendi merkezlerinden geçen bir eksen etrafında dönüyorlardı. Bu spin hareketinin yarattığı elektrik yük, manyetik momenti meydana getiriyor, böylece elektronlar ve protonlar minik mıknatıs parçaları gibi davranıyorlardı. Dışarıdan gelen bir manyetik alanda bu manyetik momentler, ya da spinler, kuantum mekaniğinin doğru biçimde tarif etti-

ği üzere kendilerini konumlandırıyorlardı. Atomlarda elektronların ve protonların spinleri genellikle eşleşiyor ve birbirlerinin momentlerini yok ediyorlardı. Fakat bazı atomlarda tek sayıda elektron bulunduğundan, bu atomlar net bir manyetik momente sahiptirler. Gümüş atomundaki durum da budur. Gerlach ile birlikte 1922 yılında gerçekleştirdiği deneyde Stern, (manyetik) alanla veya ona karşı, gümüşün manyetik momentinin konumlanışını gözlemlemiş, belirgin biçimde dedektörün iki kenarındaki birikmeyi görmüştü.

Hidrojen çekirdeği tek bir proton ihtiva eder ve bu da manyetik momente sahip olması sonucunu doğurur. İşte Stern'in ölçmek istediği moment de budur. Birçok sebepten ötürü, söz konusu ölçümü yapmak oldukça zordu. Bu zorlukları anlamak için, bir süreliğine yeniden Dirac'ın meşhur elektron çalışmasına geri dönelim. Verimli Dirac denklemi, verdiği birçok diğer sonuçla beraber, elektronun manyetik momentinin ölçüsünü de doğrudan verir nitelikteydi. Dirac teorisinin muazzam başarılarından biri de buydu. Denklemin verdiği elektron sonucu öylesine ikna ediciydi ki, fizikçiler buradan hareketle protonun da manyetik momentini bildiklerini varsayıyorlardı. Bundan o kadar eminlerdi ki, onca zor ve anlamsız bir deneye kalkışmak konusunda Stern'in hevesini kırmaya bile yeltendiler.

Dirac'ın teorisini genişleten fizikçiler, protonun manyetik momentinin, elektronunkinden daha küçük olduğunu varsayıyorlardı; aslına bakılacak olursa, tam olarak 1/1836 kere küçük olduğunu öngörüyorlardı. Bu sayının kesinliği, elektronun kütlesinden 1836 kere büyük olan protonun kütlesinden geliyordu. Stern'in karşılaştığı ilk zorluk buydu: Ölçmeye kesin kararlı olduğu protonun bu özelliğinin, manyetik momentinin, oldukça küçük değerlere sahip olması. Hidrojen atomundaki proton, elektronla eşleşmiştir ve Stern'e göre elektronun 1836 kat daha büyük olan manyetik momenti, protonun daha küçük etkilerini baskılıyordu. Böyle düşününce Stern, hidrojen molekülü formunda, kimyasal olarak birbirine bağlanmış iki hidrojen atomu kullanmaya karar verdi. Hidrojen molekülünde bulunan iki elektronun manyetik momentleri karşıt biçimde konumlanacak ve birbirlerini yok edeceklerdi. Bu zorluğu böylece atlatan Stern, bu defa başka zorluklarla karşılaştı.

Molekül bir noktadan diğerine hareket ederken, kendi içinde de taklalar atıyordu. Bu hareket de molekülün elektron ve protonlarına döngüsel bir manyetik moment kazandırıyor ve Stern'in, bu momenti protonun manyetik momentinden ayırt etmesi gerekiyordu. Stern söz konusu döngüsel etkileri saptamak için bir yöntem geliştirebilirdi. Her hidrojen molekülü, herbiri kendi protonuna sahip çekirdekleriyle, iki hidrojen atomunu bir araya getirir. Bu iki protonun manyetik momentleri birbirine göre ya paralel ya da antiparalel bir biçimde konumlanabilir. Stern'in deneyinde bu iki konumlanış, moleküler ışınlama aparatının manyetik alanı içindeki güzergâhı boyunca hareket eden her bir moleküle uygulanan yavaşça itme ve çekme etkilerine farklı tepkiler veriyordu. Aslında, antiparalel konumlanmaya sahip hidrojen moleküllerinde manyetik alan, proton spinleri üzerine hiçbir kuvvet uygulamıyordu. Böylece Stern, antiparalel momente sahip hidrojen moleküllerinin sapmasını, döngüsel manyetik momenti tespit etmekte kullandı ve sonra tespit ettiği bu manyetik momenti sonuç verilerinde hesaba kattı. Stern'in mücadele etmek zorunda kaldığı son güçlük, protonun son derece küçük manyetik momentini saptamak için moleküler ışın metodunun sınırlarını fazlasıyla zorlamak gerektiğiydi. Hiçbir sağlama aralığı, gevşeklik şansı ya da hata payı yoktu. Her şeyin doğru gitmesi ve aynı anda olup bitmesi gerekiyordu.

Stern deneye başladığında, bütün diğer meslektaşlarının da yaptığı gibi, moda olmuş bir varsayımla yola çıkmıştı: Bulmaya çalıştığı manyetik momentin, elektronun manyetik momentinin 1/1836'sı kadar olacağı. Fakat deneysel veriler akmaya başladığında, beklenmeyen bir şey olduğu netlik kazandı. Protonun manyetik momenti, öngörülen orandan daha büyük görünüyordu. Elbette Stern deneyi bütün yönleriyle inceliyor ve analizine soktuğu bütün varsayımları göz önüne alıyordu. Veriler hassas değildi ve Stern ikna olmuyordu.

Tam bu sırada Stern, yaptığı deney üzerine bir seminer verdi. Seminerde dinleyicilerinden bir parça kâğıt çıkarmalarını ve üzerine, deneylerdeki bulgularına dair tahminlerini yazmalarını istedi: Protonun manyetik momentinin değeri ne olabilirdi? Sonra bu tahminlerinin altına imzalarını da atmalarını istedi. O an orada bulunan bütün fizikçiler, sağanak yağmur altında dur-

muş hava durumu spikerinin yağmur yağacağı tahmini yapmasındaki özgüvenle, Dirac'tan öğrendikleri ilahi cevabı verdiler. Büyük Pauli, Stern'e, "Eğer zor deneyler yapmayı seviyorsan, elbette yapabilirsin ama sonuçları zaten bilindiğinden böyle bir deney zaman ve emek israfı olur," demişti.[83] Stern üzerinde fizikçilerin tahminleri yazan bütün kâğıtları topladı ve soğukkanlı biçimde sigarasından bir duman aldı. Hassasiyetten gayet uzak verilerle bile, meslektaşlarını bekleyen sürpriz konusunda kendinden çok emindi. Özgüvenini perçinlemek için daha iyi deneysel verilere ihtiyaç vardı.

Deneylerin ikinci kez yapılışında, yeni bir öğrenci, Immanuel Estermann, Stern'le birlikte çalışıyordu. Stern için öğrenci asistanlar önemliydi. Birçok deneysel çalışma yapan bilim insanı gibi Stern de, özellikle el becerisi bakımından harika sayılmazdı. O deneyleri kavramsallaştırmak konusunda üstündü. Deneysel verileri değerlendirmekte büyüktü. Ama Otto Stern aparatlara dokunduğunda öğrencilerinin tüyleri diken diken oluyordu. Estermann ise el becerileri bakımından mahirdi.

İlk tur deneylerden alınan sonuçlar ışığında Stern ve Estermann, gözlem aparatını yeniden tasarladılar. Şimdi, manyetik momentin önceden öngörülenden daha büyük olduğunu varsayıyorlar ve aparatı zorlamak konusunda daha rahat davranıyorlar, yaptıkları ölçümlerdeki hassasiyeti geliştiriyorlardı. Deneyi iki değişik yolla yaptılar. Her iki yolla da aldıkları sonuçlar aynıydı. Protonun manyetik momenti, öngörülenden 2,5 kez daha büyüktü.

Protonun manyetik momentiyle ilgili ölçümler hâlâ hassas değildi. Stern bulunan sonuçların yüzde on oranında kesin olmadığını söylüyordu. Bunun anlamı, sonuçların 2,25 ile 2,75 arasında nükleer mıknatıslanmaya karşılık geldiğiydi. Böylesine bir belirsizlik Stern için kabul edilebilir değildi. Sadece protonun manyetik momentini değil, döteronun manyetik momentini de yeniden ölçmek üzere donandı. Harold Urey'in döteronu keşfi daha yeni duyurulmuştu.

Stern'in planı, Hamburg'da sürdürdüğü deneylerin üzerine kara bulutlar çökmesiyle geri düştü. 30 Ocak 1933 günü Hitler Almanya'nın başbakanı oldu ve bir Yahudi olan Estermann, Hamburg Üniversitesi'ndeki görevine son verileceğini öğrendi.

Stern de Yahudi idi, ancak Birinci Dünya Savaşı'nda Alman gazisi olduğundan, Hitler'in hışmından şimdilik kurtulmuş gibiydi. Fakat Stern beklemedi; protesto mahiyetinde derhal istifa etti. Böylece de, proton ve döteron üzerine Hamburg'da yapılan son deney daha deneme aşamalarında kaldı. Döteron üzerine ulaştığı sonuçlar deneme niteliğinde ve nitelikseldi. 1933 yılının yazında, Stern'in Hamburg'daki moleküler ışın laboratuarı tamamen kapandı. Stern ve Estermann Amerika Birleşik Devletleri'ne davet edildiler ve proton ve döteron üzerine geliştirdikleri deneylerine orada, Carnegie Teknoloji Enstitüsü'nde devam ettiler. Yine bir Yahudi olan Frisch de Londra'ya gitmişti. 1943 yılında Otto Stern, protonun manyetik momentinin ölçümü ile fizik dalında Nobel Ödülü'nü aldı.

Protonun manyetik momentini ifade etmekte kullanılan birim nükleer manyetondu. Bu hantal birim, Bohr manyetonu olarak adlandırılan elektronun manyetik momentinden sonra şekillendi. Elektronun manyetik momenti 1 Bohr manyetona eşittir. Protonun tahmin edilen manyetik momenti, Dirac'ın 1928 yılında yayınlanan makalesindeki kestirim uyarınca, 1 nükleer manyeton olarak belirlenmişti. Stern'in ölçtüğü sonuçlarsa 2,5 nükleer manyetondu. Fizik teorisyenleri buradaki bir ayrıntıyı kaçırmışlardı -bu değerler birbirinden yüzde yüz elli oranında farklıydı. Bu sonuçlar gayet açık gösteriyordu ki, fizikçiler protonu anlamamışlardı.

Fizikçiler Dirac'ın elektron teorisinden öylesine etkilenmişlerdi ki, aynı teorinin protona da uygulanabileceği yönündeki görüşe hemen atlamışlardı. Onların bu özgüven ve haddini bilmezlikleri bir tür aşırı gurura dönüşmüştü. Hidrojen atomunun çekirdeği, yani proton, bu gurura karşı direniyordu. Tıpkı Zeus tarafından kayalara zincirlenen Prometeus gibi, fizikçiler de entelektüel anlamda yanlış tahmin kayasına zincirlenmişlerdi. Neyse ki, Prometeus'un tersine, bir kartal her gün gelerek fizikçilerin ciğerlerinden bir parçayı koparıp kendine ziyafet çekmiyordu. Stern'in hidrojen atomunu kullanarak protonun manyetik momentini ölçmesi, gururu tevazuya çevirdi.

12

Manyetik Rezonans Metodu: Manyetik Rezonansla Görüntülemenin Temeli

I. I. Rabi, 1938

En temel çekirdeğe ait ölçümleri yaparken, hidrojenin özelliklerini ölçüyormuşsunuz gibi bir hisse kapılırsınız, ölçün ve olabildiğince iyi ölçmeye çalışın.

—I. I. Rabi

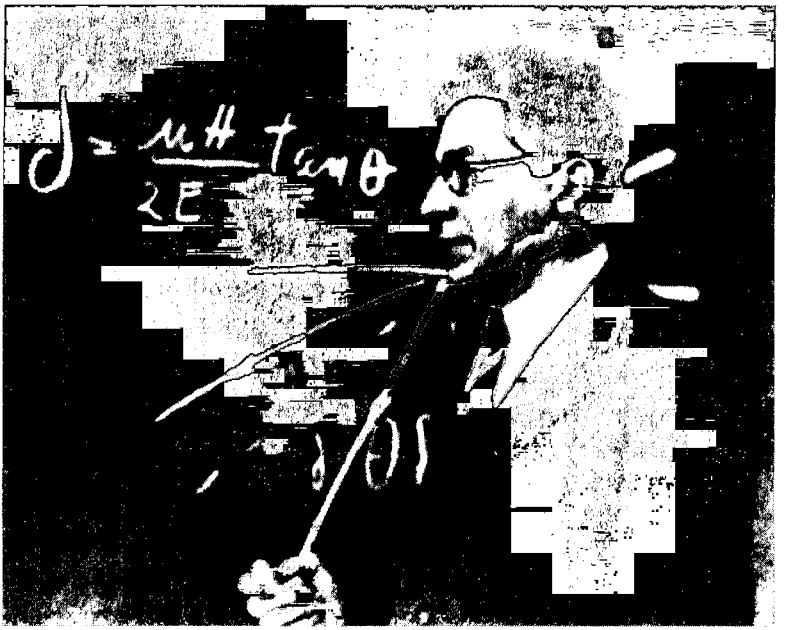
1920'li yılların ortalarında, Isidor Isaac Rabi Columbia Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrencisiyken gözü, entelektüel havai fişeklerin fizikçilerin zihinlerini aydınlattığı, tartışmalarını canlandırdığı ve tutkularını avuttuğu Avrupa'daydı. Columbia Üniversitesi'nde durum böyle değildi; Pupin Hall adlı fizik binasındaki laboratuarların koridorlarını ara sıra çıtırtılarla yanarak aydınlatan bir Roma mumu haricinde. 1926 yılında fizik alanında Avrupa ve Amerika arasındaki fark, muazzam bir modern havai fişek finaliyle, basit bir çatapat gösterisi arasındaki fark gibiydi.

1926 yılında doktorasını tamamlayana kadar Rabi, yeni fizik buluşlarının maddi dünyanın doğasına yönelik yeni temel sezgilere kapıları ardına kadar açarken ortaya çıkan sıcaklık ve pırıltıya birinci elden şahitlik etmek için yanıp tutuşuyordu. 1920'lerde yeni fiziği yaratıcılarından öğrenmek için Avrupa'ya giden birçok genç Amerikalı fizikçiden biri olan Rabi, eğlenceye katılmak istiyordu. Sonunda Rabi, yine kendi usulünce davranarak, hiçbir planlama yapmaksızın alıp başını gitti. Zürih'te Erwin Schrödinger'i, Kopenhag'da Niels Bohr'u, Hamburg'da Wolfgang Pauli'yi ve Leipzig'de Werner Heisenberg'i ziyaret etti. Hamburg'da Otto Stern ile de tanıştı ve çalışmalarını ilgiyle izledi.

Stern'in moleküler ışın laboratuarına yaptığı bir ziyarette Rabi, bir deney üzerine şifahen bir öneride bulundu ve anında cevabını aldı: "Neden kendin yapmıyorsun?" Daha sonra Rabi'ye, Stern'den böyle bir teklif almanın aslında bir onur olduğu söylendi. "O günlerde bana verilen bir onuru karşı çevirecek konumda değildim," diyor Rabi.[84] Rabi'nin deneyi, bir moleküler ışında sapan parçacıklar için alışılmamış bir manyetik alan yapıyı ortaya çıkartmıştı -bu yapıya günümüzde Rabi alanı *(the Rabi field)* adı verilir.

Moleküler ışın konusundaki yazılarından birinde Stern, "Fizikçileri içinde çalışmak için sıkıca kavrayan o güzellik ve tuhaf cazibeye sahip alan," diyerek bu deneye referans verir.[85] Stern'in bu ifadesi, Hamburg'da yürüttüğü deneylerine Rabi'nin tepkisini açık biçimde tarif eder. Rabi'nin fizik üzerine güçlü sezgisi, aparatın içinde ilerleyen atom görüntüsüyle tetiklenmiş ve ortaya çıkarttığı o "güzellik ve tuhaf cazibe," Rabi'nin profesyonel hayatına yön vermişti. (bkz. RESİM 12.1)

Rabi 1929 güz döneminde Amerika'ya dönüp, büyük bunalım yıllarının başlamasından hemen önce Columbia'daki fakültede çalışmaya başladı. Bunalıma neden olan etmenler gelişirken ve Rabi Avrupa'da kuantum mekaniği üzerine çalışmalarını bitirmek üzereyken, Heisenberg genişletilmiş bir ziyaret yapmak üzere Avrupa'dan ayrılıp Amerika'ya gelmişti. Heisenberg'in ilk durağı New York City olmuş, orada Columbia Üniversitesi'ni de ziyaret etmişti. Üniversitenin fizik bölümünün başına yeni bir atama yapılmak isteniyordu. Müfredatlarına



RESİM 12.1 I. I. Rabi.

kuantum mekaniğini sokabilecek bir personel arayışı içindeydiler. Heisenberg Rabi'yi önerdi. O günlerin etkin görüşü anti-semitik akım üniversitelerin fakültelerine Yahudilerin atanmasına engel teşkil ediyorduysa da, Heisenberg'in ısrarlı önerisine istinaden, fizik bölümünün başındaki George B. Pegram, yüksek öğrenim kurumlarında yaygınlaşan anti-semitik önyargının üzerine giderek, I. I. Rabi'yi en düşük akademik seviyeden, öğretim görevlisi olarak fizik bölümüne aldı.

1930'lu yıllar boyunca Rabi ve ünlü öğrenci grubu ve asistanları, hidrojen atomu üzerinden moleküler ışın deneylerini başarılı bir biçimde sürdürdüler -hem sıradan hidrojen (H) ve hem de ağır hidrojen (D) üzerinden. Giderek artan bir hassasiyet ve isabetle proton ve döteronun manyetik momentleri ölçüldü. Bu çabaların zirvesi manyetik rezonans metodunun keşfiydi ve bu keşif Rabi ve öğrencilerinin hayal edemeyecekleri zenginlikte

uygulama alanları buldu. Basit bir araştırmanın doğası böyledir: İçinde öngörülememiş ödüller barındırır ve sıklıkla pratik uygulamalara dönüşür.

Rabi, protonun manyetik momenti üzerine Stern'in şaşırtıcı sonuçlarını okuduğunda, beklenmeyen sonuçların sağlamasını yapmak için deneyin yeniden gerçekleştirilmesi gerektiğine hükmetti. Dahası, deneyi başka bir yolla yapabileceğini keşfetti. Stern bir hidrojen molekülü ışını kullanmıştı ve böylece etkin biçimde elektronun çok daha büyük manyetik momentini devre dışı bırakmış, protonun küçük manyetik momentini tespit edilebilir hale getirmişti. Stern'in deneyi için sapmayı sağlayacak güçlü manyetik alan gerekiyordu ki, bu alanı yönetmek, kontrol etmek ve ayarlamak güçtü. New Yorklu fizikçi Gregory Breit ile birlikte Rabi, protonun zayıf manyetik momenti ile elektronun güçlü manyetik momentini eşleştirecek bir yol buldu ve böylece güçlü olanın zayıf olanı etkin biçimde yükseltmesini sağladı. Bu yaklaşımı Rabi'yi atomik hidrojen ışını (Stern'in hidrojen molekülü kullanmasına karşı) ve zayıf bir saptırıcı manyetik alan (Stern'in güçlü manyetik alanına karşı) kullanabilir duruma getirdi. Dolayısıyla Rabi'nin deneysel süreci, Stern'in mücadele ettiği birçok karmaşadan muaftı.

1930'lu yılların başında, olağanüstü bir doktora üstü asistan olan ve daha sonra da Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde fizik bölümünün başkanı olacak olan Jerrold Zacharias, Rabi'nin araştırma grubuna katıldı. Fakat o zamanlar, Zacharias da üniversiteleri sarmış olan Yahudi karşıtlığının bir kurbanı durumundaydı ve sadece geçici işler bulabiliyordu. "İş bulamıyordum çünkü Yahudi idim," diyordu Zacharias.[86] Zacharias Rabi'nin farklı olduğunu anlamıştı. "Rabi sıra dışı biriydi," diye sürdürüyor Zacharias, "Heisenberg dekan Pegram'ı, Rabi'yi bölüme alması için zorladığında bunu anlamıştım. Ve Rabi bölümdeki tek Yahudi idi ve sıra dışı bir adamdı."[87]

Zacharias aynı zamanda Stern'in proton araştırmaları sonuçlarının açıklandığı makalesini de görmüş ve o da iyice meraklanmıştı. Zacharias Rabi'ye gitti ve "Rabi, eğer atomik hidrojen üzerine çalışırsan seninle çalışırım. Atomik hidrojen, benim de bulaşmak istediğim karmaşık bir canavar," dedi.[88] Rabi Zacharias'ın şartlarını kabul etti ve 1933 yılının sonlarında Rabi

ve yanındakiler gerekli aparatların yapımına başladılar -o aparatlar ki, 1930 yılı boyunca defalarca değişikliğe uğrayarak, sonunda manyetik rezonans metoduna dönüştüler.

Rabi'nin laboratuarında yapılan ilk hidrojen deneyi hem güçlü hem de zayıf yönler barındırıyordu. Güçlü yönü, ışın aparatının içinden geçen hidrojen atomlarının sapmasına neden olan manyetik alanın formuydu. Zacharias Stern'in bulduğu sonuçlardan kuşkuluydu çünkü Stern'in yaklaşımında gereken güçlü manyetik alanın şiddetinin aslında gayet hassas biçimde ayarlanabileceğini düşünüyordu. Zacharias manyetik alan yaratan ve gücü doğrudan hesaplanabilen bir metot ortaya çıkardı. Bu deneyin güçlü yanıydı. Deneyin zayıf yönüyse, hidrojen ışınının tespit ediliş yoluydu. Dedektör bir kimyasalla kaplı, cam bir plakaydı ve hidrojen atomları üzerine çarptığında rengi sarıdan maviye dönüyordu. Bunun anlamı, renk üzerine sübjektif bir yargıya varmak gerekliliğiydi -zira mavi, sarı bir arka plan üzerinde oluşuyordu.

Proton üzerine ilk deneyin özündeki zayıf yönlerinden dolayı, 1934 yılında yayınlanan deneysel sonuçlar yüzde on gibi büyük oranda bir belirsizlik içeriyordu. Ancak böyle bir sonuca rağmen alınan netice gayet ilgi çekiciydi. Rabi'nin protonun manyetik momenti üzerine ilk ölçüm sonuçları 3,15 ± 0,31 nükleer manyeton (nm), yani Stern'in ulaştığı 2,5 ± 0,25 nm değerinden büyüktü. İki sonuç uyuşmuyordu. Stern'in ulaştığı en yüksek değer 2,75 nm olmuştu ki, Rabi'nin ölçümlerinde en düşük değer 2,84 nm olarak bulunuyordu. Her ne kadar bu fark cevaplanması gereken sorular çıkartıyorsa da, Rabi'nin sonuçları da protonun manyetik momentinin, uzmanların önceki tahminlerinden yaklaşık üç kat yüksek olduğunu ortaya koyuyordu. Protona ilave olarak Rabi, döteron için elde edilen deneysel sonuçları da rapor etti: Döteronun manyetik momenti, yüzde 26'lık büyükçe bir hata payı ile 0,77 ± 0,2 nm olarak saptanmıştı.

Hidrojen ve döteryum deneylerinin ilk tur sonuçları yeni ve daha iyi deneyler gerektiriyordu. Proton ve döteron, sırasıyla, doğanın en basit çekirdeği ve çekirdek bileşeniydiler. Bu nedenle de, atomları anlamadaki önemleri büyüktü. İkinci seri deneylere 1935 yılında başlandı.

Hidrojen ve döteryum üzerine yapılan deneylerin ikinci serisinde, iki tane özellikle bezdirici hata kaynağı saf dışı bırakıldı. Bunlardan birincisi, artık gözleri kısıp detektör plakasındaki uçuk mavi renge bakmaya ihtiyaç kalmamasıydı. Bu sefer, ışın parçacıkları gelip çarptığında üzerindeki elektriksel direncin değiştiği bir tel dedektör geliştirilmişti. Bu tespit sistemi deneysel sonuçların değerlendirilmesindeki tahmin faktörünü devre dışı etmiş ve tespit etme eylemini objektif hale getirmişti. İkincisi ise, sisteme ilave bir saptırma mıknatısı eklenmesiydi. Bunun anlamı, iki manyetik alan içinden başarıyla geçen ışın parçacıklarının -hidrojen atomlarının- ters yönlerdeki ışın parçacıklarını saptıracakları bir tasarımdı. Daha açık söylemek gerekirse, ikinci saptırıcı mıknatıs, ilk saptırıcı mıknatısın sebep olduğu sapmayı ortadan kaldırma kapasitesine sahip olarak tasarlanmıştı. Şu şekilde çalışıyordu: Yerleştirilen ilk mıknatısın gücüyle hiçbir hidrojen atomu detektöre kadar ulaşamıyordu. Sonra ikinci saptırıcı mıknatısın gücü, ışın parçacıkları tel dedektörde yeniden algılanana dek yavaşça yükseltiliyordu. İkinci manyetik alanı meydana getiren akımın değerinden de protonun manyetik moment değeri bulunabiliyordu. Bu yeniden algılama metodu -ki 'yeniden odaklanma' olarak adlandırılıyordu- deneydeki başka belirsizlikleri de ortadan kaldırıyordu. Rabi bunu çok sevmişti. "Deney çok güzeldi. Oynanabilecek bir sürü incelik vardı... Muazzam bir çekiciliğe sahipti."[89]

Rabi'nin ikinci seri deneylerde yaptığı bir diğer değişiklik de, manyetik momentin işaretinin saptanabilmesi, yani manyetik momentin açısal momentuma paralel mi (pozitif) yoksa antiparalel mi (negatif) konumlandığının saptanabilmesiydi. Önceden ne Stern ne de Rabi'nin deneyleri, verilerinden bu bilgiyi çıkartamıyorlardı. Döteronun proton ve nötronunun momentlerinden oluşan manyetik momentin işaretini bilmek, yeni keşfedilmiş olan nötronun manyetik momentinin hem değeri hem de işaretiyle ilgili bir sonuca varmalarına imkân veriyordu. Protonun manyetik momenti, daha önceki öngörülerden üç kat fazla çıkmıştı ama bu manyetik momentin pozitif mi, yoksa negatif mi olduğu bilinmiyordu. "İnsanları bu konuda iddiaya sokuyordum," diyordu, Rabi.[90] İşareti saptamak için, iki saptır-

ma alanının ortasına bir üçüncü manyetik alan eklenmişti. T-alanı adı verilen bu alan, manyetik momentin pozitif veya negatif olmasına bağlı olarak, tespit edilen ışının şiddetini etkin biçimde değiştiriyordu.

İkinci deneyin sonuçları, 1936 yılında Amerikan Fizik Topluluğu'nun St. Louis'de gerçekleştirilen toplantısında açıklandı: Protonun manyetik momenti + 2,85 ± 0,15 nükleer manyeton ve döteronun manyetik momenti + 0,85 ± 0,03 nükleer manyeton değerlerine eşitlenmişti. Bu verilerden yola çıkarak, nötronun manyetik momenti de -2,0 nükleer manyeton olarak saptandı.

Hidrojen üzerine deneylerin ikinci turu sadece manyetik momentin işaretini vermekle kalmadı, momentlerin büyüklükleriyle ilgili çok daha hassas değerler çıkarttı. Protonun manyetik momentindeki belirsizlik oranı yüzde 10'dan yüzde 5'e ve döteron için de yüzde 26'dan yüzde 4'e düşürüldü ki, bu gerçekten kayda değer bir gelişmeydi.

O sırada Stern ve Estermann da Pitsburg'da çalışıyorlardı. Onlar da orada tekrar protonun manyetik momentini ölçmüşler ve 2,47 ± 0,07 sonucuna ulaşmışlardı. Rabi ve Stern'in değerleri hâlâ birbirine uymuyordu. Rabi için deneylere devam etmekten başka yol yoktu. "Görmüş olduğum fenomeni tertemiz ortaya çıkardığımdan emin olmak istiyorum," diyordu, Rabi. "Benim çalıştığım bir alanda başkasının büyük bir keşif yapmasını istemem. Dolayısıyla benim düşüncem, bu işi olabildiğince hassas ölçümlerle yapmak ve bulduklarımızın birbirine uyup uymadığını görmek, ardındaki nedenleri anlamaktı."[91]

Hidrojen üzerine yapılan deneylerin ikinci turunda ortaya çıkarılan T-alanı, manyetik rezonans metodunun atasıydı. T-alanı statik bir alandı ve manyetik momentlerin işaretlerini saptamak yönünde bir amaca sahipti. Rabi, T-alanını, 1936 ve 1937 yılları boyunca başka birkaç çekirdek üzerine yaptığı deneylerde de kullandı. O yıllarda aynı konuda rekabete giren diğer bir laboratuar yoktu. Rabi'nin rekabetsiz çalışmaları 1937 yılının Eylül ayında, Hollanda'nın Groningen Üniversitesi'nden C. J. Gorter'in Rabi'yi Columbia'daki laboratuarında ziyaret etmesiyle sona eriyordu. Gorter Rabi'ye, neden statik T-field

yerine salınımlı bir manyetik alan kullanmadığını soruyordu. Rabi bu öneriyi daha önce düşünmüş, nihayet gerçekleştirmeyi de planlamıştı ancak diğer işlerin yoğunluğu gerekli aparatın inşa edilmesini geciktirmişti. "Tabii," diyordu Rabi, "yaptığımız işi beğeniyordum ama Gorter de bu işin peşindeydi ve artık rekabet vardı. Dolayısıyla, 'hadi şu işi yapalım artık' dedim."[92] Gorter'in ziyareti cumartesi günü olmuştu. Pazartesi günü aparatın gerekli düzenlemelerine başlanmıştı bile.

Bir ışın parçacığı statik T-alanından geçip giderken, dönme hızının parçacığın (doğrusal) hızına bağlı değiştiği, dönen bir (manyetik) alanın etkilerini hissediyordu. Hızlı parçacıklar yüksek bir dönme hızı, ya da yüksek bir frekans, yavaş parçacıklar da düşük bir dönme hızı, ya da düşük bir frekans tecrübe ediyorlardı. Işın parçacıklarının hızları da değişik değişik olduğundan, her biri değişik bir dönme hızı, değişik bir frekans görüyordu. Bu durum da T-alanı yaklaşımına temel olarak niteliksel bir karakter kazandırıyordu. T-alanı, salınımlı bir alanla yer değiştirdiğinde, niteliksel metot niceliksel özellik kazandı. Salınım hızı yeterince yüksek tutulduğunda, alandan geçen her bir ışın parçacığı da aynı frekans etkisine maruz kalıyordu. Böylece deney yapan kişiler için ışın parçacıklarını daha fazla kontrol etme imkânı doğuyordu.

Sistem şöyle çalışıyordu. Kaynaktan çıkan ışın parçacıkları yönlendirici yarıklardan süzüldükten sonra, sırasıyla üç bölgeden geçiyorlardı. 1. bölge ilk saptırıcı mıknatıstı. 2. bölge sabit bir manyetik alanla, bunun üzerine bindirilmiş salınımlı bir ikinci manyetik alan içeriyordu. 3. bölgeyse, birinci saptırma mıknatısının tersi bir saptırmaya sahip ikinci saptırma mıknatısının konuşlandırıldığı yerdi. Işın parçacıkları 3. bölgeden sonra dedektöre giriyorlardı. Işın parçacıkları ilk saptırma mıknatısından belli bir kuantum durumda ayrılıyorlardı. Eğer 2. bölgede salınan manyetik alan tarafından hiçbir kuantum geçiş tetiklenmemiş olursa, detektörde yeniden odaklanan ışın parçacıkları doğrudan ikinci saptırma mıknatısından geliyor olacaklardı. Fakat eğer 2. bölgedeki salınan manyetik alanın frekansı ışın parçacıklarını etkileyerek bir kuantum geçişi yaratırlarsa, parçacıklar ikinci saptırma mıknatısı tarafından algılanmayacak ve

detektöre gönderilmeyecek, böylece detektörden alınan sinyal azalacaktı. 2. bölgedeki sabit manyetik alanın büyüklüğü, ve yine aynı bölgedeki salman manyetik alanın frekans bilgileriyle doğrudan saptanabilen manyetik momentlerin detektör sinyallerini azaltması gerekiyordu. Bu iki parametre de yüksek duyarlılıklarla saptanabiliyordu.

Beklentilere göre çalışan manyetik rezonans aparatıyla hidrojen üzerine yapılan 3. tur deneyler 1938 yılının ortalarında başladı ve Temmuz ayına kadar veri toplandı. Bu seri deneylerde bazı beklenmeyen sonuçlar ortaya çıktı (bkz. Kitabın 13. Bölümü). Çalışmalarını maksimum düzeyde duyurmak amacıyla Rabi ve beraberindekiler protonla ilgili ilk sonuçlarını Washington'daki 1939 toplantısında, döteronla ilgili sonuçlarını da Haziran ayındaki Seattle toplantısında duyurdular. Nihai sonuçlarla ilgili tamamlanmış bir makale de *Physical Review* dergisinin Eylül sayısında yayınlandı. Bu makalede protonun manyetik momenti 2,785 ± 0,02 nükleer manyeton ve döteronun manyetik momenti de 0,855 ± 0.006 nükleer manyeton olarak verildi. Bu değerlerdeki belirsizlik oranı yüzde 0,7 idi (bkz. RESİM 12.2)

1934-1939 yılları arasında hidrojenler üzerinde yapılan deneyler birinci sınıf bilimsel malzeme içeriyordu. Genel olarak, büyük bilim insanlarını diğerlerinden ayıran fark, üzerinde çalıştıkları özel problemleri seçme yetileridir. Rabi her ne kadar gençlik yıllarında dinine bağlı biri olmadıysa da, bilimle uğraşmak konusundaki benzetmesi dini kültürünün etkisiyle oluşmuştu. Ona göre fizikle uğraşmak, "Tanrı'nın yolundan yürümek," bir fizik deneyiyle uğraşmaksa, "Şampiyonla güreşmek," idi. Uğraşmaya değer bir fizik problemiyle ilgilenmek, "sizi Tanrı'ya yaklaştırıyordu." Atomik dünyanın başrol oyuncuları proton ve döteron Rabi'yi Tanrı'ya yaklaştırmıştı. "Bir tane proton var," diyordu Rabi.

Eğer çözülecek problemin seçimi sağlıklı yapılmışsa, deneysel sonuçlarda giderek yükselen bir hassasiyete ulaşma isteği, büyük bilim insanlarının ayırıcı özelliğidir. İlk deneyden üçüncüsüne kadar deney sonuçlarındaki hassasiyetin artışı muazzamdı:

İlk deney, 1934: belirsizlik oranları protonda yüzde 10 ve döteronda yüzde 26
İkinci deney, 1936: belirsizlik oranları protonda yüzde 5 ve döteronda yüzde 4
Üçüncü deney, 1939: belirsizlik oranları protonda yüzde 0,7 ve döteronda yüzde 0,7

Rabi'nin deney sonuçları on yılların fizik teorilerine meydan okur nitelikteydi. Büyük bilimsel düşünceler yüksek duyarlılıkla birleştiğinde bazen sürprizlere öncülük eder, bazen de önemli keşiflere (bkz. Kitabın 13. Bölümü). Rabi bunu güzel açıklar: "En temel çekirdeğe ait ölçümleri yaparken, hidrojenin özelliklerini ölçüyormuşsunuz gibi bir hisse kapılırsınız; ölçün ve olabildiğince iyi ölçmeye çalışın. Mutlaka başka bir çalışmanıza veya projenize yararı olacaktır. Eğer bu olmazsa, o zaman özel bir durum var demektir. Burada anlayabileceğiniz bir sistem vardır. Karmaşa yoktur. Anlayamadığım herhangi bir şey, henüz keşfedilmemiş olan bir şeydir."[93] Sonuçta, Rabi'ninki gibi büyük deneyler, deneysel tasarımlarla karakterize olurlar; güzellik ve asalet önemlidir.

1934-1939 yılları arasında geliştirilen deneysel metotlar, manyetik rezonans metoduyla sona erdi. Bu metot, fizik alanına ve insani uygulamalara yönelik potansiyele sahip güçlü bir metottu. İkinci Dünya Savaşı'ndan kısa bir süre sonra rezonans metodu, bugün fizik, kimya ve biyoloji alanlarında kullanılan bir biçime evrildi. Sonraları, manyetik rezonans metodu yaşayan organizmalara da uygulandı. Manyetik rezonansla görüntüleme *[magnetic resonance imaging (MRI)]*, sağlıklı dokulara zarar vermeyen bir tarama aygıtı ve çağdaş tıbbın vazgeçilmezi haline gelmiş durumda. Ve bütün bunlar 1934 yılında Rabi'nin laboratuarında başladı.

Daha önce de söylediğim gibi, deneylere başladığımızda doğanın çalışma sistemiyle ilgili nasıl bir temel kavram ortaya çıkacağını tahmin edemeyeceğimiz gibi, bunun ilerde ne gibi pratik uygulamalarda kullanılacağını hayal dahi edemeyiz; büyük araştırmaların doğası böyledir. Hidrojen atomu, yeni temel ve pratik çıkarımlara öncülük etmede özellikle seçkin bir

dH/dZ
A mıknatıs
B mıknatıs
dH/dZ
A mıknatıs
B mıknatıs
dH/dZ
A mıknatıs
B mıknatıs
dH/dZ
A mıknatıs
C
B mıknatıs
S
O
D

konuma sahiptir. Üzücüdür ki Rabi, onun hiç düşünmediği bir içerikte, kendi çalışmasının bir uygulamasına şahitlik etmiştir.

1988 yılındaki ölümünden birkaç ay önce Rabi, kısa bir süreliğine hastaneye kaldırıldı. Doktoru onun sağlık durumunu olabildiğince eksiksiz biçimde anlamak istiyordu ve Rabi hastanenin MRI birimine götürüldü. Silindir mıknatısın içine yavaşça sokuldu -ki bu mıknatısın buradaki görevi Rabi'nin moleküler ışın aparatındaki mıknatısla aynıydı. Bu manyetik alanda Rabi'nin vücudundaki hidrojen atomları manyetik rezonans metoduyla tespit edilebiliyordu ve vücudunun bir kesiti görüntüleniyor, bu görüntüler de doktorlara, onun sağlık durumuyla ilgili detaylı bilgileri gösteriyordu. Rabi aparatın içindeyken, etrafını saran parlak metal silindirin yüzeyinde çarpılmış olarak yüzünün yansımasını gördü. Kendi görüntüsünü bir süre seyretti. "Tuhaf bir histi," diyor, Rabi. "Bu şeyde kendimi görebiliyordum. Çalışmamın bu hale dönüşeceğini asla hayal edemezdim."[94] Birkaç hafta sonra Rabi, evinde, huzur içinde öldü.

RESİM 12.2 (Solda) Manyetik rezonans metodunun evrimi. 1922 yılında yapılan basit Stern-Gerlach deneyi sol üstte gösteriliyor (bkz. aynı zamanda RESİM 11.1). 1930'larm ortalarında Rabi'nin yeniden odaklanma metodu, A ve B saptırma mıknatıslarıyla sağ üstte gösteriliyor. Sol alttaki illüstrasyonda, saptırma mıknatıslarının arasına ilave edilen T-alanı gösteriliyor. Sağ altta yer alan görünümde de, A ve B mıknatıslarının arasına ilave edilen C mıknatısıyla manyetik rezonans aparatı gösteriliyor. C mıknatısının kapsam alanında bir de salınımlı alan bulunuyor.

13

Yeni Nükleer Kuvvetler Aranıyor: Döteryumun Dörtlü Momentinin Keşfi

Norman F. Ramsey ve I. I. Rabi, 1939

Hidrojen bol miktarda gizemli özelliklere sahiptir.
—Daniel Kleppner

Kuvvetler bir şeylerin meydana gelmesini sağlar. Kuvvetler nesnelerin hızlarını artırır ve kuvvetler, nesnelerin hızlarını azaltır. Çeken kuvvetler ve iten kuvvetler vardır. Çeken bir kuvvet mıknatıslı süsleri buzdolabı kapısına yapıştırır ve Ayakkabıcı-Levy adlı kuyruklu yıldızı Jüpiter gezegeninin çalkalanan yüzeyine düşürür. İten bir kuvvetse, masanın üzerinden sökülüp alınan iki yapışkan bandı birbirinden ayrı kalacak şekilde iter. Fiziksel kavramlar arenasında kuvvet, en önemli unsurlardan biridir.

Doğal dünya çeşitli faaliyetlerle nabız gibi atar. Galaksiler şiddetli ve enerjik taşkınlarla doludur; yıldızlar doğar, bünyele-

rindeki hidrojen yakıtıyla yanarken farklı aşamalara evrimleşir ve ne zaman ki bu yakıt biter, ömürlerini tamamlarlar; gezegen sistemleri büyük yıldızlarla birlikte oluşur ve bu yıldız uyduları, Güneş ve dokuz gezegenlik ailesinden bildiğimiz üzere, çok çeşitli şekillerde meydana gelirler. Evrende en azından bir gezegenin üzerinde organik yapılar vardır ve şaşırtıcı çeşitlilikte büyüklük, şekil ve konumlara sahiptirler. Canlı organizmalar bulundukları çevreyle ilişkiye girer, zaman içerisinde birbirlerini değişime uğratırlar. Gözün gördüğünün dışında, atomlar ve moleküller, kimyasal elementleri sayısız kombinasyonla bir araya getirip şekillendirerek bütün maddi nesneleri ortaya çıkartış tangolarını yaparlar. Yine bizim görüş kabiliyetimizin çok dışında, maddenin içi ve uzay boşluğunun derinlikleri temel parçacıklarla doludur. Galaksilerden en küçük parçacıklar olan gluonlara kadar bu faaliyet bolluğu, dört temel kuvvetin sonucudur ve gerek tek başlarına, gerekse ardı ardına dizilip eklenerek, doğanın işleyişine hükmederek, her şeyin olabilmesini mümkün kılarlar.

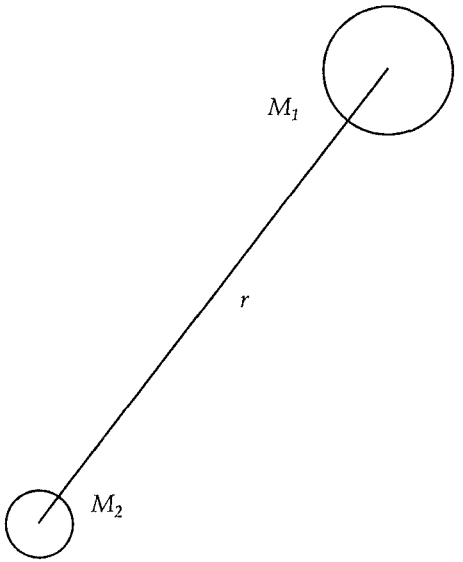
Bu dört temel kuvvetin en bilinen üyesi *kütle çekimi*dir *(gravity)* ve en çelimsizleri olmasına rağmen, geniş anlamda bakıldığında, evrende en büyük kudrete sahip kuvvettir. Kütle çekim kuvveti, galaksileri gruplar halinde birbirine bağlar, yıldızları galaksilerin içinde tutar, devasa ölmüş yıldızları kara delikler haline getirip içlerine çökertir, gezegenleri etrafında döndükleri yıldızın yörüngesinde tutar ve çocukların ve yavru köpeklerin ayaklarının sıkı sıkı yere basmalarını sağlar. *Elektromanyetik kuvvet* hem canlı ve hem de cansız dünyayı şekillendirir, atomik-moleküler birimleri iterek ve çekerek maddi nesnelerin mimarisine hükmeder. Elektromanyetik kuvvet, üzerinde oturan birine yerçekimine direnme kabiliyeti olan bir sandalye bahşeder. *Zayıf kuvvet (weak force)*, temel parçacıkların bazı belli davranışlarını yönetir. Bir elektronunu salarak bozunan dengesiz atomik çekirdekler (buna radyoaktif β-bozulması adı verilir), zayıf kuvvetin hükmettiği süreçlerden birine örnektir. Son olarak, dört temel kuvvetin en etkilisi olanı *güçlü kuvvet (strong force)*, atom çekirdeğini bir arada tutan kuvvettir. Güçlü kuvvet, yerçekimi kuvvetinden 10^{40}, yani 10,000 kere trilyon kere trilyon kere trilyon daha büyüktür. Yerçekimi kuvveti, diğer temel kuv-

vetlerle karşılaştırıldığında oldukça zayıftır ama kozmosu etkisi altında tutar çünkü her zaman çeker ve çünkü yıldızlar ve galaktik nesneler devasa büyüklüktedirler.

Her ne kadar kuvvetleri itme ve çekme özellikleriyle tarif etmek isabetliyse de, fizikçiler onları matematiksel detaylarıyla anlamak isterler. Örneğin, kütle çekim kuvveti çeken bir kuvvettir; dolayısıyla hiçbir zaman itmez, daima çeker. Ama bundan daha önemlisi, fizikçiler kütle çekiminin gücünü tam olarak neyin belirlediğini bilmek isterler. Isaac Newton bunu saptamış ve bulduğu sonuç bütün fizik öğrencileri tarafından öğrenilmiştir. İki nesne arasındaki kütle çekim kuvveti, kütlelerinin çarpımları (M_1M_2) oranında yükselirken, aralarındaki uzaklığın karesi ($1/r^2$) oranında da düşer. Newton bundan da öteye gitmiştir. Çekim kuvvetinin merkezi bir kuvvet *(central force)* olduğunu, yani kütlelerin merkezlerini birbirine bağlayan bir doğru boyunca etkidiğini göstermiştir. İki nesnenin kütleleri ve aralarındaki mesafe bilindiğinde, bu iki nesnenin arasındaki kütle çekim kuvvetinin değeri tam olarak hesaplanabilir (bkz. RESİM 13.1). Kütle çekim kuvveti matematiksel detaylarıyla bilindiği için de, kuyruklu yıldızların ne zaman görüneceği ve yaklaşan güneş ve ay tutulmalarının ne zaman olacağı hatasız bir hassasiyetle tahmin edilebilir. Fizikçiler, dört temel kuvvetin her birini tam matematiksel detaylarıyla anlamaya çabalarlar.

Atomik çekirdeğin protonlar (ve sonradan nötronlar) topluluğu olduğu anlaşılır anlaşılmaz, fizikçiler, yeni bir özel kuvvete daha ihtiyaç olduğunu biliyorlardı. Bunun sebebi gayet açıktı: Her bir proton pozitif elektrik yüküne sahiptir ve aynı yüklü protonlar arasında etkiyen elektromanyetik kuvvet itici özelliktedir. Ancak çekirdek dengeli bir yapıdadır ve böyle olduğundan, itici etkiye sahip elektromanyetik kuvveti alt eden ve çekirdeği bir arada tutan yeni bir çekici kuvvete ihtiyaç hâsıl olmuştur. Atomik bir çekirdeğin içi, elektromanyetik kuvvet ve güçlü kuvvetler arasındaki bir oyun alanıdır.

1932 yılında James Chadwick'in nötronu keşfetmesinden sonra, 1930'lu yıllar boyunca atomik çekirdek fizik araştırmalarının başat konusu haline gelmişti. Ve bu başat konunun sınırlarını zorlayanlar da Amerikalı fizikçilerdi.



ŞEKİL 13.1 Daima çeken kütle çekim kuvveti, merkezlerini birbirine bağlayan bir doğru boyunca iki kütleyi birbirine doğru çeker.

1930 yılına gelindiğinde, 1920'li yıllarda yeni fizik akımlarının yaratıldığı Avrupa'ya gitmiş olan genç Amerikalı fizikçiler evlerine dönmüşlerdi. Avrupa laboratuarlarına konuklukları sürecinde Edward Condon, J. Robert Oppenheimer ve I. I. Rabi gibi fizikçiler, kendi aralarında karar verdikleri üzere, Amerika'daki fizik dünyasını, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli ve diğer Avrupa fizik dünyası ileri gelenlerinin belirleyici gölgesinden çıkartmak yönünde bir amaca sahiptiler. Bu Amerikalı genç fizikçiler, Amerikan fiziğini rakipsiz kılmaya söz vermişlerdi. O sırada, 1932 yılında nötronun keşfiyle, bu sözlerini tutmak yönünde önemli bir yol da kat etmişlerdi.

1932 yılında Amerikan laboratuarlarında üç şey olmuştu: California Teknoloji Enstitüsü'nde Carl Anderson tarafından pozitron keşfedilmiş, Columbia Üniversitesi'nde Harold Urey tarafından döteryum keşfedilmiş ve California Üniversitesi, Berkeley'de Ernest Lawrence tarafından ivme makinesinin

(cyclotron) enerji kapasitesi 1 milyon volt seviyesine çıkartılmıştı. Böylece, fizikte başat rol Amerika laboratuarlarına kaymıştı. Nükleer araştırmaların birçoğunun yapıldığı bu üniversitelerde, Avrupa'daki yeni fiziği öğrenmiş ve dünya çapındaki araştırmaların ruhunu özümsemiş "çocuklar" ülkelerine geri dönmüş ve kendi araştırma gruplarına liderlik ederek çalışmaya başlamışlardı.

Özellikle Oppenheimer ve Rabi, Amerikan fiziği üzerindeki etkileri bakımından kayda değer isimlerdir. Her ikisi de 1929 yılının güz döneminde Avrupa'dan dönmüşlerdi. Oppenheimer, hem California Üniversitesi, Berkeley'de ve hem de California Teknoloji Enstitüsü'nde birleşik bir pozisyona atandığı batı kıyılarına gitmiş ve orada Amerikan teorik fiziğinin yeni kuşağını eğitiyordu. Rabi ise doğu kıyılarına yerleşmiş, Columbia Üniversitesi'nde moleküler ışıma üzerine deneysel araştırmalarını yapmaya başlamıştı. 1938 yılına gelindiğinde Rabi, öğrenciler ve doktora üstü araştırmacılardan oluşan olağanüstü bir grup kurmuştu. Bu grubun üyeleri, giderek fizik dünyasının en tanınan kişileri haline gelmişlerdi. Grubun içinde, ilerleyen yıllarda Nobel ödülü alacak dört kişi vardı: Rabi'nin kendisi ödülü 1944 yılında kazandı; Polykarp Kusch 1954, Julian Schwinger 1964 ve Norman Ramsey de 1985 yılında ödüle layık bulundu. Bunlara ilave olarak, Jerrold Zacharias sonradan Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde, fakültenin en yüksek pozisyonuna gelerek profesör oldu. Donald Hamilton, Princeton Üniversitesi'nde fizik bölümünün başkanlığına geldi. Sidney Millman, AT&T bünyesindeki Bell Laboratuarlarının üst düzey idari kademelerinde yükseldi. Ve Jerome Kellogg, Los Alamos Ulusal Laboratuarı'nda bir bölümün yöneticisi oldu.

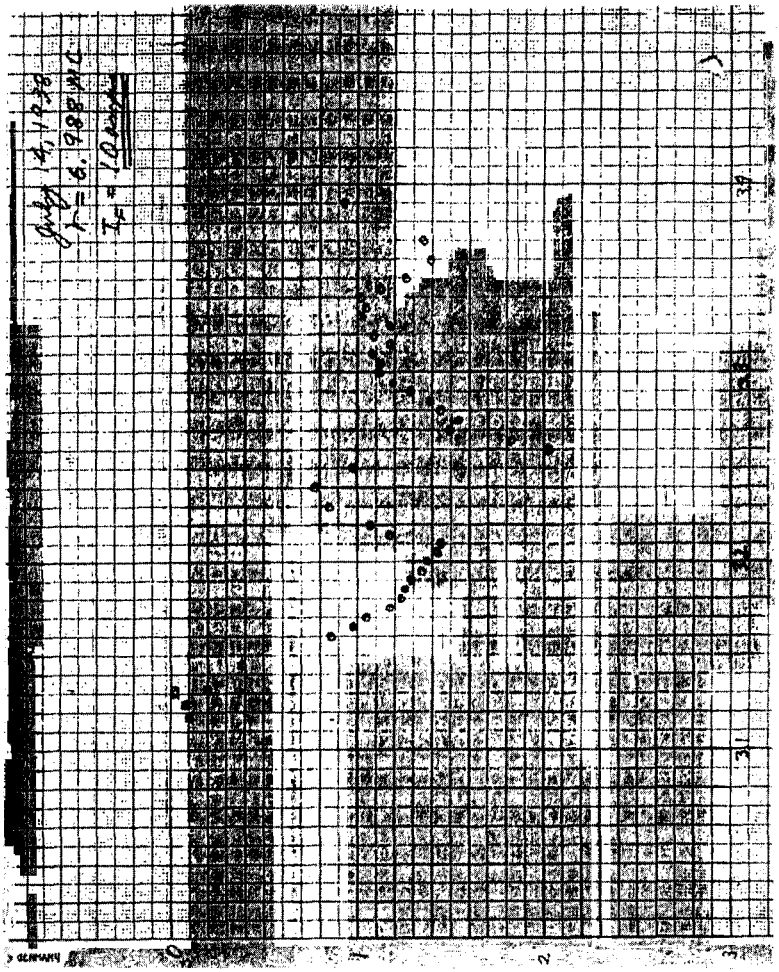
Bilimsel araştırma, yoğun biçimde kişisel, özel ve rekabete dayalı bir etkinliktir. Fikirler bireylerin zihninde şekillenirler. Ve ancak fikirleri yaptıkları bilime yön veren bilim insanları onurlandırılır. Aynı zamanda bilimsel araştırma, bilim insanları arasındaki fikir alışverişlerinden ve grup halinde çalışma dinamiklerinden güçlü biçimde etkilenir. Göreceğimiz gibi, Rabi'nin Columbia'daki grubunda hem kişisel ve hem de grup halinde yapılan çalışmalar vardı.

Rabi ve öğrencileri hidrojen üzerinde manyetik rezonans deneylerine başladıklarında, çekirdek içindeki protonlar ve nötronlar arasında rol oynayan güçlü kuvvetin, aynen kütle çekim kuvvetinde olduğu gibi, bu nükleer inşa bloklarının merkezlerini birleştiren doğrular boyunca etkidiği varsayılmıştı. Çekirdekteki parçacıklar arasında rol oynayan böylesi bir kuvvet, proton ve nötron topluluğuna küresel bir şekil verecekti. 1934 yılında başlayan ve 1938 yılına kadar süren hidrojenler üzerine seri deneyler boyunca ortak akıl bu yöndeydi.

1938 deneylerinin amacı, hidrojen ve döteryum çekirdeklerinin manyetik momentlerinin olabildiğince hassas biçimde ölçülmesiydi. Aynı yıl, tam kendilerini, hidrojenlere yeni rezonans metodunu uygulayarak protonun ve döteronun manyetik momentlerini çok daha hassas biçimde ölçmeye hazırlamışlarken, Rabi ve grubunu heyecanlandıran yeni bir ilham kaynağı oluşmuştu. Sonunda bu amaçlarına başarılı bir şekilde ulaşacaklardı ama atom çekirdeği ile ilgili karşılarına çıkan yeni bir temel bilgiyle de şaşkına dönmekten geri kalmayacaklardı.

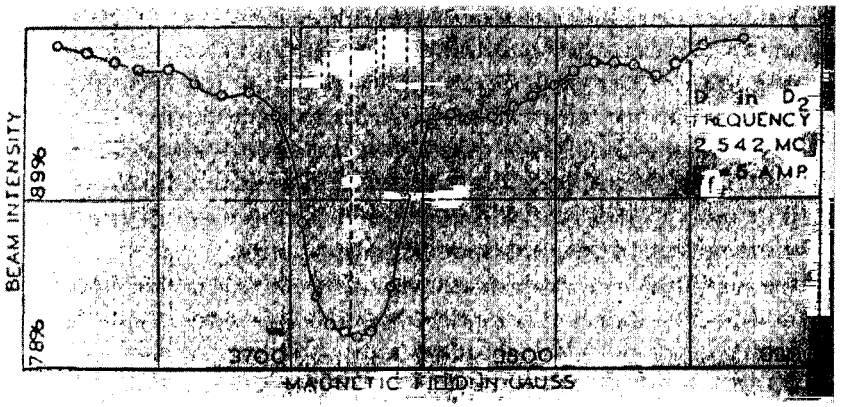
1938 yılının ortalarında hidrojenler -H_2, HD ve D_2- üzerine ölçümlere rezonans yöntemi uygulandığında, beklentiler, detektörün basit, göreceli olarak keskin ve RESİM 13.4'de görülen eğriye benzer bir rezonans üst değeri vereceği yönündeydi. Ama deneyi yapan Ramsey, H_2 ve D_2 için çok değişik bir şey buldu. H_2 için, çok da belirgin bir tepe noktası olmayan, geniş, zikzaklı tek bir eğri gördüler. Buna karşın D_2 için de, zayıf ve geniş tek bir tepe noktası olan, belirgin özellikleri olmayan kanatlar halinde bir eğri gözlemlediler (Bkz. RESİM 13.3). O sırada Ramsey, Columbia Üniversitesi'nin kendisinden yazmasını istediği tezin konusuna hizmet edebilecek bir deney arıyordu. H_2 ve D_2 rezonanslarının bu tuhaf özellikleri, kullanılan aparatın etkileri olarak düşünülerek, Ramsey'den bunlar üzerine bir çalışma yapması istendi.

Ramsey yetenekli bir öğrenciydi. Fizik teorilerine yakın ilgisi ve bunları matematikle ilişkilendirmesi, bir deneyci olarak dehasını destekleyen etmenlerdi. RESİM 13.2 ve RESİM 13.3'de görülen veriler, Ramsey'in tez araştırmasının başlangıcında elde ettiği verilerdir. Bundan kısa bir süre sonra, çok daha düşük bir



RESİM 13.2 Ramsey'in 1938 yılı laboratuar defterinden alınan ve H_2 için çıkan ilk eğri.

titreşim gücüyle H_2 eğrilerinin altı ayrı, gayet tanımlı rezonans verdiğini buldu; manyetik rezonansta ilk kez çoklu eğri yapısı gözlemleniyordu. Bu beklenmeyen sonuçla cesaretlenen Ramsey, D_2 rezonansının güçsüz kanatları üzerinde de çalıştı ve bu kanatların da çoklu rezonansı açığa çıkardıklarını keşfetti.



RESİM 13.3 Ramsey'in 1938 yılı laboratuar defterinden alınan ve D_2 için çıkan ilk eğri şekli. Bu ham ilk veriler, daha sonra iyileştirilmiş biçimde alınan ve RESİM 13.4'de gösterilen verilerle karşılaştırılmalıdırlar.

Dahası, bu rezonanslar, H_2 rezonanslarına oranla birbirinden çok daha uzağa saçılmışlardı. Bulunan sonuç kafa karıştırıcıydı; D_2'de başka bir şeyler oluyordu. Ramsey şaşırmıştı.

Ramsey topladığı verileri 1938 yazında Stanford Üniversitesi'nde ders veren Rabi'ye bir telgrafla gönderdi: "Bu ne yapıyor?" Sonra tekrar olası açıklamaları araştırmaya devam etti. 14 Eylül'de defterine şöyle yazmış: "Aparatın kendisi bu kanatlara neden olabilir mi?" Bu soruya bir yanıt bulmak ve verilerini geliştirmek için Ramsey, aparatı yeniden tasarlamaya karar verdi. Tuhaf ve muhtemelen önemli bir şeyler olduğuna şüphe yoktu.

Bir keresinde Rabi, birlikte çalıştığı gruba referansla "Biz gerçek bir ekibiz," demişti. Gerçekten de, 1938 yılının ortalarında Rabi Stanford'dan döndüğünde, araştırma grubundaki ekip ruhu kendini göstermişti. Rabi burada alınan tuhaf sinyal şekillerinin kayda değer bir gelişme olduğunu hissetmiş, araştırma ekibinin diğer üyelerini de bu potansiyel öneme sahip deneye katılmaya davet etmişti. Sonuçta Ramsey tezi için başka bir konu bulmak zorunda kalmıştı.

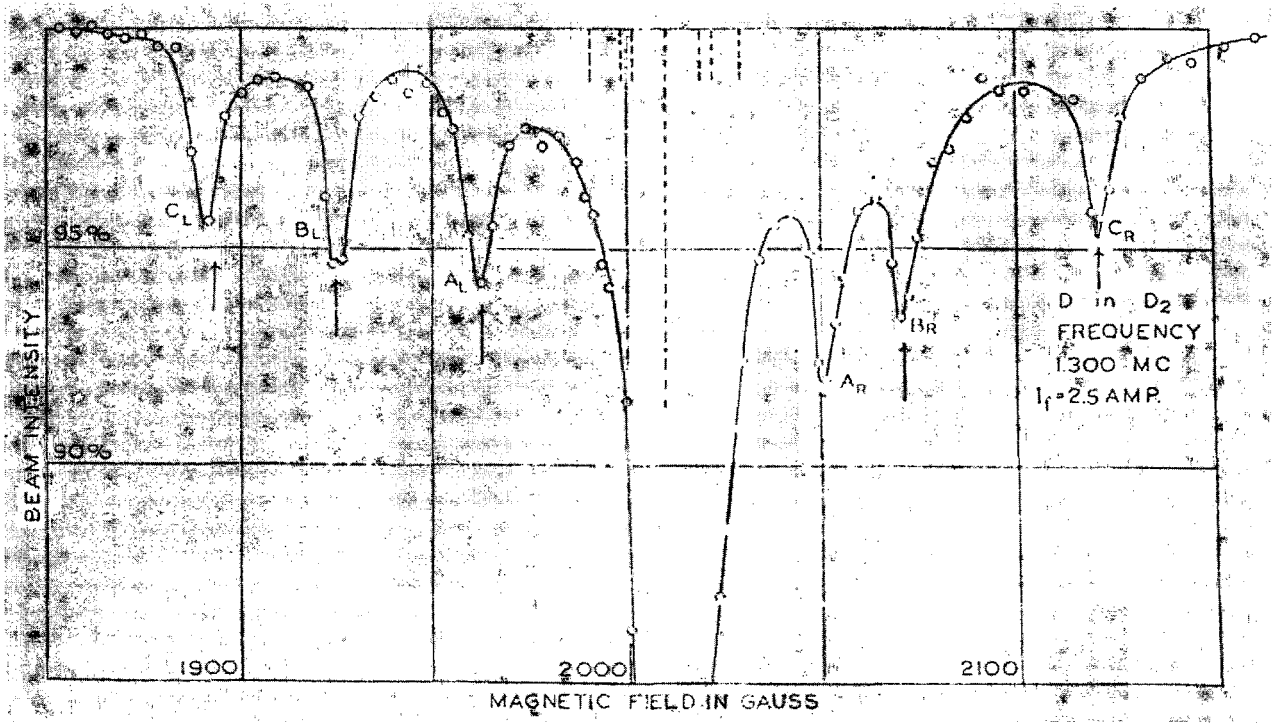
Bir sonraki deney serisi, yeni tasarlanan aparatın içinden geçirilen bir döteryum molekülü ışınıyla başladı. Metodun uygu-

lama ayarları bir deneyden öbürüne giderek iyileştirildi ve süreç içerisinde "kanatlar" üzerinde çok daha özel ayrıntılar kendilerini göstermeye başladı. Deneyler serisinin sonunda ortaya çıkan ayrıntılar muazzamdı. RESİM 13.4'de gösterilen verilere istinaden, merkezdeki büyük rezonansın uydu rezonanslar tarafından sarılmış oldukları açıkça görülmektedir -her iki yanda da üçer tane olarak. Merkezdeki rezonans, döteryumun manyetik momentini yüksek bir duyarlılıkta veriyordu. Onun etrafında yer alan uydu rezonanslar için yeni bir açıklama gerekiyordu.

Meseleyi daha net biçimde ortaya koymak gerekirse, asıl şaşkınlığı yaratan uydu rezonansların kendileri değil, bu daha küçük rezonansların böylesine geniş dağılımıydı. Rabi grubu teorik olarak küçük rezonanslar olacağını önceden tahmin etmişti ama bu rezonansların konumlarına yönelik tahminleri, büyük rezonansın kapsamında, onun altında olacağı yönündeydi. Bu küçük rezonansları deneysel olarak gözlemlemek de, eğer imkânsız değilse, oldukça güç bir işti. Küçük rezonansların merkezi büyük rezonanstan bu denli uzaklaşmasına ve ayrık biçimde dağılmasına neden olan yeni bir şey vardı. Yayılma grubun teorik olarak saptadığı tahminlerden altı kez daha genişti. Bu yayılmanın sebebi, atomik çekirdeğin yeni ve beklenmeyen bir özelliğiydi: Elektriksel kuadrupol (dört kutup, dört kutuplu, dörtlü) moment (İng.: *the electric quadrupole moment*).

Proton veya döteronun manyetik momenti, onları kuzey ve güney kutupları olan bir mıknatıs çubuk gibi davranmaya iter. Bunun anlamı, tıpkı bir mıknatıs çubuğun manyetik alan içindeki davranışı gibi, proton ve döteronun da kendini manyetik alana göre konumlandırıyor olmalarıdır. Elektriksel dörtlü momenti tahayyül etmek bundan biraz daha zordur. Eğer döteron içindeki pozitif yükün yoğunluğu hafifçe iki ayrı konumda odaklanıyorsa, bu durumda bir diğer iki ayrı konum, göreceli olarak, hafifçe negatif hale dönüşür ve böylece iki pozitif yüklü merkez ve iki de negatif yüklü merkez ortaya çıkar. Böylesi bir yük dağılımı da döterona bir elektriksel dörtlü moment yapısı kazandırır. İşte Rabi ve öğrencilerinin keşfettikleri buydu.

Döteronun dörtlü momentinin 1939 yılındaki keşfi tam bir sürprizdi. "Gerçekten de, bu deneyler başladığında böyle bir dörtlü momentin araştırılmasına yönelik bir hedef yoktu çünkü



RESİM 13.4 Döteronun dörtlü momentinin saptandığı D_2 rezonans verileri.

o günlerin teorisi, proton ve nötronlar arasındaki merkezi kuvvetler varsayımı üzerine geliştirilmişti; döteronun ... elektriksel ... dörtlü ... momente sahip olduğu varsayımı üzerine değil."[95] Bu kelimelerle yayınlanan Rabi ve grubunun makalesi, döteronun dörtlü momentinin keşfini duyuruyordu.

Bu keşif, fizikçilerin atomik çekirdek içinde rol oynayan merkezi kuvvetler varsayımından vazgeçmelerini gerektiriyordu. Merkezi kuvvetler gayet açık biçimde anlaşılıyor ve teorik olarak da kolayca ele alınabiliyordu; bu nedenle fizikçiler, merkezi kuvvetler fikrinden vazgeçmek konusunda oldukça isteksizdiler. 28 Kasım 1939'da, Harvard Üniversitesi'nden J. H. Van Vleck, Rabi'ye yazdığı mektupta, "Ortaya attığınız bu dörtlü moment konusundaki ayrıntılar hususunda hiç net değilim. Tam olarak ne yaptığınıza yönelik ayrıntıları bana gönderirseniz, dörtlü moment konusundaki girişimlerinizi desteklemek yönünde elimden geleni yapacağımdan kuşkunuz olmasın," diyordu.[96] Bir hafta sonra, 5 Aralık'ta Van Vleck tekrar Rabi'ye, "Deneyleriniz üzerine biraz düşündüm de, bir eleştiri noktası bulamadım... Deneylerinizin bu en ilginç sonucundan dolayı sizi kutlarım."[97]

Merkezi kuvvetin yerine gelen yeni kuvvet daha karmaşıktı. İki nesne arasmdaki bir merkezi kuvvet, sadece nesnelerin aralarındaki uzaklığa bağlıdır. Döteron içindeki dörtlü momentin varlığı bir tensor kuvvete (ç.n. üçten fazla elemana dayanarak tanımlanabilen vektör kuvvet) ihtiyaç gösterir ve bu kuvvet de sadece proton ve nötron arasındaki mesafeye değil, bu iki parçacık arasındaki doğru boyunca spinleri tarafından yaratılan açılara da bağlıdır.

1966 yılında, belki de yirminci yüzyılın en etkin nükleer fizikçisi olan Cornell Üniversitesi'nden Hans Bethe, 1935-1948 yılları arasında meydana gelen üç önemli olayı tanımladı. Ona göre bunlardan ilki, nükleer kuvvetlerin detaylı tanımlarıydı; ikincisi, Yukawa potansiyelinin kullanımı ve üçüncüsü de -belki de en önemlisi buydu- döteronun dörtlü momentinin keşfiydi.[98]

Bir kez daha hidrojen fizikçileri şaşırtıyordu. Nükleer kuvvetlerin doğasına yönelik sıkı sıkıya bağlanılan bir ön-kabul, doğadaki en basit atom tarafından ezilip yerle bir ediliyor ve bu süreçte de fizik teorilerine yeni bir yön veriyordu.

14

Kütleli Maddede Manyetik Rezonans (NMR)

Edward M. Purcell ve Felix Bloch, 1946

İlk deneylerimizi yaptığımız kış, bundan sadece yedi yıl önce, kapımın önünde yağan kara baktığımı hatırlıyorum –Dünya'nın manyetik alanı içinde sessizce dönen proton yığınları.

—Edward M. Purcell

Amerika Birleşik Devletleri 8 Aralık 1941'de İtalya ve Almanya'ya resmen savaş ilan etti. ABD'nin II. Dünya Savaşı'na girmesinden uzun bir süre önce birçok Amerikalı fizikçi huzursuz olmaya başlamıştı. 1938 yılının Aralık ayı sonlarında Almanya'da nükleer fisyon (ç.n. atomun parçalanması) keşfedilmişti. Bu büyük olayı Niels Bohr, 3 Ocak'ta, ABD yolunda Drottingholm'a gitmeden 3 gün önce öğrendi. ABD'de birkaç ay boyunca, Princeton'daki İleri Çalışmalar Enstitüsü'nü ziyaret etmeyi planlıyordu. Bohr'un yanında oğlu Erik ve genç bir meslektaşı olan Léon Rosenfeld vardı. Rosenfeld, Atlantik-ötesi yol-

culukları boyunca zamanının büyük bölümünü Bohr'un bu yeni keşfin getirecekleri üzerine görüşlerini dinlemekle geçirmişti.

Bohr 16 Ocak günü New York City iskelesinde Enriko Fermi, karısı Laura ve Princeton'lu fizikçi John Wheeler tarafından karşılanmıştı. Wheeler ve Rosenfeld yola devam edip Princeton'a doğru yola çıkarken, Bohr o günü New York'ta Fermi ailesiyle geçirmiş, Fermi'ye atomun parçalanması keşfiyle ilgili hiçbir şey söylememişti. Zira bu keşfi yapan Otto Robert Frisch ve Lise Meitner'in, Otto Hahn'ın yürüttüğü deneylerden aldıkları sonuçları açıklayıp, başka biri haberi Bohr'un kendisinden duymadan, hak ettikleri krediyi almalarını istiyordu. Bu nedenle de, atomun parçalanması keşfiyle ilgili havadisleri Princeton treninde ilk olarak Wheeler ile paylaşan Rosenfeld olmuştu. Aynı günün ilerleyen saatlerinde Princeton'daki Fizik Bölümü Haber Kulübü üyeleri Rosenfeld ile buluşmuş ve Rosenfeld atomun parçalanmasıyla ilgili bir konuşma yapmıştı. On gün sonra, 26 Ocak günü George Washington Üniversitesi'nde bir konferans yapılmış ve atomun parçalanmasına yönelik haberler daha geniş kitlelere duyurulmuştu. Washington konferansından sonra da nükleer fisyon haberi hızla yayılmıştı. Neredeyse fizikçilerin nükleer fisyon ile açığa çıkacak enerjinin -muazzam enerjinin- zincirleme reaksiyon yaratma potansiyelini idrak etmelerinden daha hızlı yayılmıştı bu haber.[99] Bu idrak, beraberinde büyük bir endişeyi de getirmiş, söz konusu potansiyelin, elbette üstün yetenekli Alman fizikçileri tarafından da bilindiği ve hayata geçirilebileceğinden kuşku duyulmamıştı. Amerikalı fizikçiler gerçekten huzursuz olmuşlardı.

Fizikçilerin endişelerine karşılık ortaya çıkan ilk fırsatın nükleer fisyonla hiçbir ilgisi yoktu. Bu fırsat da diğer bir Atlantik-ötesi gemiyle, 7 Eylül 1940 günü Nova Scotia sahillerine ulaşan *Richmond Düşesi* tarafından getiriliyordu. Bu gemide İngiliz bilim insanlarından oluşan bir delegasyon bulunuyordu. Beraberlerinde, "sahillerimize ulaşan en değerli kargo," diye adlandırılan bir yük vardı.[100] Söz konusu kargo küçüktü; tek elle tutulup kaldırılabiliyordu. Adı manyetrondu (ç.n. mikrodalga üreten bir lamba) ve İngiliz bilim adamları John Randall ve Henry Boot tarafından keşfedilmişti. On santimetrelik bir dalgaboyunda 10,000 watt güç üretebiliyordu.

7 Ekim günü New Jersey'deki Bell Telefon Laboratuarları'nda manyetron, bir grup fizikçiye gösterildi. Bu gösterim izleyenler üzerinde derin bir etki bıraktı: Buz hokeyi topu kadar bu aletle, savaş uçakları ve gemileri tarafından taşınabilecek küçük bir radar geliştirilebilirdi.

Manyetronun Bell Laboratuarları'ndaki personele gösterilmesinden sonra her şey çok hızlı gelişti. İki haftadan biraz daha uzun bir süre sonra, Massachusetts Teknology Enstitüsü'nde (MIT) mikrodalga radarlarının geliştirilmesi için federal hükümetin desteklediği bir laboratuar kurulması kararı verildi. Yeni laboratuarın adı MIT Radyasyon Laboratuarı olmuştu. Bu ismin seçilmesi bir aldatma taktiği içeriyordu: California Üniversitesi Radyasyon Laboratuarı bütün dünya tarafından nükleer fizik alanında tanınmış bir odaktı ve dolayısıyla insanların MIT Radyasyon Laboratuarı'nda da nükleer çalışmalar yapılacağını varsayması umuluyordu; radara yönelik çalışmalar değil. 1940 yılında Amerika'da, nükleer fisyonun keşfine rağmen, nükleer çalışmalar hâlâ akademik bir ilgi odağı olmaktan öteye geçmiyordu. Aralık ayının ilk haftası boyunca ülkenin her yerindeki fizikçiler apar topar çalıştıkları üniversite laboratuarlarını kapatmaya başlamışlardı. İşlerini tamamlar tamamlamaz da, gelecek beş yıl boyunca radar konusunun iyice geliştirileceği Cambridge ve Massachusetts'e yönlendiler. Cambridge'e ilk ulaşan fizikçilerden biri de I. I. Rabi idi. Erken gelen fizikçilerden bir diğeri de, MIT'nin üzerinde bulunduğu Massachusetts Avenue caddesinden bir mil kadar uzaktaki Harvard Üniversitesi'nden genç bir eğitmendi. Bu fizikçi Edward M. Purcell'di. ABD'nin II. Dünya Savaşı'na resmi olarak girmesinden bir yıl kadar önce, 1940 yılının sonlarına doğru Amerikalı fizikçilerin pek çoğu savaşa fiilen girmişlerdi bile.

1943 yılının başlarında Amerikan gizli istihbaratı, Almanların kendi radarlarını geliştirdiklerini öğrendi. Buna karşılık olarak Harvard'da yeni bir laboratuar kurularak, Amerikan uçaklarını ve gemilerini radar tespitinden korumak amacıyla bir karşı- (engelleyici-, önleyici-) radar sistemi üzerine çalışmalar başladı. Her ne kadar bu çalışmalar MIT bünyesinde daha önceden başlatıldıysa da, yeni merkez Harvard'a kaydırılmış ve bu defa Radyo Araştırma Laboratuarı olarak adlandırılmıştı. 1943

yılının sonlarında, Stanford Üniversitesi fizikçilerinden Felix Bloch da Harvard'daki çabalara katılmıştı. Bloch daha önce Los Alamos'da bomba yapımı üzerine çalışmış ancak Los Alamos'daki askeri havadan, mektuplarının açılıp okunmasından ve güvenlik kontrollerinin gündelik hayatının bir parçası olmasından hoşlanmamıştı.

Savaş boyunca Purcell ve Bloch aynı semtte çalışmalarını sürdürmüştü. Harvard'daki karşı-radar *(counterradar)* geliştirme çabaları MIT'deki radar çalışmalarını yürütenlerden gizlenmişti. Bu yüzden de iki fizikçi savaş boyunca birbirlerini sadece bir kez görmüşlerdi. O görüşme de, 1944 yılında Rabi'nin Nobel ödülünü alışının kutlandığı partide gerçekleşmişti.

MIT ve Harvard'daki araştırmalar ve gelişmeler sürecinde yeni radyasyon kaynakları ve tespit sistemleri, radar ve karşı-radar aletleri içindeki yerlerini almışlardı. Aslında, birçok yeni aparat ve yeni deney tekniği bu dönemde yüksek duyarlılık seviyelerine ulaştırılmışlardı. Yeni mikrodalga radyasyon kaynakları mükemmelleştirilmişti; küçük sinyalleri tespit edebilen yeni elektronik devreler tasarlanmıştı. Savaş bittiğinde, bu radyasyon kaynakları ve tespit cihazları, bu aparatlar ve teknikler, bu elektronik kabiliyetler, birdenbire araştırma yapmak için kullanıma açılıvermişti. Böylece fizikçiler eşikte durmuş, savaşın yarattığı elektronik devrelerle, mikrodalga radyasyon kaynaklarıyla ve sinyal detektörleriyle yeni araştırmalara açık devasa deney alanlarına bakakalmışlardı. Purcell ve Bloch gibi fizikçiler hamle yapmakta hızlı davrandılar.[101]

Savaş çabalarına katıldıklarında Purcell ve Bloch profesyonel kariyerlerinde farklı seviyelerdeydiler. Bloch, Purcell'in yedi yıl üstüydü ve 1934 baharından beri Stanford Üniversitesi'nde profesördü. Los Alamos'a başladığında ardında kayda değer miktarda araştırma bırakmıştı. Bunun tersine Purcell, MIT Radyasyon Laboratuarı'ndaki işine başladığında okulu henüz bitirmiş, Harvard'daki fakültede öğretim görevlisi statüsüne daha yeni atanmıştı. Purcell daha kendi araştırma hedeflerini oluşturmuş değildi.

Purcell'in profesyonel gelişiminde Radyasyon Laboratuarı'ndaki tecrübe çok önemliydi. İleri düzeydeki birçok fizikçiyle

bir araya gelmiş, onların laboratuardaki çalışmalarından önce fizik alanında yaptıklarını öğrenmişti. Purcell'in kendi ifadesiyle, "Rabi'nin Columbia'daki laboratuarından fizikçiler" özellikle etkileyiciydiler.[102] Rabi, Ramsey, Zacharias ve Henry Torrey'den, Rabi'nin savaş öncesi yürüttüğü manyetik rezonans deneylerini öğrenen Purcell'in kafasında, uzadıkça uzayan savaş sürecinde fikirler oluşmaya başlamıştı.

Savaşın resmen bittiği tarihten kısa bir süre önce Rabi, MIT bünyesinde muazzam büyüklükte bir kitap yazma projesi başlatmıştı. Bu çabaların sonucunda, Radyasyon Laboratuarı'nda radar geliştirilme çabaları sırasında elde edilen teknik başarılar üzerine eksiksiz bir döküm içeren bir dizi -toplam yirmi yedi cilt- kitap çıktı. Radyasyon Laboratuarı Serisi olarak bilinen bu kitaplar, teknik başarıların daha geniş bir bilim dünyasına iletilmesine hizmet ederken savaşı takip eden yıllarda bilim insanları ve mühendislerin el kitapları haline geldiler. Purcell'de diğer iki yazarla birlikte serinin 8. cildini yazmıştı.[103] Bu kitap yazma seferberliği savaş bittikten sonra birkaç ay daha sürdü.

Bir Eylül günü, zaferin ilan edilişinin *(V-J day)* bir ay sonrası, Purcell'in Radyasyon Laboratuarı'ndan arkadaşları ve kendileri de mikrodalga elektroniği üzerine kitap yazan fizikçilerden olan Robert V. Pound ve Henry C. Torrey, Purcell'i öğle yemeğinde kendilerine katılması için çağırdılar. Torrey savaş öncesinde Columbia'da Rabi'nin öğrencisi olmuştu ve Rabi'nin manyetik rezonans metoduna gayet aşinaydı. Batıya, Massachusetts Avenue Caddesi boyunca Cambridge'deki Central Square'e doğru yürürlerken Pound, Purcell'in Torrey'e, Rabi'nin moleküler ışınlarla sürdürdüğü manyetik rezonans deneylerini neden katı cisimler üzerinde de uygulamadıklarını sorduğunu hatırladı. Purcell'in düşüncesi, içinde bol hidrojen bulunan katı bir maddeyi alıp sabit bir manyetik alan içine yerleştirdikten sonra -ki kuantum mekaniğine göre bu durum kesikli enerji seviyeleri yaratacaktı- bu hidrojen atomlarını radyofrekans radyasyonu içine koyup enerjinin hidrojen atomları tarafından emilip emilmediğini görmekti. O günkü konuşmalarında Torrey bu olasılık üzerindeki kuşkularını dile getirirdiyse de, ertesi gün, bir akşam yapılan hesaplardan sonra Purcell'e, katı maddelerde manyetik rezonans deneyinin olasılığı üzerine daha iyimser olduğunu

söyledi. Purcell hem Pound hem de Torrey'i bu çabasında kendisine katılmaya davet etti.

Yaklaşık aynı zamanlarda, belki biraz daha önce, bir diğer yürüyüş yaşanmıştı. Bloch, 1945 yazı sonunda Harvard'daki işini bitirmiş, Stanford'a geri dönmeden kısa bir süre önce de, MIT'yi ziyaret eden Stanford'dan meslektaşı William W. Hansen'le öğle yemeğine gitmişti. Bloch ve Hansen Massachusetts Avenue Caddesi boyunca doğuya, Charles Nehri'nin karşısındaki bir restorana doğru yürümüşlerdi. Yemek sırasında Bloch Hansen'e, Stanford'a döndüğünde yapmak istediği bir deneyi anlattı. Bloch'un deneyi, hidrojen muhteviyatı zengin katı bir madde örneği alıp manyetik alan içine yerleştirmek ve hidrojen çekirdeklerinin manyetik momentlerinin radyofrekans radyasyonu tarafından yeniden yönlendirilip yönlendirilmeyeceklerini görmekti. Her ne kadar farklı biçimde kavramsallaştırılıp tanımlandılarsa da, Bloch'un Hansen'e izah ettiği deneyle Purcell'in Pound ve Torrey'le tartıştığı deney birbirinin eşdeğeriydiler. Hansen Bloch'un fikriyle hemen ilgilendi ve sözünü ettiği deneysel yaklaşımın geliştirilebileceği yollar gördü.

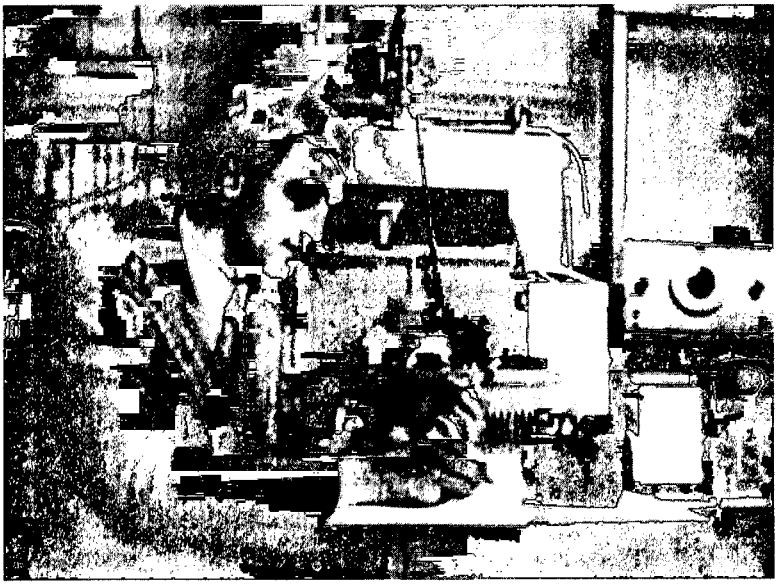
Birbirlerinden haberleri olmaksızın Purcell ve Bloch, 1945 güz döneminde, Harvard ve Stanford'da aynı zamanlarda kişisel deneylerine başladılar (RESİM 14.1 ve 14.2). Savaş sonrası Harvard'da da Stanford'da da hem az para hem de kısıtlı ekipman bulunuyordu. Bir defasında Ernest Rutherford, "Paramız yok, dolayısıyla düşünmek zorundayız," demişti. Purcell de Bloch da Rutherford'un bu öğüdüne kulak vermişti.

O günlerde MIT Radyasyon Laboratuarı Serisi kitaplarını yazmakla meşgul olan Purcell, Pound ve Torrey için Harvard deneyleri sönük geçiyordu. Her iki grup da oradan buradan ekipman otlakçılığı yapmaya başlamıştı. Purcell bir mıknatıs bulmak için MIT laboratuarlarına bakındı, ama bir tane bile bulamadı. Profesör J. Curry Street bir zamanlar Harvard'da sürdürdüğü kozmik ışınlarla ilgili çalışmasında bir mıknatıs kullanmış, Purcell de onu ikna edip, Lyman fizik binasının arka tarafında duran bu mıknatısı ödünç almayı başarmıştı. (Bu mıknatısın hayata ilk başladığı yer, Boston Demiryolu inşaatında kullanılan jeneratörün içi olmuştu.) Deney için gereken sinyal üretici



RESİM 14.1 Edward M. Purcell

ekipman da Harvard'a bağlı Psiko-Akustik Laboratuarı'ndan ödünç alındı. Bir elektronik dehası olan Bob Pound, deney için gereken elektronik devrelerin sorumluluğunu üzerine almıştı. Örnekleri içinde tutacak olan pirinç kap, savaşın bitimiyle işleri yavaşlayan MIT çalışanı bir makineci tarafından yapıldı. O sırada Torrey, deney için gereken tasarımlara yön verecek teorik hesaplamalarla boğuşuyordu.



RESİM 14.2 Felix Bloch.

Aynı günlerde Bloch, yapacağı deneyler için Stanford'dan 450 dolar para almıştı. Paranın 300 dolarlık büyük bir bölümü sadece bir ekipmana, bir osiloskopa, harcanmıştı. Sınıflarda yapılan fizik deneyleri için gereken malzemelerin tutulduğu depodan da bir mıknatıs ödünç alınmıştı. Bir diğer elektronik sihirbazı Bill Hansen elektronik devreleri tasarlamış, bir yüksek lisans öğrencisi Martin Packard ise devreleri bir araya getirmişti.

Purcell ve Bloch'un deneyleri, geçmiş tecrübelerinin mutlak etkisi altında kalmıştı. Bunun sonucunda, her iki deney de belirgin biçimde farklı yollardan ele alınmıştı. Bu farklılık öylesine belirgindi ki, deneyi yapanların kendileri bile ilk bakışta bunların eşdeğer deneyler olduklarını anlamakta güçlük çekiyorlardı.[104]

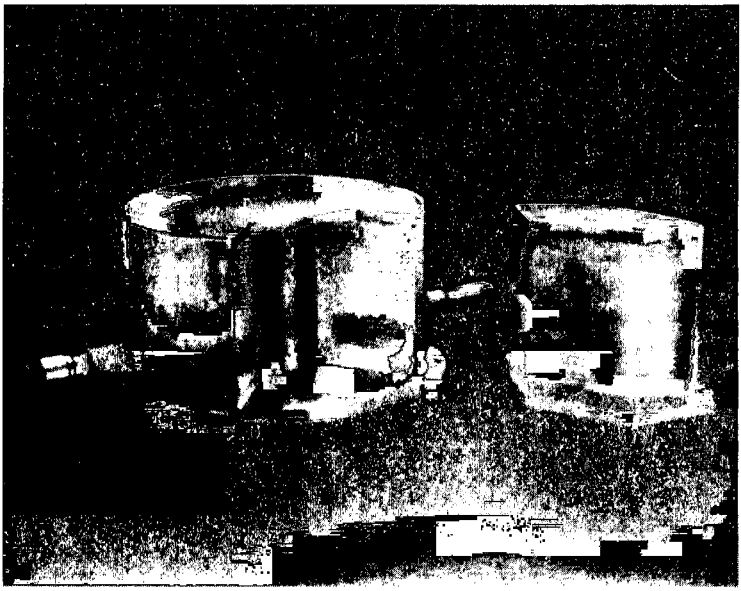
Daha önce de belirtildiği gibi, Purcell gençti ve arkasında çok da fazla araştırma deneyimi yoktu. Fakat gerçekleştirdiği iş onu iki seviyeli bir kuantum sistemi ile yüz yüze getirdi. Belki de burada Purcell'le ilgili en anlatılması gereken şey, geçmişte Radyasyon Laboratuarı'nda yapılan radar çalışmaları sırasında,

etrafındakilerce yapılan işlerin onu nasıl etkiledikleridir. Radyasyon Laboratuarı fizikçileri, giderek kısalan dalgaboylarıyla, radar sistemleri üzerine çalışıyorlardı. Dalgaboyunu 1,25 cm'ye düşürdüklerinde, sonuçların üzerinde veba illeti gibi, merak uyandırıcı bir sorun belirmişti: Bu dalgaboyunda sistemler bazen çalışıyor, bazen çalışmıyorlardı. Bu sorunun nedeni kısa süre sonra anlaşılmıştı: Havanın içinde bulunan su. Harvard profesörlerinden J. H. Van Vleck, su moleküllerinin iki kuantum seviyesinin farklı enerjilere sahip olduklarını, enerjideki bu ayrımın da 1,25 cm'lik radyasyonu emmek için çok uygun olduğunu gösterdi. Böylece rutubetli havada radar dalgaları yutuluyor ve radar sistemlerinin detektörlerine geri dönmeleri engelleniyordu.[105] İki seviyeli kuantum sistemle yaşanan bu sorunun etkisi, Purcell'in katı maddede nükleer manyetik rezonans (NMR) keşfine yönelik geliştirdiği deneysel tasarımda da açıkça görülebiliyordu.

Bloch'un deneysel tasarımıysa, önceki çalışmalarında da görülen daha dinamik olgular tarafından yönetiliyordu. Savaştan hemen önce Bloch ve Luis Alvarez, nötronun manyetik momentini büyük bir hassasiyetle ölçmüşlerdi. Bu çalışmada, nötronların manyetik momentleri önce manyetik alan boyunca dizilmiş, sonra da salınımlı alana göre yeniden konumlandırılmışlardı. Bloch'un nötron deneyi, Rabi'nin manyetik rezonans metoduyla benzerlikler ihtiva ediyordu. Manyetik momentlerin yeniden konumlanmaları, Bloch'un NMR keşfinde kullandığı deneyin tasarımını etkileyen kavramsal imajdı.

Purcell'in deney haznesi iki pound ağırlığında (ç.n. yaklaşık 1 kg) hidrojen bakımından zengin, reçel kavanozlarını mühürlemekte kullanılan parafinle doluydu ve bu malzemeyi de laboratuara giderken yolunun üzerinde bulunan bir marketten almıştı (bkz. RESİM 14.3). Bloch'un deney haznesinde ise az miktarda hidrojen bakımından zengin su bulunuyordu. Her iki deney de hidrojene odaklıydı: Purcell hidrojen atomunun iki kuantum seviyesi arasındaki enerji emilimini aramayı planlamıştı; Bloch'un niyetiyse, hidrojen çekirdeklerinin manyetik momentlerindeki bir yeniden konumlanışı aramaktı.

Purcell'in ilk deneyi 13 Aralık 1945 Perşembe günü gerçekleşti. Yoğun kar yağışı olan bir gündü. Mıknatısın uçları arasına



RESİM 14.3 Purcell grubunun deneylerinde kullandığı hazne hücresi. Bu hücre günümüzde Smithsonian Müzesi'nde sergilenmektedir.

yerleştirilmiş parafin dolu hazneyle işe başlayan Purcell'in takımı, yavaş yavaş manyetik alanın şiddetini değiştirerek detektörlerinde bir tepki aradılar. Akşam saat 10:00'dan, Cuma sabahı saat 4:00'e kadar bunu sürdürdüler: Manyetik alanın gücünü belli bir aralıkta ileri geri alarak, Torrey'in hesaplamalarına istinaden enerji emiliminin gerçekleşmesi gereken noktayı bulmaya çalıştılar. Hiçbir şey bulamadılar.

Purcell'in ekibi 15 Aralık Cumartesi günü öğle sonrası yeniden bir araya geldi. Purcell toplantıya yedi saat önce gelmiş, aletleri çalıştırmış ve parafin örneğinin manyetik alan içinde oturması için yeterli bekleme zamanını geçirmiş (yedi saat), böylece hidrojen atomlarının iki kuantum seviye arasında dengeye gelmesini sağlamıştı. Aynı günün öğle sonrasına gelindiğinde, dedektörde hâlâ hiçbir işaret görmediler ve tam aletleri kapatmak üzereyken, Pound'un hatırladığı üzere, son bir deneme daha yapmak için mıknatısı tam kapasite güçlendirip, manyetik

alan şiddetini yavaş yavaş düşürürlerken duruma yeniden baktılar. Dedektörün iğnesini dikkatle izlerlerken, birdenbire büyükçe bir sapma gözlemlediler. O manyetik alan şiddetinin altına ve üstüne doğru ayarlar yaparlarken, her defasında dedektörün tepki verdiğini gördüler. Hedeflerine ulaşmışlardı: Parafinin içindeki hidrojen atomları bir enerji seviyesinden diğerine kuantum sıçramaları yaparlarken izlenmişlerdi. Katı maddede manyetik rezonans bir gerçekti.

Robert Pound, Purcell'in deneyindeki bütün ayrıntıları titizlikle tutmuştu. Bloch'un deneyi içinse böylesine ayrıntılı kayıtlar yoktur. Şu kadarını biliyoruz ki, ilk girişimleri 1945 yılının güzünde gerçekleşti ve başarısızlıkla sonuçlandı. Noel yortusunun hemen ardından gelen ikinci girişimde, manyetik alan şiddetini düşürürlerken osiloskoptan bir sinyal aldılar. Bu sinyal Bloch ve meslektaşlarının, harici bir manyetik alanda kendilerini yeniden konumlandıran su molekülleri içindeki hidrojen çekirdeklerini gözlemlediklerine işaretti. Katı maddede manyetik rezonans bir gerçekti... Doğu kıyısı da, batı kıyısı da aynı sonuca ulaşmıştı.

Purcell grubu sonuçlarının yayınlanması için, 24 Aralık 1945 günü editörün elinde olacak şekilde, *Physical Review* dergisine bir makale gönderdi.[106] Bloch gurubu da sonuçlarını yayınlanması için aynı dergiye, 29 Ocak 1946 tarihinde ellerinde olacak şekilde yolladı.[107]

Katı maddelerde manyetik rezonansın keşfi fizik araştırmalarında son derece faal bir alan açtı. Söz konusu keşif günümüze dek bütün dünyada fizikçiler ve kimyacılar tarafından fizik ve kimya problemlerine uygulanagelmiştir. Çalışmalarının karşılığı olarak, katı maddelerde manyetik rezonansın keşfi nedeniyle Edward Purcell ve Felix Bloch fizik dalında 1952 yılı Nobel Ödülü'nü aldılar.

1952 yılında ne Purcell ne de Bloch, keşiflerinin katı maddenin anlaşılması, kimyasal moleküllerin yapısı ve daha birçok alanda onca gelişmeye hizmet edeceğini tahmin edemezlerdi. Purcell'in makalesi yayınlanıp keşfini duyurduktan kısa bir süre sonra, Dupont Kimya Şirketi'nden bir temsilci kendisini ziyaret etti. Dupont'a çalışan bu bilim insanı Purcell'e, NMR keşfinin pratik uygulamalarının neler olabileceğini sordu. Purcell'in



RESİM 14.4 Robert V. Pound, Henry C. Torrey ve Edward M. Purcell (soldan sağa), Torrey'in Rutgers Üniversitesi'nden emekli oluşu nedeniyle verilen partide. Bu fotoğraf, Harvard Üniversitesi'nde NMR keşfinin ellinci yıl kutlamalarında kullanılan posterde de yer almıştı.

cevabı, hiçbir uygulama alanı olacağını sanmadığı yönündeydi. Bu tahmininde çok yanılıyordu (bkz. RESİM 14.4).

Nükleer manyetik rezonans, kimya alanının odağı haline geldi. *Chemical and Engineering News* dergisinin 5 Kasım 1984 tarihli sayısının kapak konusu NMR spektroskopi ile ilgiliydi. Yazıda NMR için, "yeni kimyasal bilgilerin elde edilmesinde güçlü ve vazgeçilmez bir araç" deniliyordu. NMR kimyacılar için güçlü bir araçtı çünkü çekirdeğindeki minicik manyetik momentle hidrojen gibi bir atom, içinde bulunduğu molekülün duyarlı bir bileşeni haline geliyordu. Norman Ramsey, nükleer bir mıknatısın rezonans frekansının, teorik olarak molekül içerisindeki elektronik çevre faktörlerinden etkilendiğini gösterdi. Özellikle de, molekül içerisindeki belli bir çevre koşuluna bağlı hidrojen çekirdeği kaynaklı NMR sinyalleri, dramatik biçimde başka çevre koşullarındaki bir hidrojen çekirdeğinden kaynaklanan NMR sinyallerinden oldukça farklıdır. Bu "kimyasal

kayma" *(chemical shift)* aracılığıyla moleküllerle ilgili ayrıntılı bilgi alınabilir.

NMR'ın kullanım alanları pekçoktur. Örneğin NMR sistemleri petrol şirketleri tarafından kuyulardaki deliklerden aşağıya indirilip, rezervlerin hacimleri araştırılır. Daha yakın bir geçmişte NMR, doktorların elinde güçlü bir araç haline geldi. İnsan vücudunun parçalarını görmek amacıyla kullanılan X ışınları ve diğer başka metodların tersine, NMR tamamen zararsızdır (yayılmayan ve iyi huylu!) ve vücut organları ve fonksiyonları hakkında hayati öneme sahip bilgileri ortaya çıkaran bir tekniktir. Hastaneler ve sağlık kurumları kapsamında NMR metodu manyetik rezonansla görüntüleme *[magnetic rezonans imaging (MRI)]* olarak adlandırılır ve tıp alanında olmazsa olmaz bir hale gelmiştir.

NMR Rabi'nin keşfini izleyen ilk kuşak gelişme olarak görülürse, MRI da ikinci kuşak gelişmedir. Böylelikle, Rabi'nin basit çalışması salt araştırma amaçlı bir girişimken, pratik ardılları işin nerelere varabileceğini göstermiştir.

1944 yılında Cambridge'de yapılan bir partide, Radyasyon Laboratuarı ve Radyo Araştırma Laboratuarı'ndan fizikçiler bir araya gelmiş ve Rabi'nin Nobel Ödülü alışını kutlamış, partide Felix Bloch piyanonun başına oturup kısa bir şarkı çalmış ve söylemişti:

> Pırıl pırıl Otto Stern, söyle bize hadi,
> Nasıl bunca şey öğrendi bizim bu Rabi?

Bundan sekiz yıl sonra Bloch, Nobel ödülünün Purcell'le kendisine, birbirlerinden bağımsız olarak NMR'ı keşfetmeleri nedeniyle verildiğini öğrendiğinde de, yine esprili yönünü göstermiş ve Purcell'e çektiği telgrafta şöyle yazmıştı:

> Ed Purcell bu dalganın ardılını karşılamakta
> Sanırım şoku Felix Bloch'la paylaşmak zorunda.

15

Hidrojenin Dirac Teorisiyle Mücadelesi: Prototip Fizik Teorisi Olarak Kuantum Elektrodinamiği

Willis Lamb, 1947

Hidrojen atomunun spektrumu, modern fiziğin Reşit Taşı (Rosetta Stone) olduğunu kanıtlamıştır.

—Theodor W. Hänsch, Arthur L. Schawlow ve George W. Series

İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana yüzlerce fizik konferansı gerçekleşmiştir ama muhtemelen bunların en etkili olanı, 2, 3 ve 4 Haziran 1947 tarihlerinde Long Island'ın doğu ucundaki Shelter Island'da gerçekleşen konferanstır. Bu konferans, ABD'nin her yanındaki laboratuarlarda yürütülen savaş dönemi işlerinden -Los Alamos'da atom bombası tasarlama, MIT'de radar sistemleri geliştirme veya diğer savaşla alâkalı projeler- yeni dönmüş olan fizikçilerin katılımıyla gerçekleşmişti. Fizikçilerin birçoğu savaş öncesi bulundukları fakültelerdeki pozisyonlarına geri dönmüş ve artık ileriye bakıyorlardı. Konferans organizasyonu için gerçekten çok elverişli bir zamandı.

Shelter Island'daki konferansa katılacak olan fizikçiler 1 Haziran Pazar günü New York'taki Amerikan Fizik Enstitüsü'nde buluşmuşlar, döküntü haline gelmiş eski bir otobüse doluşmuşlar, boylu boyunca Long Island'ı geçmişler ve feribotla karşıya geçerek konferansın yapıldığı Ram's Head Inn'e ulaşmışlardı.

Shelter Island konferansı, elit bir fizikçi grubunun ilgilendiği konuları değerlendirebilmesi ve gelecekte yapılacak araştırmalara yön verilebilmesi amacını güdüyordu. Çoğunluğu genç fizikçilerden oluşan sadece yirmi dört kişi vardı bu konferansta. Toplantı serbest zamanlar düşünülerek tasarlanmış, böylece birebir görüşmelerin yapılabilmesine de zemin hazırlanmıştı. Konferans kuantum mekaniğinin temellerine yönelik üç tane tebliğ ile başlamıştı. Bu konferansın önemi ve sonuçları beklenenin çok üzerinde gerçekleşmişti. Konferanstan sonra J. Robert Oppenheimer, "Bugüne kadar katıldığımız en başarılı konferans," diye niteliyordu bir yazısında bu olayı.[108] Yıllar sonra, 1966 yılında Richard Feynman, "Dünya üzerinde eskiden beri birçok konferans yapıldı ama hiçbirinin bu konferans kadar önemli olduğunu hissetmemiştim," diye belirtiyordu.[109] Ve I. I. Rabi de, söz konusu konferansın muhteşem yeni gelişmelerin başlangıç noktası olarak hatırlanacağını söylüyordu.[110]

Toplantı, pazartesi sabahı, hidrojen atomunun enerji seviyelerindeki küçük ve göze batmayan sapmalara ilişkin yakın geçmişte yapılan iki deney üzerine gelişmeler konusuyla başlamıştı. Buradan başlangıçla, hidrojen atomuna yönelik veriler ve bu verilerin işaret ettikleri, tartışmaların belirleyici başlığı olmuştu. Hidrojen atomuna yönelik küçük şeyler daima önemlidir. Bir yönüyle bunun nedeni, hidrojen atomunun son derece basit bir element olmasından dolayı en küçük sapmayı bile saklayacak yeri bulunmamasından kaynaklanır. Daha da önemlisi, fizikçilerin fizik teorilerini tam ve doğru olarak uygulayabilecekleri hidrojen atomunun bu yönüyle benzersiz olmasıdır: Hidrojen üzerine yapılan teorik analizlerden elde edilenler, ne varsayımları ne de yaklaşık hesapları kaldırmaz. Dolayısıyla, hidrojen atomu üzerinden hassas biçimde edinilen deneysel verilerle fizik teorilerinin sonuçları birebir örtüşmek zorundadır ve örtüşmüyorsa teori gözden geçirilip geliştirilmek durumundadır. Shelter Island konferansının sonuçlarından biri de şu olmuştu: Sonuç-

lar, fizikçilerin ürettiği en başarılı teorik çerçeve olan kuantum elektrodinamiği *[quantum electrodynamics (QED)]* için ilave bir itici güç olmuştu. Modern QED çerçevesi, Shelter Island konferansından sonra fizik araştırmalarının büyük bölümünü şekillendirmiştir.

Ram's Head Inn'de, 2 Haziran 1947 günü sunulan deneysel veriler muazzamdı çünkü son derece hassas ve tartışma yaratıcıydılar. Bu veriler, hidrojen atomunun enerji seviyelerindeki küçük sapmaları ortaya çıkarıyor, böylece hidrojen atomunun mevcut gözlenmiş spektroskopik ayrıntılarına daha da gelişmiş ilaveler getiriyordu. Hidrojen spektrumu üzerinden evrimleşen gelişmeler, deney ve teorinin birbirini nasıl kışkırttıklarını gösterir ve bu süreçte bilimin nasıl ilerlediğinin tipik bir örneğidir (bkz. RESİM 15.1).

Yüzyılın dönüm noktasında Balmer spektrumu serisi fizikçilere somut veriler sunmuş ve bu veriler de, ya bazı oturmuş "temel çalışmalar"ın diliyle veya daha az aşina olunan hidrojen atomu içindeki dinamik yapı diliyle bir açıklama bekliyordu. Dört Balmer çizgisine -H_α, H_β, H_γ, H_δ- ilave olarak, A. A. Michelson tarafından 1891 yılında H_a geçiş çizgisinin çift olduğunu gösterilmişti; yani bu çizgi, aslında aralarındaki çok ince bir boşlukla birbirinden ayrılan iki ince çizgiden oluşuyordu. Bu incecik iki H_a çizgisi o denli inceydiler ki, Michelson'ın bunu yüksek duyarlılığa sahip optik aracı olan interferometre ile görmesi gerekmişti. 1913 yılında Niels Bohr, ilk gerçekçi hidrojen atomu modelini geliştirmişti. Bu modelde Bohr, o güne kadar gerçekten de kimsenin pek aşina olmadığı dinamikleri sağlamıştı. Bohr hidrojen atomunun sadece belli enerji seviyelerinde var olabileceğini varsayarak, bir kuantum koşul öne sürmüştü. Diğer bir deyişle Bohr, enerjinin kesikli olduğunu varsaymıştı. Balmer spektral çizgiler serisi, ilave spektral çizgi serileriyle birlikte, bu sabit enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin sonuçlarıydılar. Bohr'un modeli hidrojen spektrumunun genel hatlarını başarıyla göstermişti; H_a spektral geçişinin çift çizgili doğasını açıklamaktaysa başarısızlığa uğramıştı.

1916 yılında Arnold Sommerfeld hidrojen spektrumunu daha hassas biçimde açıklamak için kolları sıvadı. Bunu yapmak için Bohr'un modelinde varsaydığı elektronların dairesel yörün-

geleri yerine eliptik yörünge olasılığını ilave ederek teoriyi rafine etti. Bu adım tek başına, eliptik yörüngelerle ilişkili enerjilerin, dairesel yörüngelerle ilişkili enerjilerle aynı olmasından dolayı yeterli olmadı. Yine de buradaki eliptik yörüngeler, hidrojen atomu içindeki yörüngesinde dönen elektronu çılgın bir seyahate çıkarıyor, elektron atomun merkezindeki çekirdeğe giderek yaklaşıyor, sonra fırlayıp uzaklaşarak, onu Bohr'un modelindeki dairesel yörüngelerde olduğundan çok daha hareketli kılıyordu. Sommerfeld, Bohr'un enerji seviyelerinin ilave enerji seviyelerine bölünmüş olduğu konusunu açıklamak için görelilik kuramını işin içine soktuğunda, konuları birbirine yakın biçimde tasnif etmeyi başarmıştı. Bu yaklaşım, hidrojenin ince (detaylı) yapısını ve deneysel verilerin teorilerle uyum içine girmesini sağlayan ilave spektral dönüşümleri açıklamak için bir yol açtı. Ama bütün bu uyuma rağmen, Bohr'un modeli ile Sommerfeld'in bu modeli geliştirme çabaları amaca özel *(ad hoc)* bir karakterdeydi; yani, her ikisi de hidrojenin spektrum çizgilerine yönelik varsayımlar üzerine kuruluydu ve dolayısıyla da genel olarak geçerli bir teoriden ortaya çıkmamışlardı.

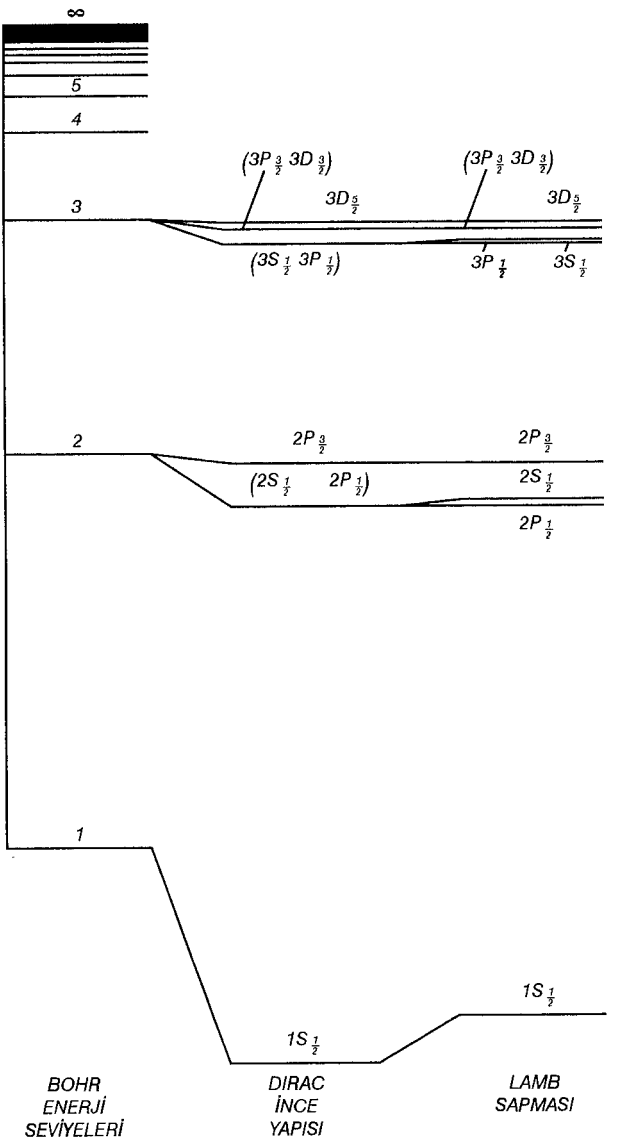
1925 yılında Heisenberg ve 1926 yılında Schrödinger'in katkılarıyla kuantum mekaniğinin yaratılması, hidrojen atomunun kuantum doğası üzerine sağlam bir teorik zemin oluşmasını sağladı. O noktadan sonra da artık Bohr'un kuantum koşulu amaca özel *(ad hoc)* olmaktan çıktı: Kuantumlaşma [ç.n. fiziksel bir büyüklüğü *devamlı (continuous)* olmaktan çıkarıp *kesikli (discrete)* hale getirme], dalga-parçacık özelliğine aynı anda sahip elektron ve bütün diğer atom altı parçacıkların doğasının bir sonucu haline geldi. Ancak ne Heisenberg'in ne de Schrödinger'in kuantum mekaniği hidrojen spektrumu üzerine yeterli bilgiyi sağlayamadı.

Hidrojen atomunun spektrumunu açıklamak için bütün gerçeklerin bilinmesi gerekiyor ve hem kuantum mekaniğinin hem de görelilik kuramının gücüne ihtiyaç duyuluyordu. Ne Heisenberg ne de Schrödinger'in kuantum mekaniği versiyonları görelilik kuramıyla tam bir işbirliği içerisine girebilmiş değildi. Her iki teori de elektron spinini kapsamıyordu. Elektronun bu temel özelliği Heisenberg'den sonra, Schrödinger'in o muazzam çalışmasından önce keşfedilmişti.

1928 yılında Paul Dirac, kuantum mekaniği ve görelilik kuramını bir araya getirdi ve bu süreçte hidrojen atomunun spektrumunu anlamak yönünde net bir teorik temel sundu. Hiçbir varsayımda bulunmadan, kuantum mekaniği ve görelilik kuramının net verileriyle çalıştı. Dirac'ın bu çalışması, sadece hidrojen spektrumunun açıklamasını yapmakla kalmayıp, elektronun spini ve manyetik momenti üzerine de sonuçlar çıkarttı.

RESİM 15.1'de spektroskopik notasyonla gösterilen hidrojenin enerji seviye diyagramı, fizikçilerin Balmer ve Bohr'dan başlayıp, Sommerfeld ve Dirac'a kadar hidrojen spektrumunu anlayış evrimini özetleyen üç sütuna sahiptir. Diyagramda gösterildiği gibi, Dirac'ın 1928 teorisi tarafından verilen enerji seviyeleri, Sommerfeld tarafından saptananlarla aynıdır ama amaca özel *(ad hoc)* karakter devre dışı bırakılmıştır. Orantılı olarak çizilmemiş olan bu diyagram, görelilik ve manyetik etkiler altında, Bohr'un sonuçlarına göre, enerji seviyelerindeki düşüşü göste-

RESİM 15.1 (Bir önceki sayfada) Bohr'a, sonra Sommerfeld'e, ardından Schrödinger'e ve nihayet Lamb'a göre hidrojenin enerji seviyeleri (soldan sağa). Soldaki sütun, Bohr'un 1913'de yaptığı hidrojen atomu modelinin sonuçları olan enerji seviyelerini gösteriyor. Her bir seviye, baş kuantum sayısı n ile gösteriliyor. En düşük enerji seviyesi, $n = 1$, atomun taban seviyesi olarak adlandırılır ve atomun normal olarak genelde içinde bulunduğu durumdur. Taban seviye, atomun fiziksel büyüklüğünü belirler. Daha yüksek enerjili seviyeler $n = 2$, $n = 3$ vb. olarak etiketlendirilmiştir. Bu seviyeler arasındaki geçişler hidrojen spektrumunun kaynağıdırlar. Ortadaki sütun, görelilik ve manyetik etkiler sonucunda ortaya çıkan değişiklikleri gösterir. Bu seviyeler enerji bakımından düşüş gösterir ve ilave enerji seviyeleri belirir. Seviyeler arasındaki geçişler, hidrojen spektrumunun "ince yapısını" ortaya çıkartır. Sommerfeld sonradan bu karmaşaya da bir açıklama getirmiştir ancak yaklaşımı bugün sadece meselenin tarihi açısından ilgi çekicidir. Dirac ise, buradaki enerji seviyelerin doğru açıklamasını, kuantum mekaniği ve görelilik kuramını birleştirerek sunmuştur. En sağdaki sütunda, Lamb'ın yaptığı deneyin Dirac teorisinden bir sapma olarak ortaya çıkan sonuçları bulunuyor. $2S_{1/2}$ ve $2P_{1/2}$ seviyeleri arasındaki ayrışma, Lamb sapması olarak adlandırılır. Enerji seviyeleri arasındaki bu bölünme kuantum elektrodinamiğindeki düzeltmelere işaret eder. Grafik orantılı olarak çizilmemiştir.


∞
5
4
3
2
1
$(3P_{\frac{3}{2}}\ 3D_{\frac{3}{2}})$
$3D_{\frac{5}{2}}$
$(3S_{\frac{1}{2}}\ 3P_{\frac{1}{2}})$
$3P_{\frac{1}{2}}$
$3S_{\frac{1}{2}}$
$2P_{\frac{3}{2}}$
$(2S_{\frac{1}{2}}\ 2P_{\frac{1}{2}})$
$2S_{\frac{1}{2}}$
$1S_{\frac{1}{2}}$
BOHR ENERJİ SEVİYELERİ
DIRAC İNCE YAPISI
LAMB SAPMASI

rir. (Manyetik etkiler, elektronun spin hareketinden ve yüklü elektronla proton arasındaki göreli hareketin yarattığı manyetik alan ile etkileşime giren manyetik momentten kaynaklanır.) Bu beş enerji seviyesi arasında olası beş spectral geçişin dalga boyları birbirlerine öylesine yakındır ki, 1928 yılında tek tek gözlemlenebilmeleri mümkün olmamıştı. Bunun yerine H_a geçişi için bir çift -iki spektrum çizgisi- gözlemlenmişti.

1938 yılında yeni deneylerden alınan veriler, hidrojen spektrumunda küçük bir tutarsızlığın saklı olabileceğinin ipuçlarını verdi. Dirac teorisinde $n = 2$ ile ilişkili üç tane enerji seviyesi vardır ve $2S_{1/2}$, $2P_{1/2}$ ve $2P_{3/2}$ simgeleriyle etiketlenmişlerdir. Ancak $2S_{1/2}$ ve $2P_{1/2}$ seviyeleri aynı enerjiye sahiptir. Aynı enerjiye sahip iki seviye dejenere *(degenerate)* seviyeler olarak adlandırılırlar. W. V. Houston ve R. C. Williams tarafından yapılan deneylerden alınan yeni veriler, bu iki dejenere seviyenin gerçekte az da olsa farklı enerjilere sahip olduklarının ipuçlarını verdi.[111] Böyle bir sonuç Dirac teorisiyle örtüşmüyordu. Diğer fizikçilerin deneyler yoluyla aldıkları sonuçlar Dirac teorisiyle uyum içinde görünüyordu; yani, her bir seviyenin aynı enerjiye sahip olduğunu gözlemliyorlardı. II. Dünya Savaşı bu tür deneylere bir nokta koyduğunda, toplanan veriler henüz tam bir sonuca varmak için yeterli değildi. Dolayısıyla Dirac teorisi de bütünlüğünü koruyarak yeterli görülmüş ve ayakta kalmıştı.

1947 yılında yapılan Shelter Island konferansındaki tartışmaların başlangıcını tetikleyen ve ilerleyen tartışmaların pek çoğunu belirleyen iki rapor, Willis Lamb ve Rabi tarafından verilmişlerdi. Her iki rapor da katılımcılara, II. Dünya Savaşı'ndan çıkmış teknoloji tarafından elde edilmiş yeni veriler getirmişti. Bu süreçte Lamb ve Rabi, dünya savaşı boyunca rafa kalkmış Dirac teorisindeki olası çelişkileri ortaya çıkartmışlardı.

Yirminci yüzyılda hem teorik ve hem de pratik fizik üzerine az sayıda pratisyen sivrilmişti. Willis Lamb bunlardan biriydi. Berkeley'de kimya lisans bölümünü bitirmek üzereyken Lamb, aslında kendisine ilginç gelen dalın teorik fizik olduğu düşüncesindeydi. Berkeley'de kaldı ama fizik bölümüne geçerek lisansüstü eğitimine başladı. Sonunda, J. Robert Oppenheimer danışmanlığında teorik bir tez yazdı. Lisans eğitimini tamamladıktan kısa bir süre sonra savaş başladı ve Lamb, Columbia Üniversite-

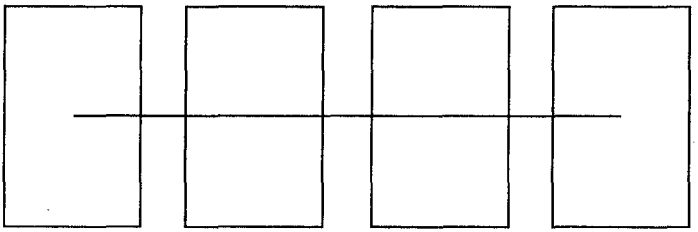
si'ndeki radar projesinin liderleri tarafından ekibe davet edilerek bu görevi kabul etti. MIT Radyasyon Laboratuarı Columbia Üniversitesi'nde de bir uydu laboratuara sahip olduğundan, Lamb orada kaldı. Lamb'ın oradaki görevi, radar araştırmalarının başlamasına neden olan, İngiltere'den gelme, on santimetrelik radar aygıtlarına göre kısa-dalga manyetronları tasarlamak, imal etmek ve denemekti. Bu görevinde Lamb, deney yapma konusundaki becerilerini oldukça geliştirmişti. Savaş bittiğinde, savaşta kullanılmak üzere üretilen mikrodalga aletleri, barış zamanındaki kullanımlarını bekliyorlardı.

Elbette Lamb, Rabi'nin moleküler ışın deneyleri hakkında geniş bilgiye sahipti ve kendi geliştirdiği deneysel tasarım da Rabi'nin ışın yaklaşımından esinlenmişti. Lamb'ın deneyinin amacı, 1946 yılında yazdığı gelişme raporunda açıkça ifade edilmişti:

> Hidrojen atomu, var olan atomlar arasında en basit olanıdır ve hemen herkesin hemfikir olduğu Coulumb etkileşim kanunu ve Dirac'ın elektron denklemi ile yapılan eksiksiz teorik hesaplamalarda kullanılabilen yegâne atomdur. Protonun hareketi ve protonun spini ile manyetik alan arasındaki etkileşim gibi ince detaylar hesaba ancak kaba tahmini yöntemlerle katılmıştır. Bununla birlikte, hâlihazır deneysel durum, teori için veya nokta yükler arasındaki Coulomb etkileşim kanununun hidrojen atomunun gözlemlenen spektrumu üzerinden test edilmesi konusunda çok da kritik olanaklar sağlamamaktadır. Kritik bir test, $n = 2$ kuantum seviyesindeki ince yapının bir ölçümünden elde edilebilir.

Bu $n = 2$ enerji seviyesi, 1938 yılında, dejenere seviyeler arasındaki küçük bir enerji farkı bulunmasıyla ipuçlarını zaten vermişti. Eğer bu durum gerçekten varsa, Dirac teorisi eksik demekti. Lamb, iki $n = 2$ enerji seviyesi için enerjilerinin aynı mı yoksa birbirinden biraz da olsa farklı mı olduklarını saptamak için düzeneğini kurdu.

LAMB-SAPMASI DENEYİNİN TEMEL UNSURLARI



RESİM 15.2 Lamb sapması keşfinin öncüsü olan deney (Lamb'ın Nobel Ödülü'nü alırken açıkladığı biçimiyle). Bir hidrojen atomları ışını, atomların çıkış kaynağından (S) bir dedektöre (D) gönderiliyor. Arada hidrojen atomları tarafından iki alan daha geçiliyor: Bir bombardıman bölgesi (B) ve bir de manyetik alan ve RF bölgesi. Çizim orantılı olarak yapılmamıştır.

Lamb'ın deneyinde bir asalet ve güzellik vardı. RESİM 15.2'de gösterilen deney açıklaması Lamb tarafından Nobel ödülünü alırken yaptığı konuşmadan alınmıştır. Bir hidrojen atomları ışını, atomların çıkış kaynağından (S) bir dedektöre (D) gönderilir. Arada hidrojen atomları tarafından iki alan daha geçilir. İlk bölge elektronların hidrojen atomlarıyla çarpıştırıldığı bombardıman bölgesidir (B). Bombardımanın amacı, hidrojen atomlarının küçük bir bölümünü $n = 1$ taban seviyesinden, daha yüksek bir enerji seviyesi olan ve asıl ilgilenilen $n = 2$ seviyesine geçirmek için uyarmaktı. Görülen oydu ki, $n = 2$ seviyesinin bir bileşeni olan $2S_{1/2}$ seviyesi, yarı-kararlıydı; yani, $1S_{1/2}$ seviyesine bozunmadan önce göreli olarak daha uzun bir ömrü olmasıydı. Lamb, bu kritik haldeki hidrojen atomlarının aparat içinden geçip, taban seviyelerine inmeden önce dedektörde tespit edilebilmelerini sağlayan uzun ömür özelliklerinden yararlandı. Hidrojen atomları bombardımana tutulduktan sonra, hem bir manyetik alanın ve hem de radyofrekans (RF) radyasyonunun birlikte uygulandığı bir diğer bölgeden geçiyorlardı. Bu alan, şüphelenilen enerji farkını araştırmak için, iki yakın seviye arasındaki geçişi doğrudan tetikleyecek biçimde tasarlanmıştı.

Aparat boyunca arzu edilen $n = 2$ seviyesinde hareket eden hidrojen atomlarıyla Lamb, RF kutusundaki unsurları değiştirerek, aralarında enerji farkı olduğundan kuşku duyulan $2S_{1/2}$ yarı-kararlı seviye ile $2P_{1/2}$ seviyesi arasındaki geçişi doğrudan tetikleyecekti. Eğer doğruysa, aralarındaki geçişler tetiklenecek ve $2P_{1/2}$ halindeki atom derhal taban seviyesine, $1S_{1/2}$ seviyesine, indirgenecek ve buna bağlı dedektör sinyalinin de düştüğü görülecekti. Olup biten de tam olarak böyleydi. Belli bir RF değerinde dedektör sinyali düşüyordu. RF değerini biliyor olmak, $2S_{1/2}$ ve $2P_{1/2}$ seviyeleri arasındaki enerji farkının saptanmasını sağlıyordu. Deney sonuçları gayet anlaşılırdı: İki seviye arasında, Dirac teorisinde açıklanamayan bir enerji farkı vardı. Lamb'a göre $n = 2$ seviyesindeki yeni enerji seviyesi RESİM 15.1'deki sağ sütunda gösterilmiştir. İki seviye arasındaki ayrım, Lamb sapması *(Lamb shift)* olarak adlandırılır.

Lamb sapmasının önemi nedir? Balmer çizgileri, prensip olarak negatif yüklü elektronlarla pozitif yüklü çekirdek arasındaki elektriksel etkileşimden çıkıyorlardı. Dirac teorisi tarafından açıklanan ince yapı da görelilik etkisiyle oluşuyordu. Lamb sapması QED ile açıklanıyordu. Lamb sapmasının QED terimleriyle açıklanması gayet incelik isteyen bir işti. Elektromanyetik alan kuantum terimleriyle açıklanmalıdır. Kuantumlaşmış elektromanyetik alan içeriğinde yapılacak bir açıklama en az dört faktör barındırır. İlki, elektronun kendi elektromanyetik alanıyla girdiği etkileşimdir ki bu, elektronun manyetik momentini belirler (kitabın 16. Bölümü'nde tartışılacak). İkincisi, elektromanyetik alanla ilişkili fotonlar, çekirdek etrafında kendiliğinden elektron ve pozitron çifti üretebilirler. Bu negatif elektrik yüküne sahip elektronlar pozitif elektrik yüklü pozitronlarla beraber etkin biçimde çekirdeği çevreleyen uzayı kutuplaştırır ve hidrojen elektronunu çekirdeğinden koruyan bir kalkan görevi üstlenirler. Üçüncüsü, elektronu çevreleyen boşluktaki dalgalanma onun hareketini ve kinetik enerjisini değiştirebilir. Son olarak da, protonun büyüklüğüne, elektrik yükünün dağılımına, kütlesine ve hareketine yönelik düzeltmelere ihtiyaç duyulabilir. QED bütün bu unsurları tutarlı biçimde bir araya getirir ve Lamb sapmasına son derece isabetli bir açıklama sağlar. QED'nin gücünü takdir etmek için, Lamb sapması sonucunda

oluşan iki seviye arasındaki spektral geçişin ölçülen frekansının 1.057,845 MHz ve temel QED eşitliğiyle hesaplanan değerin de 1.057,853 MHz olduğunu düşünün. Deneye dayalı ölçümlerle teorik hesaplamalar milyonda onluk bir hassasiyetle birbirini sağlamaktadır.

Yıllar sonra Willis Lamb altmış beşinci yaş gününü kutlarken Freeman Dyson ona şöyle yazar: "Hidrojenin ince yapısı üzerine çalışmanız, kuantum elektrodinamiğindeki gelişme dalgasına öncülük etti... Oradaki minik, bulunması zor ve ölçülmesi çok güç sapmayı ilk gören sizsiniz ve bu, hepimizin parçacıklar ve alanlar üzerine düşüncelerimizi temelden netleştirmiştir."[112] Dyson'un 1978 yılındaki yorumu, otuz bir yıl önce Rabi'nin Shelter Island konferansıyla ilgili yargısını doğrular niteliktedir: "Muazzam yeni gelişmelerin başlangıç noktası." Bu muazzam yeni gelişmelerden biri de, fiziğin bir şahikası olan QED'nin tam olarak oturtulmasıydı. "Muazzam yeni gelişmelerden" bir diğeri de, Shelter Island konferansını başlatan ikinci raporla ilgilidir: Rabi'nin hidrojenin enerji seviyeleri üzerine yeni verileri derlediği raporu. Ancak bu konu, gelecek bölümün konusu...

16

Hidrojen Atomu Elektrondaki Bir Anomalinin Haberini Veriyor

I. I. Rabi, John E. Nafe ve Edward B. Nelson, 1946

Dengeli atomların en basiti olarak hidrojen, teori ve deney arasındaki benzersiz çatışmayı olası kılar.

—Theodor W. Hänsch

Savaş Rabi'nin hayatını ve kariyerini değiştirdi. Hem MIT Radyasyon Laboratuarı'ndaki yönetici yardımcılığı hem de araştırma yöneticiliği yaptığı ikili rolünde politika yapıcıları ve askeri yöneticilerle yakın ilişkiler içinde çalıştı. Başlangıçta Rabi'nin özellikle askeri temsilcilerle tartışmaları, hayati askeri bilgilerin paylaşılması bağlamında generaller ve amiraller tarafından lütuf, kuşku ve yumuşak itirazlara yol açtı. Rabi'nin savaşla ilgili çabaları destekleyecek radar ekipmanının geliştirilmesinde öncülük edebilmesi için askeriye tarafından planlanan savaş stratejilerini bilmeye ve anlamaya ihtiyacı vardı. Ama Rabi hırslı bir oyuncuydu ve kısa süre içinde bilgeliği ve entelektüel inatçılığı Pentagon liderleri tarafından da kabul edilir oldu.

Zorluklar aşılmış ve doğrudan açık tartışmalar norm halini almıştı. Bu deneyim 1944 yılında fizik dalında aldığı Nobel Ödülü'yle birleşerek ve başkan Dwight D. Eisenhower'la olan yakın dostluğuyla pekişerek, ABD'nin II. Dünya Savaşı sonrası uzun bir Soğuk Savaş'a girmesiyle Rabi'nin ülke üzerindeki etkisini artırdı.

Rabi'nin savaş sırasındaki verimliliği ve sonraki yıllarda kendisinden istenenlerin anlamı gösteriyordu ki, odağı değişmiş ve savaş öncesinde Columbia araştırma laboratuarındaki yoğunluk seviyesi ve verimliliği bir daha asla aynı ölçülere ulaşamamıştı. Kendi deyimiyle, "Ödül (ç.n. Nobel Ödülü) size kapıları açar; belki de hiç açılmaması gereken kapıları. Sizi alanınızdan ötelere gitmeye cezbeder; birçok rahatsızlıklar getirir. Ben kapıları açan ve insanlara 'şunu yap, bunu yap' diyecek bir adam değilim. Eğer davet edilirsem etkinliğin içinde yer alabilirim. Nobel Ödülü benim davet edilmeme neden oldu, davetiyeyi o getirdi. Eğer Nobel Ödülü'nü almamış olsaydım, bütün bu davetlere yanıt verme eğiliminde olmazdım... Böyle bir zorunluluğum da olmazdı."[113] Elbette Rabi farklı tercihlerde bulunabilirdi ama o bunu yapmadı. Dolayısıyla Rabi'nin en kayda değer savaş sonrası araştırma sonuçları, 1947 yılında Shelter Island, Ram's Head Inn'de toplanan katılımcılara sunduğu rapor oldu.

2 Haziran 1947 günü Rabi'nin sunduğu veriler, hidrojen atomuyla yapılan moleküler ışın deneylerinin sonuçlarını temel alıyordu. Savaştan önce Rabi'nin hidrojen üzerine araştırması, hidrojen atomu çekirdeğinin -proton ve döteronların- manyetik momentlerinin ölçülmesi çevresinde odaklanmıştı. Rabi ve iki öğrencisi John Nafe ve Edward Nelson, Rabi'nin Columbia Üniversitesi'ne geri dönmesiyle birlikte savaş öncesi yaklaşımı geri getirdi. Proton ve döteronun manyetik momentleri savaş öncesinde manyetik rezonans metodu aracılığıyla yüksek bir duyarlılıkla ölçülmüş olduğundan, yeni deney bu manyetik moment değerlerini verilmiş (baz) olarak alacak ve hidrojen atomunun enerji seviyelerinin saptanmasında kullanacaktı.

Rabi'nin deneyinin odaklandığı iki enerji seviyesi, hidrojen ve döteryum atomlarının içindeki manyetik etkilerin doğrudan bir sonucuydu, ki sözkonusu bu manyetik etkiler elektron, proton ve döteronun manyetik momentlerinden kaynaklanıyordu.

Hidrojenin (ve diğer atomların) spektrumu kuantumlaşmış enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden kaynaklanıyordu. Ayrıca, enerjiye ilave olarak açısal momentum da kuantumlaştırılmıştı. Açısal momentum üç kaynaktan beslenir: Elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesel hareketi, elektronun spini ve çekirdeğin spini. Açısal momentumun kuantumlaşmış doğası izin verilen yörüngesel şekilleri sınırlıyordu. Elektron ve çekirdeğin spinleri her ikisine de varlıklarından gelen *(intrinsic)* manyetik bir moment kazandırıyordu. Elektron ve çekirdek, manyetik alanlara bağlı olarak kendilerini sadece belli yollarla yönlendirebiliyor ve birbirleriyle etkileşime giriyorlardı. Her bir yönlenme de küçük farklara sahip enerjiye karşılık geliyordu. Görelilik etkisi ve elektronun manyetik momenti nedeniyle ortaya çıkan Bohr tipi enerji seviyelerinin küçük ölçekli ayrışımı, ince yapı *(fine structure)* olarak adlandırılıyordu. Nükleer spinlerin etkisinden gelen çok daha küçük ölçekli ayrışımlar çok ince yapı *(hyperfine structure)* olarak bilinir. Hidrojenin enerji seviyelerinin eksiksiz bir diyagramı RESİM 16.1'de gösterilmiştir.

Rabi-Nafe-Nelson deneyinin odak noktası, hidrojen atomunun taban seviyesindeki (en düşük, $n = 1$ enerji seviyesi) iki çok ince seviye arasındaki bir geçişti. Özellikle de RESİM 16.1'in sağ sütununun altında gösterilen $F = 0$ ve $F = 1$ seviyeleri arasındaki geçiş. Proton ve döteronun manyetik momentlerinin bilinmesi ve Dirac teorisini temel alarak elektronun manyetik momentinin tam olarak bilindiğinin varsayılmasıyla bu iki seviyenin frekans ayrışması hassas biçimde hesaplanabilirdi. Hesaplanan değerler aşağıdaki gibiydi:

Frekans ayrışması, hidrojen = 1416,90 ± 0,54 MHz

ve

Frekans ayrışması, döteryum = 326,53 ± 0,16 MHz

Rabi, Nafe ve Nelson deneylerinde bir hidrojen atomu ışını kullandılar ve iki çok ince seviye arasındaki geçiş frekansını ölçtüler. Ölçülen değerler aşağıdaki gibiydi:

Frekans ayrışması, hidrojen = 1421,3 ± 0,2 MHz

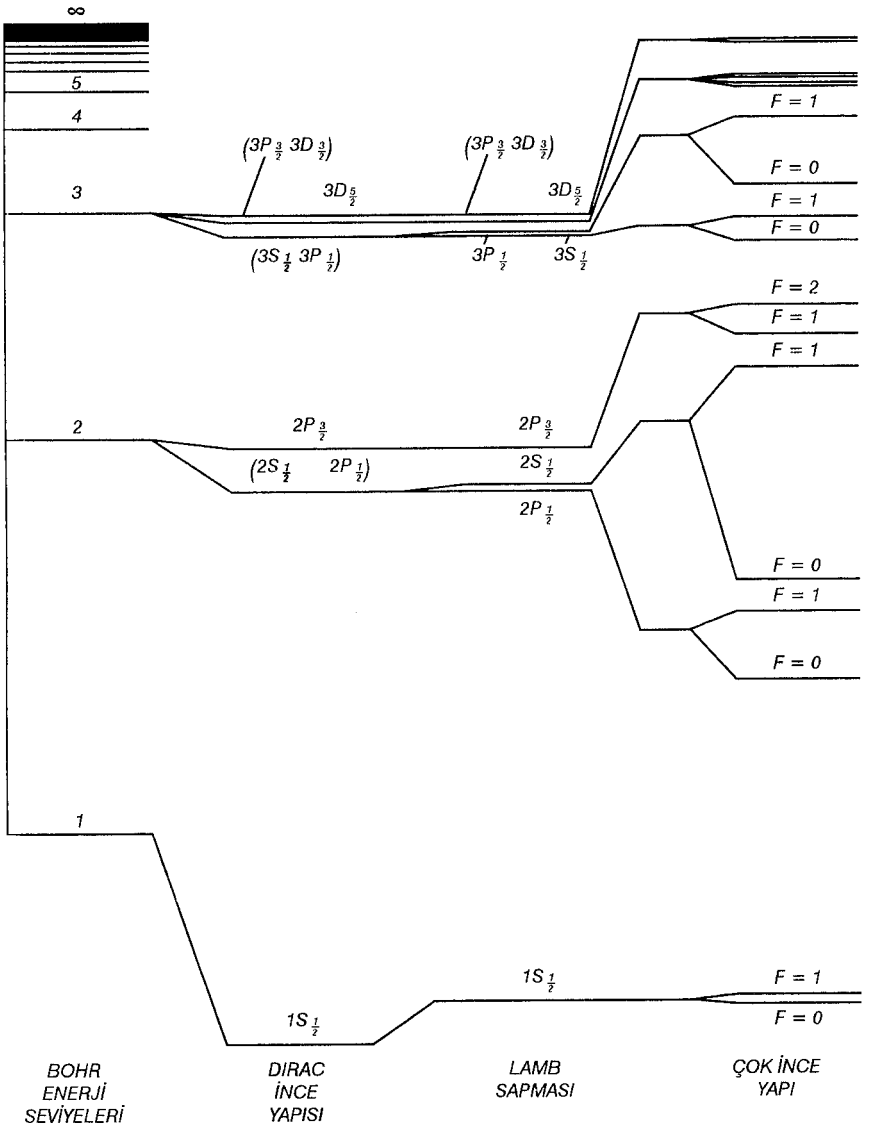
ve

Frekans ayrışması, döteryum = 327,37±0,03 MHz

Birçok deneyde bu sonuçlar teorik beklentileri doğrular nitelikte değerlendirilebilirlerdi. Nihayetinde, ölçümler ve hesaplamalarla ulaşılan değerler arasındaki fark yüzde 0,26 oranındaydı. Bu sonuçlar hidrojenin gücünü ve güzelliğini de gösteriyordu; gizli saklı hiçbir şey yoktu. Eğer teori ve deney tam olarak örtüşmezse bir şeyler yanlış demektir. Daha karmaşık atomlar için teori ve deney sonuçları arasında daha büyük farkların kabullenilmesi gerekir. Ama hidrojen atomundan bu konuda taviz beklenemez.

Bu sonuçların rapor edildiği makale, ortada bir problem olduğu saptamasıyla bitiyordu: "Teori ve deney sonuçlarının birbirini sağlamaması, hidrojen atomu teorisindeki bilinmeyen faktörlere mi ya da hassas yapı sabiti *(the fine structure constant)* gibi doğal sabitlerden biriyle ilgili ön kabulün hatalı alınmasına mı bağlıdır, buna ancak daha fazla deney yapılarak karar verilebilir."[114] Rabi'nin Shelter Island konferansına katılan fizikçilere ilettiği sonuç buydu. Rabi'nin bir deneyci olarak yaygın şöhreti, ölçülmüş sonuçlara büyük bir güven sağlıyor ve teorisyenler için ciddi bir mücadele alanı açıyordu. Lamb sapmasında olduğu gibi, kuantum elektrodinamiği hesaplamalarda oldukça küçük farklar çıkmasına olanak veriyor ve bu süreçte giderek etkin hale gelen gücünü gösteriyordu.

RESİM 16.1 Hidrojenin ince ve çok ince yapılarını da gösteren eksiksiz enerji-seviye diyagramı. İlk üç sütunun açıklamaları için bkz. RESİM 15.1'in alt yazıları. Enerji seviyeleri, çok ince ayrışmalar olarak adlandırılan elektron ile nükleer manyetik moment arasındaki etkileşim nedeniyle değişir. Bu ayrışmalar, ikinci sütunda gösterilen ince yapıdan daha küçüktürler ancak Lamb sapmasındaki (üçüncü sütun) kadar da küçük değillerdir. Sağ alt köşedeki iki enerji seviyesi, Rabi-Nafe-Nelson deneyinin odaklandığı iki seviye ve 21 santimetrelik hidrojen çizgisinin kaynağıdır. Grafik ölçekli çizilmemiştir.


∞
5
4
3
2
1
$(3P_{\frac{3}{2}}\ 3D_{\frac{3}{2}})$
$3D_{\frac{5}{2}}$
$(3S_{\frac{1}{2}}\ 3P_{\frac{1}{2}})$
$3P_{\frac{1}{2}}$
$3S_{\frac{1}{2}}$
$2P_{\frac{3}{2}}$
$(2S_{\frac{1}{2}}\ 2P_{\frac{1}{2}})$
$2S_{\frac{1}{2}}$
$2P_{\frac{1}{2}}$
$1S_{\frac{1}{2}}$
F = 1
F = 0
F = 2
BOHR ENERJİ SEVİYELERİ
DIRAC İNCE YAPISI
LAMB SAPMASI
ÇOK İNCE YAPI

Rabi'nin deneyleriyle Dirac teorisi arasındaki anlaşmazlığın ardındaki zanlı elektrondu. Rabi'nin ölçtüğü, çok ince enerji seviyesi ayrışmasıydı ki, daha önce de belirtildiği gibi, bu durum, elektronun manyetik momentinin protonun manyetik momentiyle etkileşime girmesinin bir sonucuydu. Böylece söz konusu iki seviye arasındaki ayrışma doğrudan elektronun ve protonun manyetik momentlerine bağlıydı. Dirac teorisi elektronun manyetik moment değerini üretmiş, ve bu teorinin geçerliliği, pratik kullanım açısından, sorgulanmadan kabul edilmişti. Bu Dirac'ın saygınlığıydı.[115] Yine de, Dirac teorisi olağanüstü başarısına rağmen, hidrojen atomunu tam olarak tanımlamak konusunda yetersiz kalmıştı. Teori ne Lamb sapması konusunda ne de elektronun manyetik momenti üzerine tam bir açıklama getiremiyordu.

Verilerle teori arasındaki uzlaşmazlığın açıklaması olarak, Dirac'm elektronun manyetik moment değerinin hatalı olduğu görüşü hemen benimsendi. "Bunu en baştan görmeliydim," diyordu Rabi, "ama göremedim."[116] Eğer elektronun manyetik momenti Dirac teorisi tarafından verilenden biraz daha büyük olsaydı, deney ve teori arasındaki ahenk tutturulmuş olacaktı. Rabi'nin Columbia'dan meslektaşı olan Polykarp Kusch ve bir öğrencisi Henry Foley, elektronun manyetik momentini tam olarak hassas biçimde ölçmek üzere bir deney tasarladılar. Sonuç, söylenenleri onaylıyordu: Elektronun manyetik momenti tahmin edilenden biraz daha büyüktü; bundan dolayı, Dirac teorisiyle uzlaşmadığı için bu sonuç, bir anomali (istisna) olarak adlandırıldı. Bu deney sonuçlarının ışığında teoriyi tartışmaya açmak mücadelenin bir parçası olmuştu.

Elektron nedir? Elektron hem parçacık ve hem de dalga özellikleriyle, dört tane tanımlı, nicel özelliğe sahiptir: Kütlesi, elektrik yükü, spini ve manyetik momenti. Bu özelliklerden iki tanesi, spin ve manyetik moment, Dirac teorisi tarafından iyi konumlandırılmış gibi görünüyor. (Elektronun neden çok özel bir elektrik yüküne ve kütleye sahip olduğuysa hâlâ bir sır.) Ancak elektronun göze batmayan başka yönleri de vardır ve her yerde her daim bulunan elektronun kavramsallaştırılmasının tuhaf bir yolunu kuantum elektrodinamiği ortaya çıkartır.

Peki, nedir elektron? Bu soruya cevap verebilmek için, kuantum elektrodinamiği ile ilgili bazı bilgilere ihtiyaç olacaktır. QED'nin başrol oyuncusu, elektromanyetik kuvvete vasıta olan fotondur. QED görüşünde, elektrik yüklerin birbirini çekme veya itme mekanizması foton değişimi ile olur. Böylelikle elektromanyetik alanın kendisi kuantumlaşmıştır. Foton elektromanyetik alanın temel birimi haline gelir. Fotonlar özel enerjilere sahiptirler ve söz konusu enerji *hv* (ya da *hf*) değerine eşittir. Burada *h* Planck sabiti ve *v* de fotonun frekansıdır. Eğer atomlar ve fotonlar birlikte varlarsa, birbirleriyle etkileşime de girebilirler ve atomlar fotonları ya soğururlar veya yayarlar.

Elektron gibi statik bir elektrik yük, QED içinde yeni bir yaşama sahip olur. Elektronun sahip olduğu elektromanyetik alan kuantumlaşmış fotonlar içerir. Bu nedenle elektron bir foton bulutuyla kaplıdır. Elektronu saran bu foton bulutu etkin biçimde $1/r^2$ karakterli (Coulomb kanunu) elektrik alanını yeniden üretir. Elektron kendi elektromanyetik alanıyla etkileşime girebilir; yani etrafını saran buluttaki fotonlarla. Bu etkileşim, böylesine etkileşimlerin olmadığı bir ortamdaki bir elektronun davranışlarını değiştirir. Elektronun kendi alanıyla etkileşime girmesine yönelik tam bir teorik çıkarım yapabilmek için, QED tarafından bazı düzeltmeler yapılmak zorundadır; aslında, yeni görelilik esaslı QED teorisi tarafından. 1947 yılının yazında Julian Schwinger, Rabi-Nafe-Nelson deneyinin sonuçlarını değerlendirebilmek için görelilik esaslı QED geliştirmesi gerektiğini düşündü ve izleyen altı ay içerisinde de bu düşüncesini son derece başarılı bir biçimde gerçekleştirdi.

Elektronun etrafını saran foton bulutunun neden olduğu başka bir sonuç daha vardır. Bu foton bulutunda parçacıkların yaratılışı ve yok oluşu gerçekleşir. Bu sanal parçacıklar, pozitif ve negatif çiftler halindeki parçacıklardır ve elektronu saran boş uzayın kutuplaşmasına öncülük ederler. Böylece, elektronun elektrik yükü, dış bir gözlemci için *perdelenir*; gözlemci yükü ancak kısmi olarak algılar. Elektron yükü, uzaktan, gerçekte olduğundan farklı görülür.

Bu arada bazen kuantum elektrodinamiği elektronu aşar. Diğer bir deyişle, QED düşüncesi elektronun ötesine geçer. Örneğin, parçacık değişiminin aracı olduğu temel etkileşim kav-

ramı bugün deneysel olarak tanımlanan aracı parçacıklarla zayıf ve güçlü etkileşimler olarak genişletilmiş bulunmaktadır. Kütle çekimsel etkileşimin de adına *graviton* denilen bir parçacık aracılığıyla ortaya çıktığı varsayılmaktadır ancak gravitonu gözlemlemek ve kütle çekimsel alanı kuantumlaştırmak henüz tam olarak başarılamamıştır. Yine genel anlamıyla boşluk, yeni bir hayata bürünüp, parçacık yaratılışı ve yok oluşuyla dolu bir hacim olarak görünmektedir.

Elektromanyetik alan kuantumlaşmasının etkisi, hidrojen atomu ve diğer atomların enerji seviyelerine hemen göze çarpmayan oldukça hassas değişiklikler getirir. Bu gizli değişiklikler Lamb'ın ölçtüğü değerlerdir. QED düzeltmeleri, enerji seviyelerindeki küçük sapmalar için gerekli bu değişiklikleri sağlamak amacıyla getirilmiştir.

QED'nin karakterini bu şekilde verdikten sonra, onun Rabi verilerine açıklamayı nasıl getirdiğine bakalım. Tekrar soralım: Elektron nedir? Elektron, bir kütlesi ve elektrik yükü olan parçacıktır ve bu elektrik yükü sayesinde de bir elektromanyetik alanın kaynağıdır. Elektron kendi elektromanyetik alanıyla etkileşime girer ve bu etkileşim deneylerle ölçülebilen elektronun kütlesine ve elektrik yüküne tesir eder. Ölçülen kütle ve elektrik yük, *fiziksel* kütle ve *fiziksel* elektrik yükü olarak adlandırılır. Fakat bu kendi içindeki etkileşimler olmadığında elektronun kütlesi ve elektrik yükü nedir? Genelde bir ifadeyle, elektronun *çıplak* yükü ve *çıplak* elektrik yükü nedir? QED bu sorulara cevap verdi ve bu süreçte de elektronun manyetik momentinin Dirac teorisinde verilenden biraz daha büyük olduğunu ortaya çıkarttı. Elektronun bu biraz daha büyük manyetik momenti, Rabi'nin verilerinde bulduğu beklenmeyen sapmayı üretmişti.

Rabi verileriyle tetiklenen deneyler, elektronun manyetik momentini büyük bir hassasiyetle ölçmek üzere hazırlandı. Ulaşılan hassasiyet muazzamdır. Dirac teorisine göre elektronun manyetik momenti:

$$\mu = 1{,}0 \text{ Bohr manyeton.}$$

Elektronun manyetik momentinin en hassas ölçümü sonunda elde edilen değer biraz daha büyüktür:

μ = 1,0011596521884(43) Bohr manyeton.

Buradaki (43)'ün anlamı, sağdaki son iki sayıda ±43 kadar bir belirsizlik olduğudur. Richard Feynman bu inanılmaz ölçüm hassasiyetini yazısında bir perspektife oturturken, "Bu hassasiyet, Los Angeles ile New York arasındaki 3,000 milden fazla mesafeyi saç kılı hassasiyetinde ölçmeye eşdeğerdir," der.[117]

Elektronun manyetik moment ölçümleri sonucunda ulaşılan değerler ve kuantum elektrodinamiği ile hesaplanan teorik değerler arasındaki örtüşme kayda değerdir. Fiziğin en başarılı teorisi QED, diğer fizik teorilerini değerlendirme standardı haline gelmiştir. Hidrojenin manyetik momenti Dirac teorisi yerine QED ile hesaplandığında çıkan değer

μ = 1,00115965214(4) Bohr manyeton.

olmaktadır. Elektronun manyetik momentine yönelik ölçülen değerle, hesaplanan değer arasındaki fark milyonda 0,0001 düzeyine inmiş bulunmaktadır. Deney yöntemleri giderek geliştikçe ve daha hassas veriler ürettikçe dünya da daha merak uyandırıcı bir yer haline geliyor. Doğal dünya bugüne kadar olabildiğinden çok daha fazla hayal edilebilir niteliğe büründü. İnsanlığın hayal sınırları darken, düz bir dünyada, bir filin sırtına bağlanmış halde, kaplumbağayla desteklenmiş biçimde vb. yaşanıldığı düşünülüyordu. Oysa Dünya, yakınlarındaki bir yıldızın etrafında fırıl fırıl dönen bir top ve insanlar bu kürenin üzerinde duruyorlar -nüfusun yarısı diğer yarısına göre baş aşağı biçimde duruyor. İnsan hayali rehber olduğunda, evrendeki maddeler toprak, su, hava ve ateşi içeriyordu. Oysa madde hareket halindeki atomları ve atomları yaratan elektronları, protonları ve döteronları, onların da içinde kuarkları ve gluonları içeriyor. Bütün bunlara ilave olarak, adına boşluk denen hacim de bitmeyen faaliyetlerle nabız gibi atıyor.

Doğanın bonkör hayal kurma olanaklarına kavuşunca, bize basit hidrojen atomunu verdiği için kendimizi şanslı hissediyoruz. Bir protondan veya döterondan oluşan çekirdeği ve bir elektronuyla bilim insanlarının zayıf hayal dünyasını hareketlendiren ve onları kalıplaşmış algılarının ötesine, yeni anlayış

ufuklarına doğru gitmeye ikna eden de odur. Laboratuardan çıkan kavramlar apayrı tecrübe alemlerinin benzersiz sentezleme gücünü kanıtlamıştır. Aynı zamanda, bu kavramlar hâlâ da en güçlü zihinleri uğraştırmaya devam ediyor. Geleceğe baktığımızda, hidrojen atomunun doğal dünyayı anlayarak kucaklamamızda ve bu süreçte insanlığın bu bütün içerisindeki yerini daha iyi anlamamızda bize yardım etmeye devam edeceğini görüyoruz.

17

Hidrojen Galaksinin Haritasını Çıkartıyor

Edward M. Purcell ve Harold Ewen, 1951

Jan Oort için durum kesinlikle doğrudan doğruya görünür haldeydi... onu doğrudan doğruya galaksinin yapısına yönelik bir şeyler öğrenmek için bir araç olarak gördü.

—Edward M. Purcell

Bazı zamanlarda en muhteşem insanlar bile dar görüşlü olabilirler. Hatta bazen yanlış bile düşünebilirler. Örneğin, 200 yıl önce yaşamış iki matematikçi düşünün. Bunlardan biri Alman bilim adamı Carl Friedrich Gauss (1777–1855), bütün dünyaca gelmiş geçmiş en büyük matematikçilerden biri olarak anılır. Diğeri de Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846), o da Alman ve büyük bir matematikçi. Bu iki adam da astronomi konusunda benzer görüşlere sahiplerdi ve belli tipteki verilerin toplanmasını önemli buluyorlardı. Gauss, "Astronomide önce spekülasyon sona erdi ve sonra matematiksel ifadelere yarayacak verilerle, örneğin, gökyüzündeki cisimlerin büyüklük ve

şekilleri, uzaklıkları, pozisyonları ve en önemlisi de hareketleri ile düzgün bilgi *(proper knowledge)* dönemi başladı," diyordu.[118] Bessel ise, "Astronominin bütün yıldızların hareket etme kurallarını bulmaktan başka bir işi yoktur; var oluş nedeni bu noktadan başlar," diye belirtiyor.[119]

Gauss ve Bessel matematikçilerin fizikçilerden iki kat daha fazla olduğu bir zamanda yaşadılar ve her ikisi de Newton'un güneş ışınlarını prizmadan geçirip gökkuşağının renklerini sergilediğinden haberdardılar. Ama ikisi de güneş ışınlarını ya da başka bir yıldızın ışığını göksel cisimler için "düzgün bilgi" kaynağı olarak görmediler. Bu durum, uçağın nasıl uçtuğunu anlamaya çalışan birinin, uçağın ağırlığı, şekli ve gökyüzündeki pozisyonlarını kaydederek meseleyi çözmeye çalışmasına benziyor. Gauss ve Bessel söylemlerinde daha fazla yanılıyor olamazlardı.

Gauss ve Bessel'in biliyor olmaları gerektiği üzere, Dünya uzaydan gelen radyasyonla yıkanmaktadır. Bunun en bariz örneği, elbette Güneş'ten Dünya'ya yayılan görünür ışıktır. Sonra, gece gökyüzünü süsleyen, kırpışan yıldızlardan gelen ışıklar var. Görünmez radyasyon, güneş ışınlarının görünür spektrumundaki kırmızı ve mor ışınların ötesindeki alanlarda, 1800 ve 1801 yılları arasında keşfedildi. Radyasyonun, görülebilir uzun ve kısa dalga boylarının ötesinde ne kadar uzağa genişleyebildiği bilinmiyordu ama Güneş'in görünür spektrumunun, sahip olduğu radyasyonun sadece bir parçasını temsil ettiği oturmuş bir kanıydı. Dahası, Güneş'ten gelen gökkuşağı spektrumunun kesintili olduğu veya karanlık çizgiler barındırdığı 1802 yılında gözlemlenmiş, bu durum da, Güneş'ten Dünya'ya radyasyon yoluyla bir çeşit bilgi geldiğinin ipuçlarını vermişti. Yani 1800'lü yıllarda birçok şey oluyordu - hem de Gauss ve Bessel'in entelektüel burunlarının dibinde.

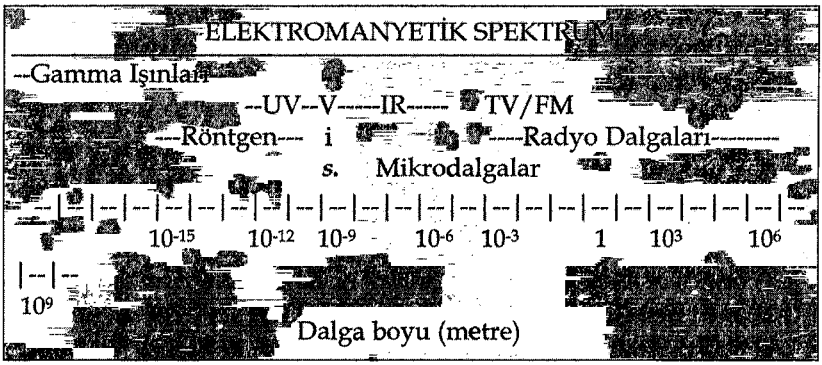
19. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, Güneş'in saldığı radyasyon ve diğer yıldızların spektrum çizgileri analiz edilerek kimyasal içerikleri hakkında bilgi edinilebileceği biliniyordu. Yıldızlarla ilgili öğrendiklerimiz -nasıl doğdukları, yaşadıkları ve öldükleri-, gece gökyüzünde pullarla süslüymüşçesine parıldayan bu uzak nesnelerden laboratuarımızdaki gözlem aygıtlarına giren radyasyonun içinde gözlemlenen değişik tip spektrum özelliklerinin sınıflandırılması yoluyla edinilmiş bulunu-

yor. O zamandan günümüze dek bilim insanları hem daha uzun ve hem de daha kısa dalga boylarını incelemeyi ilerletmiş, yıldız radyasyonundan nasıl yeni bilgiler toplanabileceğini saptamaya çalışmışlardır (bkz. RESİM 17.1).

İyi bir şans ve uygun rastlantıların var gücüyle ipleri eline aldığı bir olayda, erken 1930'lu yıllarda Bell Laboratuarları'nda Karl Jansky tarafından evrene yeni bir pencere açıldı. Bell Laboratuarları AT&T grubunun bir parçasıydı. AT&T uzunluğu yaklaşık on beş metre olan dalga boylarını gemiden kıyıya ve Atlantik ötesi iletişim kurma anlamında hayata geçirmiş bulunuyordu. Ama maalesef, kurulan iletişimin kalitesini düşüren bir parazit girişimi *(static interference)* vardı ve Jansky'den bu problemi incelemesi istenmişti. Jansky, özellikle arka plandaki bu parazitin, 'hiss' sesinin, kaynağını bulmak için hazırlandı -endüstriyel laboratuarlarda bilim insanlarının karşı karşıya geldiği tipik uygulamalı fizik problemlerinden biriydi.

Jansky üç tane parazit kaynağı keşfetti: Yerel gök gürültülü fırtınalar (güçlü girişim, ancak sadece fırtına olduğu zamanlarda), uzak gök gürültülü fırtınalar (zayıf parazit, ancak daha sabit) ve son olarak da kaynağı bilinmeyen süreğen bir 'hiss'. Bir yıl boyunca veri toplayan Jansky, zayıf parazit kaynağının uzayda Samanyolu Galaksisi'nin merkezine yakın Yay Burcu takımyıldızlarından gelen radyo dalgaları olduğu sonucuna ulaştı. Uzaydan gelen radyo sinyalleri haberi kamuoyunda bir heyecan yarattı. Jansky 27 Nisan 1933 günü Washington'da *Dünyadışı Kaynaklı Elektriksel Parazit* (İng.: *Electrical Disturbances of Extraterrestrial Origin*) başlıklı bir konuşma yaptı ve New York Times 5 Mayıs 1933 günü bu haberi, *Samanyolu'nun Ortasından Gelen Yeni Radyo Dalgaları* (İng.: *New Radio Waves Traced to Center of Milky Way*) manşetiyle kapaktan girdi. Amerikalılar radyolarını doğrudan Jansky'nin dinleme antenine bağlı olan bir istasyona ayarladılar ve radyodaki spiker dinleyicilere şu anonsu yaptı: "Evrenin derinliklerinden gelen bu radyo 'hiss' parazitini kendi kulaklarınızla duymanızı istiyorum."[120] Jansky'nin 1933 yılında Washington'da yaptığı konuşma genel olarak radyo-astronominin başlangıcı olarak kabul edildi.

Daha önce belirtildiği gibi, şans ve rastlantı Jansky'nin keşfinde önemli bir rol oynamıştı. Galaksi merkezi, belli bir dalga



RESİM 17.1 Güneş ışığı, temelde, gözlerimizin algılayabildiği elektromanyetik radyasyondur. Spektrumun bu bölümündeki dalga boyları, yukarıdan aşağıya yazılmış biçimde "Vis." ifadesiyle gösterilmiştir. Elektromanyetik spektrumun bu tablosu aynı zamanda daha kısa dalga boylarındaki dalgaları gösterdiği gibi (mor-ötesi, Röntgen -X- ışınları gamma ışınları), daha uzun dalga boylarını da gösterir (kızıl-ötesi, mikrodalga, kısa radyo dalgaları -TV/FM- ve daha uzun radyo dalgaları).

boyu aralığında bol miktarda radyo dalgası yayıyordu ve Jansky'nin araştırdığı dalga boyu da bu aralıktaydı. Ayrıca, Dünya atmosferi özellikle bu dalga boyu aralığı için saydam özellik gösteriyor, dolayısıyla Jansky'nin anteni de bunları algılıyordu. Bir de Jansky'nin çalışmalarını sürdürdüğü dönem, güneş lekelerinin minimum olduğu döneme denk gelmişti ve eğer güneş lekelerinin maksimum olduğu zamanda çalışıyor olsaydı, bu "evrenin derinliklerinden gelen" radyo sinyalleri Dünya'nın çevresindeki iyonosfer tarafından bloke edileceklerdi.

Teknik çevreler Jansky'nin radyo dalgaları keşfine sessiz kaldılar çünkü bilim insanları bu yeni keşfi basit bir merak olarak değerlendiriyorlardı. Az sayıda fizikçi Jansky'nin çalışmasının ardına düştü ve astronomlar az ilgi gösterdi. Bilim insanlarının ilgisizliğini açıklayan iki neden vardı. Birinci neden, radyo dalgalarını hassas biçimde inceleyebilmek için gereken aletlerin yokluğuydu. Bu durum, II. Dünya Savaşı'nın bitimiyle, radar sistemlerinde kullanılan uzun dalga boyuna yönelik tasarımlara

sahip elektronik aletlerdeki gelişmelerin herkese açılmasıyla değişti. İkinci neden de, Jansky'nin gözleminin, bir senfoni orkestrası üyelerinin konserden önce yerlerinde oturmuş ısınırlarken çıkarttıkları seslerle yakın benzerlik içinde olmasıydı. Bütün enstrümanlar kendi ısınma parçalarını birbirlerinden bağımsız olarak çaldıklarında konser salonunu büyük bir ses karmaşası saracaktır. Jansky'nin tespit ettiği 'hiss' de, farklı dalga boylarına sahip radyo sinyallerinin bir ürünüydü. Orkestranın ısınma anı gibi, radyo sinyallerinde de bir tane bile temiz sinyal yoktu. Bu da yakında değişecekti.

Kitabın birinci bölümünde öğrendiğimiz gibi, evrendeki toplam maddenin büyük bölümü hidrojendir. Uzak yakın, yıldızlararası gazın büyük bölümü hidrojendir. Sıcak yıldızların yakınlarında bulunan o hidrojen atomları tipik olarak elektronlarını kaybetmiş ve iyon formunda orada bulunuyorlardır. Çok küçük oranda hidrojen, yaklaşık yüzde 1 oranında, molekül formundadır -iki hidrojen atomu kimyasal olarak birbirine bağlanmıştır. Geriye kalan, tek tek hidrojen atomlarından ibarettir ve yıldızlararası boşlukta, her bir santimetre küpte yaklaşık bir tane hidrojen atomu vardır.

II. Dünya Savaşı bitmeden kısa bir süre önce, Hollandalı Astronom H. C. van de Hulst, bu hidrojen atomlarının özellikle bir *markör* sinyal aracılığıyla tespit edilebileceğini tahmin etti. Bu sinyal saniyede 1.420,4026 megadönüşlük (Mc/s) frekansa veya 21 santimetrelik bir dalga boyuna sahip olacak ve hidrojenin iki seviyesi arasındaki özel bir spektrum geçişinden çıkacaktı.

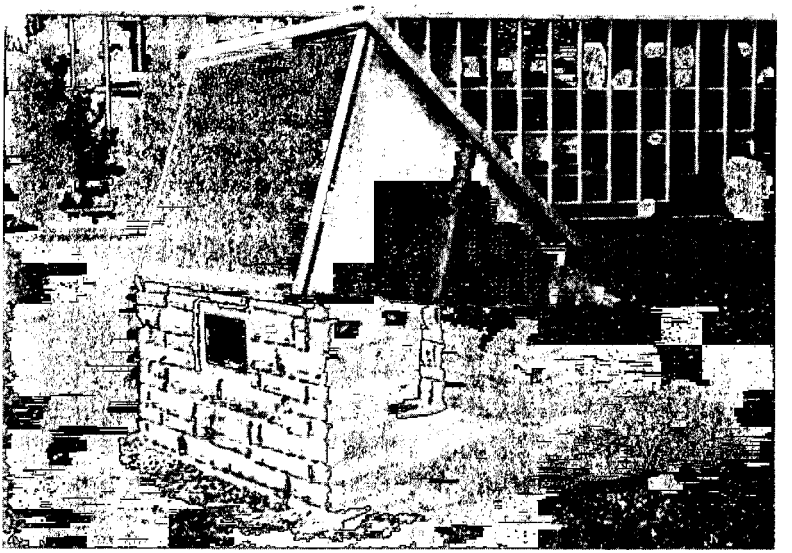
Bu özel kuantum geçiş, sonraları fizik dünyasında büyük bir üne kavuştu. Bu spektrum geçişi aynı zamanda, Rabi ve öğrencilerinin savaştan kısa süre sonra Dirac teorisindeki uyuşmazlıkları buldukları geçişti ve yine bu geçiş, elektronun manyetik momenti için bulunan yeni değere öncülük eden geçişti. 1947 yılına gelindiğinde söz konusu geçiş, Dünya kaynaklı hidrojen atomları üzerine yapılan deneylerde büyük önem kazandı; kısa bir süre içinde de aynı geçiş, galaksi çapında bir anlam kazandı. Söz konusu geçiş, 1950'li yılların sonlarına doğru geliştirilen en hassas atom saati için de bir temel oluşturdu (Kitabın 18. Bölümü'nde tartışıldı).

Van de Hulst'un tahmininden birkaç yıl sonra Hollanda'daki bilim insanları, uzayın derinliklerinde bulunan hidrojen atomlarından bu 21 cm'lik dalga boyundaki spektrum geçişinin aslında tespit edilip edilemeyeceği üzerine bir deney hazırlamaya başladılar. Maalesef, kullanacakları aletin yanması nedeniyle deneyi ilerletmekte biraz geri düştüler ve zamanın geçmesiyle de orjinal keşfi yapma fırsatını kaçırdılar. Ama yine de, göreceğimiz gibi, kader nihayetinde Hollandalı grubun yüzüne güldü.

O sırada Harvard'da fizikçi Edward M. Purcell ve lisansüstü öğrencisi olan Harold I. ("Doc") Ewen, hidrojenin bu imzası için -21 cm'lik özel dalga boyuna sahip- gökyüzünü tarayan bir deneye başlıyorlardı. Ne Purcell ne de Ewen'in, Hollandalı grubun da aynı deneyi hazırladığından haberi yoktu.

Harward'daki deney zayıf bir bütçe ile yürütülüyordu. 500 dolarlık bütçe, dikdörtgen kesiti olan ve tuhaf görünümlü bir müzik aletinin zili gibi boynundan genişleyen kontrplak bir anten imal etmeye harcanmıştı. Anten oldukça soğuk uzaydaki hidrojen atomlarından 21 santimlik çizgiyi tespit etmek ve algılamak üzere tasarlanmıştı. (Harvard'da inşa edilen orjinal teleskop RESİM 17.2'de gösterilmiştir. Bu aparat, Batı Virginia'daki Green Bank'da bulunan Ulusal Radyo Astronomi Gözlemevi'nde sergilenmektedir.) Aparatın geri kalan gereçleri ödünç alınmıştı. 1951 baharına gelindiğinde deneye başlamaya hazırdılar. 21 santimlik çizgiyi tespit etmek için kaç nafile gece geçirilmiş olduğuna dair kayıtlar yok. Aslında, bir noktada Purcell ve Ewen, söz konusu çizgiyi bulma çabasından vazgeçerek, olumsuz sonuçları ikna edici bir hale getirmek için deneye devam etme kararı aldılar. Bu süre içinde, 25 Mart 1951 gecesi hidrojen çizgisi ilk kez tespit edildi. Sinyal, Samanyolu'nun merkezinde bulunan Yılancı *(Ophiuchus)* takımyıldızlarındaki hidrojen atomlarından geliyordu. Bu ilk sinyalin kaynağı, 3.000 ila 5.000 ışık yılı ötedeki hidrojen atomu bulutlarıydı.

Hidrojenin 21 cm'lik çizgisinin keşfiyle, genç bir alan olan radyo-astronomi yepyeni bir döneme girdi. Birdenbire, sanki bir orkestra şefi podyuma gelmiş gibi, kakofoni sona erdi ve orkestra bir bütün olarak çaldığında tatlı, saf karakterli bir ton duyulmaya başlandı. Ewen'in boynuz anteninde, uzaydan gelen rastgele radyo dalgalarının yarattığı parazit hiss, hidrojen atomları-



RESİM 17.2 Purcell ve Ewen'in hidrojenin 21 cm'lik çizgisini keşfederken kullandıkları boynuz anten.

nın saf tonuyla yer değiştirdi. Bu saf ton, 21 cm'lik dalga boyuyla "aşağı yukarı" 1.420 Mc/s bir frekansa sahipti.

Deney başarıya ulaştığında van de Hulst Harvard'da konuk eğitmen olarak ders vermekteydi. Rastlantı sonucu o günlerde yine Harvard'da, Avustralya'daki radyo astronomi grubundan Frank J. Kerr de bulunuyordu. Kerr neler olduğunu şöyle anlatıyor: "Purcell gece gerçekleşen keşiften sonraki sabah bizi [van de Hulst ve Kerr] çağırdı. Temkinli bir bilim adamı olduğundan, sonuçları yayınlamadan önce tespit ettiği şeyin sağlamasını görmek istiyordu. Van de Hulst ve benim Hollanda ve Avustralya'daki enstitülerimizle keşfi rapor etmek için ilişkiye geçmemizi ve oralardan, mümkünse çabuk biçimde onay almamızı önerdi."[121] Purcell ve Ewen keşiflerini anlatan bir duyuruyu *Nature* dergisine yolladılar ancak Purcell editörlerden, duyuruyu Hollanda ve Avustralya'daki gruplardan sonuçlarla ilgili cevap

gelene kadar bekletmelerini istedi. Hollanda grubu sonuçları hızlı biçimde onaylayabildiyse de, Avustralya grubunun bulguları onaylaması altı hafta sürdü. Keşfin sonuçları nihayet üç grup tarafından -Amerikalı, Hollandalı ve Avustralyalı- ardı ardına makaleler halinde, *Nature* dergisinin 1 Eylül 1951 sayısında yayınlandı.

Edward M. Purcell'in karakteri işte böyleydi. Kaç tane bilim insanı, sonuçların yayınlanmasını böylesine erteleyerek, kazanılan zaferi diğerleriyle paylaşır? Purcell insanda hırs nedeniyle sıklıkla bulunması olası hiçbir kabalık göstermeyen sıra dışı bir fizikçiydi. Tersine, incelik ve diğerleri için düşüncelilik onun en belirgin yanıydı. Yaşadıkları onuru Hollandalı ve Avustralyalı gruplarla paylaşmak konusundaki kararda Ewen'in de payı olmalıydı. Ewen sıradan bir lisansüstü öğrencisinden biraz daha kıdemliydi çünkü II. Dünya Savaşı sırasında deniz kuvvetlerinde hizmet yapmıştı. Deniz kuvvetlerinde yıldızlarla navigasyon konusunda eğitmenlik görevi üstlenmişti. Öğrencilerinden biri, büyük Boston Red Sox beyzbol takımının oyuncularından Ted Williams idi ve pilotluk yapıyordu. Purcell-Ewen deneyi sırasında Ted Williams, Ewen'i ve ilk elden yapılan deneyi görmek için Harvard fizik laboratuarını ziyaret ederdi. Daha sonra Purcell'in bildirdiğine göre, Harvard'daki ünlü fizikçilerin hepsinin, büyük Ted Williams'ı aralarında görünce yürekleri çarpıyordu. Belki olgunluğu, belki deniz kuvvetlerinde çalışmış olması, belki de Purcell'in etkisiyle Ewen, bu keşfin onurunu paylaşmayı ziyadesiyle hak ediyordu.

Purcell ve Ewen, keşiflerinin çok önemli olduğunu biliyorlardı. Bu önemin bir işareti, Purcell ve Ewen'in *hatalı olarak*, bu keşiften dolayı Nobel Ödülü aldıkları yönünde bir krediyle onurlandırılmış olmalarıdır. (Aslında Purcell Nobel Ödülü'nü NMR keşfiyle almıştı.) Muhtemelen gönül zenginlikleri nedeniyle keşfin onurunu iki laboratuarla daha paylaşmaları, onları Nobel ödülünden yoksun bırakmıştı. İlginçtir ki, ölümünden bir yıl kadar önce Purcell, sırrını en başarılı öğrencilerinden biri olan Nicolaas Bloembergen'e söylemiş ve radyo-astronomiye katkısının en az nükleer manyetik rezonans keşfi kadar önemli olduğunu dile getirmiştir.[122] Hidrojenin 21 cm'lik çizgisinin keşfi, bizden uzaklardaki evren hakkında olduğu kadar galaktik

komşularımızla ilgili de yeni bilgiler -detaylı ve şaşırtıcı- kazanmak yönünde olanaklar yaratmıştı.

Güneş ve dokuz gezegeni, Samanyolu adını verdiğimiz büyük yıldız kompleksinin -ki bizim de içinde olduğumuz galaksidir- merkezinden yaklaşık 30.000 ışık yılı uzaktadır. Bu galaksinin bir sakini olmamıza karşın, onun yapısı hakkında çok az bilgiye sahibiz. Bu durum, ağaçlarından birinin altında durduğumuz bir ormanın şeklini tespit etmeye benzer. İlaveten, yıldızlar arası toz ve hidrojen bulutları görülebilen ışığı bloke ettiğinden, bilim insanları Samanyolu'nun merkez bölgesindeki yapısal karakterleri optik teleskoplarla gözlemleyemezler. Ama radyo dalgaları söz konusu bulutlar tarafından bloke edilemezler. Aslında, buradaki yıldızlar arası hidrojen bulutları 21 cm'lik çizgi aracılığıyla haritalandırılabilirler.

Samanyolu'nun spiral kolları büyük ölçüde hidrojen ihtiva ederler. Bu spiral kolların içinde yer alan yıldızlar dışında, kolların kendileri optik teleskoplar tarafından görülemezler. Hidrojenin 21 cm'lik çizgisi, söz konusu spiral kolların yapısal ayrıntılarını "görünür" kılar. Bu çizgiye odaklanıp ayarlanmış radyo anteni Samanyolu diskini boylu boyunca tarayarak, spiral kollar şeklindeki yapının gözlemlenmesini sağlar. Hidrojen verilerinden elde edilen böylesi bir görüntü Gart Westerhout tarafından elde edilmiştir. Bu görüntü galaksimizin yapısal ayrıntılarını gösterir (bkz. RESİM 17.3).[123]

Bu veriler nasıl olup da Westerhout'a bunu yapma imkânı vermiştir? On dokuzuncu yüzyıl matematikçileri Gauss ve Bessel, göksel nesneler üzerine düzgün çalışmalar yapmanın yegâne yolunun, onların hareketlerini anlamakla mümkün olacağını söylemişlerdi. Gauss ve Bessel kısmen haklıydılar. Hidrojenin 21 cm'lik çizgisi, hidrojen bulutlarının hareketine imkân verir -dairesel harekete- ve bu hareketin Dünya üzerindeki bir dedektöre yönlenmiş olduğu veya ondan uzağa doğru olduğu son derece hassas biçimde tespit edilebilir. Daha önce, hidrojenin 21 cm'lik çizgisinin frekansını "aşağı yukarı" 1.420 Mc/s olarak vermiştik. Bu değerin "aşağı yukarı" olmasının nedeni, gözlemlenen frekansların aslında 1.420 Mc/s merkez frekansı etrafında kümelenmiş olmalarıdır. "Kümelenme" hidrojen atomlarının hareketlerinin bir sonucudur. Benzer şekilde,



RESİM 17.3 Hidrojenin 21 cm'lik çizgisi yoluyla görünen Samanyolu.

uzaktaki galaksilerden gelen ışık, evrenin genişlemesinden kaynaklı kırmızı kaymaya *(red shift)* uğrar. Dolayısıyla, radyo anteninden uzağa doğru hareket eden hidrojen atomları biraz daha uzun dalga boylarına kayarken (kırmızıya kayma), antene doğru hareket edenler biraz daha kısa dalga boylarına kayarlar [maviye kayma *(blue shift)*]. Bu Doppler kayması verileriyle, Samanyolu'nun spiral kollarının hem hareketi, hem de yeri hassas biçimde tespit edilebilir.

Eğer Samanyolu'nun spiral kolları boyunca yıldızlar arası boşlukta manyetik bir alan varsa, hidrojenin 21 cm'lik çizgisi spektrum bileşenlerine ayrılır. Bu ayrım Zeeman etkisi olarak adlandırılır. Bu, hidrojenin 21 cm'lik çizgisinin Samanyolu hakkında daha fazla bilgi verme potansiyeline sahip olması demektir. 1968 yılında Gerrit Verschuur, bu ayrışmayı tespit ederek yıldızlar arası manyetik alanın varlığını keşfetti. Aslında, hidrojen bulutlarının manyetik alanlarla iç-içe oldukları bulundu.[124]

Samanyolu'nun ötesinde, bizim galaksimize en yakın galaksi olan Magellan Bulutları, hidrojen çizgileri aracılığıyla gözlemlenmiş bulunuyor. Astronomları şaşırtan, bu galaksinin optik teleskoplarla göründüğünden daha büyük olduğudur. Dahası, hidrojenin 21 cm'lik çizgisiyle gözlemlenen kırmızıya ve maviye kaymalar, Magellan Bulutları'nın dönmekte olduklarını ortaya çıkartmıştır.

Hidrojenin 21 cm'lik çizgisinin keşfi, dış uzayda radyo frekanslarının spektroskopisinin de başlangıcıydı. Purcell-Ewen keşfini takiben uzayda birçok molekülün varlığı da bulundu. Su molekülü H_2O ve amonyum NH_3, 1969 yılında California Üniversitesi Berkeley'deki bilim insanları tarafından keşfedildi. İlk organik molekül olan formaldehit (H_2CO) de 1969 yılında keşfedildi. Yıldızlararası boşlukta böylesi üç ve dört atomlu moleküllerin varlığı beklenmiyordu. 1970 yılına gelindiğinde, bütün bir kimya alanının uzayın karanlık uzaklıklarında da aktif olduğu net bir hale geldi. Belki de en beklenmedik moleküler keşif 1994 yılında, en basit amino grup asit olan glisinin (NH_2CH_2COOH) yıldızlar arası boşlukta keşfiydi. Amino asitler yaşamın yapı taşlarıdır ve bu karmaşık moleküllerin soğuk uzay boşluğundaki varlıklarının keşfi, 21 cm'lik çizginin derin geçmişinde karşılaşılan en büyük sürprizlerden biriydi.[125]

Hidrojen atomu radyo-astronomi alanını ardına kadar açmıştı. Bugün radyo-astronomik gözlemevleri, her iki yarımküredeki birçok dünya ulusunun stratejik bölgelerinde konumlandırılmıştır. Bu gözlemevlerindeki bilim insanları aktif biçimde Samanyolu içindeki ve uzayın çok daha uzak derinliklerindeki kaynaklardan yayınlanan radyo sinyallerini dinlemektedirler. Radyo dalgalarının birçok kaynağı tanımlanmış, böylece daha geniş bir evren bilgisine sahip olmamız sağlanmıştır.

Hidrojen atomları fiziksel evrende bol miktarda bulunur. Bu atomlar doğal formlarında bulundukları yerlerde, örneğin yıldızlar arasında ve belki de galaksiler arasında, 21 cm'lik bir radyo dalgası yayma potansiyeline sahiptirler. Ortalama olarak bir hidrojen atomu 133 yılda bir tane 21 cm'lik foton salar. Eğer uzayın her bir santimetre küpünde yaklaşık bir tane hidrojen atomu bulunduğunu kabul edersek, bunun anlamı, hidrojen atomunun karakteristik imzasını uzayın her bir metre küpüne her bir yılda yaklaşık altmış kez bıraktığıdır. Bu radyo fotonlarının bazıları Dünya'ya doğru salınırlar ve bilim insanları bunları dinlemeyi seçtiklerinde aparatları özel formda bilgi veren bir müzik işitir; bu bilgiyi de sadece doğanın kışkırtıcısı hidrojen atomu sağlar.

18

Hidrojen Maser: Yüksek Duyarlılıklı Saat

Norman F. Ramsey ve Daniel Kleppner, 1960

Bu, hareket eden nesnelerin durağanlığı hakkındadır,
Akan suda, hatta kış tohumlarının uykusunda
Gelecek zamanların kendini germiş olmasında
Bir yazıyı öylesine incelikle şifrelemek ki,
Onu sadece kum saatinin büyütebileceği hale
getirmek, sadece
Yıllar köküne inen cümleleri açar.

—Howard Nemerov, Finlandiya şiiri

Zaman şaşırtır -hayal dünyasını kışkırtır ve bunu hep yapmıştır. İnsan varlığına dair en eski kayıtlar, atalarımızın uzaktan akrabalarının bile zamanın geçtiğinin farkında olduklarını gösterir. Fransa mağaralarının duvarlarındaki yaklaşık 32.000 yıl öncesinden kalma taş devri resimleri, geçmiş deneyimlerden sahnelerle o günkü bir eylemi temsil ederken, bilim insanları bu sahnelerin gelecek olayları etkilemek amacı taşıdık-

larını düşünürler. Bu resimleri yaratan hayal gücünün, söz konusu düşünceleri mağara duvarlarına yansıtmadan çok önce ilkel insanların zihninde oluşmuş olduklarını varsaymak gayet mantıklıdır. Gerçekten de, zaman olgusunu tanımak -geçmiş, şimdi ve gelecek- insan tecrübesinde çok eski zamanlardan beri görülür. Bu ilkel çağ insanları da yaşamın zamana bağlı geçici doğasını iyice kavramış ve ölümden sonraki bir yaşamı tasavvur etmişlerdir. Mezarlar, insan kalıntılarının yanında, ölen kişiye ruhlar dünyasında hizmet etmek üzere tasarlanmış el yapımı eserler de barındırırlar.

Bir çocuk erken çağlarında doğum ve ölüm gerçeklerini keşfeder. Çocuklar olgunlaştıkça, ölümlü olmak üzerine bilinçli farkındalıkları daha bir belirginleşir. Belki de bu doğum ve ölüm gerçeği insan zihninde zaman kavramının oluşumunu sağlayan etkendir. Zaman insanın ölümlü olduğu gerçeğini beraberinde taşır ve bu üzücü mukadderat, dinlerin inananlarına mezarın ötesinde huzura giden bir yol sunmasına zemin hazırlar. Bu konuda tipik insan görüşünü yansıtan bir çizgi film kahramanının söylemi şöyledir: "Dinle! Sonsuza kadar yaşamak istemiyorum ama aynı zamanda sonsuza kadar ölü kalmayı da istemem."

Metafizik ve dini referanslara ilaveten düşünürler, çağların zaman kavramını getirmiş olduğunu düşündü ve zaman farkındalığı çok pratik çıkarımlar da geliştirdi. Takvimler göksel nesnelerin gözlemlenmesiyle oluşturuldu ve uzun vadede zamanın geçişini izleyebilmek için geliştirildi. Zamanın daha küçük aralıklarla kullanımı da eski bir ihtiyaç olarak kendini gösterdi. İlk saat hiç kuşkusuz güneşti. M.Ö. 3.500 gibi erken çağlarda Sümerler zamanın geçici insan icadı bölünmelerini geliştirdiler: Gün ve yıl. Yine güneş ışınlarını kullanarak, Mısırlılar M.Ö. 2.000'lerde zamanı gölgelerden yararlanarak ölçtü. M.Ö. 1.600'e gelindiğindeyse Mısırlılar su saatini geliştirdiler.

İngiliz Robert *(Robert the Englishman)* 1271 yılında ağırlıkla çalışan bir saatin yapımına girişildiğini yazıyordu: "Saat yapımcıları, her bir ekinoks (geceyle gündüzün eşit olduğu gün) arasında tam tur dönecek bir çark yapmayı deniyorlar ancak çabalarında henüz tam bir başarıya ulaşamadılar. Fakat eğer bunu başarırlarsa, bu yaptıkları gerçekten doğru bir saat olacağı gibi,

saatleri saptamak için kullanılan usturlap veya diğer astronomik gereçlerden daha değerli olacak."[126] Galileo sarkaç salınımının periyotlarının, salınımın genliğinden bağımsız olduğunu keşfettiğinde, sarkaç saatlerin temeli haline geldi ve on yedinci yüzyıl zamanın tutulması konusunda büyük bir gelişmeye şahitlik etti. Sarkaçlı saatlerin hassasiyetleri geliştikçe, sıcaklık ve basıncın küçük etkileri de görünür hale geldi ve bu küçük etkiler gelişmiş hassasiyet için mücadeleyi başlattı.

Küresel genişleme çağıyla birlikte küresel ticaret, dayanıklı ve hassas doğrulukta saatlerin tasarlanması ve yapılması yönünde kuvvetli bir motivasyon sağladı. Büyük kâşifler Vasco da Gama, Vasco Núñez de Balboa, Ferdinand Magellan ve Sör Francis Drake, doğu batı hattında nerede olduklarını bilmenin imkânı olmadığından körlemesine yelken açmışlardı. 1714 yılında İngiliz hükümeti, kırk iki günde iki dakikadan fazla hata yapmadan zamanı gösterecek bir saat için 20.000 Pound ödül koymuştu. Buradaki amaç denizdeki birinin yerini tespit edebilmekti; bunun için de hem enlem hem de boylam bilgisine sahip olmak gerekiyordu. Enlem Güneş ve diğer yıldızlar aracılığıyla bulunabiliyordu ancak boylam, iki zamanın hassas bilgisini gerektiriyordu: Örneğin, ayrılma limanındaki saat ve denizdeki yerel saat. Zamanı hassas biçimde gösteren aletler yapmak konusundaki arzu ve istek o zaman da, şimdi de, son derece pratik ihtiyaçlardan kaynaklanır.

Zaman fiziğin en temel kavramlarından biridir. Hareket, zaman ve mekanın oluşturduğu sahnede oynanan bir oyundur. Hareketi anlamak ve hareket eden bir nesnenin geçmişte nerede olduğunu ve gelecekte nerede olacağını bilmek için, belli zamanlardaki özel, üç boyutlu pozisyonları bir araya getiren verilere ihtiyaç vardır. Isaac Newton için zamanın mutlak bir karakteri vardır: Zaman kendi içinde gerçek ve evrensel, geçmişten geleceğe, ileri doğru, içerisinde meydana gelen olaylardan ve etkilerinden bağımsız, durdurulmaz bir akışa sahiptir. Newton'un zaman kavramı, insan tecrübesiyle tutarlıydı. Ancak bu görüş Einstein'ın özel ve genel görelilik teorileriyle dramatik biçimde değişti. Özel görelilik teorisi, zamanın mutlak doğasını etkin biçimde reddetti çünkü teori, zaman ve uzay arasında bir bağlantı gösterdi. Örneğin, bir otoyolda çeyrek mil aralıklarla

saatler yerleştirilip birbirleriyle senkronize edilseler, otoyolda *duran* bir fizikçiye hepsi aynı zamanı gösterecektir. Oysa otoyolda hızla *hareket eden* bir fizikçiye her bir saat farklı bir zamanı gösterecektir. Ya da, zaman saatin yanında *oturan* biri tarafından hassas biçimde tutulurken, saate göre *hareket eden* biri tarafından da yavaş aktığı görülecektir. Buna benzer etkiler sayısız fizik deneyiyle tespit edilmiştir.

Einstein'ın genel teorisi zaman düşüncesine yeni marifetler getirmiştir. Göreliliğin genelleştirilmiş formu, saatlerin de kütle çekiminden etkilendiklerini ortaya çıkarttı: Kütle çekim potansiyeli ne kadar güçlü olursa, saat de o kadar yavaş ilerleyecektir. Bu tahmin Robert V. Pound ve Glen Rebka tarafından yapılan güzel bir deneyle 1960 yılında onaylandı; ikili, Harvard Üniversitesi'ndeki fizik binasının bodrum katıyla tepesi arasında ilerleyen gamma ışınının dalga boyunun uzadığını gösterdi. Uzayan dalga boyu, yavaşlayan saate eşdeğerdir.

Einstein'ın görelilik teorileri yirminci yüzyılın başlarında ortaya atılmıştı. Göreliliğin çıkarttığı birçok tahmin ve hesaplamayı onaylamak arzusu, daha hassas saatlerin araştırılmasında da bir motivasyon olagelmiştir. Hidrojen maser saati de bu arayışın bir parçasıdır.

Atomik özellikler üzerine kurgulu ilk saat, kuvars kristalleri ile ortaya çıkmıştı. Doğrusunu söylemek gerekirse, bir kuvars saati, kuvarsı meydana getiren silikon ve oksijen atomlarının özelliklerine bağlı değildir. Bunun yerine, bu saat bir kristal kuvarsın mekanik özelliklerine dayalı olarak çalışır. 1920'lerin sonlarına doğru Bell Laboratuarları'ndaki bilim insanları kuvars kristali osilatörü üzerine kurulu bir saat tasarladılar. Tıpkı Galileo'nun sabit bir frekansla ileri geri salınan sarkacının, zamanın geçişini sarkacın periyoduyla tanımlı aralıklarla takip edebilmesi gibi, sabit frekansta düzenli titreşimleri olan kuvars kristalleri de zamanın geçişinin kaydını tutabilirdi. 1940'larda kuvars saatler, zamanın standardı olarak sarkaçlı saatlerle yer değiştirdi.

Kuvars saatlerin hassasiyeti, hata payının günde 0,0001 saniye olmasıyla anlaşılabilir. Böyle bir hassasiyet, günlük kullanım için gayet yeterlidir. Ancak, diyelim ki sorun, bir saatin deniz seviyesindeki ve Everest Dağı'nın tepesindeki atma hızındaki

farkın ölçülmesi olsun. Bu sorunun cevabı, Everest'in tepesindeki saatin deniz kenarındaki saate göre yılda 0,000030 saniye daha geri kaldığıydı. Kuvars saatler bu anlaşılamaz zaman farkını asla gideremediler. Fizik alanında ortaya çıkan soruların cevaplarını öğrenmek için daha iyi zaman ölçerlere ihtiyaç vardı.

1945 yılında I. I. Rabi, New York'da gerçekleşen Amerika Fizik Öğretmenleri Derneği'nin yıllık toplantısında baş eğitmen olarak bulunuyordu. Verdiği derste Rabi, atom saatinin olabileceğini duyurdu. Bu konuşma New York Times'ın bilim köşesi yazarı William L. Laurence tarafından hemen haber yapıldı: *Planlanan Yeni Saat İçin Kozmik Sarkaç* (İng.: *'Cosmic Pendulum' for Clock Planned*) başlığıyla çıkan yazı 21 Ocak 1945 günü gazetede yayınlandı. Bunu üç başlık daha izledi: *Atomun Kalbindeki Radyo Frekansları En Hassas Saatin Yapımında Kullanılabilir* (İng.: *Radio Frequencies in the Hearts of Atoms Would Be Used in Most Accurate Clock*) bunlardan ilkiydi. II. Dünya Savaşı henüz bitmemişti ve Rabi'nin konuşmasının ilk paragrafı 1945 yılının başlarında yaşayan fizikçilerin zihniyetini açıklar nitelikteydi: *"Physical Review* ya da *American Journal of Physics* dergilerinde zaten yazılmış olandan fazla çok az yeni katkıda bulunacağım için çok üzgünüm. Savaş bu konuyla da ilgilenmiş bulunuyor ama bir konu üzerine, barış zamanındaki fizik nostaljimizi yaşayarak görüş bildirmek de ihmal edilemez."[127] Bu başlangıçtan sonra Rabi, kendisinin ve öğrencilerinin savaş başlamadan önce geliştirdikleri manyetik rezonans metodunu açıklamayı sürdürdü. Rabi çalışmaları sırasında en gelişkin zaman tutma aletinin potansiyelini görmüştü ve öğrencileriyle II. Dünya Savaşı'nın başlamasından önce bu olasılık üzerine de konuşmuştu. Norman Ramsey moleküler ışın aparatı ile biri dağ başında, diğeri de bir madenin içinde, zaman üzerindeki yerçekimi etkisi ile ilgili yapılacak bir deneyi tartıştıklarını hatırlıyor. O sırada lisansüstü öğrencisi olan Ramsey, kendisinin deneyin karanlık ve boğucu maden kısmına gönderilirken, Rabi ve diğer kıdemlilerin dağ manzarası eşliğinde çalışacaklarını söylüyor. Rabi'nin daha hassas bir saat -atom saati- yapımının yeni prensiplerini sunduğu 1945 konuşması, beş yıl önce başlamış olan tartışmaların devamı niteliğindeydi.

Atom saatinin kökleri Rabi'nin manyetik rezonans metodunun içindeydi. Bunun nedenleri, ideal bir saatin karakteristikleri ile başlar. Bir saat değişmez bir periyoda sahip olmak durumundadır; örneğin, sarkacın bir tur sallanmasına karşılık gelen zaman gibi. İdeal bir saatin içsel *(intrinsic)* periyodu her yerde ve her zaman elde edilebilecek nitelikte olmalıdır. Sarkaçlı saat ideal değildir çünkü salınım periyodu saatin hareketinden ve yüksekliğinden etkilenir.

Bir atom yüksek enerjili bir kuantum seviyeden düşük enerjili bir seviyeye geçtiğinde, belli bir frekans ve periyotta elektromanyetik radyasyon salar. Doğru biçimde tespit edildiğinde bu frekans veya periyot atom saatinin tiktakları haline dönüşür; tıpkı kristal titreşim frekansı ve sarkaç salınım frekansının, kuvars saatin ve sarkaçlı saatin duyulmaz tiktakları olduğu gibi. Fakat atomdan yayılan frekans, ısı, basınç, nem ve ivme gibi çevre koşullarından, kuvars kristali veya sarkacın etkilendiğinden çok daha az etkilenir. Böylece atom saati, doğası gereği, kendini tekrarlama, durumunu sürdürme ve hassasiyete sahip olma potansiyelini elinde tutar.

Bir atomun yaydığı radyasyondan saat yapımında yararlanmak için frekans salınımlarının sayılması gerekir ki bu da atomik saatin tiktaklarını saymakla eşdeğerdir. Manyetik rezonans metodunda kuantum geçişleri, mikrodalga bölgesindeki frekanslarda gerçekleşir ve bunlar da 1940'larda elde bulunan teknolojiyle sayılabiliyordu. Ama hidrojen spektrumunun Balmer serisi ile ilişkili frekansları optik bölgededir ve çok daha yüksek değerlere sahiptir. Optik dönüşümlerin yüksek frekanslı salınımlarını saymak için gerekli teknoloji henüz yok denecek kadar ilkel düzeydeydi. Böylece manyetik rezonans metodu atom saati için ideal bir zemin oldu.

1950 yılında Norman Ramsey -manyetik rezonans metodunu geliştiren ekibin bir üyesi- Rabi'nin moleküler ışın aparatına basit bir modifikasyon yaparak onu kayda değer biçimde hassaslaştırdığı gibi, aynı zamanda atom saati için gereken gelişmiş hassasiyetin de öncüsü oldu. Ramsey'in modifikasyonu gayet basit ancak derinliği olan bir işti. Rabi'nin orjinal aparatında her bir ışın parçacığı salınımlı bir (manyetik) alandan geçiyordu. Ölçülen sonuçların hassasiyeti, parçacıkların bu salınımlı alanda

ne kadar kaldıklarına bağlıydı. II Dünya Savaşı'ndan sonra Ramsey, Harvard'da kendi laboratuarını kurduğunda, salınımlı alanı uzatmayı denemiş, böylece hareket halindeki ışın parçacıklarının bu alanda daha uzun süre kalmalarını ve deney sonuçlarının hassasiyetinin artmasını amaçlamıştı. Ancak bu yaklaşım başa çıkılmaz problemler yaratmıştı. Problemleri çözmek için Ramsey'in şahane bir fikri vardı: Her bir ışın parçacığını, ışın yolu üzerinde, birbirinden ayrı, ardı ardına iki salınımlı alandan geçirmek. Bu yaklaşım etkin biçimde ışın parçacıklarını salınımlı alanda daha uzun süre tutarak başarıyla çalıştı. Ramsey'in ayrık salınımlı alanlar metodu birçok uygulamada kullanıldı; atom saati de dâhil.

Manyetik rezonans metodu üzerinden çalışan ilk atom saati, Rabi'nin eski arkadaşı ve savaş sonrası MIT fakültesinin bir üyesi olan Jerrold Zacharias tarafından yapıldı. 1952 yılında Zacharias, MIT lisans bölümünün parlak son sınıf öğrencilerine bir seminer dersi veriyordu. Derslerden birinde görelilik teorisini ve bu teorinin bazı çıkarımlarının hassas bir saatle nasıl test edilebileceğini tartışıyorlardı. Zacharias savaş öncesi Rabi'nin laboratuarındaki atom saati tartışmalarının bir parçası olmuş ve moleküler ışınların kullanımından çok etkilenmişti. Öğrencileri ışın parçacıklarını salınımlı alanda daha uzun süre tutmak için zekice bir fikir geliştirdiler: Düşey eksende bir ışın sistemi tasarlayacak ve parçacıkları yerçekimine karşı, yukarıya doğru fırlatacaklardı. Bir süre sonra parçacıklar gerisin geriye dedektöre düşeceklerdi. Zacharias bu atomik fıskiye fikriyle çok heyecanlandı ve ışın atomu olarak sezyum kullanıp iki adet saat geliştirmeyi planladı: Bir küçük saat ve bir de büyük fıskiyeli saat. Fıskiyeli saat Zacharias'ın zamanında hiç gerçekleştirilemedi ama küçük sezyum saati sadece çalışmakla kalmayıp bir standart haline geldi.

Zacharias sezyum saatiyle ilgili ilk raporunu 1955 yılında verdi.[128] Bu saatte, bir sezyum atomu ışını boşluk boyunca hareket ediyor ve yolu boyunca manyetik alan tarafından saptırılıyordu. Bu sapmanın değeri atomların enerji seviyelerine bağlıdır, dolayısıyla farklı seviyelerdeki atomlar da farklı yollara ayrılırlar. Zacharias, deney aparatını öyle ayarlamıştı ki, istenmeyen seviyelerde bulunan atomları bloke edebiliyordu. Sadece

tek bir özel enerji seviyesindeki atomların özel bir frekanstaki mikrodalga alanına girmesine izin veriyor, bu da arzu edilen seviyedeki atomların bir (spektrum) geçişini tetikliyordu. Sonunda sadece bu atomlar detektöre ulaşıyordu. Uygulanan mikrodalga alanının frekansı *tam* olarak geçiş frekansına eşit olduğunda maksimum sayıda atom dedektöre ulaşıyordu. Peki, bu işlem nasıl olup da saat haline geliyordu? Özel bir elektronik devre, dedektöre ulaşan atom sayısını denetliyor ve uygulanan mikrodalga alanının frekansını düzenli olarak ayarlayıp sezyum geçiş frekansına eşitleyerek maksimum sayıda atomun detektöre ulaşmasını sağlıyordu. Dedektöre maksimum sayıda ışın atomu çarpması, uygulanan frekansla geçiş frekansının tam olarak birbirine eşit olduğunu gösteriyordu. Bu frekans da saatin tiktakları halini alıyordu.

Zacharias'ın girişiminden yaklaşık kırk yıl sonra, sezyum fıskiyeli atom saati de gerçekleştirildi. Günümüzde çağdaş sezyum saatleri zamanı muazzam bir hassasiyetle ölçüyor. En iyi sezyum saatleri de fıskiyeli saatler ve 20 milyon yılda yaklaşık bir saniye hatayla çalışan bir hassasiyete sahipler. Bu saatler zamanı, hem Dünya'nın kendi etrafındaki dönüşünden ve hem de Güneş etrafındaki yıllık dönüşünden daha hassas tutuyorlar. Bu yüzden de, zamanın en temel birimi olan saniyenin yeni bir tanımı 1967 yılında yapıldı. Bir zamanlar 1/86.400 gün olan saniye tanımı, şimdi artık 9.192.631.770 Cs^{133} sezyum rezonans frekansı periyodu olarak birimlendirilmektedir. Sezyum saatleri ticari olarak da piyasada bulunmakta ve yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Hassasiyetle ilgili motivasyon, Ramsey'in ayrık salınımlı alan metodunu üretmişti; ancak bu iki salınımlı alanın birbirinden ne kadar ayrılacağı konusunda bir sınır vardı. Söz konusu aralık, Dünya'nın yerçekimi kuvvetinin ışın parçacıklarını yolundan saptırıp çekmesine imkân vermemeliydi. Bu nedenle Ramsey başka bir fikirle geldi ve bu fikir hidrojen maser saatinin yaratılmasına öncülük etti. Işın atomlarını salınımlı alan içerisinde daha uzun süre tutma çabası, Ramsey'i bu atomları salınımlı alan içerisine yerleştirilmiş bir çeşit konteynır içinde hapsedip hapsedemeyeceği merakına yöneltti; ışın atomları kritik salınımlı alandan çıkmadan önce bir süre bu konteynırın içinde çeperle-

re çarparak dolanacaklardı. Neden olmasın? 1950'lerin sonlarına doğru Ramsey düşüncelerini, o günlerde en parlak lisansüstü öğrencilerinden biri ve ilerde MIT'de profesörlüğe kadar yükselecek olan Daniel Kleppner ile paylaştı. (Ramsey'in akademik kariyeri boyunca seksen dört doktora öğrencisi oldu ve birçoğu da olağanüstü fizikçiler haline geldi.) 1960 yılında Ramsey ve Kleppner birlikte hidrojen maser'i ve bunun üzerine kurulu saati keşfettiler (bkz. RESİM 18.1).[129]

Sezyum saati dedektördeki atomları tespit ederek çalışır; hidrojen maser saatiyse, doğrudan hidrojen atomlarının saldığı radyasyonu kullanır. Hidrojen maser saatinde, hidrojen molekülleri bir ateşlemeyle atomlarına ayrıştırılır ve bu atomlar, hidrojen atomları ışını haline gelecek şekilde yönlendirici aygıtlara dağılırlar. Sonra bu hidrojen atomları, aralarından özel çok ince *(hyperfine)* enerji seviyesinde bulunanlarının seçilebileceği biçimde kurgulanmış bir manyetik alana girerler. Bu arada, Ramsey ve Kleppner tarafından seçilmiş bu özel enerji seviyesi, 1947 yılında Rabi'nin Shelter Island'da yaptığı konuşmanın konusunu teşkil eden ve elektronun manyetik momentinin doğru biçimde saptanmasını sağlayan iki seviyeden yüksek olanıydı. İlginç biçimde bu iki seviye, Edward Purcell ve Doc Ewen'in uzaydaki hidrojen atomlarını tespit etmek ve bununla Samanyolu Galaksisinin haritasını çıkartmakta kullandıkları seviyelerdi. Ramsey, "Dan Kleppner ve ben, burada sözü geçen iki seviye arasındaki enerji farkını daha hassas biçimde ölçmek için atomik hidrojen maser'i keşfettik."[130] diye not düşmüştür.

Ramsey ve Kleppner'in hidrojen maser saati tasarımında seçilen seviye, yani RESİM 16.1'de sağ alt köşede $F = 1$ olarak etiketlenen çok ince seviye, teflon kaplı küre şeklinde bir biriktirme ampulüne yönlendirilir. Teflon kaplama, biriktirme ampulünün çeperleriyle 10.000 kadar çarpışma yaşayan hidrojen atomlarının yüksek enerji seviyesinde kalmasına imkân verir. Bütün bu hidrojen atomları, düşük seviyelerine indirgenmeyi bekler vaziyette yüksek enerji seviyelerinde kalırlar. Bir hidrojen atomu bozunduğunda, saniyede 1.420.405.721,68 devirlik bir frekansta radyasyon salar. Bu mikrodalga foton diğer hidrojen atomlarının da bozunmasını tetikler ve kısa sürede biriktirme ampulünün içinde bir mikrodalga alan oluşur. Bu aparatın ismi-



RESİM 18.1 Norman Ramsey (ortada), Daniel Kleppner (sağda) ve Ramsey'in bir diğer lisans üstü öğrencisi Stuart B. Crampton, hidrojen maser saatinin bir versiyonu başında duruyorlar.

ni aldığı maser eylemi işte budur. [Maser kelimesi, *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Türkçesi: *Tetiklenmiş Radyasyon Salımıyla Microdalga Güçlendirme*) tanımının baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır.]

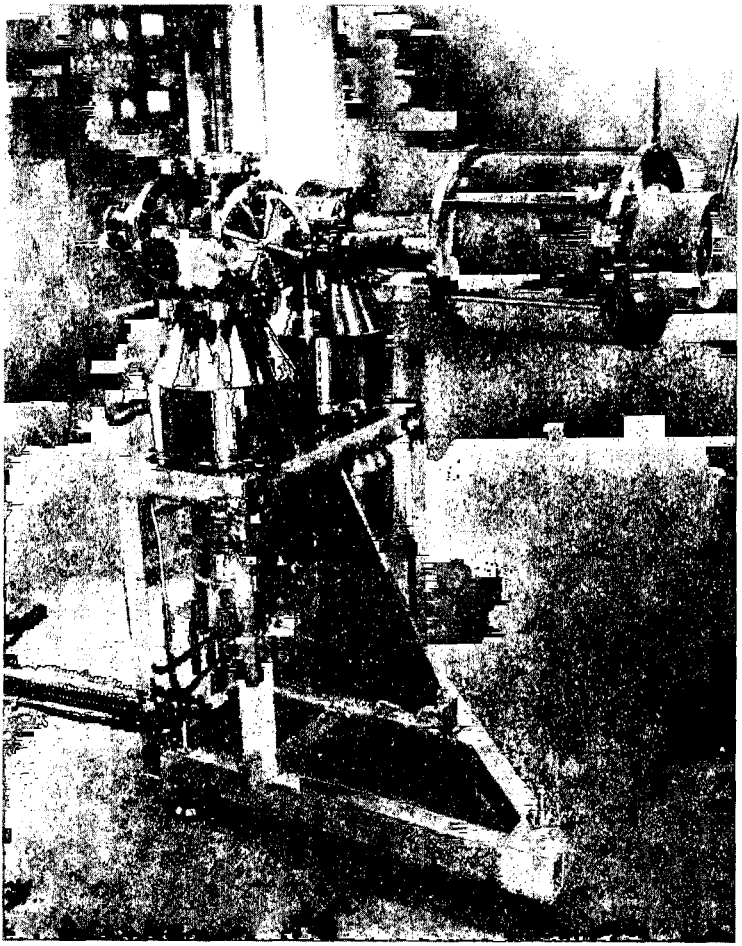
Saniyede 1.420 mega-devirlik (Mc/s) frekansa sahip mikrodalga alan, biriktirme ampulünde, sisteme yollanan ışınlardan

aralıksız olarak gelen hidrojen atomu girişiyle sürdürülür. Biriktirme ampulünün içine de minik bir toplayıcı aparat ilâve edilir ve bu aparatın içinde mikrodalga frekansıyla aynı frekansta bir elektrik akımı tetiklenir. Bu sinyal bir dizi elektronik devreyi besleyerek söz konusu frekansı zaman vuruşuna, yani hidrojen maser saatinin tiktaklarına dönüştürür.

Hidrojen maser saati yaklaşık 300 milyon yılda bir saniye hatayla dengeli bir sistemdir. Yıllar boyunca da en hassas ve en dengeli saat olmuştur. Ancak hidrojen maser saatinde bir sorun vardır: Hassasiyeti ancak birkaç günlük bir periyotta sağlanabilir. Birkaç gün sonra saatin hassasiyeti, biriktirme ampulünün iç çeperine hidrojen atomlarının sürekli çarpmasının biriktirme ampülünün rezonans karakteristiklerini değiştirmesinden dolayı kötüleşebilir ve saat hassasiyetini kaybeder.

Hidrojen maser saati birçok pratik uygulamada kullanıla gelmiştir. Örneğin, güneş sistemi içerisinde seyahat eden uzay cisimlerinin izlenmesinde ve Dünya'dan milyarlarca ışık yılı uzaktaki yıldız veya kuasarların (ç.n. Radyo dalgası yayan galaksi dışı yıldızsılar) yerlerini tespit etmekte kullanılır. Bunu başarmak için, hidrojen maser saatiyle senkronize edilmiş, birbirinden geniş bir aralıkla ayrılmış iki radyo teleskop kullanılır. Bir yıldız veya uzay cismi her iki teleskoptan da tespit edilir. Bu yıldız veya uzay cisminden gelen aynı radyasyonun, birbirinden ayrılmış iki teleskopa erişim zamanları hassas biçimde kaydedilerek tam olarak nerede bulunduğu tespit edilebilir. Bir hidrojen maser de, Ramsey'in yardımcılarından Robert Vessot tarafından, genel görelilik teorisi tarafından ortaya atılan, yerçekimi kuvveti azaldıkça zamanın hızlandığı iddiasını test etmek amacıyla yüksek rakımda yüzde 0,007 hassasiyetle yapılan bir deneyde kullanıldı.[131] Amacı, genel göreliliğin bir diğer iddiası ve herkesin peşine takıldığı kütle çekimi dalgalarını *(gravity waves)* tespit etmek olan deneyler tasarlandı.

Hidrojen maser saati ayrıca Dünya'nın tektonik plakalarının hareketlerini izlemek için de kullanıldı. San Andreas fay hattı boyunca birbirinden 336 km uzaklıktaki istasyonlar aracılığıyla yapılan izlemeden, on bir haftalık bir periyotta iki istasyon arasındaki mesafenin yaklaşık 20 cm arttığı öğrenildi. Bu tespitten kısa bir süre sonra deprem oldu. Plaka hareketleriyle bu deprem



RESİM 18.2 Hidrojen maser saatinin öncüsü ilk hidrojen maser.

arasında gayet olası bir bağlantı vardı. ABD'nin doğu-batı yönündeki ölçüsü daha sabittir. Massachusetts ve California'daki izleme istasyonları beş yıl boyunca göreli olarak 154.680.381 ± 1 inç mesafede (yaklaşık 4.000 km) birbirlerinden ayrık kalmışlardır.

Hidrojen atomu fizikçilere zamanı o güne dek görülmemiş bir hassasiyette ölçme imkânı verdi ama zamanın gerçekten ne

olduğu sorusunun yanıtına da fazla yaklaştırmadı. Belki de fizik bu sırrı asla açığa çıkaramayacak. Einstein insanlar için şimdi kavramının geçmiş ve gelecekten farklı olduğunu ortaya koydu. Ancak yine Einstein'ın vardığı sonuca göre, zamanın anlamı fizikte bulunamaz.

İnsanlar için zamanın bir yönü vardır: Geçmişten geleceğe doğru akar. Yumurta kabukları arasında emekleyen bir civcivin etrafını kapayan kabuklar ve nihayet yumurtanın çatlaksız hale dönüştüğünü gösteren bir film, kuşkusuz geriye doğru oynar haldedir ve algımız buradaki normal olmayan akışı hemen kavrar. Doğanın temel parçacıkları seviyesinde zaman ileri veya geri doğru gidebilir. Başka bir deyişle, bir fizikçi parçacıkların birbiriyle etkileşimini gösteren bir filme bakıp filmin ileri mi geri mi gittiğini tespit edemez. Ancak bu durum değişebilir.

Yirminci yüzyılın sonlarına gelindiğinde, deney sonuçları formunda yeni bir bulmaca kendini gösterdi. CERN'de ve Fermi laboratuarlarında kaon ve antikaonlar üzerine yürütülen bir deney, gizemli zaman kavramına yeni bir bakış ortaya çıkarttı. Bu deneyde kaon ve antikaonlar yaratıldı ve antikaonların kaonlara, veya bunun tam tersinin, salınım hızı ölçüldü. Eğer zamanın ileri veya geri aktığı belirsiz olsaydı, bu iki salınım hızı birbirine eşit olurdu. Bulgular bunu göstermedi. Deney sonuçları, antikaonların kaonlara dönüşümünün, tersi durumdan daha hızlı olduğunu gösterdi. Bu sonuç, evrenin neden madde esaslı olup, antimadde esaslı olmadığı yönünde bir anlamaya öncülük edebilir.

Eğer fizikçiler zamanın gerçekten nasıl çalıştığını anladıklarını düşünseler, tahminlerini deneyle test etmek istediklerinde zamanı çok yüksek hassasiyette ölçmek durumunda kalacaklardır. Eğer bir gün bu noktaya gelinirse, 1.420 Mc/s değerindeki (spektrum) geçişiyle hidrojen atomu, pekâlâ zaman denen muammanın sırrını çözen element olarak da anılır hale gelebilir.

19

Rydberg Sabiti: Temel Bir Sabit

Johannes Robert Rydberg, 1890
Theodor W. Hänsch, 1992

Rydberg sabiti temel atomik sabitlerle (e, h, m_e, c) bağlantısı ve tespit edilişindeki yüksek hassasiyet nedeniyle atom fiziğinin en önemli sabitlerinden biridir.

—George W. Series

Rydberg sabitinin fizik literatüründe ilk belirişi 1890 yılıdır. Günümüzde, yani bir asırdan uzun bir süre sonra bile bu sabit hâlâ fizikçileri meşgul etmekte, mükemmel aletlerle Rydberg sabitini giderek artan hassasiyette ölçmek için dikkatle tasarlanan deneyler sürmektedir. Bu sabite duyulan ilginin gayet geçerli sebepleri vardır ancak söz konusu sebepleri anlatmadan önce, üç arka plan sorusu kendini gösterir: İlki, bir sabiti 'temel' yapan nedir? İkincisi, temel sabitler nereden gelirler? Ve üçüncüsü, neden temel sabitler önemlidirler?

Temel olarak görülen sabitler, fiziğin geniş kapsamlı teorilerinin özünden gelirler; değerlerini doğanın temel etkileşim büyüklüklerinden alırlar. Sonuçta bunlar, değerleri diğer önemli fizik sabitleriyle bağlantılı ve onların değerlerini belirlemeye de yardımcı olan sabitlerdir. Suyun erime noktası kendi başına suyun önemli bir özelliği olarak durur ama önemi sudan öteye geçmez. Ses hızı da, ses yayılımı olarak adlandırılan mekanik düzen bozukluğu yaratan her ortam için farklıdır. Ne suyun erime noktası, ne de ses hızı temel sabitler değildirler. Bunların tersine, birçok farklı fizik içeriğinde ve fiziğin önemli alanları arasındaki bağlantılarda ince yapı sabiti *(the fine structure constant)* boy gösterir. Dolayısıyla ince yapı sabiti temel bir sabittir.

Temel sabitler hem doğanın kendisinden, hem de fizik teorilerinden çıkarlar. Evrendeki her atom elektron ve proton içerir. Bu temel parçacıkların taşıdığı elektrik yükü ve bunların kütleleri her temel sabitler listesinde yerlerini alırlar. Elektron ve protonun her ikisinin de temel bir özelliği manyetik momentleridir. Bu temel parçacık özellikleri doğadan gelen temel sabitlerdir. Kütle çekimi, elektromanyetizma, görelilik, kuantum mekaniği ve kuantum elektromanyetiği (QED) gibi fiziğin büyük teorileri de, yerçekimi sabiti G, ışık hızı c, Planck sabiti h ve ince yapı sabiti α gibi temel sabitlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Temel sabitlerin önemi birçoktur. Temel sabitlerin sahneye çıktığı noktalar genellikle deneysel sonuçların teorik hesaplamalarla karşılaştırıldığı yerledir. Bu sabitler yüksek hassasiyette bilindiklerinde, doğanın fizik işleyişini açıklamak için fizikçiler tarafından üretilen teorilerin güçlü ve zayıf yanlarını ortaya çıkartabilirler. Ölçülen değerlerle, teorik hesaplamalar sonucunda bulunan değerler arasındaki karşılaştırma, teorilerin test edilmesini sağlar: Teori böylece sorgulanır, sağlamlaştırılır veya çöpe atılır. Temel sabitlerin giderek daha hassas biçimde ölçülmelerindeki cazibe, bilimin yararına olan yeni deney tekniklerinin gelişmesini de tetiklemiştir. Temel sabitler sadece deney ve teori ilişkisini kurmakla kalmaz, farklı teoriler arasındaki ilişkileri de sağlar. Çeşitli teorik çerçevelerdeki varlıkları, önemlerinin daha da ortaya çıkmasına önayak olur.

Temel sabitlerin basit doğalarının, dolayısıyla önemlerinin, bir diğer işareti, gruplar halinde kümelerde tasnif edilmeleri, ve böylece birbirleri arasındaki karşılıklı kontrol mekanizmasını da sağlamalarıdır. Örneğin, iki temel sabitin birbirine oranı olan e/h, elektronun elektrik yükü e ile Planck sabiti h arasındaki orandır ve yoğun madde fiziği, QED, yüksek enerji fiziği, atom fiziği ve röntgen fiziği alanlarında çok önemlidir. Temel sabitlerin öneminin altını çizen bir diğer etmen de şudur: Ağırlık ve ölçüm sistemi tarihsel olarak, örneğin platin-iridyum çubuklar gibi insan yapımı nesneleri temel almış, Paris'teki *Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu* (İng.: *The International Bureau of Weights and Measures*) tarafından korumaya alınmış, uzunluk standardı olan metre, bu çubuktaki iki çizik arasındaki mesafe olarak saptanmıştır. Temel sabitler, doğrudan doğanın kendi işleyişini baz alarak şekillenen standartların tanımlanmasını sağlama potansiyeli sunarlar ve dolayısıyla, aynı çubuğun üzerindeki rastgele çentiklerden bağımsız, sabit değerler olarak tanınırlar.

Rydberg sabiti, temel sabit kabul edilmek yönünde bütün kriterleri karşılayan bir sabittir. İlâveten, Rydberg sabiti herhangi bir atomun enerji seviyeleri üzerine bütün teorik hesaplamaları ve deneysel ölçümleri birbirine bağlar.

Balmer çalışmalarını yayınladıktan ve hidrojen spektrumunun dalga boylarının basit bir matematik formülle hesaplanabileceğini gösterdikten on dört yıl sonra, Johannes Robert Rydberg, Balmer'in makalesiyle karşılaşmıştı. Rydberg İsveçli bir matematikçi ve fizikçiydi ve kimyasal elementlerin periyodik sistemine hayrandı. Elementlerin spektrumlarının onlar hakkında daha derin bilgiler içerdiklerine ve Periyodik Tablo'daki periyodik dizilimlerinin nedenlerini anlamakta anahtar bir rol oynadıklarına inanıyordu. Gözlemlerinde özellikle ilgi duyduğu alan, birçok kimyasal elementin spektrumlarının bir dizi dalga boyuna karşılık geldiği, bunun da söz konusu dalga boyları arasında bir ilişkiye karşılık geldiğinin ipucu olduğu yönündeydi. Rydberg bu spektrum serileri ile ilgili gözlemleri hassas biçimde ortaya çıkartan basit bir matematik formül geliştirmeyi başardı.

Rydberg bu basit matematik formülü derlediği sıralarda, Balmer'in hidrojen atomunun spektrum çizgileri üzerine yazdı-

ğı makaleyi keşfetti. Hemen, hidrojen atomunun spektrumu üzerine Balmer formülünü yeniden yapılandırabileceğini ve kendisinin bulduğu matematik formülle bunu genelleştirebileceğini anladı. Rydberg'in yeniden yapılandırdığı biçimiyle Balmer formülü şu hale geliyordu:

$$\frac{1}{\lambda} = N\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right)$$

Burada λ spektrum çizgisinin dalga boyuna, m bir tamsayıya ve N de Rydberg tarafından tespit edilen, 109.721,6 cm^{-1} değerinde bir sabite karşılık geliyordu. Rydberg N sabitinin "bütün seriler ve incelenen bütün elementler için ortak bir evrensel sabit" olduğunu iddia ediyordu.[132] Bu formülle Rydberg, birçok kimyasal element için hassas biçimde spektrum değerini bulabiliyordu. Rydberg sabiti olan N harfinin yerine daha sonraları Rydberg'i temsil etmesi amaçlanarak R kullanıldı. İlerleyen zamanlarda bu notasyon da değişerek, spektrum geçişlerini üreten atom çekirdeğinin kütlesini de yansıtması amaçlanarak R_∞ halini aldı.

Sadece Rydberg'in çalışmasını temel alarak bu sabiti temel bir sabit olarak görmek mümkün değildir. 1890 yılında Rydberg bulduğu sonuçları yayınladığında ortaya çıkan sabit ampirik nitelikteydi; yani deneysel verilerin analizinden bulunmuştu. Bu sayıya, geniş bir yelpazedeki fiziki veriyle tutarlı olduğu ve dolayısıyla önemli olduğu ihtimali ötesinde daha derin bir anlam atfedilemezdi.

Niels Bohr kendi hidrojen modeli teorisini ortaya attığında, bu sabitin statüsü dramatik olarak değişti. Bohr'un teorisinin özellikle ortaya çıkarttığı şey, Rydberg sabitinin sadece bir sayıdan ibaret olmadığı ancak diğer temel sabitlerin bir bileşimi olduğuydu. Bohr'un çalışması sonucunda ortaya çıkan sonuç şöyleydi:

$$R = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3 c}$$

Bohr, Rydberg sabitini elektronun kütlesi m_e, elektronun elektrik yükü e, Planck sabiti h ve ışık hızı c cinsinden ifade edebilmişti. Bohr'un bu çalışmasından sonra Rydberg sabiti basit ampirik bir

sabit olmaktan çıkıp teorik bir zemin ve diğer temel sabitlerle doğrudan bağlantılı olduğundan da derin bir önem kazanmıştı.

Böylece Rydberg sabitini ortaya çıkartan diğer sabitler de fiziğin geniş alanlarına ulaşmışlardı. m_e ve e elektronun temel özellikleridir ve birçok fizik eşitliğinde ya tek başlarına ya da başka sabitlerle birleşmiş olarak bulunurlar. c sabiti elektromanyetik fenomenlerde ve görelilik teorisi içinde belirirken, h sabiti kuantum mekaniği içerisinde çok yaygın kullanılır. Belki de daha önemlisi, bir araya gelip Rydberg sabitini ortaya çıkartan sabitlerin tek tek yüksek hassasiyette ölçümlerinin oldukça zor olmasıydı. Göreceğimiz gibi Rydberg sabiti son derece hassas biçimde ölçülebilir ve böylece diğer temel sabitlerin bulunmasında bir mihenk taşı niteliği kazanır. Buna ilâveten, yüksek hassasiyete sahip Rydberg sabitinin değeri QED teorisinin iyice test edilebilmesini de sağlar.

Yirminci yüzyıl içindeki on yıllar boyunca deneyci fizikçiler Rydberg sabitini giderek artan bir hassasiyetle ölçmek yönünde sebatla çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu misyona temel altyapıyı sunan da yine hidrojen atomu olagelmiştir. Daha açık söylersek, Balmer'in spektrum çizgileri serisindeki en seçkin ve ilk element olarak, parlak kırmızı H_α çizgisi, "üzerinde diğer herhangi deneysel spektroskopik çalışmanın yapıldığı çizgilerden daha yoğun çalışılmış" bir çizgidir.[133]

Bilim ışığında yapılmış sayısız ölçümler düşünüldüğünde, spektrum dalga boylarının ölçülmesinde ulaşılan hassasiyet seviyesi, bu konudaki ölçümleri diğerlerinden ayırır. Böylece, fizikçiler yıllar boyunca yaptıkları H_α çizgisinin dalga boyu ölçümlerinden Rydberg sabitini tespit etmişlerdir. Tablo 19.1'de erken dönem sonuçlarından bazıları verilmiştir.

Tabloda gösterilen deneysel sonuçlar, daha büyük bir hassasiyeti engelleyen belirsizliklerle beraber 109.737,3 cm^{-1} değeri etrafında kümelenmiştir.

TABLO 19.1 Optik spektroskopi yoluyla tespit edilen Rydberg sabiti değerleri

Fizikçi	Yıl	Değer (cm^{-1})
J. R. Rydberg	1890	109.721,6
W. V. Houston[a]	1927	109.737,424 ± 0,020
R. T. Birge[b]	1941	109.737,303 ± 0,014
J. W. M. DuMond ve diğerleri.[c]	1953	109.737,309 ± 0,012
B. P. Kibble ve diğerleri.[d]	1974	109.737,326 ± 0,008

a. William V. Houston, "A Spectroscopic Determination of *e/m*," *Physical Review* 30, 608-613 (1927).
b. R. T. Birge, "The values of *R* and of *e/m*, from the Spektra of H, D, and He^+," *Physical Review* 60, 766-785 (1941).
c. Jesse W. M. DuMond and E. Richard Cohen, "Least-Squares Adjustment of the Atomic Constants," *Reviews of Modern Physics* 25, 691-708 (1953).
d. B. P. Kibble, W. R. C. Rowley, R. E. Shawyer and G. W. Series, "An Experimental Determination of the Rydberg Constant," *Journal of Physics B* 6, 1079-1089 (1973).

1985 yılında durum değişti. Rydberg sabitinin ölçümündeki hassasiyete yönelik kayda değer ilerlemeler sayesinde yaşanan gelişme, fizikçiler spektrum dalga boylarının ölçülmesinde önceden beri engel teşkil eden sınırlamayla mücadele ederken ortaya çıktı. Söz konusu sınırlama, H_α spektrum geçişinin de, diğer spektrum geçişlerinde olduğu gibi, tek bir dalga boyunun olmaması, ancak "doğru" dalga boyu etrafında simetrik olarak dağılan dalga boyları kümesi uyarınca ölçülebilmesinden kaynaklanıyordu. Bu dalga boyları kümesinin nedeni de, fotonları yayan hidrojen atomlarının rastgele hareket ediyor olmalarıydı. Dedektöre doğru atomlar tarafından salınan fotonlar dedektör tarafından daha kısa bir dalga boyuna doğru kaymış şekilde görülür - atom ne kadar hızlı hareket ediyorsa, kayma da o kadar büyük olur. Buna karşın, dedektörden uzaklaşan atomlar tarafından salınan fotonlar da, dedektör tarafından daha uzun dalga boylarına doğru kaymış şekilde görülür -atom ne kadar

hızlı hareket ediyorsa, kayma da o kadar büyük olur. Işıma yapan atom ve dedektör arasındaki göreli hareket sonucunda oluşan dalga boyundaki kaymaya Doppler etkisi *(Doppler effect)* adı verilir -aynı etki kozmolojide gayet iyi bilinen, evrenin genişlemesi nedeniyle uzaklaşan galaksilerin kırmızıya kaymasında *(red shift)* kendini gösterir. Deneycilerin çabalarında karşı karşıya kaldıkları sorunla mücadelede yapmaları gereken, Rydberg sabitini hassas biçimde ölçebilmek için Doppler etkisini azaltmak, dalga boyları kümesini daraltmak, gözlemlenen dalga boyları kümesinin merkezi değerini hassas biçimde saptayabilmek ve böylece belirsizlik miktarını azaltmaktır.

Söz konusu hedeflere ulaşabilmek için izlenmesi gereken bir bariz ve bir de o kadar bariz olmayan adım vardı. Bariz adım, hidrojen örneğinin sıcaklığını düşürmek için bir yol bulmak, böylece rastgele hareket eden atomların hızlarını düşürmekti. Buna karşın, düşük sıcaklık beklenen gelişmeyi göreli olarak pek de göstermedi. Bariz olmayan adımsa, Doppler etkisinden muaf sonuçlar almaya yönelik zekice bir lazer uygulaması geliştirmekti.

Lazer uygulamalarının atom üzerine yapılan çalışmaları hayata döndürdüğü değilse de, yeniden canlandırdığı gönül rahatlığıyla söylenebilir. Atom fiziği, kuantum mekaniğinin yaratılmasıyla fizik araştırmalarının en aktif alanlarından biri haline gelmişti. 1930 yılına gelindiğinde nükleer fizik zaten yükselen değer olarak yaşanıyordu ve II. Dünya Savaşı'ndan sonra da parçacık fiziği ve ondan biraz sonra da yoğun madde fiziği ilgiyi en çok çeken alanlar haline gelmişti. Lazer atomlar üzerine yapılan çalışmalarda hassasiyeti artıran yeni bir araç sundu ve 1970'li yıllarda atom fiziği alanında gerçek bir *rönesansı* tetikledi. Rydberg sabitinin hassas ölçümleri de fizikçilerin atom üzerine ilgilerindeki bu canlanmanın bir parçasıydı.

Birçok önde gelen fizikçi Rydberg sabitinin bir adım daha ötede bir hassasiyetle ölçülebilmesi için mücadele etti. Ancak bunların arasında Theodor W. Hänsch, hidrojen atomunu kullanarak yeni deneyler tasarlamak ve Rydberg sabitinin daha hassas ölçüm değerini bulmak konusunda en kararlı ve en başarılı bilim adamı oldu.

Hänsch Almanya'nın Heidelberg şehrinde doğmuş ve büyümüştü. 1967 yılında bir lisans üstü öğrencisi olarak G. W. Series'ın hidrojen atomu üzerine teşvik edici bir konuşmasını duyduktan sonra hidrojenle ilgilenmeye başlamıştı. Series hidrojen atomu üzerine geniş çalışmalarıyla tanınıyordu ve 1957 yılında yayınladığı *Atomik Hidrojenin Spektrumu* (İng.: *The Spectrum of Atomic Hydrogen*) adlı kitabıyla ünlenmişti.[134] 1972 yılında Hänsch'ın hidrojen üzerine ilk makalesiyle,[135] fizik araştırmalarını sürdüreceği hidrojene olan ilgisi tescillenmiş oldu. Stanford Üniversitesi'ndeki fakültede on altı yıl geçirdikten sonra Hänsch, ülkesi Almanya'ya döndü ve iki kuruluşta birden, Münih Üniversitesi'nde fizik profesörü ve Max Planck Institut für Quantenoptik'de yönetici olarak çalışmaya başladı.

1974 yılından önce, Rydberg sabitinin değerinin hesaplandığı hidrojen H_α çizgisinin bütün dalga boyu ölçümleri, spektrum çizgisini genişleten Doppler etkisinden muzdaripti ve bu da sonuçların hassasiyetini sınırlıyordu. 1970'li yılların başında Hänsch tarafından, bu genişlemeyi ortadan kaldıran, son derece zekice hazırlanmış bir metot geliştirildi. İlk olarak Hänsch, hidrojen atomlarını hareketlendirmek ve H_α dönüşümlerinin izlenmesi için yeni bir lazer çeşidi *(dye laser)* geliştirdi.[136] Bu lazerle hedef hidrojen atomlarının üzerine iki ışın kolu yönlendiriliyordu -güçlü bir ışın bir yönden, ikinci bir zayıf ışın ters yönden hedef hidrojen atomlarının içinden geçiyordu. Üzerlerine gelen lazer ışınlarına doğru veya ona ters yönde hareket eden atomlar, Doppler etkisi nedeniyle farklı dalga boyları "görüyorlardı". Sadece iki lazer ışınının dalga boyları, hidrojenin H_α geçişinin gerçek dalga boyuna eşit olduğunda, her iki ışın birden aynı atom grubuyla etkileşime girmiş oluyordu; yani, gerçekten hareketsiz duran atomlarla.

Bu noktada deneyin püf noktası başlar: H_α geçişinin dalga boyuna ayarlanmış olan güçlü ışına karşılık, güçlü ışına göre hareketsiz duran bütün hidrojen atomları ışından enerji emer ve H_α geçişini gerçekleştirir. Esasen, güçlü ışın zayıf ışın için yolu açar. Ters yönden gelip örneğin içinden geçen güçsüz ışın, hiçbir atomu etkilemeden, enerji emilimi olmadan, yolunu sürdürür, ve örnekten de oraya girdiği enerjiye eşit bir enerjiyle çıkar. Burada gözlemlenen değer, zayıf lazer ışınının şiddetidir ve

zayıf ışının örneğin içinden şiddeti değişmeden geçip gitmesine izin veren bu dalga boyu da, büyülü dalga boyu olarak tanımlanır. Doygunluk spektroskopisi *(saturation spectroscopy)* adı verilen bu deney güzel bir şekilde düşünülmüştür ve mükemmel sonuçlar verir.

Bu H_α dalga boyunun deneysel ölçümü, Rydberg sabitinin değerini daha önceki deneylere göre on kat daha büyük bir hassasiyetle üretti. Hänsch ve deneyin diğer katılımcılarının ulaştığı Rydberg sabitinin değeri şuydu:

$$R_\infty = 109.737,3143 \pm 0,001$$ [137]

İki yıl sonra, 1976 yılında Hänsch ve bir lisans üstü öğrencisi olan Carl Wieman, polarizasyon spektroskopisi *(polarization spectroscopy)* adı verilen başka bir deney metodu daha geliştirdiler ve bu da Rydberg sabitinin değerini biraz daha hassas biçimde bulmaya hizmet etti. Bu metotta polarize edilmiş ışık kullanılır. İki lazer ışını -biri dairesel biçimde polarize edilmiş güçlü ışın, diğeri de doğrusal olarak polarize edilmiş zayıf ışın- hidrojen atomları örneğinin içinden birbirlerine karşıt yönlerde geçerler. Bir kez daha, sadece iki ışının dalga boyları H_α geçişinin dalga boyuna eşit olduğunda iki ışın aynı tipteki hidrojen atomlarıyla ilişkiye girer -yani ışınlara göre hareketsiz olan atomlarla. Dairesel olarak polarize edilmiş güçlü ışın seçilmiş bir hidrojen atomu grubuyla etkileşime girer ve aslında onları örneğin içerisinden çıkartır. Doğrusal olarak polarize edilmiş zayıf ışınsa, seçilmiş atom grubunun ayıklanmış olduğu örnek atomlarla karşılaşır ve bu durum, gönderilen ışından gelen ışığın tespit edilmesini mümkün kılar. Işık tespit edildiğinde, her iki ışının dalga boyları tam olarak H_α geçişinin dalga boyuna eşittir. Bu dalga boyundan da Rydberg sabitinin değeri tespit edilir. Deneyin sonunda bulunan değer şudur:

$$R_\infty = 109.737,31476 \pm 0,00032$$

Bulunan bu değer 1974 sonuçlarından üç kat daha hassastır.[138]

1974 ve 1976 deneyleri sırasında Hänsch'ın dikkati, hidrojenin H_α çizgisinden, "Doppler etkisinden muaf yüksek çözünür-

lükte lazer spektroskopisi ile üzerinde çalışmanın zihni en fazla kurcaladığı geçişlerden biri" olarak uzun zaman nitelenen bir geçişe kayıyordu.[139] Bu kafa kurcalayan geçiş Balmer serisinin bir parçası değildi. H_α geçişi, hidrojenin ikinci enerji seviyesiyle üçüncü enerji seviyesi arasındadır; yani, $n = 2$ seviyesinden $n = 3$ seviyesine geçişte. Kafa kurcalayan geçiş Lyman serisinin bir parçasıdır, Lyman-alfa geçişi olarak adlandırılır ve birinciyle ikinci enerji seviyeleri arasında, 1S-2S geçişi olarak ifade edilir: $n = 1 \rightarrow n = 2$. Şaşkınlık yaratan yönü, bu geçişin doğası itibarıyla dar olmasından kaynaklanır; yani Doppler etkisinden muaf bu teknikle Rydberg sabiti için çok daha hassas değerler elde edilebilir.

Balmer serisi görülebilir dalga boylarına sahiptir; bunun tersine, 1S-2S geçişinin dalga boyu görünmez; morötesi bölgededir. Böylesine kısa dalga boylarında lazer kaynakları yoktu. Bir kez daha, iki-foton spektroskopisi *(two-photon spectroscopy)* adı verilen zekice bir yaklaşım, hidrojen atomunun 1S-2S geçişi üzerine bir çalışmanın kapılarını açtı. İki-foton spektroskopisinde lazer ışını, arzulanan geçiş frekansının yarısı (ya da dalga boyunun iki katı) kadar bir frekansa sahiptir. Lazerden gelen ışın hidrojen atomları örneğinin içine gönderilir ve orada bir aynaya çarpıp tekrar örneğin içine yönlendirilir. Böylece hidrojen atomları lazer ışınıyla yıkanır, Lyman-alfa geçişinin dalga boyunun tam iki katına ayarlanır ve ters yönlere giderler. Belli bir hidrojen atomunun nasıl hareket ettiği dikkate alınmaksızın, bir atom, ters yönlerde hareket eden her bir lazer ışınından bir fotonu emdiğinde Doppler kayması sıfırlanır. İki fotonun emilimi de Lyman-alfa dönüşümünü tetikler.

İki-foton metodunu kullanarak Rydberg sabiti yeniden hesaplandı. Bu deneyle tespit edilen değer şuydu:

$$R_\infty = 109.737{,}31492 \pm 0{,}00022$$ [140]

Sonradan yapılan ilâve iyileştirmelerle, iki-foton metoduyla daha da hassas değerlere ulaşıldı.

$$R_\infty = 109.737{,}3156841 \pm 0{,}0000042$$ [141]

Bu sonuçla Hänsch ve projenin katılımcıları, 1992 yılında "bulduğumuz yeni değer, bütün temel sabit saptamalarının en hassas olanını temsil eder," diyerek başarılarını duyurdular.[142] Ancak Hänsch'ın bu üstünlük iddiası gayet kısa ömürlü oldu.

1997 yılının Ekim ayına gelindiğinde Hänsch ve yanında çalışanlar yeni bir "en hassas değer" bulmuşlardı. Yine 1992 yılındaki sonuçları aldıkları 1S–2S kışkırtıcı geçişini kullanarak ve iki-foton metodunu uygulayarak 1997 yılında yeni bir değere ulaştılar:

$$R_{\infty} = 109.737,31568639 \pm 0,00000091$$ [143]

TABLO 19.2 Rydberg sabitinin ölçülen değerleriyle ilgili, Hänsch'm 1997 sonuçlarını da içeren daha kapsamlı bilgiler barındırmaktadır.

Bıkmadan usanmadan böylesine büyük bir hassasiyete ulaşma çabasının karşılığı neydi? Neden Hänsch'ın 1997 sonuçları bu denli hayati bir öneme sahipti? Hänsch ve meslektaşlarının 1997 yılında yayınlanan makalesinin ilk paragrafı bunu açıklıyordu:

> Neredeyse son 30 yıl boyunca, 1,3 Hz'lik doğal çizgi kalınlığıyla atomik hidrojendeki 1S–2S iki-foton geçişi, yüksek çözünürlükte spektroskopi ve optik frekans ölçüm bilimi alanlarında ilerleme için ilham kaynağı oldu. Bu rezonans [1S–2S geçişi], *bilfiil* bir optik frekans standardı oldu. Daha da önemlisi, bu geçiş, temel sabitlerin saptanması ve kuantum elektrodinamiği teorisinin sıkı bir teste tabi tutulabilmesi için bir nirengi noktası sağlar. Gelecekte, bu (çok özel) geçiş, temel sabitlerin olası küçük değişmelerinin, ve hatta, madde ve antimadde arasındaki farkların üzerindeki örtüyü de kaldırabilir.[144]

TABLO 19.2 Rydberg Sabiti'nin ölçülen değerleri

Yıl	Yazar	Değer
1890	Rydberg	109,675
Sonra	Rydberg	109,674.7
1914	Curtis	109,737.7
1921	Birge	109,736.9
1929	Birge	109,737.42
1952	Cohen	109,737.311(7)
1959	Martin	109,737.312(8)
1968	Csillag	109,737.3060(60)
1971	Masui	109,737.3188(45)
1973	Kessler	109,737.3208(85)
1973	Kibble*	109,737.3253(77)
1973	Cohen*	109,737.3177(83)
1974	Hänsch*	109,737.3143(10)
1976	Hänsch*	109,737.31476(32)
1978	Goldsmith*	109,737.31506(32)
1980	Petley*	109,737.31529(85)
1981	Amin*	109,737.31544(10)
1986	Hänsch*	109,737.31492(22)
1986	Zhao*	109,737.31569(7)
1986	Hildum*	109,737.31492(22)
1986	Barr*	109,737.3150(11)
1986	Biraben*	109,737.31569(6)
1987	Zhao*	109,737.31573(3)
1987	Beausoleil*	109,737.31571(7)
1987	Boshier*	109,737.31573(5)
1992	Hänsch*	109,737.3156841(42)
1997	Hänsch*	109,737.31568639(91)

* Sonuçların yayınlandığı makalelerde adı geçen diğer araştırmacılar da vardır. Burada, bilim dünyasının eski zamanlarında kişilerin kendi başlarına çalışmalarının daha ortak bir özellik olduğunu görüyoruz.

Gayet net olarak, bu deney sonuçları günümüz dünyasında yaşayan insanlar üzerinde bir etki yapmayacaktır. Ama fizikçilerin perspektifinden bakıldığında bunun muazzam bir karşılığı vardır.

Deneylerin kendileri -doygunluk spektroskopisi, polarizasyon spektroskopisi ve iki-foton spektroskopisi- hem tasarım hem de uygulama açısından mükemmellerdi. Hidrojen spektrumunun özelliklerini ölçmek amacıyla geliştirilmiş olan bu deneysel metotlar başka yerlerde de uygulama alanları bulacaklardı. Örneğin, H_α geçişinin dalga boyunu büyük bir hassasiyetle ölçme mücadelesi, geniş uygulama alanlarına sahip olacak daha ileri gelişmeleri ve lazer tekniklerinin daha da iyileştirilmesini teşvik etti.

Fizik alanında da hikâye halâ açılarak devam ediyor. Lamb'ın, hidrojenin $2S_{1/2}$ ve $2P_{1/2}$ seviyelerinin birbirinden az miktarda farklı olduklarını keşfetmesi teorisyenler için büyük bir mücadele alanı açtı ve belki de fizik teorilerinin en güçlüsü olan QED rafine bir halde ortaya çıktı. Hänsch'ın deneylerinde hidrojenin temel seviyesi olan 1S için Lamb sapması büyük bir hassasiyetle ölçüldü. Bu fizik teorisyenleri için büyük bir çalışma alanı açtı: Lamb sapması, elektronun serbest ve bağlı hallerindeki öz-enerjilerinin farkı, birleştirme enerjisi üzerinde boşluk polarizasyonunun etkisi ve nükleer büyüklük etkisi gibi öylesine temel fenomenleri kucaklıyordu ki... Hidrojen ve döteryum gibi iki farklı hidrojen-türevinin spektrumları arasında yapılan bir karşılaştırma, QED'de proton-elektron kütlelerinin oranı (m_p/m_e) ve protonun elektrik yükü yarıçapı üzerine en zorlu testlerin yapılmasını sağlayabilir. Aslında Hänsch, protonun ve döteronun elektrik yükü yarıçaplarının karelerinin ortalamasını zaten saptamıştı:

$$r_d^2 - r_p^2 = 0{,}00000000000000038212 \pm 0{,}00000000000000000015 \text{ m}^2.$$[145]

Hänsch aynı zamanda döteronun yapısal yarıçapını *(structure radius)* da tespit etmişti:

$$r_{str} = 0{,}00000000000000197535 \pm 0{,}00000000000000000085 \text{ m}.$$[146]

Döteron genel olarak atom çekirdeğinin iç işleyişini anlamak için en önemli çekirdek olduğundan, bu sonuçlar daima nükleer fizikçilerin dikkatini çekecektir.

Sonuç olarak, Rydberg sabiti şimdi, saniyenin yeni tanımına temel teşkil edebilecek kadar yeterli derecede hassas biçimde bilinmektedir. Bu kapasitesiyle Rydberg sabiti, temel sabitler hiyerarşisinde daha görünür bir yere sahip olacaktır. Her ne olursa olsun, fizikçiler yine kafalarını kaşıyarak, bu sabiti daha da yüksek bir hassasiyet seviyesine getirmek için bir yol geliştirmeyi deneyeceklerdir.

20

Döteryumun Bolluğu: Big Bang Kozmolojisine Bir Bakış

David N. Schramm, 1945–1997

Big bang nükleosentezinin son parametresi... yüksek-kızıl kaymada (high-redshift) hidrojen bulutları içindeki döteryum bolluğunun ölçümleri vasıtasıyla saptanır.

—David N. Schramm ve Michael S. Turner

Hubble Uzay Teleskopu'nun açtığı çığırda, uzaydan alınan görüntülerin ayrıntılı güzelliğinin hem entelektüel hem de duygusal anlamda yarattığı büyüleyici etki ortak bir tecrübedir. İçinde cenin halindeki yıldızların doğuma yaklaştığı ve ölü yıldızların mezarlarını işaret eden narin nebulaların olduğu, büyüklükleri ışık-yıllar cinsinden ölçülen değerlere sahip kozmik bulutlar gözlemleniyor. Bu kozmik görüntülerin yarattığı haşmet karşısında kelimeler yetersiz kalıyor. Artık astronomların ve astrofizikçilerin her gün yeni bir keşif yaptıklarını öğrenmek de olağan bir hâle geldi. Bazen bu keşifler gizemli oluyor ve

onları anlayıp kucaklamak zaman alıyor. 1996 yılındaki durum böyleydi.

O yıl içinde, California Teknoloji Enstitüsü'nden bir grup, Digital Palomar Sky Survey adı verilen bir uzay araştırmasıyla uğraşıyordu. Bu çalışma sırasında astronomlar, gece gökyüzünde parıldayan tuhaf bir nesne keşfettiler. Bu ne bir yıldızdı ne de bir galaksi. Astronomlar bu fenomen karşısında üç yıl kadar -1999 yılının ortalarına kadar- kafaları karışık kaldılar. Nihayet 1999 yılının Haziran ayında Caltech takımının bir üyesi, Amerikan Astronomi Topluluğu'nun Chicago'daki bir toplantısında astronomlara, bu 5 ila 7 milyar yıl yaşındaki gizemli nesnenin tanımlanmasına yönelik yardım etme teklifinde bulundu. Neydi bu? Sonunda, Ağustos ayı içerisinde, dünyanın en güçlü iki teleskopundan biri bu ışık saçan gizemli nesnenin üzerine çevrildi ve gelen ışığı incelemeye başladı. Hawaii'deki Keck Gözlemevi'nde bulunan teleskopun içine, söz konusu ışık saçan yabancı nesneden gelen ışığın dalga boyları, hidrojen atomunun neşrettiği ışık dokusunun dalga boylarının aynısıydı. Uzayın derinliklerinden merak uyandırıcı biçimde gelen bu hidrojen atomlarından yayılan spektrum dalga boyları, bilim insanlarının onu bir kuasar olarak tanımlayabilmesini sağladı. (ç.n. *Kuasar*, radyo dalgası yayan galaksi dışı yıldızsılara verilen addır.) Kafa karıştırıcıydı bu kuasar ama kuasardı işte...

Bir kez daha hidrojen, göklerin atomu, endişeli astronomların yardımına koşmuş ve kafa karıştırıcı bir gözlemi çözmelerine yaramıştı. Hidrojenin Balmer serisi spektrum çizgileri, 1963 yılında, gizemli yıldızsı bir nesne tarafından yaratılan muammayı çözümlemeye yardımcı olmuş, daha sonra da bu nesneler kuasar olarak adlandırılmışlardı. Hidrojenin 1420 Mc'lik çok ince *(hyperfine)* spektrum geçişi, galaktik yapılara ve astrofiziksel işleyişe dair ayrıntılı bilgiler sağlamıştı. Hidrojenin astronomi ve astrofizikteki başat yeri kimseyi şaşırtmamalı: Hidrojen Büyük Patlama'dan *(big bang)* fırlayan en baskın ve muhtemelen ilk atomdur.

Günümüzde Büyük Patlama, evrenin başlangıcı için kabul edilen kozmolojik bir açıklamadır. Bu duruma gelişi de en başarılı bilimsel açıklamalarla desteklenmiştir: Büyük Patlama teorisi kışkırtıcı bir öneridir. Hem deney ve hem de teori, bu görüşe

dayanan tahmin ve sonuçları incelemek için bir araya gelmiştir. Ancak, anahtar niteliğindeki tahminlerin ileri sürülmesi veya doğrulanması için, Büyük Patlama kozmolojisi çetin sınavlardan geçmeliydi.

Bir düşüncenin çıkış noktasını tanımlamak her zaman risklidir. Büyük Patlama'nın temel fikri, 1922 yılında Einstein'ın genel görelilik denklemleriyle donanan ve tek bir başlangıç noktasından genişleyen bir evren resmi geliştiren Rus matematikçi ve fizikçisi Alexander A. Friedmann ile ilişkilendirilebilir.[147] Ancak zamanlama yanlıştı ve Friedmann'ın çalışması dikkat çekmedi. Büyük Patlama kozmolojisinin tanımı da yine bir Rus ve şakacı bir fizikçi olan George Gamow'a atfedildi.

Gamow bir nükleer fizikçiydi. İlk evrenle elementlerin oluşumu arasında bir ilişki hayal etti. 1942 yılının Nisan ayında Washington'da teorik fizik konulu konferansların sekizincisi yapılmıştı. Gamow'un önerisi uyarınca bu konferansın ana teması "Yıldızların Evrimi ve Kozmoloji Problemleri" olarak belirlenmişti. Gamow ve J. A. Fleming tarafından yazılan konferans raporunda, "Öyle görünüyor ki, element oluşumlarını bir patlama karakterinin yarattığı ve bu patlamanın da 'zamanın başlangıcı' ve hâlihazır evren genişlemesinin tetiklendiği nokta olduğu daha akla yatkındır."[148] Gamow ve lisansüstü öğrencisi Ralph Alpher bu fikirleri, 1948 yılında yayınladıkları *Kimyasal Elementlerin Orjini* (İng.: *The Origin of Chemical Elements*) adlı makalelerinde ayrıntılı biçimde geliştirdiler. Bu makale Alpher, Hans Bethe ve Gamow tarafından yazıldı. Ama Bethe'nin aslında makaleyle hiçbir ilişkisi yoktu! Bu tamamen Gamow'un şakacı yanını gösteren bir olaydı. Gamow tam bu makaleyi Alpher ve Gamow imzalarıyla yayınlatmak üzereyken, Yunan alfabesinin birinci ve üçüncü harflerinin sırasıyla alfa (α) ve gamma (γ) olduğunu hatırladı; yani asistanı ve kendisinin baş harfleri. Çok fena. Gamow bu sıralamada Yunan alfabesinin ikinci harfinin, betanın (β) eksik olduğunu düşünmüş olmalı ki, muhtemelen kıkır kıkır gülerek makaleye Bethe'nin adını da ekleyip, yayıncıya öyle gönderdi. Alpher, Bethe, Gamow makalesi böylece $\alpha\beta\gamma$ makalesi olarak bilinir oldu.[149] (Bethe de mizahi yönü kuvvetli biri olduğundan, Gamow'un bu marifetinden bir hayli eğlenmişti.)

αβγ makalesinin yayınlandığı o yıl, halihazır evren gözlemleri üzerinden bir diğer kozmolojik proje ortaya atılmıştı. Bu yeni teorinin mimarları olan Cambridge Üniversitesi'nden Fred Hoyle, Hermann Bondi ve Thomas Gold, 1948 yılında yayınlanan iki makalelerinde konuyu geliştiriyorlardı. Durağan hâl teorisi *(steady state theory)* olarak adlandırılan teori, Büyük Patlama ile iki farklı kutup gibi tersti.[150] Büyük Patlama net bir başlangıç ve süre giden bir evrim ileri sürerken, durağan hâl teorisi, mükemmel kozmolojik prensip olarak adlandırılabilecek bir görüş üzerine oturuyordu: Evren, nereden ve ne zaman bakıldığının önemi olmaksızın, aynı görünüyordu. Mükemmel kozmolojik prensip oldukça rağbet gördü.

Elbette her kozmolojik yaklaşım evrenin görünen genişlemesini açıklayabilmeliydi. Bu apaçık gözlem ışığında durağan hâl teorisyenleri, genişleme sürerken maddeyi incelmekten kurtaracak ve zaman geçerken maddenin sabit bir yoğunluğa sahip olmasını sağlayacak bir yol bulmak zorundaydılar. Bunu başarmak için de cesur ve temelsiz, basit bir varsayımda bulundular: Bütün uzayda hidrojen atomları sürekli olarak yaratılmaya devam ediyordu. Bu tezin gözlemlediğimiz genişleyen evren düşüncesiyle örtüşmesi ve maddenin sabit bir yoğunluğu olması için, her bir metreküp uzay boşluğunda 300.000 yılda bir yaklaşık bir hidrojen atomunun ortaya çıkması gerekiyordu.

Durağan hâl teorisi ve Büyük Patlama, taraftar toplamak ve daha popüler olmak için 1950'den 1960'lara kadar rekabet ettiler.[151] Fakat durağan hâl teorisinin iddia ettiği prensip, kısa süre sonra gün yüzüne çıkan tartışmasız gerçeklerle örtüşmedi. Güçlü taraftar toplamış bulunan bilimsel ve felsefi bu iki duruş arasında acımasız yargılamalar başladı. Kozmolojik modellerin asimile etmesinin zorunluğu olduğu gerçeklerden biri de kuasarların keşfiydi. 1963 yılında keşfedilen kuasarlar muazzam büyüklükte enerji kaynaklarıydılar. Kuasardan fışkıran enerji, büyük bir galaksideki bütün yıldızların enerjilerine eşdeğer nitelikteydi. Aynı biçimde kafa karıştıran bir diğer etmen de, kuasarlar için ölçülen geniş kırmızıya kaymaydı *(red-shift)* ve bunun anlamı da, bütün kuasarların Dünya'dan akıl almaz mesafelerdeki uzaklıklarda konuşlanmış olduklarıydı. Durağan hâl teorisyenleri için kuasarların dağılımı uzlaşılamaz bir konuydu:

Kuasarların sadece çok uzaklarda, ve dolayısıyla çok uzun süre önce var olabilmeleri, durağan hâl teorisinin olmazsa olmaz "aynı dün, aynı bugün ve aynı yarın" ve "burada neyse, başka yerde de aynı" prensiplerini açıkça ihlal ediyordu.

1960'lı yıllarda kozmologların karşısına çıkan ikinci gerçek de, evrene yayılmış radyasyonun keşfiydi. Mikrodalga arka plan radyasyonu *(microwave background radiation)* adı verilen bu radyasyon 1948 yılında öne sürülmüş ancak o zaman hiç ilgi çekmemişti.[152] Aslında, bu iddianın onaylanması, yani keşfin kendisinin yapılması 1965 yılında tamamen tesadüfen olmuştu. New Jersey'deki Bell Telefon Laboratuarları'nda çalışan fizikçiler, Arno Penzias ve Robert Wilson, uydu haberleşmesine eşlik eden parazitin kaynağını tespit etmeye çalışıyorlardı. Amaçları bu sorun yaratan paraziti ortadan kaldırmaktı. Purcell ve Ewen'in kullandığına benzer ama ondan çok daha büyük, boynuz gibi bir anten kullanıyorlardı. Bu algılayıcı anteni Samanyolu içerisinde nereye yönlendirseler arka plan paraziti olan 'hiss' (sesi) hep aynıydı ve aynı şiddete sahipti. Söz konusu hiss'i ortadan kaldırmak için, boynuz şekilli anten içlerine giren güvercin pisliklerini temizlemek de dahil her şeyi denediler. Nihayet, gözlemledikleri radyasyonun kozmolojik çıkışlı olduğu sonucuna vardılar. Böylece de kazara mikrodalga arka plan radyasyonunu keşfetmiş oldular.

Bazen bilim insanlarının nasıl çalıştığı merak uyandırıcıdır. Arka plan radyasyonu, Büyük Patlama kozmolojisinin doğal bir sonucuydu: Evren tek bir sıcak, çok sıcak, noktadan başlamıştı. Patlamayla birlikte genişleme başladı ve bu genişleme giderek yavaşladı, evren soğudu. Büyük Patlama'ya eşlik eden yüksek enerji radyasyonu da soğudu ve nihayetinde dalga boyu, hâlihazır mikrodalga boyutlarındaki karakterine, yani 2.7 Kelvin'lik (K) -mutlak sıfırın biraz üstü- kozmik sıcaklığa düştü. Peki, bilim insanları neden etkin biçimde bu radyasyona bakmadılar? Aslında zaman içerisinde bu konuyla ilgileneceklerdi. Penzias ve Wilson keşiflerini yapar yapmaz, diğer bir grup fizikçi de, Büyük Patlama'dan kalan tortuları incelemek için gökyüzüne bakmak üzere donandı. Diğer birçok konunun yanı sıra, kuasarlar ve mikrodalga arka plan radyasyonu, durağan hâl teorisiyle açıklanamıyor, ancak büyük bir zarafet ve mantıkla Büyük

Patlama kozmolojisine oturuyordu. Buradaki "diğer birçok konu"dan biri de bizi yine hidrojene getirir.

Büyük Patlama'nın Gamow için barındırdığı şaşırtıcı şey, kimyasal elementlerin gözlemlenen bolluğuna niceliksel anlayış getiren yapısal potansiyeliydi. Gamow patlamadan hemen sonraki aşırı koşulların ortaya dev bir kazan çıkartmış olabileceğini ve elementlerin de bu kazanın içinden çıkmış olabileceklerini düşündü. Gamow'un bu heyecan verici düşüncesinin doğruluğu kısmen ispatlandı. Üç elementin dışındaki bütün elementler yıldızların içinde sentezlendi. Üç elementse, döteryum, helyum ve lityum, doğrudan Büyük Patlama'nın ürünü olup, daha ağır elementler olan oksijen, nitrojen, magnezyum ve demir ise, yıldızların içindeki hidrojen, helyum ve daha ağır elementlerin füzyonu sonucudurlar. (Demirden daha ağır elementler, nova ve süpernova olarak adlandırılan yıldız patlamaları sırasında oluşurlar.) Her ne kadar Gamow turnayı gözünden vuramadıysa da, düşüncesi hedefe yönelikti.

Bu kitabın ilk bölümünde döteryum, Büyük Patlama'dan hemen sonra ortaya çıkmış olduğu yönünde tanımlanmıştı, bu nedenle döteryum karakterce başlangıçtan beri vardı. Bu durum önemli bir soruyu akla getirir: Evrende gözlemlenen hâlihazır döteryum miktarı, Büyük Patlama kozmolojisi üzerine deneye dayalı bir diğer bakış haline dönüşebilir mi? Daha açık söylersek, Büyük Patlama'nın hemen ardından gelen kısa süre içinde oluşan hafif elementlerin nükleer sentezleri -en çok helyum (^{4}He), çok da fazla olmayan döteryum (^{2}H), helyum (^{3}He) ve lityum (^{7}Li) - bugün evrende gözlemlenen hâlihazır bolluklarını açıklayabilir mi?

Birçok bilim insanı bu soruyla ilgilenmiştir ama en fazla bir astrofizikçinin sürdürdüğü yoğun ilgiye konu olmuştur. Bu konuda gerçekten de idolleşmiş olan kişi, Chicago Üniversitesi'nden David N. Schramm'dır (bkz. RESİM 20.1). Schramm, boy pos olarak büyüklüğü, yardımsever kişiliği, bilimsel başarıları, ve yaşam biçimiyle, gerçek ve mecazi anlamda "büyük" bir insandı. Kırmızı bir Porsche kullanmış, kendi uçağına pilotluk yapmış, dağlara tırmanmış, Chicago Bears profesyonel Amerikan futbol takımında mücadele etmiştir. Stephen Hawking onun için, "David birçok yönüyle yaşamdan daha büyük biri-



RESİM 20.1 David Schramm

dir," diyor.[153] Schramm herkes kadar temel parçacık fiziğini ve kozmolojinin büyüklüğünü bir araya getirmişti. David birinci sınıf bir bilim adamıydı, "ama", astronom Margaret Geller'in yazdığı gibi, "Belki bundan da önemlisi, içinde bulunduğu bu kaba dünyada, gönlü zengin ve nazik, mükemmel bir insandı."[154] Enflasyonist kozmolojinin *(inflationary cosmology)* yaratıcısı Alan Guth da onun için, "Kendisini her zaman bizim alanın lideri olarak gördüm," diyordu.[155] David Schramm, ününün doruğunda olduğu 19 Aralık 1997 günü kendi kullandığı uçakla Colorado'daki bir buğday tarlasına düşerek öldü. Elli iki yaşındaydı.

Schramm parçacıklar ve kozmoloji arasındaki bağlantıyla ilgilenmeye doğal olarak başladı. California Teknoloji Enstitü-

sü'nde, William A. Fowler'in -Willy ismiyle bilinir- öğrencisi olarak doktorasını tamamladı. Caltech'de de Hubert Reeves ve onun lisansüstü öğrencisi Jean Audouze vardı. Öğrencileri Reeves ve Audouze hafif elementlerle ilgilenirken, Fowler tamamen nükleer astrofizikle ilgiliydi. Schramm nükleer astrofizikle hafif elementleri bir araya getirdi, ve bu onun en büyük tutkularından biri oldu.

Schramm hafif elementlerin evrendeki bolluğunun, Büyük Patlama kozmolojisiyle tutarlı olup olmadığını bulmak istiyordu. Bu soruya yanıt bulmak için de, Büyük Patlama kozmolojisinin ilkeleri üzerine kurulu teorik tahminleri rafine etmesi, dört hafif elementin bolluğunu ölçmek yönünde astronomik deneyler tasarlaması ve sürdürmesi, sonra da sonuçları karşılaştırması gerekiyordu. Göreceğimiz gibi, döteryum için bulunan sonuçlar özellikle önemlidir. Döteryum bolluğu sadece ve sadece bir tek parametreye bağlıdır: Maddenin yoğunluğu.

Kısa sürmüş Büyük Patlama [big bang] nükleosentezi (BBN) dönemi -ki bu olay Büyük Patlama'dan hemen sonra gerçekleşmiştir- hafif çekirdeklerin evrendeki bolluğunu tahmin etmek, laboratuar fiziğinin -yani elle tutulur verilerin- gözlemlenemez kozmolojik olaylarla karşı karşıya gelişine güzel bir örnektir. Hafif çekirdeklerin BBN sırasındaki bolluğunun tahmini, doğrudan yerüstü laboratuarlarında derlenen verilerden yola çıkılarak yapılır. Söz konusu drama için sahne şudur: Büyük Patlama'nın hemen ardından, genişleme ve soğuma başladı. Patlamadan yaklaşık 100 saniye sonra sıcaklık 10^{10} K değerine ulaştı. 1.000 saniye sonra sıcaklık 10^{9} K'ya düştü. Sıcaklığın 10^{10} K'dan da yüksek olduğu ilk 100 saniyeden önceki zamanlarda serbest protonlar ve nötronlar öylesine yüksek enerjilerle savruluyorlardı ki, güçlü nükleer kuvvet onları bir araya getirip çekirdekleri oluşturamıyordu. Sıcaklığın 10^{9} K'ya düştüğü 1.000 saniye sonra çekirdekler, pozitif elektrik yükleri arasında etkin olan itici elektromanyetik kuvveti hiçe sayacak kadar hızlı hareket edemez oldular. Dolayısıyla, Büyük Patlama'dan sonraki ilk 100 saniyenin ardından 1.000 saniyeye kadar geçen yaklaşık on beş dakikada evren 10^{10} K'dan 10^{9} K'ya 9 milyar derece kadar soğurken, çekirdeklerin sentezi için fırsat oluştu. Evrenin başlangıç periyodundaki nükleer sentezler sırasında proton ve nötron tarafından

tecrübe edilen enerji aralığı, bugün laboratuarlarda bu parçacıklar üzerine yeniden uygulanarak çalışmalar yapıla gelmektedir. Böylece davranışlarının dinamikleri bilinmektedir. Elde edilen bu bilgilerle de tahminler yürütülebilmektedir.

Büyük Patlama'nın ortaya çıkarttığı hafif çekirdeklerin tahmin edilen bolluğu bir bilinmeyene bağlıdır: BBN sırasında orada bulunan proton ve nötronların sayısı. Veya, BBN sırasında var olan proton ve nötronların sayısı madde yoğunluğunu ortaya çıkarttığından, tahmin edilen bolluğun, madde yoğunluğuna bağlı olduğunu söyleyebiliriz. 15 milyar yıl önceki madde yoğunluğunu nasıl bilebiliriz? O günden bugüne evrendeki madde miktarı değişmemiş olduğundan, bilinen bulutlar, tozlar, gezegenler, kuyruklu yıldızlar, yıldızlar, galaksiler, kuasarlar ve benzeri bütün görünür maddeleri hesaba katarak bunu tespit edebiliriz. Elbette bu hesap tam olmayacaktır, dolayısıyla en iyi tahminin etrafındaki küçük bir aralık seçilip, oradaki olasılıklar değerlendirilir. Bu aralıktaki döteryum bolluğu, her 10.000 hidrojen atomu için üç döteryum atomu civarında tahmin edilir. Bu tahmin 1991 yılında Schramm ve diğerleri tarafından yapılmıştır.[156] Schramm ölümünden kısa bir süre önce, başlangıçta olan döteryum bolluğu tahminini rafine etmek için yeni bir girişimde bulunmuştu -bulunan sonuç, her 10.000 hidrojen atomu için 3,5 döteryum atomunun biraz altında çıkmıştı.

Acaba 15 milyar yıl önce gerçekleşen Büyük Patlama'da oluşan döteryum için başka bir kaynak var mı? Bazı olası kaynaklar düşünüldü ama Schramm'ın kendisi çetin argümenlerle diğer olası kaynakları reddetti.[157] Dolayısıyla elimizde bir tahmin var: Her 10.000 hidrojen atomu için yaklaşık 3,5 döteryum atomu olmalı. Schramm bu sonuçtan gayet emindi ve onu "gayet sağlam" olarak adlandırıyordu çünkü bu sonuç laboratuar ölçümleriyle birbirine sıkı sıkıya geçmişti.[158]

Doğada döteryumu imha eden süreçler var mı? Kesin olan şuydu ki yoğunlaşıp yıldız haline dönüşen bir bulutun parçası olan herhangi bir döteryum bu süreçte tükenmiş olacaktı. Yıldızlar hidrojen füzyonu yaparlar. Her ne kadar ender rastlansa da, döteryumu dolanımdan kaldıran başka süreçler de vardır. Peki, döteryumun tahmin edilen bolluğu, evrenin Büyük Patlama'dan sonra 1.000 saniyelik nükleer sentez periyodundan çıktığındaki asıl bolluğuyla nasıl karşılaştırılır?

Döteryum bolluğunu tespit etmenin bariz yolu, yakınlardaki bir hidrojen bulutunun saldığı spektrum çizgilerini aramaktır. Fakat galaksimizdeki hidrojen gazı bulutları Büyük Patlama'dan bu yana yıldızlara birkaç kez girip çıkacak şekilde bir döngüye sahip olduğundan, bünyesindeki döteryum içeriği çoktan tükenmiş bulunacak ve böylece Büyük Patlama'dan hemen sonraki bolluk bu verilerle iyi ölçülemeyecektir. İhtiyacımız olan şey, eldeğmemiş, eski zamana ait, hidrojen ve döteryum varlığının tıpkı BBN periyodundan sonraki gibi aynı oranda bulunduğu başlangıçtaki bir hidrojen kaynağı bulmaktır. Bunu göstermek için çok zekice bir deney tasarlanmıştır.

Kuasarlar Dünya'dan çok uzaklardadır ve bunun anlamı, bizim onları şimdi gördüğümüz hallerinin, aslında evrenin çok genç dönemlerindeki halleri olduğudur. Bu uzak kuasarlardan çıkan ışık Dünya'ya gelirken, henüz yoğunlaşıp galaksiye dönüşmemiş ve dolayısıyla içerisinde yıldız barındırmayan hidrojen bulutlarının içinden geçerler. Böyle bir bulut, onu yaklaşık 14 milyar ışık yılı uzaklığa yerleştiren bir kırmızı-kaymaya *(red shift)* sahiptir. Neyse ki, bu bulutun ardında en parlak kuasarlardan biri olan Q0014+813 kuasarı bulunmaktadır. Bu kuasardan geldiğini gördüğümüz ışık, 14 milyar yıl önce, yani evren daha çok gençken, hidrojen bulutunun içinden geçmiştir. Böylesine eski zamana ait bir bulutun bünyesindeki döteryum çekirdeklerinin sadece bir tek kaynağı olacaktır: Büyük Patlama nükleosentezi.

Bu bulutun içinden geçip gelen ışığa bakarak, döteryumun varlığı ve bolluğu tespit edilebilir. Söz konusu harika deney, Hawaii'deki Mauna Kea zirvesinde, Q0014+813 kuasarından gelen ışığı alan on metrelik Keck teleskopuyla yapıldı. Deney Hawaii üniversiteleri ve Washington'dan gelen bir ekiple 11 Kasım 1993 günü gerçekleştirildi[159] ve sonuçlar, *Döteryum Bolluğu ve Yüksek Kırmızıya Kaymaya Sahip En Eski Zaman Bulutlarındaki Arka Plan Radyasyon Sıcaklığı* (İng.: *Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds*) başlıklı makaleyle yayınlandı. Bu deneyin sonuçları neydi? Döteryumun bu eski zamanlara ait bulutta gözlemlenen bolluğu, her 10.000 hidrojen atomu için 1,9 ila 2,5 aralığında döteryum atomuna karşılık geliyordu. Bu ilk deney daha

sonra rafine edildi ve diğer grupların buldukları sonuçlar daha yüksek çıktı. Yakın geçmişte ulaşılan sonuçlarsa, her 10.000 hidrojen atomu için yaklaşık 3,4 döteryum atomu ortaya çıkarttı.[160] Net olarak, BBN'e yönelik tahminler deney sonuçlarıyla uzlaşmıştır. Dolayısıyla, döteryum bolluğu Büyük Patlama kozmolojisine gayet uygun bir bakış sunar.

Fakat bu süreçte bir diğer bulmaca belirir. Her 10.000 hidrojen atomu için yaklaşık üç döteryum atomunun bulunduğu ve bu deneylerin sürmesiyle başka gözlemcilerin ulaşacakları benzer deney sonuçları, bir diğer derin etkiye sahip olabilir. Büyük Patlama'dan hemen sonra üretilen döteryum miktarı, yukarıda belirtildiği gibi, hassas biçimde, evrenin söz konusu erken zamanlarında ortamda bulunan toplam proton ve nötron miktarına bağlıdır. Ancak şu da var ki, döteryumun üretildiği zamanlardaki toplam proton ve nötron miktarı, bugün var olan toplam proton ve nötron miktarıyla aynıdır. Böylece başlangıca dair zamanlardaki döteryum bolluğu, bize bugünkü *toplam* proton ve nötron sayısını verir. Bu sayı esasen, görünür evrenin kütlesini belirler. Bu süreçten gelen sonuç, kütle galaksiler ve etraflarındaki halelerin kütle çekimine bağlı davranışlarını açıklayabilmek için gereken kütleden azdır. Kısacası, eksik kütle vardır.

Bu eksik kütleye karanlık madde *(dark matter)* adı verilmiştir. Her 10.000 hidrojen atomu için üç döteryumluk bolluk, gözlemlenen proton ve nötron sayısıyla örtüştüğünden, eksik madde proton ve nötronlardan başka bir şeylerden oluşmuş olmalıdır. Diğer bir deyişle, galaksilerde gözlemlenen kütle çekimi etkilerini açıklamak için ihtiyaç duyulan eksik madde, bilinmeyen bir formda bulunmaktadır. Söz konusu eksik maddenin doğası, astrofiziğin en hararetle tartışılan bir meselesidir.

Bugün, evrende hafif elementlerin miktarı meselesi, Büyük Patlama kozmolojisinin en zorlu testlerinden biri olarak görülüyor. Hafif elementlerin arasında döteryumun miktarı özellikle dikkate değer bir rol oynuyor çünkü gayet hassas biçimde maddenin yoğunluğuna bağlı. Böylece bu kitabın kahramanı olan hidrojen, Büyük Patlama kozmolojisinin etkinliği konusunda ve ayrıca maddenin yoğunluğunun temel göstergesi olmak anlamında yargıç koltuğuna oturuyor.

21

Antihidrojen: İlk Antiatom

Hidrojen atomu hâlâ ortaya çıkacak sürprizler barındırıyor olabilir. Diğer yandan, belki de en büyük sürpriz, hiçbir sürpriz barındırmıyor olmasıdır.

—Theodor W. Hänsch

İnsanın tecrübe ettiği zaman skalası -saatler, aylar veya on yıllar- evrenin yaşının anlamı veya önemini kavramakta mantıksal bir zemin hazırlamaz: 15 milyar yıl! Bin yıllık süreci kapsayan zaman dilimi bile bunu kavramaya yetmez. Evrenin yaşını 15 milyon bin yıl olarak tanımlamak da durumu anlatmaya pek yardımcı olmaz. Bu muamma karşısında, 15 milyar yıl önce olup bitenlerin Büyük Patlama kozmolojisiyle teorik olarak açıklanması ve bu açıklamaların doğrudan gözlemler ve laboratuarlarda üretilen sonuçlarla geçerli kılınması şaşırtıcıdır. Döteryum miktarı, kuasarlar ve mikrodalga arka plan radyasyo-

nu, deneyler yoluyla saptanmış, Büyük Patlama teorisini entelektüel olarak akla yatkın kılan üç sac ayağıdır. Sonuç olarak Büyük Patlama kozmolojisi çağdaş bilim insanlarının büyük bir çoğunluğu tarafından desteklenmektedir. Ama sahih bilimde, Büyük Patlama kozmolojisi gibi iyi bir teorik çerçeve bile rahatsızlık verici sorular ortaya çıkartıp, davetkâr bulmacalar yaratabilir.

Örneğin, antidöteryum nerdedir? Daha genel olarak, antimadde nerededir? Dünya'yı, Güneş'i ve Samanyolu'nu oluşturan temel parçacıkların mikroskopik seviyesindeki bütün kanıtlar, madde ve antimadde arasında net bir simetriyi işaret ediyor. Makroskopik seviyedeyse bir asimetri gözlemliyoruz -madde kozmosda ağır basıyor. Bu neden böyle olmak zorunda ki? Acaba Büyük Patlama aslında eşit miktarda madde ve antimadde üretti de, Dünya'nın evrende bulunduğu yerde mi madde ağır basıyor? Yakın kozmik çevremizde maddenin duruma hakim olduğunu büyük bir güvenle biliyoruz. Sevdiğimiz peynirli tostun malzemesindeki de net biçimde madde. Bu atıştırma menüsünün ötesinde, sürekli yaşamımıza girmeye devam eden bütün kanıtlar ağırlıkla evrenin madde, *sadece* sıradan madde içerdiğini ileri sürüyor. Örneğin, Dünya uzaydan gelen parçacıklar içeren kozmik ışınlarla bombardımana tutulduğunda ne bir antiparçacık, ne antidöteron gibi basit bir birleşik çekirdek ne de bir antialfa parçacığı gözlemlenmiyor. Eğer evrenin başka yerlerinde antimadde varsa, o yerlerde antiçekirdek ve antiatomlar da olacaktır. Dünya üzerine yağan kozmik ışınların içinde yer yer bazı çeşit antiparçacıkların olması beklenebilir. Antiparçacıklar kozmik ışınlarda gözlenmemişlerdir. Ayrıca, eğer evrende antimadde yoğunlaşması olan bölgeler varsa, madde ve antimadde bölgeleri arasındaki belli uzay alanlarından yayılan gama radyasyonu arka planının gözlemlenmesi beklenirdi. Bu tür gama ışınları, madde ve antimadde bir araya geldiklerinde meydana gelen yok oluş *(annihilation)* sonucunda oluşurlar. Ancak gama ışını saçan uzay bölümleri hiç gözlemlenmiyor. Dolayısıyla, maddeden oluşmuş bir evren düşüncesinin tersini iddia edebilmek için kanıt yetersizliği yaşanıyor.

Antimaddenin yokluğu sadece daha fazla soruyu tetikliyor. Büyük Patlama neden antimaddeye değil de maddeye hizmet etmeyi seçti? Yoksa maddeyi de antimaddeyi de birbirinden biraz farklı miktarlarda Büyük Patlama yarattı da, madde ve antimadde birbirini yok ettiklerinde ortada madde kalıp, patlamadan bu yana geçen 15 milyar yılda hâlihazır evreni bu kalan madde mi oluşturdu? Bu soruların hepsine akla yatkın cevaplar vardır ama bütün bu cevaplar spekülasyon ve belirsizlikler içerir. Lakin spekülasyonlar her zaman yararsız değildirler. Bugün bu sorulara ilk elden verilen yanıtlar muhtemelen yarınlarda bulunacak gerçeklerin içerisinde de yer alıyor olacaklar.

Fizikçiler hâlihazırda madde ve antimadde arasındaki asimetriyi, maddenin korunumu kanunu ve simetri prensibi uyarınca nedenselleştirerek anlıyorlar. Eğer fizikçilerden fizik prensiplerini önemlerine göre bir sıralamaya sokmaları istense, maddenin korunumu kanunu ve simetri prensibi listenin en başında veya başa yakın bir sırada olurlardı. Şaşırtıcı biçimde, herhangi bir cevap sunabilmek için, hem bir korunum kanunu hem de bir simetri prensibi ihlâl edilmek zorundadır. İhlâl edilen korunum kanunu baryon sayısının korunumudur. Baryonlar, parçacık ve onların antiparçacıklarından (bunlar tanıdık proton ve nötronları da içerir) oluşan bir sınıfdır. Daha büyük ve daha az tanıdık baryonlar vardır. Baryonlara +1 sayısı verilirken, antibaryonlara -1 sayısı verilir. Baryon sayısının korunumuna göre, baryon içeren herhangi bir işlem, baryon sayısı aynı kaldığı sürece gerçekleşir; yani, işlemden önceki toplam baryon sayısı, işlemden sonraki toplam baryon sayısına eşit olmak zorundadır. Eğer Büyük Patlama tam olarak eşit sayıda madde ve antimadde üretseydi ve baryon sayısının korunumuna tamamen sadık kalınsaydı, parçacıklarla antiparçacıklar birbirlerini yok eder, evrende arka plan radyasyonundan başka bir şey kalmazdı -hiçbir galaksi, hiçbir yıldız, hiçbir gezegen, ne de bir Picasso olmazdı.

Dolayısıyla, baryon korunumunda ufak bir ihlâl kaçınılmazdır sonucuna ulaşılıyor. Aslında, çok çok küçük bir ihlâl... Göreli olarak çok daha büyük olan proton, kararlılığını baryonların korunumuna borçludur. Genel olarak büyük parçacıklar enerji bakımından kararsızdırlar. Daha kararlı hale geçmek için daha küçük parçacıklara bozunurlar. Örneğin, izole olmuş bir

nötron, bir proton ve bir elektrona bozunmadan önce 896 saniyelik ortalama bir ömre sahiptir. Çok büyük olan nötrondan daha küçük olan proton ve elektron, enerji bakımından daha kararlıdırlar. Proton, bir pozitron ve bir nötr piona makul biçimde bozunabilir ama bunu yaparken baryon sayısının korunumunu ihlâl eder. Peki, proton tam olarak kararlı bir parçacık mıdır? Baryon korunumu mutlak mıdır?

Proton deneylerle tespit edilmiş bir ömre sahiptir ve bu ömür 10^{30} yıl kadar olup evrenin kendi yaşından 10^{20} kez büyüktür. Günümüzde, içinde 10^{30} kadar protonun etrafını sardığı dedektörlerin sabırla proton bozunmasını işaret eden bir sinyal beklediği deneyler sürdürülmektedir. Bir protonun bozunması, baryon korunmasından sapma değerini verecektir. Bir protonun bozunması, bir madde evreni için yolu açacaktır. (Baryon korunumunun statüsü biraz şüphelidir çünkü bir dış gözlemci, pozitif baryon sayısına sahip bir madde kara deliğiyle, negatif baryon sayısına sahip bir antimadde kara deliğini birbirinden ayırt edemez. Bunun anlamı, baryon korunumunun elektrik yüklerinin korunumu kadar derin bir öneme sahip olamayacağıdır.) Baryon sayısının korunumunundaki küçük ihlâlle birlikte, bir de simetri prensibi ihlâl edilmek zorundadır.

Eğer bir sistem farklı bakış noktalarından gözlemlendiğinde fizik kanunları tutarlılıklarını muhafaza ediyorlarsa, burada bir simetri prensibi tanımlanabilir demektir. Simetri prensiplerinden biri *parite* olarak adlandırılır ve P harfiyle gösterilir. P, bir sisteme ister doğrudan veya isterse aynadaki yansımasından bakılsın, fizik kanunlarının geçerliliğinin muhafaza edildiğini işaret eder. Aynaya bakıp sağ kolunuzu havaya kaldırarak kendi görüntünüzü selamladığınızda, görüntünüz de sizi selamlayacak, ancak bunu sol koluyla yapıyor olacaktır. Ayna, kullanılan elin tarafını değiştirir. Sağ eli sol ve solu da sağ gösterir. Parite simetrisi der ki, doğa sağ ve sol arasında mutlak bir ayrım yapmaz ve böylece bir işlem ve onun aynadaki yansıması aynı fizik kanunlarıyla tanımlanabilir. Fizikçiler 1957 yılına kadar P simetrisinin mutlaklığına inandılar ancak o yıl, Chien-Shiung Wu ve birlikte çalıştıkları,[161] ayrıca onlardan bağımsız Richard Garwin, Leon Lederman ve Marcel Weinrich[162] farklı farklı yollardan P simetrisinin ihlâl edildiğini gösterdiler.

Parite prensibinin terkedilmesi, tuhaf isimli diğer bir simetri prensibini gündeme getirdi: Yük çiftleşmesi *(charge conjugation)*. Bu prensip C simetrisi olarak gösterilir ve içinde madde olan bir işlemi tarif eden aynı kanunun, antimadde olduğunda da geçerli olduğu anlamını taşır. Aslında P simetrisinin ihlâli, fizik kanunlarının madde ve antimaddeyi birbirinden ayırabildiklerini gösterdi.

P ve C simetrilerinin her ikisi de doğa tarafından tek tek ihlâl edilmesine rağmen, CP birleşiminin değişmezliğinin - parçacıkların kendi antiparçacıklarıyla yer değiştirmesi aynadaki bir yansıma tarafından izlenir- J. W. Cronin, Val L. Fitch ve meslektaşları tarafından 1964 yılında nötr kaonların bozunmasında ihlâl edildiğinin gösterilmesine kadar mutlak olduğu düşünüldü.[163] Bu ihlâl, CP simetrisinin nötr B mezonlarının bozunmasıyla de ihlâl edildiğinin gösterildiği 2001 yılı Mart ayına kadar gözlemlenen yegâne ihlâldi. Ama bu iki ihlâl, CP değişmezliğinin mutlak olmadığı anlamına gelir. CP simetrisinin bu ihlâli ve baryon korunumunun çalışmadığı ihtimaliyle, neden maddenin evrende baskın çıktığını açıklamak mümkündür. Fakat bu açıklama da spekülatiftir ve çok da tatmin edici değildir.

Simetri prensipleri olan C, P ve CP mutlak değildirler. Aşağıda tartışılacak olan CPT simetri prensibi mutlak (geçerli) olarak değerlendirildi ve sıklıkla CPT teoremi olarak adlandırıldı. İşte burası antihidrojenin devreye girdiği yerdi. Antihidrojen atomu vardır; gözlemlenmiştir. Hidrojen atomu, negatif elektrik yüklü elektronla çevrelenmiş pozitif elektrik yüklü bir proton içerir. Antihidrojen atomundaysa bu parçacıklar antiparçacıklarıyla yer değiştirmiştir; antihidrojenin çekirdeği negatif elektrik yükü taşıyan bir antiproton barındırır ve pozitron olarak adlandırılan, pozitif elektrik yükü taşıyan bir antielektronla çevrelenmiştir.

Antimaddenin varlığına dair ilk ipucu, Paul Dirac'ın görelilik ve kuantum mekaniği teorilerini bir araya getirdiği ünlü 1928 yılı makalesindeki kafa karıştırıcı sonuçlardan ortaya çıktı. Bu ipucunu anlamaya yönelik birkaç girişimden sonra fizikçiler, elektrik yükünün ters işaretli olması dışında, elektronun tıpatıp aynısı olan yeni bir parçacığın varlığını duyurdular. 2 Ağustos

1932'de, California Teknoloji Enstitüsü'nde çalışan Carl D. Anderson, bir pozitron tarafından çıkarılan kozmik ışın izinin ilk fotoğrafını çekti.[164] Günümüzde pozitronlar parçacık hızlandırıcı laboratuarlarda düzenli olarak yaratılmakta ve bütün ayrıntılarıyla incelenerek, geniş kapsamlı çalışmalarda fırlatıcı veya hedef olarak kullanılmaktadırlar. Antiproton bundan yirmi üç yıl sonra, 1955 yılında, California Üniversitesi Berkeley'de, Owen Chamberlain ve Emilio G. Segrè tarafından keşfedildi.[165] Antiproton da günümüzde parçacık hızlandırıcı laboratuarlarda yapılabiliyor ve ayrıntılı biçimde inceleniyor. Bu iki deney, antihidrojen atomunun her iki bileşeninin de var olduğunu göstermişti ve dolayısıyla antihidrojenin kendisi de olmak durumundaydı. Şimdi mesele, üzerinde önemli çalışmalar yapmak için yeterli miktarda antihidrojeni yapabilmekti.

Neden antihidrojen üzerinde çalışma yapmak caziptir? Çünkü bu antimadde formundaki hidrojen, üzerinde fiziğin iki temel prensibini test etmek için fırsatlar sunacaktı: CPT simetrisi ve eşitlik prensibi. Bir kez daha hidrojen atomu, aydınlanmak için gözlerini ona çeviren fizikçilerin dikkatini çekiyordu.

CPT simetrisinde yer alan T harfi, fizik kanunlarının zamanın ileri veya geri akmasına bağlı olmaksızın geçerli (değişmez) olduklarını işaret eder. CPT simetrisini uygulamak için her bir simetri işlemi ardarda uygulanmalıdır: Parçacık ve antiparçacık yer değiştirdiğinde (C), sağ ve sol yer değiştirdiğinde (P) ve ileri akan ve geri akan zaman akışı yer değiştirdiğinde (T). Aynı fizik kanunu, bu işlemlerin *tamamı* gerçekleştirildiğinde de geçerli olmak durumundadır. Yukarıda açıklandığı üzere, CP simetrisi iki bilinen durumda ihlâl edilmişti; fakat T'nin ilâvesiyle ortaya çıkan CPT doğanın mutlak simetrisidir. CP simetrisinin ihlâl edildiğini ortaya çıkartan kaon sisteminin, oldukça yüksek bir hassasiyetle (10^{18}'de bir gibi) CPT simetrisiyle tutarlı olduğu bulunmuştur.

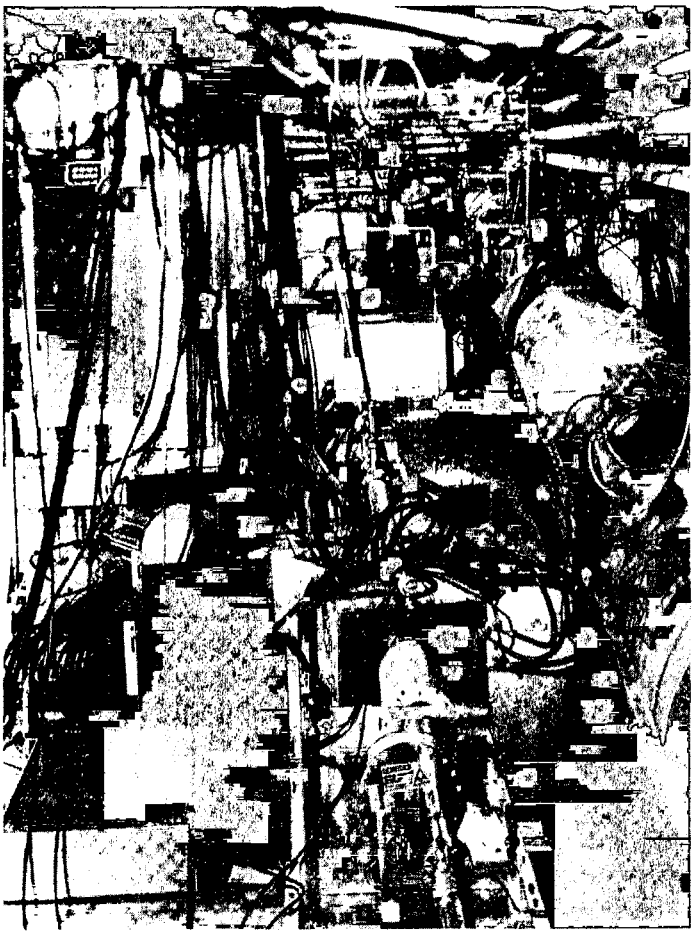
CPT simetrisi temel fiziğin içine derinlemesine yerleşmiştir. Kuantum alan teorisi ve özel göreliliğin (bu teorilerden hâlihazırda anladığımız kadarıyla) CPT simetrisiyle uyumlu olduğu görülür. Eğer CPT'nin de geçersiz olduğu kanıtlansaydı, çağdaş fizik darmadağın olurdu.

Eşitlik prensibi *(the equivalence principle)* genel göreliliğin köşe taşıdır. Bu prensip, herhangi bir nesnenin ağırlığının eylemsizlik kütlesiyle *(inertial mass)* orantılı olduğunu belirtir. Bu gayet şaşırtıcı bir durumdur. Bir tuğla, eylemsizlik kütlesi adı verilen doğasına dair bir özelliğe sahiptir; tuğlanın ağırlığı, tuğlanın yerçekimsel kütlesiyle *(gravitational mass)* doğru orantılıdır ve tuğlayla Dünya arasındaki yerçekiminin bir ölçüsüdür. Eşitlik prensibi, eylemsizlik ve yerçekimsel kütlelerin aynı olduğunu ortaya koyar. Peki, anti-madde eşitlik prensibine uyar mı? Doğrusunu isterseniz, fizikçiler bunu bilmiyor.

Antihidrojen atomu bugün, eşitlik ve CPT simetri prensiplerinin ikisini de olası en zorlu testlere sokuyor. Bunun nasıl yapılabildiğini düşünmeden önce, antiproton ve pozitronun nasıl bir araya getirilip antihidrojeni oluşturduğunu kısaca ele almak daha uygun olacak. Dan Kleppner 1992 yılında Münih'deki bir atölye çalışmasında, "Geçen altı yılda antihidrojenin yaratılması tamamen hayal olmaktan, sadece güç bir hale ilerledi" diyor.[166] 1992 yılından beri "sadece güç" olan süreç, hâlâ çok zor olmayı sürdürüyor.

Daha önce de belirtildiği gibi, antihidrojen aslında yapıldı: İlk olarak İsviçre'nin Cenevre kentindeki CERN'de[167] ve kısa bir süre sonra da İllinois'deki Fermilab'da[168] (bkz. RESİM 21.1). Fakat sadece birkaç antiatom üretildi ve gözlemlendi. Şimdi deneycilerin uğraştıkları mesele, öncelikle bol miktarda antihidrojen üretmek, sonra bu antiatomları bir araya getirmek ve son olarak da üzerlerinde spektroskopik inceleme yapabilmek için izole edilmiş olarak yeterince süre hayatta tutmak.

Bilinen en hassas fizik sabiti, ki bu yüksek hassasiyetteki değer hidrojenin 1S-2S spektrum geçişi aracılığıyla tespit edilmiştir, Rydberg sabitidir. Antihidrojendeki aynı geçiş, hem CPT hem de eşitlik prensibini olası en sağlam teste sokma potansiyelini taşımaktadır. CPT teoreminin açık bir sonucu, parçacıkların ve onların antiparçacıklarının aynı kütlelere, aynı elektrik yük değerlerine ve aynı manyetik momentlere sahip olmalarıdır. Dolayısıyla bunun ardından, hidrojen ve antihidrojen spektrumlarının da tamamıyla aynı olmaları gerekecektir. Hidrojen spektrumu üzerine çalışmalarda ulaşılan akıl almaz hassasiyet kuan-



RESİM 21.1 Fermilab'da ilk antihidrojen atomunun üretildiği deney aparatı.

tum elektrodinamiğinin en başarılı fizik teorisi statüsüne yükselişini getirmiş bulunuyor. Antihidrojenle ulaşılacak benzer bir hassasiyet de CPT simetrisinin ayaklarının yere daha sağlam basmasını sağlayacaktır.

Üretim sürecinden hem antiprotonlar hem de pozitronlar, göreli olarak yüksek enerjilerle ortaya çıkarlar -bir araya gelip

uysal bir antihidrojen atomu oluşturmak için fazlasıyla yüksek bir enerjiyle. Antiatoma giden yolda ilk adım, antiparçacıkları sakin hızlara düşürmek, böylece antiprotonlar ve pozitronlar arasındaki elektrostatik çekimin onların birbirlerine sarılmalarını sağlamasına imkan vermektir. Yavaşlatma işinden sonra gelen adım, antiparçacıkları demetler haline getirmek ve askıya alınmış bir bulut içinde aparatın duvarlarından izole edip kıstırmaktır. Sonra bu antiproton ve pozitron bulutları birbirlerinin içine sokularak, antiatomları oluşturabilmeleri sağlanmak zorundadır. Bütün bunlar deneyci fizikçileri müthiş bir mücadelenin içine sokmakta olsa da, sonunda bu işi başaracaklardır.

Antihidrojen atomları bir kez bir araya getirildikten sonra, lazerlerden çıkan ışık atomlara yöneltilecek ve böylece 1S–2S geçişi gözlemlenecektir. Ted Hänsch'ın hidrojen üzerinden Rydberg sabitini ölçümlerinde elde ettiği muazzam sonuçlar, antihidrojenle gözlemlenen Raydberg değeriyle karşılaştırılacaktır. Eğer iki atomun enerji seviyeleri aynı ise, bu sabit şu değere sahip olacaktır:

$$R_{\infty} = 109.737,31568639 \pm 0,00000091$$

Eğer bu sonuç elde edilirse, CPT teoremi onaylanacak; eğer Rydberg sabiti biraz değişik bir değere sahip çıkarsa, temel fiziğin esaslarından olan kutsal simetri prensibi sorgulanmaya açık hâle gelecektir.

Antihidrojen spektrumunun analizi aynı zamanda eşitlik prensibini test etmek için de bir yol gösterecektir. Birden fazla metot düşünülüyor ama bunlardan daha heyecan verici olanı Dünya yüzeyinde, Güneş'in kütle çekimi etkisinde, mevsimlerin yarattığı değişimlerle ilgi olanıdır. Yıl boyunca Dünya ve Güneş arasındaki uzaklık değişmekte, bu da kütle-çekim potansiyelindeki bir değişime önayak olmaktadır. Peki, bunun hidrojen-antihidrojen spektrumlarıyla ne ilgisi var?

Bağlantı Einstein'ın çok ünlü eşitliği $E = mc^2$'dir. Kütle-enerji eşitliği nedeniyle, bir hidrojen atomunun kütlesi, atomun enerjisinden de bir katkıya sahiptir. Yüksek enerji seviyesindeki bir antihidrojen atomu, düşük seviyedekinden daha fazla enerjiye sahiptir. Ayrıca, yüksek enerji seviyesindeki bir atom, düşük

enerji seviyesinde olduğundan daha kütleli olacaktır. Dahası, atom kütle çekimsel bir alanda olduğunda, yüksek bir enerji seviyesinde bulunurken daha büyük bir kütle-çekim potansiyel enerjisine sahip olacaktır. Genel göreliliğin bir sonucu da, bir fotonun dalga boyunun, kütle-çekim potansiyeli düştükçe yükseleceği yönündedir. Böylece, kütle çekimsel alan içindeki bir atom bir foton saldığında, salınan fotonun dalga boyu, potansiyel enerjiyle orantılı olarak düşer.

Antimadde kütle çekimine madde ile aynı şekilde mi tepki verir? Bir yıl boyunca Güneş'in Dünya'daki potansiyeli, Dünya'nın Güneş etrafındaki yörüngesinin özelliği nedeniyle değişkenlik gösterir. Eğer pozitronlar yerçekimine elektronun verdiğinden farklı tepki verselerdi, antihidrojenin 1S–2S geçişinin frekansı, hidrojen için 1S–2S geçişinden farklı olan mevsimsel kaymalar gösterirdi. Eğer dalga boyundaki (veya frekanstaki) mevsimsel kaymalar hidrojen ve antihidrojen için aynıysa, madde ve antimadde için eşitlik prensibinin geçerliliği de onaylanmış olacaktır. Eğer mevsimsel kaymalar biraz değişik çıkarsa, o zaman madde ve antimaddenin kütle çekimine farklı tepki verdikleri olasılığı tartışmaya açılacaktır.

Simetri, tipik olarak bir nesneye karşı duyulan ilgiye neden olur ve bunu, nesneye güzellik katarak yapar. Missouri'nin St. Louis kentinde, Mississippi Nehri'nin batı yakasında boy gösteren Gateway Takı, hem simetri hem de güzelliğe sahiptir. Takın üçgen kesiti, üzerinde durduğu tabana indikçe genişlemekte, 200 metredeki en tepeye doğru yükseldikçe tatlı bir incelmeyle dönmekte, ters *brachistochrone* olarak bilinen çift yönlü bir simetriyle şekil almaktadır.

Simetri fiziğe de güzellik ve basitlik getiren bir etmendir. Simetriler doğanın değişmez parçası olarak bulunurken, doğanın fenomenlerini tanımlayan fizik kanunları da aynı simetriyi bünyelerinde barındırırlar. Simetri fizik kanunlarının simetri operasyonları altında değişmezliği anlamını da taşır. Örneğin parite simetrisi P, sağ ve solun kendi içinde yer değiştirdiğinde aynı kanunların fiziksel fenomenleri aynı biçimde tanımladığına işaret eder. Bu simetrinin ihlâlinin sağ-sol değişmezliğinin mutlak karakterini yok ettiği saptanmıştır.

Steven Weinberg, simetri prensibinin derin önemini tanımlamakta özellikle tartışma yaratıcı ve çekici bir yola sahiptir. Weinberg esnemezlik *(rigidity)* düşüncesine başvurur.[169] Bazı teorik eşitlikler, verilere uyacak şekilde ayarlanabilen matematiksel terimler içerir. Böyle eşitlikler ortaya çıktıkları andan itibaren bir esnekliğe sahiptirler. Ancak bunun tersine, diğer bazı eşitliklerse değişmez, *esnemez*, niteliktedirler. Onları bir duruma uyarlamanın, ayarlamanın bir yolu yoktur -mantıksal olarak esnemezler. Simetri prensipleri fizik teorilerine mantıksal esnemezlik getirirken, böylesi eşitliklere bir çeşit güzellik vermekle kalmaz, çok büyük bir inanırlık kazandırır. Bir teorik çerçeveden ortaya çıkan eşitlikler sadece bir tek yolla yazılabildiklerinde ve bu eşitlikler deneyler sonucunda elde edilen verilerle tam olarak örtüştüğünde ciddiye alınmak durumundadır. Özetle simetri, fiziğe esnemezlik ve güzellik getirir.

Gateway Takı paslanmaz çelikten bir posta, deriye sahiptir. Dakika dakika ortam ışığı değiştiğinde, tak bu ışığı alır ve kendisini yaşayan bir yapı şeklinde yansıtır. Bu takın değişen ışık koşulları altındaki değişik anlarını ve konumlarını görsek de, yapının temel karakterleri simetri sayesinde korunur. Aynı bu şekilde, simetri prensipleri doğanın fizik kanunlarına da güç ve hayat verir. Ve bu prensiplerin acımasızca test edilmesine imkân vermek de, basit hidrojen atomuna düşer.

22

Hidrojen İçin Bose-Einstein Yoğuşuğu

Satyendranath Bose, 1924 • Albert Einstein, 1925 • Eric A. Cornell ve Carl E. Wieman, 1995 • Daniel Kleppner ve Tom Greytak, 1998

MIT'te Thomas Greytak ve Daniel Kleppner, 22 yıl önce Bose-Einstein yoğuşuğunu hidrojen atomlarından oluşan bir gazı soğutup sıkıştırarak ortaya çıkartma girişiminde bulunduklarında, nasıl çetin bir yolculuğa çıktıklarını tahmin etmiyorlardı.

—Barbara G. Levi

Bir bilim insanına şöhret çeşitli yollardan gelir. Satyendranath Bose için şöhret, Albert Einstein'dan makalesini yayınlatmak için yardım istemesiyle gelmiştir. Nihayet adı Einstein'ın adıyla hem kuantum parçacıklarına dair bir istatistik metodunda (Bose-Einstein istatistiği) ve hem de Bose-Einstein yoğuşuğu *(Bose-Einstein condensate)* olarak bilinen maddenin tuhaf bir hâlinde birbirine bağlanmıştır. Buna ilaveten Bose,

adını bir parçacık sınıfına da vermiştir: Bozon. Bu örnekten de görüldüğü gibi, Einstein'ın bilim dünyasındaki etkisi büyüktü.

1923 yılının sonlarına doğru, Doğu Bengal'deki Dakka Üniversitesi'nden Hint asıllı bir fizikçi olan Bose, İngiliz *Philosophical Magazine* dergisine bir makale gönderdi. Altı ay sonra derginin editörleri Bose'un makalesinin kabul edilmediğini bildirdiler. Bose işin arkasını bırakmadı. 4 Haziran 1924 tarihli Einstein'a yazdığı mektubuna makalesini de ekledi. Bose makalesi hakkında Einstein'ın düşüncelerini öğrenmek istiyor ve "Her ne kadar tamamen yabancı biri olsam da, makalenin Alman *Zeitschrift für Physik* dergisinde yayınlanması için bir ayarlama yapmak mümkün müdür?" diye soruyordu. Bose mektubunu, "Böyle bir talepte bulunmak için tereddüt etmem. Çünkü biz hepimiz, maalesef sadece yazdıklarınız aracılığıyla öğrettiklerinizden yararlanan öğrencileriniz," diyerek sürdürüyordu. Einstein hemen Bose'a kararlı biçimde yanıt verdi. Makaleyi İngilizce'den Almanca'ya çevirdi ve *Zeitschrift*'e gönderdi.[170] Makale Einstein'm bu makalenin ayrıntıları üzerine kapsamlı bir çalışma yapacağı sözünü verdiği bir notuyla birlikte yayınlandı.[171]

Ayrıntılar önemliydi. 1924 yılının Temmuz ayında Einstein, Prusya Akademisi'nin önünde, Bose'un istatistik yöntemini ideal bir gaza uyguladığı ve kuantum gazla moleküler bir gaz arasında yaptığı analojiyi içeren makalesini okudu. Bunu izleyen birkaç ay içerisinde Einstein, Martin Klein'ın "Onun bir diğer ustalık eseri"[172] diye tanımladığı ve 1925 yılının Ocak ayında yayınlanan bir makale yazdı.[173] Bu makalede Einstein, ideal bir kuantum gazdaki parçacıkların olası en düşük enerji seviyesinde bir araya toplanabileceği ve günümüzde Bose-Einstein yoğuşuğu adıyla bilinen formu oluşturacağı tahminini ileri sürüyordu. O zamanda fizikçiler, Einstein'ın bu tahminini merakla karşılasalar da, fizik anlamında çok da büyük bir önem atfetmemişlerdi.

Einstein, Bose'un kuantum istatistiğinin başlatıcısı olduğunun hakkını asla yemedi. (İki yıl sonra, 1926 yılında, kuantum istatistiği bütün bunlardan bağımsız olarak Paul Dirac ve Enrico Fermi tarafından, günümüzde Fermi-Dirac istatistiği olarak bilinen duruma genişletildi.)[174] Ancak Bose kendi çalışmasından,

Einstein'ın gösterebildiği fizik anlamındaki önemi çıkartamadı. Hem Bose-Einstein ve hem de Fermi-Dirac istatistiği masaya getirildiğinde, fizikçilerin bu hesaplama yöntemlerini anlaması sadece birkaç ay zaman aldı.

Maddi dünyayı yaratan parçacıkların hepsi iki gruptan birine dâhildir: Aynı kuantum seviyede bir araya gelebilen sosyal parçacık olan bozonlar ve her biri kendi için bir kuantum seviye gerektiren asosyal parçacık olan fermiyonlar. Bozonlar Bose-Einstein istatistiğine, fermiyonlarsa Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar. Bu iki tip arasında bir diğer ayrım daha vardır: Bütün bozonlar tam-katlı *(integral)* bir spine sahiptir -1, 2, 3, ...- ve bütün fermiyonlar da yarı-katlı *(half-integral)* bir spine sahiptir - $^1/_2$, $^3/_2$, $^5/_2$ ... .

Periyodik Tablo'da gösterilen her element kendine has kimyasal özelliklere sahiptir çünkü atomlar proton, nötron ve elektronlardan oluşur ve bunların hepsi fermiyondur. Pauli dışlama prensibine *(Pauli exclusion principle)* göre, hiçbir elektron çiftinin, tıpkı asosyal fermiyonlar gibi, aynı kuantum seviyesini işgal edememesi gerekir. Böylece, atomları oluşturan çekirdeğe bağlı elektronlar, bütün elektronların kendi kişisel kuantum seviyelerinde bulunmasına izin veren bir dizi yörünge katmanında konuşlanmışlardır. Yörünge katmanlarının yapısı atomdan atoma değişir ve atoma ona özel kimyasal ve fiziksel özelliklerini verir.

Kuarklar, elektronlar ve nitrojen atomları fermiyondurlar. Fotonlar, alfa parçacıkları ve nitrojen molekülleri bozondurlar. Bozonlar Pauli dışlama prensibiyle sınırlı değildirler ve pek çok bozon aynı kuantum seviyeyi işgal edebilir; aslında bozonlar tek bir kuantum seviyede bir araya gelmeyi ve orayı doldurmayı tercih bile ederler. Lazerlerin mümkün olmasının nedeni, fotonların bozon olmasıdır.

Einstein 1925 yılında Bose-Einstein yoğuşuğu ile bozonların belli bir özelliğini tahmin etti. Bir Bose-Einstein yoğuşuğu fizikçiler için, sadece maddenin özel bir hâli olduğu için değil, kuantum davranışın makro ölçekte bir görünümüne imkân verdiği için de büyük heyecan konusu olmuştu. Normalde atomlar parçacık olarak değerlendiriliyordu. Ama kuantum teorisi atomların hem parçacık ve hem de dalga olma özelliğini ortaya çıkart-

tı. Bir atom soğuduğunda dalga boyu büyür. Eğer bu atomlar bozonsa ve dalga boyları birbirlerininkiyle üst üste bindiği noktaya kadar soğutulabilirlerse, kendilerine özel kimliklerini birleştirip tek bir kuantum seviyeye girebilir, biri diğerinden ayrılmaz, tanınmaz bir duruma gelerek "mükemmel bir birliktelik içinde dans"[175] edebilirler. Atomlar birleşerek, bir yönüyle, doğrudan gözlemlenebilir tek bir atom haline gelir: Makroskopik bir kuantum sistem haline.

Yıllarca Einstein'ın bu tahmini, içerisinde sadece teorik özellik barındıran bir tespit olarak algılandı. Bu algı 1995 yılında, yani tahminden yetmiş yıl sonra, Eric Cornell ve Carl Wiemar ilk kez maddenin merak uyandırıcı söz konusu hâlini rubidyum atomlarıyla üretene kadar da devam etti.[176] Aşağıda izah edilecek nedenlerden ötürü, Bose-Einstein yoğunlaşmasını gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan kesin koşulları elde etmek yönünde uzun zamandır beklenen şey, bu koşulları hidrojen atomlarının ilk olarak sağlayacağıydı. Ama hidrojen bu konuda fena halde inatçı olduğunu kanıtladı. Dolayısıyla kullanılan element hidrojen değildi; Bose-Einstein yoğunlaşmasında 0,0000001 Kelvin'de, yani mutlak sıfır sıcaklığının 100 milyarda bir derece üzerindeki 2.000 rubidyum atomu kullanılmıştı. Ne olursa olsun, rubidyumla ulaşılan başarının yolunu hazırlayan, daha önceki zamanlarda hidrojeni yoğunlaştırma girişimlerinden kazanılan deneyimdi. Dolayısıyla, hidrojen atomunun yolu gösterdiğini söylemek hâlâ gayet geçerlidir.

Daniel Kleppner hidrojen atomuyla ilgilenmeye önceden başladı. Aslında hidrojenin Kleppner'in akademik genlerinde olduğu bile söylenebilir. Kendisi, I. I. Rabi'nin öğrencisi olan Norman Ramsey'in bir öğrencisiydi. Rabi 1930'lu yılların büyük bölümünü hidrojenin temel özelliklerini ölçerek geçirmiş ve 1937'de Rabi'nin grubuna katılan Ramsey de Rabi'nin laboratuarından çıkan en önemli çalışmaların aktif katılımcılardan biri olmuştu. 1960 yılında Ramsey ve yüksek lisans öğrencisi Kleppner birlikte hidrojen maseri geliştirmişlerdi. Ardındaki böylesi bir mirasla Kleppner'in basit hidrojen atomuna olan ilgisi çok önceden biçimlenmişti; dolayısıyla Kleppner'in, "Benim için hidrojen nerdeyse gizemli bir çekiciliğe sahiptir," demesi hiç de şaşırtıcı değildir.[177]

1970 yılının ortalarında bir zamanda, Kleppner ve Tom Greytak, hidrojen atomlarının bir Bose-Einstein yoğuşuğu yaratmak konusunu düşünmeye başladılar. Bu işi becermek için gaz halindeki örnek atomların mutlak sıfırın sınırına yakın bir sıcaklığa kadar soğuması ancak hâlâ gaz halinde kalması gerekiyordu. Diğer bir deyişle, gaz örneğinin ne sıvı ne de katı hâle dönüşmemesi lâzımdı. Bu gereklilik hidrojeni yakalanması zor Bose-Einstein yoğuşuğu için birincil aday yapıyordu.

Hidrojenin hem protonu ve hem de elektronu ½ spin ile birer fermiyondurlar. Bu iki fermiyon hidrojen atomunu oluşturmak için bir araya geldiklerinde, atom ya 0 spine sahip (elektron ve proton spinleri birbirine karşıtsa) veya 1 spine sahip (iki parçacığın spinleri paralelse) bir bozon haline gelir. İki hidrojen atomu bir araya geldiğindeyse, *eğer* iki elektronun spinleri birbirine paralel değilse hidrojen molekülü oluşur. Bunun tersi durumda, yani iki hidrojen atomunun elektronları birbirine paralel spinlere sahipse, iki atom bir araya gelip hidrojen molekülünü *oluşturamazlar.* Bu durumdaki hidrojen atomlarından oluşan bir grup -elektron spinleri paralel olduğunda bunlara spin kutuplaşması *(spin-polarized)* adı verilir- ne sıvı ne de katı hâle geçmeden mutlak sıfır noktasına kadar soğutulabilir. Spin kutuplaşmalı hidrojen atomları, olası en düşük sıcaklıkta bile ideal bir gaz davranışı sergilerler. Bu da, hidrojeni bir Bose-Einstein yoğuşuğu hâline dönüştürmeyi başarmak için cazip hedef yapan bir karakteristiktir.[178]

Hidrojenin diğer özellikleri de, örneğin küçük kütlesi, onu Bose-Einstein yoğunlaşması için birincil aday kılar. Bir parçacığın kütlesi ne kadar küçükse, o kadar uzun *de Broglie dalga boyu* vardır. Hidrojen atomlarıyla ilişkili dalga boylarının dikkate değer biçimde üst üste gelmelerini başarmak için, onları daha büyük atomlar kadar soğutmak zorunda olmamak, hidrojen kullanımının bir diğer nedenidir. Bir de, hidrojeni soğutma metotları oldukça geliştirilmiş ve iyice anlaşılmış görünmektedir.

Ama hidrojen kolayca teslim olmadı. Kleppner, Greytak ve öğrencileri 1978 yılında çalışmaya başladılar. Hidrojen atomlarını manyetik alan aracılığıyla kıstırmak ve buharlaştırma aracılığıyla soğutmak yönünde metotlar geliştirdiler. Buharlaştırma

metodunda, fazla enerji taşıyan, daha hızlı hareket eden atomların kıstırma konteynırından kaçmasına izin verilir ve geride daha soğuk atomların kalması sağlanır. Deney metotları büyük emek istiyordu ve karmaşıktı. Her ne kadar bu metotlar başarıyla düşünülüp uygulanmışsa da, hidrojenle sonuca ulaşılamamıştı. Fakat aynı metotlar, 1989 yılında bunları alkali metallerden biri olan rubidyum üzerinde uygulamaya karar veren Cornell ve Wieman için bir başlangıç noktası oluşturmuştu. Rubidyumla ilk Bose-Einstein yoğuşuğunu 1995 yılında başarıyla yarattılar.

Kleppner ve öğrencileri Bose-Einstein yoğunlaşmasını gerçekleştirmek için hidrojenle giriştikleri ilk denemelerde, hidrojen atomlarının konteynırın duvarlarında yeniden bir araya gelişlerinde kaybolmaları nedeniyle engellenmişlerdi. Bunun üzerine manyetik alan kullanarak duvarsız bir konteynır geliştirmişlerdi. Böylece atomları başarıyla 0,00010 Kelvin'e kadar buharlaştırma yöntemiyle soğutmuşlardı ama bu defa da sıcaklık duvarına çarpmışlardı. Hızlı hidrojen atomları beklendiği gibi buharlaşmamış ve hidrojen örneğinin sıcaklığı bir türlü düşmemişti. Zekice bir teknik uygulayıp, radyo frekanslarında (RF) elektromanyetik dalgalar kullandılar. RF frekanslarını ve manyetik alanlarla oynayarak en enerjik atomları hedefleyebiliyorlar ve etkin biçimde onları örneğin dışına fırlatıp, kalan atomların daha da soğumasını sağlıyorlardı. Bu yöntem konteynırda kalan hidrojen atomlarını 0,000050 Kelvin'deki bir sıcaklığa kadar düşürmüş ve bu noktada da yirmi yıl süren misyon sona ermişti: 1998 yazı sonlarına doğru, içerisinde yaklaşık 1 milyar (10^9) atom bulunan bir Bose-Einstein yoğuşuğu nihayet gözlemlenmişti.[179] Hidrojenli Bose-Einstein yoğuşuğundaki atom sayısı (1 milyar), rubidyumla başarılan deneydeki 2.000 atomdan çok daha fazlaydı ve dolayısıyla ileride yapılacak çalışmalar için hidrojen yoğuşuğu daha çekici hâle gelmişti.

Bose-Einstein yoğuşuğu yaratılır yaratılmaz fizikçiler bunun üzerinde çalışma yapmak için zengin bir nesne olacağını anladılar. Theodor Hänsch bu gelişme için, "Yeni bir dünyaya açılmış kapı gibi," diyordu.[180] Bu yeni dünya, teorik anlayışın genişlemesi anlamında hem pratik uygulamalara hem de fırsatlara işaret eder.

Örneğin, bir Bose-Einstein yoğuşuğundaki atomlar, bir lazerdeki fotonlarla benzeşirler. Böylece lazerin alışılmışın dışındaki özelliklerine ulaşılır çünkü fotonlar optik olarak eşevrelidirler *(coherent)*; bunun anlamı, her fotonun aynı frekans ve faza sahip olmasıdır. Yoğuşuk hâl içindeki atom dalgaları da eşevrelidir. Wolfgang Ketterle ve MIT'de birlikte çalıştığı insanlar, iki yoğuşuk hâldeki atom grubu bulutunu birbirinin içine sokarak ve üst üste binen alanlardaki girişim sınırlarını gözlemleyerek, tek dalga boyu doğasını ve yoğuşuk hâlde bulunan atomların dalga doğasındaki uyumu gayet güzel biçimde gösterdiler.[181] Bu eşevrelilik, aslında zaten gösterilmiş, ancak manipule edilebildiği veya net biçimde odaklanabildiği henüz netlik kazanmamış olan atom lazerleri olasılığının önünü açtı.[182] Fotonlarla atomlar arasındaki bir fark da, bir lazer ışınındaki fotonların birbirleriyle etkileşime girmemeleridir. Atomlarsa birbirleriyle etkileşime girerler. Bu etkileşimden ne gibi sonuçlar doğar? Optik lazerler litografide (oyma) kullanılırlar. Fizikçiler, uygun atomlardan oluşan yoğuşuk maddelerin hassas bir şekilde odaklandığı ve bunların bir yüzey üzerine, transistörlerle diğer pratik aparatları elde etmek üzere, yerleştirildiği litografik uygulamaları hayal ediyorlar.

Bose-Einstein yoğuşukları birçok yönüyle sıra dışıdırlar. Dikkatli çalışmalar sonucunda fizikçiler, maddesel ve kuantum dünyalar hakkında temel bilgiler kazanacaklardır. Bir yoğuşuk maddedeki atomlar ayırt edilemezler. Bu hâldeki bütün atomlar aynı hızda ve aynı alanda hareket ederler. Şu sorulabilir: Nasıl olur da iki nesne aynı zamanda aynı yeri işgal edebilir? Bir yoğuşuk madde, makroskopik bir kuantum dalga paketidir ve Heisenberg'in belirsizlik prensibinin makroskopik bir örneğidir. Yoğuşuk maddeler, mikroskopik kuantum ve makroskopik klasik ortamlar arasındaki tuhaf dünyaya yeni bir bakış getirilebileceğini vaat ederler.

Atomlar katılaşarak yoğuşuk hâle geçtiklerinde, çok yoğun bir ortam oluştururlar. Bir ortamda ışığın yayılma hızı, diğer koşulların arasında, ortamın yoğunluğuna da bağlıdır. Bir Bose-Einstein yoğuşuk maddesi içinde ışığın hızı nedir? Lene Hau ve birlikte çalıştığı insanlar, bu soruyu sodyum atomlarının bir yoğuşuğu için yanıtlamış bulunuyorlar. Hau, lazer ışınını yoğu-

şuk maddeye yöneltip, bu merak uyandıran ortamda ışığın saniyede on yedi metre gibi inanılmaz bir hızla sürünerek ilerlediğini buldu -ki bu hız, ışığın boşlukta ilerleme hızından 299.792.299 metre/saniye daha düşüktü![183]

Maddenin bu yoğun formu, çok parçacıklı sistemler fiziğinin *(many-body physics)* test edilebileceği bir arenaya dönüşecektir. Tuhaf bir sıvı ve eşevreli dalga karışımı olarak, yoğuşuk maddeler, atom fiziğinin yüksek duyarlılığını çok parçalı fizik çatısı altında bir araya getirecek.

Bose-Einstein yoğuşuklarının yaratımıyla ortaya çıkan bütün bu heyecanda hidrojen yine geleneksel çekiciliğini göstermektedir. Şimdi hassas spektroskopik inceleme beklemededir. Hänsch tarafından hassas biçimde ölçülen 1S-2S geçişinin frekansı belki de çok daha hassas biçimde yeniden ölçülecektir. Bir hidrojen yoğuşuğunda diğer atomlarla gerçekleşebilecek olandan daha fazla atom bir araya getirilebilir. Hidrojenin basitliği, Bose-Einstein teorisinin hidrojenin etkileşmelerine bir kesinlik içinde uygulanmasına olanak sağlar.

Bütün bunlar, maddenin bu sıra dışı hâlindeki karışıklığı açıklamadaki rolü için hidrojene bir methiye niteliğindedir. Kleppner'in hidrojen için "gizemli çekiciliğe sahip element" dediği kadar vardır.

Alkali atomların seyreltilmiş gazlarında bir Bose-Einstein yoğuşuğu yaratabildikleri için Eric A. Cornell ve Carl E. Wieman fizik dalında 2001 Nobel Ödülü'yle onurlandırıldılar. Wolfgang Ketterle de, yoğuşuklar üzerine önemli çalışmaları nedeniyle bu ödülü Cornell ve Wieman'la paylaştı.

23

Hidrojen Benzeri Egzotik Atomlar: Teoriden Teknolojiye

Muonik hidrojen, bağlı $\mu^- p^+$ hâli, ... protonun yapısına ... karşı daha duyarlıdır.
—T. Kinoshita ve M. Nio

Hidrojen atomu, fizikçilerin olası her yolu deneyip hidrojen benzeri sistemler yaratma çabasına girdikleri fiziksel evrene açılan muazzam kışkırtıcı ve üretken bir pencere olmuştur. Hidrojen benzeri böylesi "atomlar" iki parçacık içerirler; bir pozitif elektrik yüklü parçacıkla (proton gibi) bir de negatif elektrik yüklü parçacık (elektron gibi) aralarındaki zıt elektrik yüklerinin karşılıklı çekimiyle bağlanıp bir araya gelirler. Tıpkı hidrojen atomunun fizik teorilerinin netleşmesi için olanak sağlaması gibi, bu atomsular da sıra dışı yollarla teorik kavramları zorlarlar. Üç tane hidrojen-benzeri atom sınıfı vardır. Egzotik atomlar adıyla anılan ilk sınıfı, Rydberg atomları olarak bilinen ikinci sınıf ve biri dışında bütün elektronlarından arındırılmış, yüksek elektrik yüküne sahip çekirdeğinin etrafında tek bir elektron bırakılmış sıradan atomların oluşturduğu üçüncü sınıf izler.

Egzotik atom durumunda fizikçiler, bir egzotik parçacık ve bir de sıradan parçacığı veya iki egzotik parçacığı bir araya getirip, yapısal olarak hidrojene benzeyen kısa ömürlü bir oluşum yaratırlar. İşin içinde olan egzotik parçacıklar kararsız ve kısa ömürlüdürler. Örneğin, böyle bir egzotik parçacık olan muan, 2,1971 x 10^{-6} saniyelik ortalama bir ömre sahiptir. Pozitron izole edildiğinde kararlıdır ama tipik bir laboratuar ortamında olası bir elektronla karşılaşması durumunda derhal yok olur. *Pion*un da 2,603 x 10^{-8} saniye ortalama ömrü vardır. Bu parçacıklardan oluşan hidrojen benzeri atomlar, üzerlerinde çalışma yapmak için mücadele gerektiren nesnelerdir ancak söz konusu çalışma başarıya ulaşırsa bu işten bütün mücadeleye değer biçimde kârlı çıkılır.

Pozitronyumda proton yerine bulunan bir pozitron vardır ve hidrojen benzeri bu atomda söz konusu pozitronla bir elektron birbirlerine bağlanmışlardır. Belki de en basit egzotik atom olan muonik hidrojen, negatif elektrik yüklü bir muonla pozitif yüklü bir protonu bir araya getirir. Bu örnekte bir muon basit şekilde elektronla yer değiştirir. *Muonyum* atomundaysa bir elektron pozitif elektrik yüküne sahip bir muona bağlanmıştır. Az sonra göreceğimiz gibi, başka egzotik atomlar da vardır. Pozitronyum, muonik hidrojen ve muonyum üzerine geniş araştırmalar yapılmıştır.

Bu hidrojen benzeri atomlar tarafından tetiklenen mücadele en az iki katmanlıdır. Birincisi, elektriksel çekimlerinin onları atom benzeri bir birim halinde birbirlerine bağlaması için parçacıkların bir araya getirilmesi gerekir. Bu egzotik parçacıklar, normalde bağlantılarının olmasını sağlayan enerjilerden çok daha yüksek enerjilerde oluştuğundan, ortak elektriksel çekimlerin gerçekleşmesi için enerjilerinin düşürülmesi (yavaşlatılmaları) gerekir. İkincisi, bu kısa ömürlü hidrojen benzeri atomlar üzerinde çalışma yapılmasına izin veren deney teknikleri geliştirilmelidir.

Peki bununla neden bu kadar uğraşılıyor ki? Hidrojen benzeri atomlar konusundaki heyecan, fizikçilerin hidrojenin kendisine karşı duydukları heyecanla başlar. Sebep, basitliktir -işin içinde sadece iki parçacık vardır. Böylesine basit bir sisteme fizikçiler, kuantum mekaniği, görelilik ve kuantum elektrodina-

miği (QED) gibi temel fizik teorilerini, sonuçları etkileyecek ön kabulleri minimum düzeyde tutarak uygulayabilirler. Fizikçiler çoğu zaman iki parçacıklı sistemlerin matematiksel denklemlerini tam olarak çözebilirler. Bu durum ikinci en basit atom olan helyum için -üç parçacıklı bir sistem- geçerli değildir ve görece basit bir atom olan karbon, fizik teorileri karşısında çözülmesi çok zor problemler çıkartır. Bu hidrojen benzeri atomlar temel teorileri yeni ve zorlu testlere tabi tutma fırsatları sunduğundan heyecan daha da artar. Bir teori ne kadar başarılı görünürse görünsün, fizikçiler daima onun farklı durumlar karşısında kendisini doğrular ya da yalanlar hallerini görerek daha da açmak yönünde bir arzuya sahiptirler. Teorilerin çökmesi yeni sorular çıkartır ve önemli yeni görüşleri içinde barındırır.

Pozitronyum gözlemlenen ilk egzotik atomdu. Pozitron, Dirac'ın 1928 yılında yaptığı ve yeni kuantum mekaniği ile göreliliği bir araya getirdiği çalışmasında tahmin edilmişti. Ardından 1932 yılında Carl Anderson tarafından ilk olarak gözlemlenmişti. Hemen sonra, 1934 yılında Stjepan Mohorovicic, bir pozitron ve bir elektron ihtiva eden bir "atom"un gözlemlenebileceğini öngördü.[184] Ancak bu öngörü, 1951 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden Martin Deutsch tarafından pozitronyum yaratılması ve gözlemlenmesi hayata geçene kadar gerçekleşmedi.[185] Deutsch bu işi, bir sodyum izotopunun bozunmasında dışarı salınan pozitronları çevreyi saran gazdaki elektronları yakalayacak kadar yavaşlatarak başardı.

Muonik hidrojen ilk olarak 1956 yılında L. W. Alvarez ve meslektaşları tarafından gözlemlendi.[186] Muon için kanıtlar California Teknoloji Enstitüsü'nden S. H. Neddermeyer ve C. D. Anderson'a 1937 yılında ilk olarak göründüğünde ve hemen ardından Harvard'dan J. C. Street ve E. G. Stevenson tarafından onaylandığında, bu durum fizik çalışmalarına atılan bir anahtar oldu.[187] "Bunu kim sipariş etti?" diye sormuştu Rabi, bariz bir şaşkınlık ve hayretle. Üç yıl boyunca Richard Feynman'ın Caltech'deki ofisinde bulunan karatahtayı şu soru cümlesi süslemişti: "Neden muon?" Besbelli muon sorusu Feynman'ın düşüncelerine de zorla girmişti; aslında aynı soru birçok diğer fizikçinin de düşüncelerini zorlamıştı. Muonik hidrojen ilk olarak, 25 cm'lik hidrojen köpüğü haznesinde *K mezon* adı verilen

parçacıkların fark edildiği bir deneyde tesadüfen gözlemlendi. (K mezonlar bir protonun yaklaşık yarısı kadar büyüklüktedirler ve ne negatif ne de pozitif elektrik yükü taşıyamazlar.) K mezon ışınlarında da, bazıları protonlarla bağlı bir sistem halinde olan muonlar vardı. Muonyumun kendisi, Vernon W. Hughes ve beraberindekiler tarafından 1960 yılında keşfedildi.[188]

Bu hidrojen benzeri atomlar, isimlerinin de işaret ettiği üzere, hidrojen gibidirler fakat hidrojenden ciddi farklılıklara sahiptirler. Pozitronyumdaki aynı kütleye sahip pozitron ve elektron, aralarındaki mesafenin ortalarındaki bir nokta etrafında dönerler ve bu nokta aslında kütlelerinin ortak merkezidir. (Bu durum hidrojende de aynıdır ancak proton elektrondan 2.000 kat büyük olduğundan, elektron protonun etrafında döner gibi görünür.) Bohr'un hidrojen atomu modelinden, en düşük enerji hâlindeki pozitronyumun boyutsal genişlemesinin hidrojenden daha büyük olduğunu öngörebiliriz. Aslında bu genişleme hidrojenin iki katı kadardır.

Muon ağırlaşmış bir elektrondur. Kütlesi elektronunkinden 206,8 kat daha büyüktür. Muonik hidrojende muon elektronun yerini aldığında yörüngesi protona çok daha yakınlaşır ve böylece muonik hidrojenin atomu daha küçük olur. Hidrojende en düşük enerji seviyesindeki yarıçap yaklaşık 0,5 Å civarındayken, muonik hidrojende bu ölçü 0,003 Å kadardır. Muonyum atomunda ise pozitif bir muon etkin çekirdek haline gelir. Protondan çok daha hafiftir; daha net söylersek, muon, proton kütlesinin onda biri kadardır. Bunun anlamı, muonyum atomunun hidrojenden daha geniş olduğudur.

Hidrojen ve muadillerinin arasındaki bu büyüklük farkı ilginç ve önemlidir. Ama dahası var. Muon ve pozitron, tıpkı elektron gibi, *lepton* adı verilen bir parçacık ailesinin mensubudurlar. Leptonlar, nükleer parçacıklar arasında -protonlar ve nötronlar arasında- rol oynayan güçlü kuvvete karşı bağışıktırlar. Bu öyle güçlü kuvvettir ki protonlar arasındaki elektriksel itmeyi bastırır ve bir atom çekirdeği oluşturmak için onları bir araya getirir. Ne pozitron ne de muon bu güçlü kuvveti hissetmezler. Bunun anlamı, egzotik atomların, güçlü kuvvetin kaynağı olan proton içeren çekirdeğiyle hidrojenden bile daha basit olduklarıdır.

Vernon Hughes egzotik atomlar üzerine çalışmanın motivasyonunu belirtmiştir. Bu motivasyonlar arasında, parçacıkların kendi özelliklerini tespit etme, bağlı parçacıklar *(bound particles)* arasındaki etkileşimler üzerine çalışma, modern teorileri test etme ve parçacıkların bağlı halleri üzerindeki zayıf, güçlü ve bilinmeyen etkileşim etkilerini araştırma fırsatları sayılabilir.[189] Hughes'in de dediği gibi, egzotik atomlar üzerine çalışmak temel amaçlara hizmet eder. Hem pozitronyum hem muonyumda etkileşen parçacıkların ikisi de leptondur; yani, iki parçacık yalnızca elektromanyetik etkileşim üzerinden, arka planda ortalığı tarayan güçlü kuvvet olmaksızın etkileşirler. Bunun da anlamı, bu "atomlar"ın güçlü kuvvetten gelen olası bir etkilenme veya karışma olmaksızın, elektromanyetik etkileşimin engelsiz bir görüntüsünü sunduklarıdır. Veya, içerdiği muonın yörüngesi protona çok daha yakın olan ve böylece daha yakın bir avantajlı bakış noktasından protonun yapısal özelliklerini araştırma olanakları açan, ayrıca güçlü kuvvetin herhangi bir etkisine yakından şahitlik etmeyi sağlayan muonik hidrojeni düşünün.

Hidrojen spektrumu üzerine, başka herhangi bir atomdan çok daha yoğun ve daha ince eleyip sık dokuyan çalışmalar yapılmıştır. Hidrojenin enerji seviyeleri, bilinebilecek her yönüyle bilinir. Tıpkı hidrojende olduğu gibi, bu egzotik "atomlar"ın da fiziksel özelliklerini ortaya çıkaran ışıkla spektrumlarını incelemek ve fizik teorilerini test ekmek fırsatları oluşur. Prensip olarak pozitronyum ve muonyum, fizikçilerin öngörülerde bulunmasına olanak sağlamalıdır. Bu öngörüler, hidrojen tarafından yapılmış olanlara ilaveten teoriden istenen yeni talepleri de beraberinde getirir. Örneğin, kuarklardan oluşan protonun tersine hem pozitron hem de muon yapısı olmayan *(structureless)* parçacıklardır ki bu da, söz konusu parçacıkların enerji seviyeleri arasındaki mesafenin sadece QED etkileşimiyle tespit edilebileceği anlamına gelir. Böylesi bir durum, hidrojen benzeri atomları QED'yi test etmek için ideal bir arena haline getirir. Dahası, bu egzotik atomlardaki Lamb sapması tarafından talep edilen teoriye yönelik düzeltmeler, prensip olarak bu teorilerin yeni ve daha sıkı testlerle karşı karşıya gelecekleri anlamını da taşıyabilir. Hem pozitronyum hem de muonyumda çeşitli enerji seviyelerindeki kuantum geçişleri gözlemlenmiş ve

ölçülmüş bulunmaktadır. Örneğin, yakın geçmişte muonyumdaki 1S-2S enerji aralıkları ölçüldü[190] ve deney sonuçları teoriyle uyumlu çıktı.

Egzotik atomlar üzerine yapılan çalışma güncel araştırmaların aktif bir alanıdır. Birçok hidrojen benzeri atom tespit edilmiş ve incelenmiştir. Bunlar arasında, yukarıda sözü geçenlere ilâveten, bir pozitif piona bir elektronun bağlı olduğu *pionyum* ve elektronun yerine geçmiş bulunan, örneğin negatif pion, negatif *kaon* ve antiproton gibi egzotik parçacıklarla diğer hidrojen benzeri atomlar bulunur. İsabetli veriler üretildikçe, fizikçiler de bu merak uyandırıcı atomların sunacağı incelikli yeni sonuçları aramaktan hoşlanacaklardır. Kesinlikle egzotik hidrojen benzeri atomlar, fiziksel teorinin karışıklıklarını benzersiz ve cezbedici yollarla ortaya çıkaracaklardır.

İkinci sınıf hidrojen benzeri atomlara Rydberg atomları adı verilir. Bir Rydberg atomu, içerisindeki bir elektronun çok yüksek bir kuantum seviyeye çıkartıldığı sıradan bir atomdur. Atomların enerji seviyeleri, baş-kuantum sayısı olarak adlandırılan n ile tanımlanır. Taban seviye veya en düşük seviye $n = 1$ seviyesidir ki, atomlar zamanlarının büyük kısmını bu seviyede geçirirler. İlk uyarılmış seviye $n = 2$ enerji seviyesiyken, ikinci uyarılmış seviye de $n = 3$ seviyesidir ve bu böyle devam eder.

Atomun büyüklüğü, atom taban seviyesindeyken çekirdek ve en dıştaki elektron arasındaki ortalama mesafeyle tespit edilir. Hidrojen taban seviyesinde iken, tek elektronu yaklaşık olarak 0,5 Å uzaklıktadır ve dolayısıyla hidrojen atomu yaklaşık 1.0 Å'lık bir çapa sahiptir. Eğer hidrojen atomunun elektronu uyarılarak $n = 2$ enerji seviyesine yükseltilirse, atomun çapı n^2 oranında veya dört kat olarak büyür. Hidrojen bir Rydberd atomu haline gelirse, elektronu $n = 80$, 90 veya daha yüksek enerji seviyesindedir. Ana kuantum sayısı birkaç yüzlere eşit olan Rydberg atomları gözlemlenmiştir. Bu durum Rydberg atomlarını çok çok büyük hale getirir -en düşük kuantum seviyesindeki büyüklüğünün 100.000 katına kadar. Egzotik atomlar gibi, Rydberg atomları da çok hassastırlar ancak diğer egzotik atomlardan farklı olarak, izole oldukları ve diğer atomlarla çarpışmadıkları sürece çok uzun yaşarlar.

Bütün Rydberg atomları hidrojen benzeri atomlardır. Bunun nedeni yükseltilmiş bir enerji seviyesindeki elektronun hem çekirdekten hem de diğer elektronlardan çok uzak olmasıdır; normal kuantum seviyelerinde göreli olarak çekirdeğe daha yakın kalır. Dolayısıyla, eğer bir Rydberg elektronu çekirdeğine doğru içeriye bakabilse, içinde Z tane pozitif nükleer proton (ve nötr nötronlar) ihtiva eden tam bir küre ve etrafında Z-1 tane negatif elektron görecektir. Yani Rydberg elektronu, tıpkı bir hidrojen atomu gibi toplam +1 elektrik yükü olan bir kor etrafında hareket eder.

Her ne kadar Rydberg atomlarının varlığı on dokuzuncu yüzyılın sonlarından beri biliniyor olsa da, ilk hidrojen Rydberg atomu muhtemelen 1965 yılında dış uzayda gözlemlenmiştir.[191] (Buradaki niteleyici, *muhtemelen,* herhangi bir şeyin en çok olanın ilkini tespit etmenin zorluğunu yansıtır.) Hidrojenin tüm uzayda mevcut olmasından öte, uzay Rydberg atomları için uygun bir ortam da sunar. Böyle atomlar hassastırlar ve dünya üzerindeki laboratuarlarda bir gaz örneğinin içinde meydana gelecek bombardımana dayanamazlar. Uzaydaysa, her atom diğer atomların çarpışmaları tarafından rahatsız edilmeyecek şekilde huzurlu bir izolasyon içindedir.

Rydberg atomları, 1970'lerde *dye* lazerleri kontrol edilebilir detaylarıyla yaratılıp üzerlerinde çalışılarak güçlü bir araç haline geldiğinde, laboratuar deneylerinde görülmeye başlandı. Bu lazerlerle bilim insanları esasen herhangi bir atomun dış elektronlarını uyarabilir ve ortaya hidrojen benzeri bir Rydberg atomu çıkartabilir. Rydberg çalışmaları için en çok kullanılan atomlar alkali metallerdir: Lityum, sodyum, potasyum ve benzerleri gibi. Rydberg atomlarını diğer atomlar tarafından yumruklanmaktan ve hassas hâllerini yerle bir etmekten korumak için deneyciler, yüksek bir vakum içinde hareket eden atomlardan bir ışm oluştururlar. Böylesine ışınların içinde atomlar birbirlerine paralel olarak hareket ederler ve etkin biçimde izolasyonda tutulurlar.

Bu devasa atomların tuhaflıkları bir yana, bilim insanları neden onları inceliyor ki? Rydberg atomlarından ne öğrenilebilir? Onları incelemek için bir motivasyon kaynağı, elektriksel ve manyetik alanlara gösterdikleri muazzam tepkidir. Sıradan bir

hidrojen atomuna bir elektriksel alan uygulandığında, enerji seviyeleri biraz kayar. Ama hidrojen devasa bir Rydberg atomu haline dönüşünce, elektriksel alana tepkisi de o ölçüde büyük olur. Enerji seviyeleri büyük miktarlarda kayar ve bu süreçte bazen birbirlerinin üzerinden geçerler. Bu geçme noktasındaki iki seviye aynı enerjiye sahiptir; yani dejenere *(degenerate)* olmuşlardır. Dejenere enerji seviyeleri cezbedicidir çünkü altında yatan bir basitliği ima ederler.[192] Böyle basitlikleri keşfetmek, atomlar dünyasına yeni bir bakış getirecektir.

Rydberg atomları üzerine çalışma yapmak için diğer bir sebep, bu atomların atomun kuantum dünyası ve gündelik nesnelerin klasik dünyası arasındaki loş alana ışık tutma potansiyeline sahip olmalarıdır. Kuantum mekaniği muazzam başarılı bir teoridir ve fiziksel evrenin yapı taşlarını tanımlar. Fizikçiler kuantum mekaniğini klasik fizik kanunlarından daha basit bulurlar. Kuantum mekaniği günden güne daha daha büyük nesnelere uygulanageldiğinden, fizikçiler kuantum fiziğinin giderek klasik fiziğin içine karıştığının görülmek durumunda olacağını düşünmeyi severler ve böyle düşünmek için de iyi sebepleri vardır. Çünkü mikroskobik ve makroskopik dünyalar arasındaki alanda kuantum ve klasik fizik birbirlerine denk olmalıdır. Kuantum teorisinin klasik fizik içerisine karışması düşüncesi Niels Bohr tarafından ortaya atılan karşılıklılık prensibiyle *(correspondence principle)* gayet açık bir şekilde ifade edilmiştir.

Kuantum dünyası ani kesintiyle *(discontinuity)* karakterize edilir; klasik dünya ise süreklilikle *(continuity)*. Bir atomun düşük enerji seviyesi açık biçimde kuantum benzeri bir durumdur: Birbirine komşu enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı büyüktür. Bunun tersine, bir Rydberg atomunun yüksek enerji seviyeleri arasındaki enerji farkları küçüktür ve enerji terimleriyle açıklarsak, bu seviyeler arasındaki geçişler göreli olarak yumuşaktır. Düşük enerji seviyelerinden yüksek enerji seviyelerine geçen atomlar sert kesintilerden yumuşak sürekliliğe doğru hareket ederler ve bu da açık kuantum alanından klasik alana doğru bir hareketi betimler.

Klasik bir atom neye benzer? Gezegen sistemini düşünün. Gezegen gayet tanımlı bir yörüngedeki belli konumunda sapta-

nabilir. Oysa hidrojen atomunun taban seviyesindeki durumu böyle değildir; elektron ne belli bir konumda saptanabilir ne de kesin yörüngesi tanımlanabilir. Hassas bir ileri görüşlülükle Heisenberg, kuantum mekaniğinin ilk versiyonunu yarattığında yörüngeler ve yörünge üzerindeki pozisyonlar meselesini esasen aklından tamamen çıkarıp atmıştır. Bunu yapmasının nedeni, elektron yörüngelerinin ve elektron pozisyonlarının ne gözlemlenebileceği ne de ölçülebileceği gerçeğidir ve Heisenberg böylece ölçülemeyen içeriklerin fizik teorilerinde yer alamayacağı sonucuna varmıştır.

Belki Heisenberg'in Rydberg atomlarını bilmiyor olması bir şanstır. Geçtiğimiz yıllarda, Heisenberg'in ölümünden çok sonra, fizikçiler Rydberg atomlarını incelemek için çok zekice yollar geliştirdiler. Böyle atomlarda açık biçimde eliptik olan yörüngedeki elektronun yerinin kısmen tespit edilebildiğini buldular.[193] Fizikçiler bir elektron bulmadılar ama eliptik bir yörünge üzerinde hareket eden çan şeklinde bir bulut kümesi gördüler. Tıpkı yörüngelerindeki gezegenler gibi, bu elektron bulutu da Rydberg atomunun merkezine yaklaştıkça çok hızlı ve uzaklaştıkça çok yavaş hareket eder. Kısacası, Rydberg atomu klasik fizik kanunlarıyla örtüşen bir davranış sergiler.

Kuantum ve klasik dünyalar arasındaki doğayı anlamak giderek önem kazanıyor. Teknolojik metotlar dramatik sonuçlarla bu ara bölgelere yönelmiş bulunuyor. Tünel taramalı mikroskoplar *(scanning tunneling microscopes)* tek tek atomları resmedebiliyor ve katı cisimlerin yüzeylerindeki atomik karakteri ortaya çıkartabiliyor. Tek tek atomlar hareket ettirilebiliyor ve özel amaçlı materyaller isteğe uygun biçimde imal edilebiliyor. Elektronik devre unsurları molekül düzeyine kadar ufaltılmış bulunuyor. Bilim insanları kuantum alanının klasik alanın önünü nasıl açtığını tamamen anlama noktasına geldiklerinde, bu teknolojiler de artacak ve uygulamaları yaygınlaşacaktır. Hidrojen benzeri atomlar teknolojik gelişmeye de yararlı olabilirler.

Üçüncü sınıf hidrojen benzeri atomlarsa yüksek oranda iyonize atomlardır; yani, çekirdek etrafındaki yörüngede sadece bir elektron kalacak şekilde diğer elektronları sökülüp uzaklaştırılmış atomlardır. Hidrojende elektron, protonun elektromanyetik kuvveti etkisi altında hareket eder. Lakin Willis Lamb'ın deneyi-

nin ortaya koyduğu üzere, hidrojenin elektronu son derece faal bir alanda hareket etmektedir; bu alanda elektron-pozitron çiftleri kısa ömürlü yaşamlara fırlamakta ve sanal fotonların hepsi etkilerini açık bir şekilde göstermektedirler. Bu canlı ortam hidrojenin $2S_{½}$ seviyesinde sapmaya neden olur ki, bu kaymaya günümüzde Lamb sapması adı verilir ve yine bu kayma, QED'nin bir testine de olanak verir.

Şimdi yüksek oranda iyonize olmuş bir atom düşünün. Uranyum buna bir örnektir. Uranyum doksan iki proton ve büyük sayıda nötronu olan çekirdeğinin etrafındaki yörüngelerde dönen doksan iki elektrona sahiptir. Deneyciler buradaki doksan bir elektronu atomdan çıkartıp uzaklaştırmayı, yüksek elektrik yükü taşıyan uranyum çekirdeğinin etrafındaki yörüngede tek bir elektronun kalmasını, böylece de U^{+91} iyonunu ortaya çıkartmayı başarmışlardır. Bu elektron, hidrojen atomuyla karşılaştırıldığında, elektromanyetik etkiler tarafından çok daha güçlü biçimde etkilenmiş bir uzayda hareketini sürdürmektedir. Aslında, bir uranyum çekirdeğinin etrafındaki yalnız elektron, laboratuarda üretilebilen herhangi bir etki alanından defalarca kat daha güçlü bir elektriksel alan tecrübe eder. Bu hidrojen benzeri atom için Lamb sapması nasıl bir şeye benzer acaba? QED bu duruma bir açıklama getirir mi? İlk sorunun cevabı muazzamdır: U^{+91} atomundaki Lamb sapması, hidrojen atomundakinin yaklaşık 1×10^8 katı daha büyüktür. Gözlemlenen Lamb sapması esasen QED'nin öngördüğüyle uyumludur.[194] Deney sonuçlarındaki belirsizlikler göreli olarak oldukça büyüktür ama işlemleri rafine etmek ve hassasiyeti yükseltmek yönündeki çalışmalar sürmektedir. Acaba QED eksik bulunacak mı? Bunu zaman gösterecek.

"Taklit," der bir söylem, "takdirin en samimi ifadesidir." İster kısa ömürlü parçacık içeriğiyle egzotik atomlar olsun, ister büyümüş Rydberg atomları olsun, isterse de yüksek oranda iyonlaşmış uranyum atomu olsun, hidrojen benzeri atomların hepsi hidrojenin yapısal özelliklerini paylaşırlar. Bu atomlar sadedirler ve bir fizikçi için sadelikten daha çekici bir şey yoktur. Hidrojen ve yerine geçenler, sadece en basit atomun sunabileceği bitmek tükenmek bilmez cömertlikleriyle fizikçileri ödüllendirmeyi sürdüreceklerdir.

Sonsöz

Hidrojeni anlamak, bütün fiziği anlamak demektir.

—Viktor Weisskopf'a atfedilmiştir.

Bilim insanları Dünya kabuğu üzerine dağılmış ve atmosfere saçılmış materyalleri analiz ettiklerinde, saf biçimde görünen veya diğer elementlerle birleşmiş halde bulunan doksan iki element tanımlarlar. Doğal yollarla oluşmuş elementlere ilâveten, bazı elementler de laboratuarlarda yaratılırlar ama bunların ömürleri kısadır ve doğada gözlemlenmezler. Doğada bulunan veya laboratuarlarda üretilen bütün bu kimyasal elementler, dünyanın bütün fen bilimleri sınıflarının duvarlarında asılı olan Periyodik Tablo'yu oluştururlar. Tablonun on dördüncü elementi olan silikon, yazlıkçıları çeken kumsallarda bol miktarda bulunur. Tablonun birinci ve sekizinci elementleri olan hidrojen ve oksijen de, sörfçülerin üzerinde kumsallara ulaşıp kırılana kadar kaydıkları dalgaları meydana getirirler. Hidrojen,

karbon, nitrojen ve oksijen, yani birinci, altıncı, yedinci ve sekizinci elementler çiçeklerin, sincapların, futbolcuların ve yaşayan bütün organizmaların temel taşlarıdırlar. Dünya'nın üzeri, içerisinde büyük ölçüde nitrojen, oksijen ve birkaç diğer elementin izleri bulunan ince bir gaz tabakasıyla kaplıdır.

Doğal dünyanın karışık yapısını anlamak misyonunda düzenli olarak yeni zeminler yaratan hidrojen elementi, maddenin en dominant formu olarak kozmosun yıldızlarında ve yıldızlar arası bölgelerinde bulunmakla birlikte, Dünya üzerinde genellikle saf halde görülmez. Dünya atmosferinde hiç hidrojen yoktur. Yerçekiminin nitrojen ve oksijeni başarılı biçimde Dünya yüzeyine doğru çeken gücü, en basit atom üzerinde hakimiyet kuramaz. Atomik hidrojen Dünya'da çok kısa ömürlüdür. Atmosfere salınan her hidrojen, Dünya'yı saran nitrojen ve oksijenin içinden geçip atmosferin en üst katmanına kadar yavaşça yükselerek, oradan kararlı biçimde Dünya'ya veda eder, güneş sistemi ve ötesi içinde gözden kaybolur. Burada bir ironi vardır; evrende bu kadar bol miktarda bulunan hidrojen atomu, üstünde yaşadığımız Dünya üzerinde saf haliyle esasen yok gibidir. Buna karşılık hidrojen gördüğü ilgiyi hak edecek bir içeriğe sahiptir.

Hidrojenin hikâyesi fizik yoluyla yazılmıştır. Kimyacılar da bu hikâyeye ilâveler yapabilirler. Burada değinilmeyi bekleyen bir diğer başlık da hidrojen bağlarıdır. Bu bağ gerçekte, bir su molekülünde oksijenle iki hidrojen arasında oluşan bağ gibi bir kimyasal bağ değildir. Hidrojen bağı suda, bir molekülün oksijeni ve bir komşu molekülün hidrojeni arasında oluşur. Ayrı moleküllerdeki oksijen ve hidrojen arasındaki bu çekimdir ki, suya sıra dışı bazı özelliklerini verir. Buzun yüzmesinin nedeni hidrojen bağıdır. Ve Dünya üzerindeki hayatın nedeninin buzun yüzebilmesi olduğu tartışılabilir. Eğer su tipik bir sıvı olsaydı, katı hâli olan buz, sıvı hâlinden daha yoğun olurdu. O durumda da buz içinde bulunduğu su kütlesinin dibine batar ve orada yavaş yavaş, Büyük Göller'i *(Great Lakes)* ve diğer su kütlelerini tamamen katı buza dönüştürene kadar büyürdü. Yaşayan organizmalar büyük ihtimalle ilk olarak suda form bulduklarından, katı buz kütlelerinin yaşamın filizlenmesi için bu kadar verimkâr olup olmayacakları sorgulanabilir. Kimyacıların hidrojenin

hikâyesine dâhil edebilecekleri bundan başka bölümler de olacaktır.

Temel element olan hidrojen atomunun bilimin ilerleyişine elinden gelen desteği verdiğine inanıyorum. I. I. Rabi'nin bir biyografisini kaleme almak benim için büyük bir ayrıcalıktı.[195] Rabi ile birlikte günler geçirdim ve ilk elden hidrojenler üzerine çalışmalarını öğrendim. Bu arka plan, kuşkusuz, hidrojen atomu üzerine bir kitap yazma kararımı etkiledi. Bu kitap, aslında Amerikan Bilimsel Gelişmeler Birliği'nin toplantısında yapılan bir konuşmayı dinlerken doğdu. Konuşmacı, fizik biliminin hâlihazır durumu ve her şeyi kapsayan tek bir teorinin nasıl gerçeklik haline dönüşeceği üzerine cesaretli açıklamalar yapıyordu. "Hadi canım," dedim kendi kendime, "en basit atoma sahip hidrojen hâlâ el ediyor uzaktan. Hâlâ hidrojen atomundan bir şeyler öğrenmeyi sürdürüyoruz." Nihayetinde H harfi sadece hidrojeni değil tevazuyu da simgeler. (ç.n. Tevazu: İng. *Humility*) Hidrojen atomu hâlâ uzaktan el ediyor -hikâyesi henüz bitmekten çok uzakta. Bazen bilimin bütün temel bilgiye artık sahip olduğuna yönelik sözler duyuyoruz. Ne zaman birisi böyle bir iddiada bulunsa, bir proton ve bir elektrondan oluşan en basit atomun nasıl hâlâ doğal fenomenlere ışık tuttuğunu hatırlamakta fayda görüyorum. Bilim insanları temel element hidrojen üzerinden bir şeyler öğrenmeye devam ettikleri sürece, bilimin sonuna ermek gibi bir tehlike de olmayacaktır.

Notlar

1. Bulgular henüz doğası tam olarak anlaşılamamış "karanlık" maddenin varlığını göstermektedir.
2. John S. Rigden, "H Stands for Hydrogen ... and Humility," *American Journal of Physics* 50, 299 (1982).
3. Evrenin erken evrelerinin şahaneliği için, Steven Weinberg'in *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (New York: Basic Books, 1977) adlı eserini okuyunuz.
4. William Prout, *Annals of Philosophy* 6, 321-330 (1815); 7, 111-113 (1816).
5. *Prout's Hypothesis*'den alıntı, Alembic Club Reprints, no. 20 (Edinburgh: The Alembic Club, 1932), 17.
6. A.g.e., s. 18. (yukarıda Adı geçen eser, sayfa 18.)
7. A.g.e.
8. Frederick Soddy, *Nature* 92, 399-400 (1913).
9. Herbert Dingle'den alıntı, *The British Journal for the History of Science 1*, 199-216 (1963), s. 200.
10. A.g.e., s. 201.
11. Arthur Schuster, "On Harmonic Ratios in the Spectra of Gases," *Proceedings of the Royal Society* 31, 337-347 (1881).
12. 1 Angstrom = 0,0000000001 metre = 1×10^{-10} metre.
13. Johann Jacob Balmer, *Annalen der Physik und Chemie* 25, 80-85 (1885).
14. J. J. Thomson, *Philosophical Magazine* 44, 292-311 (1897).

15. William Thomson, *Popular Lectures and Addresses*, vol. 2 New York: Macmillan, 1894).
16. Abraham Pais'den alıntı, *Inward Bound* (Oxford University Press, 1986), s.179. Thomson'un 1000 elektronu muhtemelen 1897 yılında elde edilen verilerden çıkmıştı. Bu veriler, hidrojenin *m/e* oranının, elektronun *m/e* oranından 1000 kat kadar büyük olduğunu gösteriyordu.
17. Bu alıntı birçok referansta görülür: E. N. da C. Andrade, *Rutherford and the Nature of the Atom* (Garden City: Anchor Books, 1964), s. 114; Barbara Lovett Cline, *The Questioners* (New York: Thomas Y. Crowell, 1965), s. 6; David Wilson, *Rutherford: Simple Genius* (London: Hodder and Stoughton, 1938), s. 296.
18. Kendi ifadesiyle (Niels Bohr ile sözlü tarih, Thomas Kuhn, 1962), Niels Bohr Rutherford'un 1911 güz döneminde verdiği ve yeni atom modelini açıkladığı semineri izlemişti.
19. Niels Bohr, *Philosophical Magazine* 26, 1-25, 476-502, 857-875 (1913).
20. Niels Bohr, *Collected Works*, L. Rosenfeld, general ed., vol. 2, *Works on Atomic Physics* (1912-1917), U. Hoyer, ed. (Amsterdam: North Holland, 1981), s. 111.
21. A.g.e., s. 123.
22. Pais'den alıntı, *Inward Bound*, s. 208.
23. Victor Weisskopf'un *Niels Bohr: Physics and the World* adlı çalışması ndan (New York: Harwood Academic Publishers, 1988), s. 4.
24. Bkz. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science* (New York: Harper & Brothers, 1958), s. 31.
25. Niels Bohr, *Collected Works*, vol. 2, s.603.
26. İnce yapı sabitinin boyutsuzluk karakteri, elektrik yükü birimi olan coulomb'un temel bir birim olmadığı düşünülerek anlaşılabilir. Coulomb aslında türetilmiş bir birimdir. Temel birimler cinsinden coulomb şoyle ifade edilebilir: Coulomb = Newton *m*. Böylece, ince yapı sabiti boyutsuzdur.
27. Muon elektronla aynı aileye mensuptur. Bir anlamda muon, m_μ = $207m_e$ değeriyle ağır bir elektron olarak düşünülebilir.
28. Bkz. Toichiro Kinoshita, "The Fine Structure Constant," *Reports on Progress on Physics* 59, 1459-1492 (1996).
29. Edward M. Purcell, Mr. Roger Auten'e mektup, 3 Eylül 1986, yazarın özel arşivinden.
30. Pais, *Inward Bound*, s. 215.
31. Max Delbrück, "Out of This World," *Cosmology, Fusion & Other Matters* adlı çalışmadan, Frederick Reines, ed. (Boulder: Colorado Associated University Press, 1972), s. 283.
32. Pais, *Inward Bound*, s. 134.

33. A.g.e., s. 252.
34. A.g.e., s. 248.
35. Jagdish Mehra ve Helmut Rechenberg'den alıntı, *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 2 (New York: Springer-Verlag), s. 77.
36. Born'dan Bohr'a mektup, 16 Nisan 1924, Niels Bohr'dan (Almanca) alıntı, *Collected Works*, vol. 5, *The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924-1926)*, Klaus Stolzenburg, ed. (Amsterdam: North-Holland, 1984), s. 299.
37. Pauli'den Bohr'a mektup, 11 Şubat 1924, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 2, s. 133.
38. Heisenberg interview in Archives for the History of Quantum Physics, s. 4.
39. Heisenberg'den Bohr'a mektup, 21 Nisan 1925, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 2, s. 209.
40. Heisenberg'den Bohr'a mektup, 16 Mayıs 1925, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 2, s. 213.
41. Hendrik Kramers, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 2, s. 214.
42. Helge S. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990), s. 20.
43. J. H. Van Vleck, Kragh'dan alıntı, s. 22.
44. Wolfgang Pauli, *Zeitschrift für Physik* 36 (1926), 336-363, s. 357.
45. Niels Bohr'dan Wolfgang Pauli'ye mektup, 13 Kasım 1925, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 3, s. 181.
46. Werner Heisenberg'den P. A. M. Dirac'a mektup, 9 Nisan 1926, Kragh'dan alıntı, s. 23.
47. Max Born, MIT dersleri, 1926, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 3, s. 171.
48. Schrödinger'den Einstein'a mektup, 3 Kasım 1925, Walter Moore'den alıntı, *Schrödinger: Life and Thought* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), s. 192.
49. E. Schrödinger, *Annalen der Physik* 79, 361-376 (1926), s. 361. Makalenin İngilizce çevirisi için bkz. E. Schrödinger, *Collected Works on Wave Mechanics* (London: Blackie & Sons Limited, 1928), 1-12, s. 1.
50. A.g.e., s. 8.
51. A.g.e., s. 9.
52. Pauli'den Jordan'a mektup, 12 Nisan 1926, Jagdish Mehra ve Helmut Rechenberg'den alıntı, *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 5, pt. 2 (New York: Springer-Verlag, 1987), s. 617.
53. Einstein'dan Schrödinger'e mektup, 16 Nisan 1926, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 5, pt. 2, s. 625.

54. Max Born, *Physics in My Generation* (New York: Springer-Verlag, 1969), s. 89.
55. Max Jammer'den alıntı, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, (New York: McGraw-Hill, 1966), s. 283.
56. Schrödinger'den Wien'e mektup, 25 Ağustos 1926; Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 5, pt. 2, s. 827.
57. Abraham Pais'den alıntı, *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World* (Oxford: Clarendon Press, 1986), s. 255.
58. Schrödinger, *Collected Papers*, s. 45.
59. Heisenberg'den Pauli'ye mektup, 8 Haziran 1926. Pauli'nin mektubunun tam metni için bkz. B. L. van der Waerden, "From Matrix Mechanics and Wave Mechanics to Unified Quantum Mechanics," *The Physicist's Conception of Nature* adlı eserde, Jagdish Mehra, ed. (Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1973), s. 278.
60. Bohr'dan Schrödinger'e mektup, 11 Eylül 1926, Mehra and Rechberg'den alıntı, vol. 2, s. 625.
61. Werner Heisenberg, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations* (New York: Harper & Row, 1971), s. 73.
62. A.g.e., s. 75.
63. Erwin Schrödinger, *Naturwissenshaften* 23, 807-812, 823-828, 844-849 (1935).
64. C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, ve D. J. Wineland, "A 'Schrödinger Cat' Superposition State of an Atom," *Science* 272, 1131-1136 (1996).
65. P. A. M. Dirac, "The Quantum Theory of the Electron, I," *Proceedings of the Royal Society (London)* 117, 610-624 (1928), s. 610.
66. Helge S. Kragh'dan alıntı, *Dirac: A Scientific Biography* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990), s. 57.
67. Laurie M. Brown ve Helmut Rechenberg'den alıntı, "Dirac and Heisenberg: A Partnership in Science," *Reminiscences about a Great Physicist: Paul Adrien Maurice Dirac* adlı eserde, Behram N. Kursunoglu ve Eugene P. Wigner, eds. (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), s. 148.
68. Kragh, s.65.
69. A.g.e., s. 60.
70. A.g.e., s. 62.
71. A.g.e., s. 63.
72. P. A. M. Dirac, "Quantized Singularities In the Electromagnetic Field," *Proceedings of the Royal Society* A133, 60-72 (1931), s. 61.
73. Ernest Rutherford ve Frederick Soddy, *Philosophical Magazine* 4, 370-390 (1902).
74. Frederick Soddy, "Inter-atomic Charge," *Nature* 92, 399-400 (1913).
75. Hidrojenin trityum adı verilen üçüncü bir izotopu daha vardır ve çekirdeğindeki protonun yanına iki notron katılmıştır. Bu izotop

radyoaktiftir, dolayısıyla doğadaki hidrojen örneklerinde bulunmaz. Trityum ancak laboratuarlarda yaratılabilir.

76. Ferdinand G. Brickwedde, "Harold Urey and the Discovery of Deuterium," *Physics Today*, September 1982, 34-39.
77. A.g.e.
78. John S. Rigden, *Rabi: Scientist and Citizen* (New York: Basic Books, 1987); Harward University Press tarafından yeni bir sunuşla yeniden basılmış (2000), s. 90.
79. Döteryum isminin verilişinin tam bir hikayesi için, bkz. Roger H. Stuewer, "The Naming of the Deuteron," *American Journal of Physics* 54, 206-218 (1986).
80. Abraham Pais'den alıntı, *Inward Bound* (Oxford: Oxford University Press, 1986), s. 208.
81. Bretislav Friedrich ve Dudley Herschbach'dan alıntı, *Daedalus*, Winter 1998, s.179.
82. John S. Rigden, "Atoms, Molecules, and Clusters," *Zeitschrift für Physik* D 10, 119-120 (1988), s.119.
83. Immanuel Estermann, S. N. Foner, ed. "History of Molecular Beam Research," *American Journal of Physics* 43, 661-671 (1975), s.670.
84. John S. Rigden, *Rabi: Scientist and Citizen* (New York: Basic Books, 1987); Harward University Press tarafından yeni bir sunuşla yeniden basılmış (2000), s. 61.
85. Stern tarafından Ronald G. J. Fraser'in *Molecular Rays* kitabına yazılan önsözden (Cambridge: Cambridge University Press, 1931), x.
86. Rigden, s. 104.
87. A.g.e.
88. A.g.e.
89. A.g.e., s. 107.
90. A.g.e.
91. A.g.e., s. 109.
92. A.g.e., s. 96.
93. A.g.e., s. 99.
94. Kişisel görüşme, 1987 sonlarına doğru.
95. J. M. B. Kellogg, I. I. Rabi, N. F. Ramsey, Jr., ve J. R. Zacharias, "An Electrical Quadrupole Moment of the Deuteron," *Physical Review* 57, 677-695 (1940).
96. Van Vleck'den Rabi'ye, 28 Kasım 1938, Rabi'nin kişisel dökümanlarından.
97. Van Vleck'den Rabi'ye, 5 Aralık 1938, Rabi'nin kişisel dökümanlarından.
98. Charles Weiner ve Jagdish Mehra'nın 28-29 Ekim 1966'da *American Institute of Physics* bünyesindeki *Center for the History of Physics*'de Hans Bethe ile yaptıkları röportajdan.

99. Roger Stuewer, "Bringing the News of Fission to America," *Physics Today*, October 1985, 48-56.
100. James Phinney Baxter, III, *Scientists Against Time* (Boston: Little Brown, 1946), s. 142.
101. Buradan sonra verilen ayrıntıların birçoğu Profesör Robert Pound'un detaylı kayıtlarından alınmıştır. Bu bilgilerden ötürü Pound'a minnettarım.
102. Edward M. Purcell, AIP Oral History, 1977, s. 27.
103. C. G. Montgomery, R. H. Dickle ve E. M. Purcell, *Principles of Microwave Circuits*, Radiation Laboratory Series, vol. 8 (New York: McGraw Hill, 1948).
104. John S. Rigden, "Quantum States and Prcession: The Two Discoveries of NMR," *Reviews of Modern Physics* 58, 433-448 (1986).
105. J. H. Van Vleck, "The Absorption of Microwaves by Uncondensed Water Vapor," *Physical Review* 71, 425-433 (1947).
106. E. M. Purcell, H. C. Torrey ve R. V. Pound, "Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid," *Physical Review* 69, 37-38 (1946).
107. F. Bloch, W. W. Hansen ve M. Packard, "Nuclear Induction," *Physical Review* 69, 127, 680 (1946); "The Nuclear Induction Experiment," 70, 474-485 (1946).
108. Silvan S. Schweber'in Shelter Island Konferansı üzerine mükemmel yapıtından alıntı, *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, and Tomonaga* (Princeton: Princeton University Press, 1994), s. 175.
109. A.g.e., s. 156.
110. A.g.e., K. K. Darrow tarafından alıntı.
111. W. V. Houston, "A New Method of Analysis of the Structure of H_α and D_α," *Physical Review* 51, 446-449 (1937); R. C. Williams, "The Fine Structures of H_α and D_α under Varying Discharge Conditions," *Physical Review* 54, 558-567 (1938).
112. Schweber, s. 218-219.
113. John S. Rigden, *Rabi: Scientist and Citizen* (New York: Basic Books, 1987), s. 177.
114. J. E. Nafe, E. B. Nelson ve I. I. Rabi, "The Hyperfine Structure of Atomic Hydrogen and Deuterium," *Physical Review* 71, 914-915 (1947).
115. Hatırlayınız ki, fizikçileri protonun manyetik momentini bildiklerine ikna eden Dirac teorisiydi. Stern'in deneyi fizikçilerin bu varsayımının doğru olmadığını göstermişti.
116. Rigden, s. 175.
117. Richard Feynman, *QED* (Princeton: Princeton University Press, 1985), s. 118.

118. Dieter B. Herrmann, dan alıntı, *The History of Astronomy from Herschel to Hertzsprung* (Cambridge: Cambridge University Press, 1973), s. 69.
119. A.g.e.
120. J. S. Hey, *The Evolution of Radio Astronomy*, Science History Publications, Neale Watson (New York: Akademik Publications, 1973), s. 7.
121. Alıntı, W. T. Sullivan, III ed., *The Early Years of Radio Astronomy*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1984), s. 137.
122. Nicolaas Bloembergen, "Edward M. Purcell (1912-1997)", *Nature* 386, 662 (1997).
123. Gart Westerhout tarafından Hollanda ve Avustralya verilerinden oluşturulan yayınlanmamış resim.
124. Benjamin K. Malphrus, *The History of Astronomy and the National Astronomy Observatory*, (Malabar, Fla.: Krieger Publishing Co., 1996). Bkz. s. 26.
125. A.g.e., s. 96-100.
126. H. Alan Lloyd'dan alıntı, "Timekeepers: An Historical Sketch," *The Voices of Time* adlı eserde, J. T. Fraser, ed. (New York: George Braziller, 1966), s. 390.
127. Rabi'nin kişisel koleksiyonundan.
128. J. R. Zacharias, J. G. Yates ve R. D. Haun, "An Atomic Frequency Standard," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 43 (3), 364 (1955).
129. H. M. Goldenberg, D. Kleppner ve N. F. Ramsey, "Atomic Hydrogen Maser," *Physical Review Letters* 5, 361-362 (1960).
130. Norman F. Ramsey, *Spectroscopy with Coherent Radiation: Selected Papers of Norman F. Ramsey with Commentary* (Singapore: World Scientific, 1998), s. 205.
131. R. F. C. Vessot et al., "Test of Relativistic Gravitation with a Space Borne Hydrogen Maser", *Physical Review Letters* 26, 2081-2084 (1980).
132. Nadia Robotti'den alıntı, "The Spectrum of ζ Puppis and the Historical Evolution of Empirical Data," *Historical Studies of Physical Sciences* 14, Part 1, 123-145, s. 125.
133. G. W. Series, "The Rydberg Constant," *Contemporary Physics* 14, 49-68 (1974), s. 51.
134. G. W. Series, *The Spectrum of Atomic Hydrogen* (Oxford: Oxford University Press, 1957).
135. T. W. Hänsch, I. S. Shahin ve A. L. Schawlow, "Optical Resolution of the Lamb Shift in Atomic Hydrogen by Laser Saturation Spectroscopy," *Nature Physical Science* 235, 63-65 (1972).
136. T. W. Hänsch, "Repetitively Pulsed Tunable Dye Laser for High Resolution Spectroscopy," *Applied Optics* 11, 895-898 (1972).

137. T. W. Hänsch, M. H. Nayfeh, S. A. Lee, S. M. Curry ve I. S. Shahin, "Precision Measurement of the Rydberg Constant by Laser Saturation Spectroscopy of the Balmer α Line in Hydrogen and Deuterium," *Physical Review Letters* 32, 1336-1340 (1974).
138. C. Wieman ve T. W. Hänsch, *Physical Review Letters* 36, 1170-1173 (1976).
139. E. A. Hildum, U. Boesi, D. H. McIntyre, R. G. Beausoleil ve T. W. Hänsch, "Measurement of the 1*S*-2*S* Frequency in Atomic Hydrogen," *Physical Review Letters* 56, 576-579 (1986), s. 576.
140. A.g.e.
141. T. Andreae, W. König, R. Wynands, D. Leibfried, F. Schmidt-Kaler, D. Meschede ve T. W. Hänsch, "Absolute Frequency Measurement of the Hydrogen 1*S*-2*S* Transition and a New Value of the Rydberg Constant," *Physical Review Letters* 69, 1923-1926 (1992).
142. A.g.e., s.1923
143. Th. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz ve T. W. Hänsch, "Phase-Coherent Measurement of the Hydrogen 1*S*-2*S* Transition Frequency with an Optical Frequency Interval Divider Chain," *Physical Review Letters* 79, 2646-2649 (1997).
144. A.g.e., s. 2646.
145. A. Huber, Th. Udem, B. Gross, J. Reichert, M. Kourogi, K. Pachucki, M. Weitz ve T. W. Hänsch, "Hydrogen-Deuterium 1*S*-2*S* Isotope Shift and the Structure of the Deuteron," *Physical Review Letters* 80, 468-471 (1998).
146. A.g.e.
147. Friedmann'ın 1922'deki makalesinin İngilizce çevirisi için *Cosmological Constants: Papers in Modern Cosmology*, J. Bernstein ve G. Feinberg, eds. (New York: Columbia University Press, 1986).
148. Helge Kragh'tan alıntı, *Cosmology and Controversy*, (Princeton: Princeton University Press, 1999), s. 105.
149. R. A. Alpher, H. Bethe ve G. Gamow, "The Origun of the Chemical Elements," *Physical Review* 73, 803-804 (1948).
150. H. Bondi ve T. Gold, "The Steady-State Theory of the Expanding Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, 252-270 (1948) ve F. Hoyle, "A New Model for the Expanding Universe," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108, 373-382 (1948).
151. Kozmolojinin tarihsel dökümü yönünde son dönemlerde çıkan çok güzel bir kitap için *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe* (Princeton: Princeton University Press, 1996).
152. R. A. Alpher ve R. C. Hermann, "Evolution of the Universe," *Nature* 162, 774-775 (1948).

153. Dennis Overbye'dan alıntı, *New York Times*, February 10, 1998.
154. Margaret J. Geller, "Is Cosmology Solved? A Tribute to David N. Schramm," *Astronomical Society of the Pacific* 111, 253 (1999).
155. Overbye, n. 7.
156. Terry P. Walker, Gary Steigman, David N. Schramm, Keith A. Olive ve Ho-Shik Kang, "Primordial Nuclesynthesis Redux", *Astrophysical Journal* 376, 51-69 (1991).
157. Richard I. Epstein, James M. Lattimer ve David N. Schramm, "The Origin of Deuterium," *Nature* 263, 198-202 (1976).
158. Scott Burles, Kenneth M. Nollet, James W. Truan ve Michael S. Turner, "Sharpening the Predictions of Big-Bang Nucleosynthesis," *Physical Review Letters* 82, 4176-4179 (1999).
159. A. Songalla, L. L. Cowle, C. J. Hogan ve M. Rugers, "Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds", *Nature* 368, 599-604 (1994).
160. S. Burles ve D. Tyler, "The Deuterium Abundance toward Q501009+2956," *Astrophysical Journal* 507, 732-744 (1998).
161. C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes ve R. P. Hudson, "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay," *Physical Review* 105, 1413-1414 (1957).
162. Richard L. Garwin, Leon M. Lederman ve Marcel Weinrich, "Observation of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon," *Physical Review* 105, 1415-1417 (1957).
163. J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch ve R. Turlay, "Evidence for 2π Decay of the K_L Meson," *Physical Review Letters* 13, 138-140 (1964).
164. Carl D. Anderson, "The Positive Electron," *Physical Review* 43, 491-494 (1933). Dünya atmosferinde oluşan pozitron.
165. O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand ve T.Ypsilantis, "Observations of Antiprotons," *Physical Review* 100, 947-950 (1955).
166. "Antihydrogen"den alıntı, John Eades, Richard Hughes ve Claus Zimmermann, *Physics World* 6, 44-48, July (1993), s. 48.
167. G. Baur, "Production of Antihydrogen," *Physics Letters* B 368, 251-258 (1996).
168. G. Blandford, D. C. Christian, K. Gollwitzer, M. Mandelkern, C. T. Munger, J. Schultz ve G. Zioulas, "Observation of Antihydrogen," *Physical Review Letters* 80, 3037-3040 (1998).
169. Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon Books, 1992).
170. S. N. Bose, "Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese," *Zeitschrift für Physik* 26, 178-181 (1924).

171. Hikâyenin tamamı için bkz. William A. Blanpied, "Satyendranath Bose: Co-Founder of Quantum Statistics," *American Journal of Physics* 40, 1212-1220 (1972).
172. Martin Klein, "Einstein and Wave-Particle Duality," Natural Philosopher 3, 1-49 (1963), s. 26; Blanpied'den alıntı.
173. Albert Einstein, "Quantentheorie des einatomigen idealen Gases," *Berliner Berichte* 3, 3-14 (1925).
174. P. A. M. Dirac, "On the Theory of Quantum Mechanics," *Proceedings of the Royal Society* 112, 661-677 (1926); Enrico Fermi, "Zur Quantelung des idealen einatomigen Gases," *Zeitschrift für Physik* 36, 902-912 (1926).
175. Eric A. Cornell ve Carl E. Wieman, "The Bose-Einstein Condensate," *Scientific American* (March) 40-45 (1998).
176. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman ve E. A. Cornell, "Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor," Science 269, 198-201 (1995).
177. Daniel Kleppner, "The Ying and Yang of Hydrogen," *Physics Today*, 11-12 (1999).
178. Bkz. Issac F. Silvera ve Jook Walraven, "The Stabilization of Atomic Hydrogen," *Scientific American* (January) 66-74 (1982).
179. Dale G. Fried, Thomas C. Killian, Lorentz Willmann, David Landhuis, Stephen C. Moss, Daniel Kleppner ve Thomas J. Greytak, "Bose-Einstein Condensation of Atomic Hydrogen," *Physical Review Letters* 81, 3811-3814 (1998).
180. *Physics Today*'den alıntı, August 1995, s. 20.
181. M. R. Andrews et al., "Observation of Interference between Two Bose Condensates," *Science* 275, 637-641 (1997).
182. S. Inouye et al., "Phase-Coherent Amplification of Atomic Matter Waves," *Nature* 402, 641-644 (1999).
183. Lene V. Hau et al., "Light Speed Reduction to 17 Meters per Second in an Ultracold Atomic Gas," *Nature* 397, 594-598 (1999).
184. S. Mohorovicic, *Astronomische Nachrichten* 253, 94 (1934).
185. M. Deutsch, "Evidence for the Formation of Positronium in Gases," *Physical Review* 82, 455-456 (1951).
186. L. W. Alvarez, H. Bradner, F. S. Crawford, Jr., J. A. Crawford, P. Falk-Vairant, M. L. Good, J. D. Gow, A. H. Rosenfeld, F. Solmitz, M. L. Stevenson, H. K. Ticho ve R. D. Triff, "Catalysis of Nuclear Reactions by Mesons," *Physical Review* 105, 1127-1128 (1956).
187. S. H. Neddermeyer ve C. D. Anderson, "Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles," *Physical Review* 51, 884-886 (1937); J. C. Street ve E. G. Stevenson, "Penetrating Corpuscular Component of the Cosmic Radiation," *Physical Review* 51, 1005 (1937).

188. V. W. Hughes, D. W. McColm, K. Ziock ve R. Prepost, "Formation of Muonium and Observation of Its Larmor Precession," *Physical Review Letters* 5, 63-65 (1960).
189. Vernon W. Hughes, Exotic Atoms '79: *Fundamental Interactions and Structure of Matter* adlı eserde, Kenneth Crowe, Jean Duclos, Giovanni Fiorentini ve Gabriele Torelli eds. (New York: Plenum Press, 1980), s. 3.
190. V. Meyer et al., "Measurement of the 1*S*-2*S* Energy Interval in Muonium," *Physical Review Letters* 84, 1136-1139 (2000).
191. B. Höglund ve Peter G. Mezger, "Hydrogen Emission Line n_{110} 6 n_{109} Detection, at 5009 Megahertz in Galactic H II Regions," *Science* 150, 339-348 (1965).
192. Daniel Kleppner, Michael G. Littman ve Myron L. Zimmerman, "Highly Excited Atoms," *Scientific American* (May 1981), s. 130-149.
193. Michael Nauenberg, Carlos Stround ve John Yeazell, ",The Classical Limit of an Atom", *Scientific American*, June 1994, 44-49.
194. Thomas Stoehlker et al., "1*S* Lamb Shift in Hydrogenlike Uranium Measured on Cooled, Decelerated Ion Beams," *Physical Review Letters* 85, 3109-3112 (2000).
195. John S. Rigden, *Rabi: Scientist and Citizen*, yeni önsözüyle (Cambridge: Harvard University Press, 2000).

Teşekkür

1988 yılında kaybettiğimiz I. I. Rabi, bu kitapta hatırı sayılır biçimde boy gösteriyor. Rabi, 1930'lu yıllarının büyük bölümünü, giderek artan bir hassasiyetle yaptığı Hidrojen çekirdeğinin manyetik özellikleri üzerine ölçümlerle geçirdi. Biyografisini yazarken kendisini yakından tanımıştım ve bu kitabı kaleme alırken de başımdan hiç ayrılmadığını hissettim. Rabi'nin, geçen onca zamana inat varlığını sürdürmesi ve hâlâ da ağırlığını hissettiriyor olması beni mutlu ediyor.

Norman F. Ramsey, Jr. da Rabi'nin bir öğrencisiydi ve yirminci yüzyıl fiziğine Hidrojen atomu üzerine çalışmaları ve diğer olağanüstü başarılarıyla belirleyici katkılarda bulundu. Ramsey, çabalarımın güçlü bir destekçisi oldu ve pek çok durumda bana yardım etti; dolayısıyla kendisine özel bir teşekkürü borç biliyorum.

Bilim insanlarıyla bu kitap için yaptığım pek çok görüşmede, böylesi basit bir fikirden yola çıkmak konusundaki özgüvenim giderek güçlendi. Bu görüşmelerden biri de, Austin-Texas'da Steven Weinberg ile yaptığım görüşmedir. Austin'de yolumuz kesiştiğinde bana, "Ne yazıyorsun?" diye sordu. Ona Hidrojen üzerine yazdığım bu kitabımdan bahsettim. Bir anlık bir duraksamadan sonra, "Çok güzel... çok güzel. Nereden aklına geldi bu fikir? Rabi mi verdi sana bu fikri?" dedi. Weinberg bu sorusuyla, Hidrojen tarafından büyülenmiş olan Rabi'yle birlikte yaptığım kitap çalışmasına gönderme yapıyordu kuşkusuz. Her ne kadar, böylesi bir düşüncede Rabi'ye bağımlı olduğum yönünde manidar bir tavır sergilemiş olsa da, Weinberg'in tepkisinden mutluluk duydum.

Pek çok diğer fizikçi (ve fizikçi olmayan) bilim insanı da sorularıma cevap verip, gerekli bilgileri bana sundu. Bunlar arasında, Eric J. Chaisson, David Christian, Neil Comins, Eric Cornell, John Eades, Thornas Gallagher, Ted Hansch (kendisine sık sık başvurdum), Craig Hogan, Wolfgang Ketterle, Torn Kinoshita, Dan Kleppner (kendisine tekrar tekrar başvurdum), Mel Leon, C. J. Martoff, Bert Mobley, Mary Jo Nye, Sharon O'Dair, William Phillips, Carol Pierrnan, Ronald Reynolds, Alan Rocke, Philip Schewe, Benjamin Stein, Roger Stuewer, Michael Turner, Fred Ulrich, Gart Westerhout, and Carl Wieman bulunuyor. Bazı kişilerin adlarını burada anmayı atlamış olduğumdan eminim ama adı geçen ve geçmeyen tüm şahsiyetlere yardımları için en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Kitap makine koduna geçmezden önce henüz sadece bir fikir halindeyken, çabalarım için Alfred P. Sloan Vakfı'ndan bir destek aldım. Profesyonel yaşamımda karşılaştığım temel bir değişiklik nedeniyle kitaba uzun süre ara vermek durumunda kalışım Sloan camiasında büyük tepkilere neden olmadı. Sloan Vakfı'na, verdikleri destek ve gösterdikleri sabır nedeniyle teşekkür ederim.

Yardımları ve önerileriyle Harvard University Press'den Michael Fisher ve ekibi bana karşı son derece cömert davrandılar. Hepsine teşekkür ederim.

Bu kitabı, bilimsel gelişmelerin izlediği yolla ilgilenen ve özellikle fizik sever genel okuyucu için yazdım. "Genel okuyucu" deyimi elbette bir soyutlama ve bu kavramı iki tür "genel okuyucu" olarak düşündüm. Birincisi, dünya çapında bir konser piyanisti olup tamamen zevk için fizik kitapları okuyan Eugene Istomin gibi okurlar. Kendisiyle yaptığım sohbetlerden büyük keyif aldım ve bana bir gölge okur olarak yardımlarından dolayı minnettarım. İkicisi ise, oğlum Jonathan; çalışkan bir fizikçi ve doymak bilmez bir okur. Böylece fizik dünyasındaki gelişmelerden daima haberdar olur. Bana sorduğu ve bazılarına cevap vermekte zorlandığım sorularla kitaba katkıda bulundu. Gerek Eugene, gerekse Jonathan bilmeden bu kitap için verdiğim çabalara hatırı sayılır biçimde yön verdiler.

Bir de son olarak, ve daima, kutup yıldızım Diana var elbette...

Teşekkür Edilen Kurumlar

7.1 American Institute of Physics, Emilio Segrè Visual Archives, Segrè Collection.
7.2 American Institute of Physics, Emilio Segrè Visual Archives, Photograph by Francis Simon.
8.1 American Institute of Physics, Emilio Segrè Visual Archives, *Physics Today* Collection.
9.1 Copyright Cavendish Lab, Cambridge, Great Britain.
12.1 American Institute of Physics, Niels Bohr Library.
14.1 American Institute of Physics, Meggers Gallery of Nobel Laureates.
14.2 Stanford University Archives.
14.3 American Institute of Physics, Visual Archives, W.F. Meggers Collection.
14.4 Robert V. Pound. Protograph by Mrs. Henry Torrey.
17.2 National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia.
17.3 Gart Westerhout.
18 Chapter epigraph courtesy Mrs. Howard Nemerov.
18.1 Norman F. Ramsey.
18.2 Norman F. Ramsey.
20.1 Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago.
21.1 Visual Media Services, Fermilab, Batavia, Illinois.

Dizin

A
Almanya; 112, 137, 203
Alvarez, L.W.; 145, 242, 262
Amerika Birleşik Devletleri; 75, 113-115, 129-130, 137, 139, 187
Amerikan Astronomi Topluluğu; 211
Anderson, Carl; 96, 129, 226, 242, 261-262
Ångström, Anders Jonas; 25
Annalen der Physik; 78, 80, 84, 253, 255
Archimedes; 61
Aston, Francis William; 18
Atomik Yapı ve Spektrum Çizgileri; 45
Avrupa; 114-115, 129-130

B
Balboa, Vasco Núñez de; 185
Balmer, Johann Jacob; 20, 24-28, 30, 38-39, 42-43, 46, 50, 67, 74, 80, 86, 101-102, 152, 154, 159, 188, 198-199, 200, 205, 211, 253, 260
Bell Telefon Laboratuarları; 139, 214
Berkeley; 100, 104, 129-130, 156, 181, 226
Bern; 45
Berzelius, J. J.; 16
Bethe, Hans 45, 60, 136, 212, 257, 260
Birinci Dünya Savaşı; 17, 113
Bloch, Felix; 2-3, 137, 140, 142, 144-145, 147, 149, 258
Bohr, Niels; 2, 28-29, 34-53, 56-57, 63-68, 73-75, 79-80, 82, 85-87, 90-91, 105-106, 113, 115, 129, 137-138, 152-154, 163, 168-169, 199, 243, 247, 254-256, 267
Born; 61, 64-65, 72-75, 81-83, 95, 255, 256
Bose-Einstein yoğuşuğu; 4
Boyle, Robert; 11
Brahe, Tycho; 47
Brewster, David; 23
Broglie, Louis de; 63, 78-79, 236
Brüksel; 91
Büyük Göller; 251

Büyük Patlama; 7, 10-12, 211-215, 217-223

C
California Teknoloji Enstitüsü; 96, 129-130, 211, 226, 242
Cambridge Üniversitesi; 29, 72, 213
Carnegie Teknoloji Enstitüsü; 113
Carnegie Vakfı; 102
Cavendish Laboratuarları; 35
Cavendish, Henry; 12, 35, 59, 267
Cenevre; 227
CERN; 5, 195, 227
Chadwick, James; 128
Chamberlain, Owen; 226, 261
Chemical and Engineering News; 148
Chicago; 211, 215, 267
Columbia Üniversitesi; 101, 109, 114-115, 129-131, 157, 162
Compton, Arthur; 62
Cornell Üniversitesi; 136
Coulomb; 55, 57, 67, 103, 157, 167, 254
Courant, Richard; 64-65
CPT simetrisi; 226
Crookes, William; 16-17

D
Dakka Üniversitesi; 233
Dalton, John; 14-16
Danimarka; 29
Debye, Peter; 78, 107
Democritus; 14
Digital Palomar Sky Survey; 211
Dirac, Paul; 2-3, 53, 61, 72-74, 85, 89-97, 110, 112-113, 150, 154, 156-157, 159, 163, 166, 168-169, 175, 225, 233-234, 242, 255-256, 258, 262
Doppler kayması; 180, 205
Dunoyer, Louis; 106
Dupont Kimya Şirketi; 147

E
Eddington, Arthur; 45
Edinburgh Üniversitesi; 15
Einstein, Albert; 4-5, 21, 35, 39-40, 45, 56, 61-63, 78-81, 83, 105, 185-186, 195, 212, 229, 232-239, 255, 262
Eisenhower, Dwight D.; 162
Elektronun Kuantum Teorisi; 89, 94
Everest Dağı; 186
Ewen, Harold; 171, 176-178, 181, 191, 214

F
Faraday, Michael; 16
Fermi, Enriko; 73, 138, 195, 233-234, 262
Feynman, Richard; 44, 151, 169, 242, 258
Fisher, Michael; 266
Foucault, Jean Bernard Leon; 23
Fowler, Ralph; 72, 217
Fransa; 183
Fraunhofer, Joseph; 22-24
Friedmann, Alexander A.; 212, 260
Friedrich, Bretislav; 28, 171, 257

G
Galileo; 185, 186
Gama, Vasco da; 185, 222
Gamow, George; 212, 215, 260
Gateway Takı; 230-231
Gauss, Carl Friedrich; 171-172, 179
Geiger, Hans; 32-33
George Washington Üniversitesi; 138

Glasgow Üniversitesi; 99
Gorter, C. J.; 120, 121
Göttingen; 64-66, 68-69, 81, 95
Groningen Üniversitesi; 120
güçlü kuvvet; 127, 244

H
Hall, Pupin; 58, 114
Hamburg Üniversitesi; 109, 112
Hänsch, Theodor 2, 5, 20, 150, 161, 196, 202-204, 206-208, 221, 229, 237, 239, 259-260
Harvard; 140, 142-143, 145, 148, 176-178, 186, 189, 242
Harvard University Press; 263, 266
Harvard Üniversitesi; 136, 139, 148, 186
Hawaii; 211, 219
Heidelberg; 203
Heisenberg, Werner; 2, 45, 61, 64-69, 72-74, 78-79, 84-86, 90, 95, 115-117, 129, 153, 238, 248, 254-256
Helgoland; 68, 69
Heraklit; 18
Herschbach, Dubley; 28, 257
Herschel, William; 16, 21-23, 259
Hilbert, David; 64-65
Hitler; 112-113
Houston, W. V.; 156, 201, 258
Hubble Uzay Teleskopu; 9, 210
Hughes, Vernon; 243-244, 261, 263

İ
İkinci Dünya Savaşı 123, 137, 139, 150, 156, 162, 174-175, 178, 187, 202
ince-yapı sabiti; 54, 56-57, 59
İngiliz Robert; 184
İsviçre; 5, 20, 45, 227

J
Jacob, Maurice; 20, 89, 253
Jüpiter; 1, 126

K
Keck Gözlemevi; 211
Kelvin, Lord; 8, 11, 23, 30-31, 101-102, 214, 235, 237
Kepler, Johannes; 46-47
Kirchhoff, Gustav Robert; 24
Kleppner, Daniel; 2-3, 13, 76, 105, 126, 183, 191, 227, 232, 235-237, 239, 259, 262-263, 266
Kopenhag; 43, 64-66, 85, 87, 115
Kopenhag Üniversitesi; 29
Kopernik; 46-47
Kramers, Hendrik; 67, 255

L
Lamb sapması; 158-159, 164, 166, 208, 244, 249
Lamb, Willis; 2-3, 150, 154, 156-160, 164, 166, 168, 208, 244, 248-249, 259, 263
Lavoisier, Antoine-Laurent; 12
Lawrence, Ernest; 104, 129
Leipzig; 115
Lenard, Philipp; 31
lepton; 243
Leucippus; 14
Levi; 232
Lorentz, H. A.; 63, 262
Los Alamos Laboratuarı; 60

M
Magellan Bulutları; 181
Magellan, Ferdinand; 181, 185
Manchester Üniversitesi; 31
Marsden, Ernest; 33
Massachusetts Institude of Technology; 75
Maxwell, James Clerk; 16, 19, 29, 56

McGill Üniversitesi; 99
MIT Radyasyon Laboratuarı; 139-140, 142, 157, 161
Michelson, Albert Abraham; 43, 152
Missouri; 230
Mott, Nevill; 92
Muonyum; 241, 243-244
Münih Üniversitesi; 45, 64, 203

N
Naturwissenschaften; 60
New Jersey; 139, 214
New York Üniversitesi; 99
Newton, Isaac; 18, 21-22, 36, 45, 56, 61-62, 68, 91, 128, 172, 185, 254

O
Oppenheimer, J. Robert; 95, 129-130, 151, 156
Otto Robert Frisch; 109, 138

P
Pauli, Wolfgang; 2, 45, 61, 65-66, 69, 72-75, 78, 80, 85, 90, 93, 112, 115, 129, 234, 255, 256
Pentagon; 161
Philosophical Magazine; 35, 41, 233, 253-254, 256
Physical Review; 100, 122, 147, 187, 201, 257-263
Pisagor; 24
Planck sabiti; 38-39, 44, 54-55, 58, 167, 197-199
Planck, Max; 38, 44, 62, 105, 203
Pound, Robert V.; 141-143, 145-148, 185-186, 258, 267
Pozitronyum; 241-242, 244
Prag; 47
Proceedings of the Royal Society; 73-74, 94, 253, 256, 262
Prometeus; 113
Prout Hipotezi; 13, 16-17
Prout, William; 13-18, 30, 99, 253
Prusya Akademisi; 233
Purcell, Edward; 2-3, 54, 59, 137, 139-142, 144-149, 171, 176-178, 181, 191, 214, 254, 258-259

Q
QED; 59, 152, 159-160, 167-169, 197-198, 200, 208, 242, 244, 249, 258

R
Rabi, I. I.; 2-3, 102, 109, 114-123, 125-126, 129-131, 133-134, 136, 139-141, 145, 149, 151, 156-157, 160-164, 166-168, 175, 187-189, 191, 235, 242, 252, 257-259, 263, 265
Ramsey, Norman; 2-3, 126, 130-131, 133, 141, 148, 183, 187-191, 193, 235, 257, 259, 265, 267
Rayleigh, Lord; 29
Rebka, Glen; 186
Ritter, Johann Wilhelm; 22
Roma; 114
Rosenfeld, Leon; 95, 137-138, 254, 262
Rutgers Üniversitesi; 148
Rutherford, Ernest; 17, 31-36, 38, 42, 46, 99, 104, 142, 254, 256
Rydberg sabiti; 5, 196, 198-202, 205, 207, 209, 229

S
sabit yörüngeler; 36
Samanyolu; 55, 173, 176, 179-181, 191, 214, 222
Schramm, David N.; 98, 210, 215-218, 261
Schrödinger, Erwin; 2, 76-88, 90, 97, 115, 129, 153-154, 255-256

Schuster, Arthur; 24, 253
Segrè, Emilio G.; 226, 261, 267
Series, George W.; 150, 196, 201, 203, 258-259
Shelter Island; 150-152, 156, 160, 162, 164, 191, 258
Smithsonian Müzesi; 146
Soddy, Frederick; 18, 99, 253, 256
Solvay Konferansı; 91
Sommerfeld, Arnold; 2, 38, 40, 44-54, 56-57, 64-65, 67, 69, 90, 94, 105-106, 109, 152-154
Stanford Üniversitesi; 133, 140, 203
Stern-Gerlach deneyi; 105-106, 109
Stern, Otto; 2, 40, 105-113, 115, 117-120, 149, 257-258
Sudbury Nötrino Gözlemevi; 10

T
Teorik Fizik Enstitüsü; 64
Thales; 14, 18
Thomson, J. J.; 17-18, 23, 29-31, 34-35, 253-254
Turner, Michael S.; 210, 261, 266

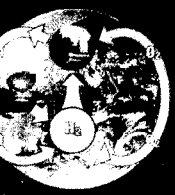
U
Uhlenbeck, George; 84
Ulusal Radyo Astronomi Gözlemevi; 176
Ulusal Standartlar Ofisi; 101
Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu; 198
Urey, Harold; 2, 98, 100-104, 112, 129, 257

V
Verschuur, Gerrit; 181
Vleck, J. H. Van; 73, 136, 145, 255, 257, 258

W
Wagoner, Robert V.; 98
Washington; 122, 138, 173, 212, 219
Weinberg, Steven; 231, 253, 261, 265
Weisskopf, Victor; 43, 250, 254
Westerhout, Gart; 179, 259, 266, 267
Wieman, Carl; 204, 232, 237, 239, 260, 262, 266
Williams, R. C.; 156, 178, 258
Wineland, David; 88, 256
Wollaston, William; 22

Y
Yıldızların Evrimi ve Kozmoloji Problemleri; 212

Z
Zacharias, Jerrold; 117-118, 130, 141, 189-190, 257, 259
zayıf kuvvet; 12, 127
Zeeman efekti; 106
Zeeman etkisi; 181
Zeeman, Pieter; 106, 181
Zeitschrift; 72, 233, 255, 257, 261-262
Zeitschrift für Physik; 72, 233, 255, 257, 261-262
Zeus; 113
Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü; 78
Zürih Üniversitesi; 78



Bir hid[redacted]n
Rigden[redacted]l
atomu[redacted]n
en büy[redacted]ı
kavramamıza ve birleştirmemize nasıl yardım ettiğini gösteriyor. Bu kitap, on dokuzuncu yüzyılın ortalarında atomun temel yaşlarının tanımlanmasına yönelik ilk girişimlerden, bundan birkaç yıl önce Bose-Einstein yoğuşmasının keşfine kadar, yüz yıldan fazla bir süreye yayılmış şaşırtıcı keşiflerin ve elde edilen sonuçların bir hikâyesi.

Kitap, bilginin öncülüğünü zorlayan fizikçilerin zekice tasarladıkları deneyler ve bakış açılarına yönelik cesurca ifade edilmiş ayrıntılarla dolu. Rigden'in hidrojenle ilgili bu şiirsel anlatımı, bir yandan fiziğin gerçekte nasıl geliştiği hakkında zihinlerde bir resim oluştururken, diğer yandan da yepyeni ve ufuk açıcı bir alternatif teşkil ediyor."

- Lawrence M. Krauss
New York Times Book Review

"Harika hikâyelerin muhteşem bir anlatımı... Rigden, fizikçilerin gözdesi olan atomik bir cevhere atfen yazdığı dokunaklı aşk mektuplarıyla, bilim insanlarına önemli bir hizmet sunuyor."

- Graham Farmelo
New Scientist

"Rigden... genel okuyucu için anlaşılır, sempatik bir kitap ortaya çıkartmak yönünde müthiş bir mücadeleyi göze almış görünüyor... Yazar bu kitabıyla, daha yaygın bir okur kitlesine hidrojenin zengin hikâyesini tanıtmak yönünde ta[redacted]ediyor."

- Peter Pesic
American Scientist



ISBN 978-605-5164-18-8



20.00 TL (KDV Dahil)