
Bilim
Graham Farmelo
EVREN SAYILARLA KONUŞUR
1495
Graham Farmelo
EVREN SAYILARLA KONUŞUR
Modern Matematik
Tabiatın En Gizli Sırlarını Ortaya Çıkarıyor
AYRINTI
BİLİM

GRAHAM FARMELO

18 Mayıs 1853'te Londra'da dünyaya gelen Farmelo, Cambridge Üniversitesi Churchill College'da fizik bölümü öğretim üyesidir, aynı zamanda Boston Northeastern Üniversitesi'nde de dersler vermektedir. Biyografi ve bilim yazarı olarak eserler veren Farmelo bilimsel iletişim alanındaki çalışmalarıyla da tanınmaktadır. Yazmış olduğu kitaplar arasında 2009 yılında Costa Biyografi Ödülü ve Los Angeles Times Bilim ve Teknoloji Kitabı ödüllerini alan *The Strangest Man, It Must Be Beautiful: Great Equations of Modern Science, Chuchill's Bomb, Creating Connecions* gibi eserler yer almaktadır.

Ayrıntı: 1495
Bilim: 17

Evren Sayılarla Konuşur
Modern Matematik Tabiatın En Gizli Sırlarını Ortaya Çıkarıyor
Graham Farmelo

Kitabın Özgün Adı
The Universe Speaks in Numbers
How Modern Maths Reveals Nature's Deepest Secrets

İngilizceden Çeviren
Aydın Çavdar

Yayıma Hazırlayan
İlbay Kahraman

Son Okuma
Barış Özdemir

Bu kitabın Türkçe yayım hakları Ayrıntı Yayınları'na aittir.

Bu kitabın Türkçe yayım hakları AnatoliaLit Agency aracılığıyla alınmıştır.

All rights reserved
© Graham Farmelo, 2019

Kapak Tasarımı
Gökçe Alper

Dizgi
Kâni Kumanovalı

Baskı ve Cilt
Deren Matbaacılık Ambalaj San. ve Tic. Ltd. Şti.
Beylikdüzü OSB Mah. Orkide Cad. No: 9/Z
Merkez Köyü / Merkez Bucağı / Beylikdüzü / İstanbul
Tel.: (0212) 875 48 86-87 – Fax: (0212) 875 48 88
Sertifika No.: 47881

Birinci Basım: Nisan 2021

ISBN 978-605-314-516-5
Sertifika No.: 10704

AYRINTI YAYINLARI
Basım Dağıtım San. ve Tic. A.Ş.
Hocapaşa Mah. Dervişler Sok. Dirikoçlar İş Hanı No: 1 Kat: 5 Sirkeci-İstanbul
Tel.: (0212) 512 15 00 Faks: (0212) 512 15 11
www.ayrintiyayinlari.com.tr & info@ayrintiyayinlari.com.tr

twitter.com/ayrintiyayinevi facebook.com/ayrintiyayinevi instagram.com/ayrintiyayinlari

Graham Farmelo

Evren Sayılarla Konuşur

Modern Matematik Tabiatın En Gizli Sırlarını Ortaya Çıkarıyor



Claire, Simon ve Adam'a

"Dünyanın harmonisi, Biçim ve Rakamlarla açıkça görülecek şekilde oluşturulmuştur ve Doğa Felsefesinin kalbi, ruhu ve tüm şiirselliği matematiksel güzellik kavramında vücut bulur."

D'Arcy Thompson,
On Growth and Form (1917)

içindekiler

teşekkür 13
giriş
evrene kulak vermek 17

1 matematik, bulutları dağıtıyor 27
2 elektrik ve manyetizma konularına ışık tutuluyor 49
3 yerçekimine yeniden ışık tutuluyor 74
4 kuantum matematiği 97
5 uzun ayrılık 118
6 devrim 145
7 kötü bir birliktelik? 161
8 şaka mı, büyü mü: sicime giden yol 179
9 sicimle bağlandılar 201
10 milenyuma giden yol 222
11 işlenmemiş cevher 246

son bölüm - olabilecek en iyi zamanlar 271
kaynakça 286
dizin 296

evren sayılarla konuşur

modern matematik
tabiatın en gizli sırlarını ortaya çıkarıyor

teşekkür

Tüm hayatım boyunca ya da en azından on bir yaşımdan beri bu kitap üzerinde çalıştığımı hissediyorum. Dirac'ın "Doğadaki matematiksel nitelik" olarak tanımladığı şeye olan ilgimi okulda ve üniversitede ve ardından da akademik hayatımda artıran tüm öğretmenlerime ve meslektaşlarıma çok büyük minnet borçluyum.

Birçok fizikçi ve matematikçi ile gerçekleştirdiğim sohbetlerin getirdiği kazanımlar olmasa bu kitabı yazamazdım. Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü direktörü Robbert Dijkgraaf, bilhassa cömert davranarak yalnızca cana yakın bir ortamda çalışmamı sağlamakla kalmadı, aynı zamanda fakültedeki matematikçi ve fizikçilerle de görüşmeme imkan verdi. Yaptığımız aydınlatıcı sohbetler için Steve Adler, Clay Córdova, Pierre Deligne, Freeman Dyson, Peter Goddard, Robert Langlands, Juan Maldacena, Nati Seiberg, Douglas Stanford, Karen Uhlenbeck, Heinrich Von Staden, Lauren Williams, Edward Witten ve Matias Zaldarriaga'ya minnettarım. Nima Arkani-Hamed'e de özel bir teşekkür borçluyum, hem projeye sonsuz bir destek verdi hem de birçok fizikçi ve matematikçiyle bir araya gelmeme imkan verdi.

Yaptığımız aydınlatıcı sohbetler için Steve Adler, Clay Córdova, Pierre Deligne, Freeman Dyson, Peter Goddard, Robert Langlands, Juan Maldacena, Nati Seiberg, Douglas Stanford, Karen Uhlenbeck, Heinrich Von Staden, Lauren Williams, Edward

Witten ve Matias Zaldarriaga'ya minnettarım. Nima Arkani-Hamed'e de özel bir teşekkür borçluyum, hem projeye sonsuz bir destek verdi hem de birçok fizikçi ve matematikçiyle bir araya gelmeme imkan verdi.

Enstitüde geçirdiğim dönemde kurumun muhteşem kütüphanesinden ve arşivinden çok fazla yararlandım. Yardımları için Karen Downing, Marcia Tucker, Kirstie Venanzi ve Judy Wilson-Smith'e teşekkür ediyorum. Matematik ve doğal bilimler kütüphanesi müdür Emma Moore gerçekten çok yardımsevere davrandı ve sonsuza dek kaybolduğunu düşündüğüm bilgileri bulup çıkarmak konusunda inanılmaz başarılıydı. Shelby White ve Leon Levy Arşiv Merkezlerinde Erica Mosner'a ve Casey Westerman'a tarihi bilgileri ortaya çıkarmaktaki yardımları için son derece minnettarım. Enstitüdeki birçok başka meslektaşım ve dostum da orada geçirdiğim zamanı son derece keyifli hale getirdiler: Mary Boyajian, Beth Brainard, Linda Cooper, Kathy Cooper, Dawn Dunbar, Lisa Fleischer, Helen Goddard, Jennifer Hansen, Nelson Lopez, Susan Olson, James Stephens, Nadine Thompson, Jill Titus, Sharon Tozzi, Michele Turansick ve Sarah Zantua-Torres.

2015 Yılı bahar aylarında Kuantum Yer Çekimi Temelleri programı esnasında Kaliforniya Üniversitesi Santa Barbara, Kavli Teorik Fizik Enstitüsü'nde geçirdiğim iki aylık süre bana büyük faydalar sağladı. Bu süreçte ve Stanford Lineer Hızlandırıcısı tesislerinde bulunduğum kısa sürede Tom Abel, Martin Breidenbach, David Gross, Lars Bildsten, Tom Banks, Lance Dixon, Steve Giddings, Ted Jacobson, Eva Silverstein, Dave Morrison ve Joe Polchinski ile sohbetlerimizden çok şey öğrendim.

Diğer araştırma enstitülerinde gerçekleştirdiğim daha kısa üç konaklama bana çok yardımcı olduç CERN'de, James Gillies deney araştırmacılarıyla yaptığım çok sayıda faydalı görüşmeye imkan verdi; görüştüğüm kişiler arasında genel direktör Fabiola Gianotti, Michelangelo Mangano, Gian Giudice, Federico Anitnori, Joel Butler, Michael Doser, Eckhard Elsen, Karl Jacobs ve Guy Wilkinson da vardı. Kanada Waterloo'daki Perimeter Teorik Fizik Enstitüsü'ne çağrıldığım için de çok şanslıyım, bu daveti yapan Enstitü Müdürü Neil Turok'a çok teşekkür ediyorum. Orada geçirdiğim heyecan verici bir hafta içinde birçok

bilim insanıyla görüşme fırsatı yakaladım, aralarında Freddy Cachazo ve Kevin Costello da vardı. Daha sonra meslektaşları Pedro Vieira ile de görüştüm. 2016 Yılında Fermilab'da bir saçılım-genliği konferansında Stephen Parke, Tomasz Taylor, Parameswaran Nair, Ruth Britto ve modern saçılım genliği teorisinin öncülerinin daha birçoğuyla uzun uzun konuşma imkanım oldu. Caltech'te saçılım genlikleri hakkındaki bir çalıştayda Hirosi Ooguri ve Jaroslav Trnka ile görüşme mutluluğunu yaşadım.

Birçok matematikçi, fizikçi ve tarihçi değerli vakitlerini ayırıp benimle uzun uzun görüştüler ve bana kendi görüşlerinden yararlanma imkanı verdiler: Merhum Sir Michael Atiyah, Jacob Bourjaily, Sir Simon Donaldson, Michael Duff, John Ellis, Howard Georgi, Sheldon Lee Glashow, Jeremy Gray, Michael Green, Jeff Harvey, John Heilbron, Peter Higgs, Nigel Hitchen, Andrew Hodges, Gerard 't Hooft, Bruce Hunt, Roman Jackiw, Sir Roland Jackson, Arthur Jaffe, Christian Joas, Jared Kaplan, Sir Chris Llewellyn-Smith, Lionel Mason, Andy Nietzke, Sir Roger Penrose, Sasha Polyakov, Pierre Ramond, Lisa Randall, Lord (Martin) Rees, John Schwarz, Sam Schweber, Jim Secord, Graeme Segal, Tara Shears, David Skinner, the late Elias Stern, Raman Sundrum, John Thompson, Jaroslav Trnka, Gabriele Veneziano, Steven Weinberg ve Peter Woit. Newton, Laplace, Maxwell ve çağdaşlarıyla ilgili konularda bana engin bilgileriyle yardımcı olan Simon Schaffer'e de bilhassa teşekkür ediyorum.

Bu uzmanların birçoğu (sayılamayacak kadar fazla kişi) metnin bazı bölümlerini kontrol etme inceliğini gösterdi ve onlara minnettarım. Ayrıca birçok başka tarihçi, bilim insanı ve filozof da bana kitabın bir veya daha fazla bölümü hakkında paha biçilmez tavsiyeler verdiler: Michael Barany, David Cahan, Philip Candelas, Elena Castellani, Thony Christie, Frank Close, Michael Dine, Jeroen van Dongen, Mordecai Feingold, David Forfar, Robert Fox, Alexander Goncharov, Niccolò Guicciardini, Hanoch Gutfreund, Rob Iliffe, Jorge José, Renate Loll, Lionel Mason, Michela Massimi, John Norton, Tom Pashby, Jürgen Renn, Siobhan Roberts, Andrew Robinson, Dan Silver, David Sumner and David Tong. Special thanks to my friends Ben Sumner and David Johnson. Onlar kitap üzerinde detaylı

analizleriyle çok yardımcı oldular. Geriye kalan tüm bilgi ve değerlendirme hataları elbette şahsıma aittir.

Bu projenin çeşitli aşamalarında arşivci ve kütüphanecilerden değerli yardımlar aldım: Aspen Fizik Merkezi'nde Candace Cross; Florida State Üniversitesi Dirac arşivinde Katie McCormick, Stuart Rochford ve eski çalışma arkadaşları Julia Zimmerman; Jerusalem Hebrew Üniversitesi Einstein arşivinde Orith Or Burla ve eski meslektaşı Barbara Woolf; Oxford Üniversitesi Nuffield College'da Elizabeth Martin; Edinburgh Kraliyet Topluluğunda Vicki Hammond ve William Duncan ve Cambridge Trinity College Wren Kütüphanesinde Jonathan Smtih.

Akademik yuvamda, yani Cambridge Üniversitesi Churchill College'da meslektaşlarım ve dostlarımla birçok ufuk açıcı sohbet gerçekleştirme hazzına eriştim. Hocamız Dame Athene Donald'a ve fakültenin tüm üyelerine teşekkür ediyorum. Çalışmama dostça bir ilgi gösterdikleri için Adrian Crisp, Helen Anne Curry, Mark Goldie, Ray Goldstein, Archie Howie, Neil Mathur, Allen Packwood, Richard Partington ve Sir David Wallace'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Elbette New York ve Londra'daki yayıncılarıma da teşekkür ediyorum. Basic Books'tan Lara Heimert sürekli yardımcı oldu ve Eric Henney birçok faydalı yorum ve öneri getirdi. Carrie Watterson büyük titizlikle metnin redaksiyonunu yaptı ve süreci neredeyse bütün sıkıntılardan arındırdı. Londra'daki Faber'e spekülatif bir girişim gibi görünebilecek bu kitabın arkasında durduğu için çok şey borçluyum. Stephen Page'e, eski meslektaşlarım Neil Belton'a ve Julian Loose'a ve Paul Baillie-Lane'e minnet borçluyum. Editörüm Laura Hassan'la birlikte çalışmak büyük bir zevkti, hiç vazgeçmeden beni cesaretlendirdi ve yapıcı önerileriyle anlatımın niteliğini büyük oranda artırdı.

Son olarak Paul Dirac'a teşekkür etmek istiyorum. Dirac'ın 1939'daki Scott Semineri bu ebedi konudaki algılarımı derinden etkiledi. Hiçbir zaman değerini yitirmeyecek bir seminerdi ve bize hala çok şey söylüyor.

Cambridge, Birleşik Krallık
Şubat 2019

giriş
evrene kulak vermek

"Saf düşüncenin gerçekliği kavrayabileceğine inanıyorum, tıpkı eski düşünürlerin hayal ettiği gibi."

Albert Einstein,
"Kuramsal Fizik Metodu Üzerine", 1933

"Einstein tam bir kaçık." Genç ve ukala Robert Oppenheimer, 1935 yılının başlarında Princeton'da Einstein'ı ziyaret etmesinin ardından, dünyanın en ünlü bilim insanını bu şekilde tanımlamıştı.[1] Einstein o dönemde yaklaşık on yıldır yeni ve cüretkâr bir teori geliştirmeye çalışıyordu ve bu teori, Oppenheimer ve diğerlerinin gözünde Princeton'daki bilge adamın yoldan çıkmış olduğunu çeşitli şekillerde gösteriyordu. Göründüğü kadarıyla Einstein, maddeyi en küçük ölçekte anlamak adına kuantum teorisi aracılığıyla atılan adımları görmezden gelmekteydi. Cüretkâr bir yeni teori arayışındaydı; amacı şaşırtıcı deneysel keşiflere karşılık vermek değil, entelektüel bir düşünce alıştırması gerçekleştirmekti; yalnızca hayal gücünü kullanıyordu, desteği de matematikti. Bu yaklaşım o dönemin bilim insanları arasında popüler olmasa da, en seçkin haleflerinden bazılarının günümüzde araştırma dünyasının ön saflarında başarıyla kullandığı bir metoda öncülük etmiş oluyordu.

1. Robert Oppenheimer'den kardeşi Frank'e, 11 Ocak 1935: Smith ve Weiner (ed.), (1980: 190). "Temel fiziğin" anlamına dair ilgi çekici yaklaşımlar için, bkz. Anderson (1972) ve Weinberg (1993: 40-50)

Oppenheimer ve o dönemdeki diğer birçok fizikçi, Einstein'ın matematiksel yaklaşımını talihsiz buldukları için pek de suçlanamazlar: her şeyden önce bu yaklaşım, son 250 yıldaki bilimsel araştırmaların öğrettiği ana noktalardan biriyle, yani Platon ve diğer düşünürlerin inandığı gibi saf düşünce kullanılarak tabiatın işleyişini anlamaya çalışmanın akıllıca olmayacağı anlayışıyla çelişiyordu. Geleneksel anlayışa göre fizikçiler, gerçek dünyada yapılan gözlemlerin ve deneylerin sonuçları aracılığıyla evrenin kendilerine teorileri hakkında ne söylediğini dikkatle dinlemeliydiler. Böylece teorisyenler, tabiat hakkında gerçekte bildiklerinden daha fazlasını bildiklerini zannetmekten sakınmış oluyorlardı.

Einstein ise elbette ne yaptığını biliyordu. 1920'lerin başlarından beri sıklıkla söylediği üzere, tecrübeleri ona şunu öğretmişti ki; ana amacına, yani doğanın en temel yasalarını keşfe giden yolda en iyi yöntem, matematiksel bir strateji izlemekti. 1925 yılında genç öğrencisi Esther Salaman'a şunu söyledi: "Tanrı'nın bu dünyayı nasıl yarattığını anlamak istiyorum. Şu ya da bu doğa olayıyla veya şu ya da bu elementin [özellikleriyle] ilgilenmiyorum. Tanrı'nın ne düşündüğünü anlamak istiyorum, gerisi sadece detay."[2] Ona göre "fizikçinin öncelikli ödevi", tüm evrenin işleyişinin altında yatan düzeni kavramaktı, atomların içinde salınan küçük partiküllerin davranışlarından uzay boşluğundaki galaksilerin sarsılmalarına kadar tüm düzeni anlamaktı.[3] Evrendeki çeşitliliğin ve karmaşıklığın altında yatan şeyin görece basit bir düzen olması unsuru ise, Einstein'a göre "bir mucizeden veya ebedi bir gizemden" daha az bir şey olarak değerlendirilemezdi.[4]

Matematik, her şeyin altında yatan bu düzeni ifade etmek adına eşi bulunmaz netlikte bir yol sağlar. Fizikçiler ve selefleri,

2. Salaman (1955: 371). Salaman'ın "spektrüm" şeklindeki teknik teriminin yerine, kendi çeviri değerlendirmem neticesinde köşeli parantez içindeki "özellikler" sözcüğünü kullandım.

3. "Araştırma İlkeleri" hakkında Einstein 1918: Einstein (1954: 226).

4. Einstein'dan Solovine'ye, 30 Mart 1952: Solovine (ed.), (1986: 131), Solovine'in "dünya" olarak kullandığı kelimeyi "evren" olarak değiştirdim, bu şekilde daha uygun olduğunu düşünüyorum (ç.n.). 1936 yılında Einstein da benzer bir saptama yaptı: "Evrenin en nihai gizemi, anlaşılabilirliğidir.": bkz. Einstein "Fizik ve Gerçeklik" üzerine, yer aldığı çalışma, *Einstein* (1954: 292).

yalnızca hemen burada Dünya'da geçerli olmakla kalmayıp aynı zamanda her yerdeki her şeye, zamanın başlangıcından en uzak geleceğe kadar uygulanabilen evrensel yasalar keşfetmeye muktedir olmuşlar ve bunları matematiksel dille ortaya koymuşlardır. Bu yolu izlemiş olan teorisyenlerin, ki aralarında Einstein da var, güç zehirlenmesi ve aşırı gurur içinde olmakla suçlanmaları doğaldır, ama tutku yoksunluğuyla itham edilemezler.

Yeni tabiat yasaları keşfetmek konusunda matematiğin sağlayabileceği potansiyel fayda, Einstein'ın tutkusu haline geldi. Fizik araştırmalarına getirdiği matematiksel yaklaşımı ilk olarak 1933 yılı baharında Oxford'da kamuya açık olarak verdiği bir seminerde ortaya koydu. Sakin ve özgüveni yüksek konuşmasında; teorisyenlere, sadece yeni deneysel bulgulara bakarak (yani kanıksanmış yöntemle)temel yasalar keşfetmeye çalışmamaları tavsiyesinde bulundu, matematikten ilham almaları gerektiğini söyledi. Bu yaklaşım o kadar radikaldi ki dinleyici kitlesi içindeki fizikçileri muhtemelen şaşkına çevirdi, gerçi elbette hiç kimse ona karşı çıkmaya cüret edemedi. Öğütlediği şeyi uygulamaya geçirdiğini de söyledi; yerçekimi teorisiyle elektrik ve manyetizma teorilerini birleştirebilmek için matematiksel bir yaklaşım kullanıyordu. Bu teorilerin matematiksel yapılarını tahmin etmeye çalışarak bu amacaulaşılabileceğini düşünüyordu; iki teorinin matematiği, onları birleştirebilmek açısından potansiyeli en yüksek araçlardı.

Einstein'ın çok iyi bildiği gibi, bu türden bir matematiksel strateji diğer bilimsel disiplinlerin çoğunda işlemezdi, çünkü diğer disiplinlerin teorileri genellikle matematiksel dil çerçevesi içinde değildi. Örneğin Charles Darwin doğal seleksiyonla evrim teorisini ortaya koyarken hiç matematik kullanmamıştı. Benzer şekilde Alfred Wegener de kıtaların kayması teorisinin ilk tanımında yalnızca sözcükleri kullanmıştı. Böylesi teorilerin muhtemel yetersizliği, kelimelerin aldatıcı olmasından kaynaklanır –kelimeler muğlaktır ve yanlış anlaşılmaya açıktır–; oysa matematiksel kavramlar kesindir, iyi tanımlanmıştır ve mantıksal, yaratıcı gelişime yatkındır. Einstein, matematiğin bu niteliklerinin teorik fizikçiler için bir nimet olduğunu düşünüyordu ve fizikçi bundan sonuna kadar faydalanmalıydı.Meslektaşlarının çok azı onunla hemfikirdi, en ateşli hayranları bile ona

dudak büküyordu. Dilinin kemiği olmayan arkadaşı Wolfgang Pauli, Einstein'ı fizikten kopmakla suçlayacak kadar ileri gitti: "Bütünüyle matematiğe geçmiş olmandan dolayı seni tebrik etmeliyim (veya acaba taziyelerimi mi iletmeliyim?). ... Beni çürütmekle uğraşmaya yöneltmek istemiyorum seni, böylece senin [bu yeni] teorinin ölümü zaman kaybetmemiş olur."[5] Einstein, böylesi yorumları bir kenara itip yolunda yalnız yürümeye devam etti, gerçi çabalarının karşılığında elinde gösterecek çok az şeyi vardı: modern fiziğin Don Kişot'u haline gelmişti.[6] 1955 yılındaki ölümünün ardından önde gelen fizikçiler arasındaki ortak görüş, yaklaşımının elim başarısızlığının onu eleştirenleri haklı çıkardığı yönündeydi; ama bu değerlendirmenin henüz erken olduğu ortaya çıkacaktı.

Gerçi Einstein da atom altı düzeyde madde teorilerindeki gelişmeleri görmezden gelmesi açısından hatalıydı, ama kendisini hakir görenlerin çoğundan daha ileri görüşlüydü. Ölümünden yaklaşık yirmi yıl sonra, 1970'lerin ortalarında, birçok önemli fizikçi onun ayak izlerini takip eder durumda olacaktı, saf düşünce gücünü kullanarak –matematikle desteklenmiş düşünce gücünü kullanarak– iyi kurgulanmış ancak maalesef kusurlu teoriler geliştireceklerdi. O dönemde ben de toy bir öğrenciydim, bu zihinsel strateji karşısında temkinliydim ve bu stratejinin bir yere varması ihtimali güç, makus talihli bir yaklaşım olduğuna kendimi büyük ölçüde inandırmıştım. Teorisyenler için ilerlemenin en iyi yolunun deneysel bulguların rehberliğine güvenmek olduğu bence çok aşikârdı. Kanıksanmış yöntem de buydu ve atom altı güçlere dair modern teoriyi oluşturmuş olan teorisyenlere büyük bir hediye sunmuştu. Daha sonraları parçacık fiziğinin Standart Modeli olarak anılacak olan teori adeta bir mucizeydi: yalnızca birkaç basit prensibe dayanan bu teori, kısa sürede atom altı parçacıkların davranışını açıklamak açısından kendinden önceki tüm girişimlerin önüne geçti. Her atomun iç işleyişini gayet güzel açıklıyordu. O dönemde arka sıralarda oturmuş, epik bir çağdaş dramanın sahnelenişini izleyebildiğim için ne kadar şanslı olduğumun ise tam olarak farkında değildim.

5. Pauli'den Einstein'a, 19 Aralık 1929: Pais (2000: 216).
6. Schweber (2008: 282).

O yıllarda etkileyici görünen, ama deneylerle ancak uzaktan bağdaşan egzotik yeni teoriler hakkında onlarca seminere katıldığımı hatırlıyorum. Bununla beraber bu teorilerin savunucuları bir şeyler yakalamak üzere olduklarından oldukça emindi, bunun sebeplerinden biri de teorilerin ilgi çekici yeni matematiksel temeller içeriyor oluşuydu. Bana göre bu yaklaşım fizik araştırmaları açısından tuhaf bir yöntemdi; tabiatın bize ne söylediğini dinlemek bence çok daha iyi bir düşünceydi, çünkü tabiat zaten asla yalan söylemezdi.

Yeni bir rüzgârın esmeye başladığını hissedebiliyordum ve görebildiğim kadarıyla bu rüzgâr pek de çekici olmayan matematiksel bir yöndeydi. Şahsen bu trendin sönüp gideceğini bekliyordum, ama bir kez daha yanılmıştım. 1980'lerin başlarında, atom altı parçacıklar ve güçler üzerine yapılan deneylerden gelen yeni bilgilerin akışı şelale gibi olmaktan çıkıp damlacıklara dönüşürken, bu rüzgâr daha da momentum kazandı. Bu sebeple daha fazla sayıda teorisyen, matematikle desteklenen saf düşünce gücüne yöneldi. Ve böylece temel fiziğe yeni bir yaklaşım oluştu: evrenin temel bileşenlerinin parçacıklar değil, bir sicimin küçük parçaları olduğunu varsayarak doğaya en küçük ölçekte birleşik bir açıklama getirmeye çalışan sicim teorisi.* Kuramcılar bu teoride ilerleme kaydettiler ancak büyük çabalara rağmen deneylerle teyit edilebilecek tek bir tahminde bile bulunamadılar. Benim gibi şüpheciler de bu teorinin matematiksel bilimkurgudan öteye gidemeyeceğini düşünmeye başladı.

Bununla beraber önde gelen teorik fizikçilerin birçoğunun, doğrudan deneysel destek olmamasına rağmen yılmamış olmalarını da etkileyici buluyordum. Teorinin potansiyelini ve dünya çapındaki matematikçiler için bile ufuk açıcı olacak şekilde matematikle olan bağlantılarının heyecan verici derinliği ile çokluğunu tekrar tekrar vurguluyorlardı. Bu zenginlik, teorik fizikçilerle matematikçiler arasındaki işbirliğinin daha yüksek seviyeye çıkarılmasına yardımcı oldu ve özellikle de matematikçiler için birçok akıl almaz sonuç yarattı. Matematiğin

* Sicim teorisi, parçacık fiziğinde, kuantum mekaniği ile Einstein'ın genel görelilik kuramını birleştiren bir teoridir. "Sicim" ifadesi, klasik yaklaşımda "sıfır boyutlu noktalar" şeklinde tarif edilen atomaltı parçacıkların, aslında "bir boyutlu ve ipliksi varlıklar" olabileceği varsayımına dayanır (y.h.n.).

fizik için vazgeçilmez olmasının yanı sıra fiziğin de matematik için vazgeçilmez olduğu her zamankinden daha net bir şekilde görülüyordu.

Matematik ve fiziğin bu şekilde bir araya getirilişi, zaman zaman "kuramcıların kuramcısı" olarak da tanımlanan fizikçi Paul Dirac tarafından 1930'larda ortaya konan görüşü de örneklendirmiş görünüyordu.[7] Dirac, temel fiziğin, matematiksel güzelliği gittikçe artan teoriler aracılığıyla ilerlediğine inanıyordu.[8] Bu trend, onu; fizikçilerin her zaman güzel matematik arayışında ("mantıktan ziyade bir inanç meselesi olarak") olması gerektiğini düşünmeye ikna etmişti.[9] Bu inancın sicim uzmanları için neden özel bir cazibesi olduğunu görmek güç değildi: teorilerinin bol miktarda matematiksel güzelliği vardı, dolayısıyla Dirac'ın düşünce şekline göre buna orantılı olarak çok şey vaat ediyordu.

Sicim teorisinin egemenliği, modern temel fiziğe güçlü bir matematiksel ton vermek açısından çok şey yaptı. Dikkatini teorik fizik üzerinde yoğunlaştırmış parlak bir matematikçi olan Michael Atiyah, daha sonraları matematiğin fiziği ele geçirişi üzerine kışkırtıcı bir yazı kaleme aldı.[10] Bununla beraber bazı fizikçiler, en yetenekli meslektaşlarının birçoğunu, birçok durumda test edilmesi imkânsız olan muğlak matematiksel teoriler üzerinde çalışırken görmekten rahatsızlık duyuyordu. 2014 yılında Amerikalı deney araştırmacısı Burton Richter, bu trendden duyduğu endişeyi dobra dobra özetledi: "Görünen o ki bu teori kısa süre sonra gerçek dünyada yapılan gerçek deneylere değil, kuramcıların kafalarında yapılan hayali deneylere dayanır hale gelecek."[11] Sonuçların felaket olmasından korktuğunu ekliyordu: "Teorisyenler yeni ilham kaynaklarını yeni gözlemlerden değil, matematikten almak zorunda kalacaklar. Bana göre bu, bildiğimiz şekliyle temel fizik açısından araştırmaların sonu olacak."

Modern teorik fiziğin durumuyla ilgili hayal kırıklığı, halka açık bir tartışma konusu haline bile geldi. Yaklaşık olarak son on

7. Farmelo (2009: 188)
8. Farmelo (2009: 300-301)
9. Dirac (1954: 268-269)
10. Atiyah (2005: 1081); Atiyah'la söyleşi, 15 Nisan 2016
11. Burton Richter'le söyleşi, 30 Nisan 2015 (daha sonra yorumlarını e-mail ile de doğrulamıştır). Richter, Temmuz 2018'de hayatını kaybetti.

yılda birçok önemli yorumcu sicim teorisini hedef aldı, teoriyi "masal fiziği" olarak tanımlıyorlardı, onlara göre bu teorinin "yanlış olması bile mümkün değildi" ve bir nesil teorik fizikçi "matematiğe kapılıp gitmiş" olmakla suçlanıyordu.[12] Artık sıklıkla medyadaki bazı eleştirmenlerin, özellikle de blog dünyasındaki eleştirmenlerin şikâyetlerini duyuyoruz, modern fiziğin yeniden gerçek bilimin doğru dürüst ve dar yoluna girmesi gerektiğini söylediklerini işitiyoruz.

Bu görüş yanılgı içindedir ve gereksiz ölçüde kötümserdir. Bu kitapta günümüzün teorik fiziğinin aslında bütünüyle mantıklı ve potansiyeli son derece yüksek bir yol izlediğini ortaya koymaya çalışacağım. Evvela, bu yaklaşım mantıksal açıdan ve yaratıcılık olarak Isaac Newton'a kadar dayanan yüzyılların kazanımlarından yola çıkar. Newton, hareket kurallarını ve yerçekimini tanımlayan matematiksel yasaları ortaya koyarken, gerçek dünyayı tanımlamak açısından matematik temelli ve deneysel olarak kanıtlanabilir ilk çerçeveyi oluşturmak anlamında herkesten fazlasını yapmıştır. Newton'ın açıkça ortaya koyduğu gibi, uzun vadeli amaç gitgide daha az kavram çerçevesinde evrene dair gitgide daha fazla şey algılamaktır.[13] Günümüzün önde gelen kuramcıları, yirminci yüzyılın granitten yapılmış iki temel taşı üzerinde durarak bu programı takip ediyor: Newton'ın uzay ve zaman görüşünün bir modifikasyonu olan Einstein'ın temel izafiyet teorisi ve maddenin davranışını en küçük ölçekte tanımlayan kuantum mekaniği. Bugüne kadar hiçbir deney bu iki teoriyi çürütemedi, dolayısıyla araştırmalar için mükemmel bir temel oluşturuyorlar.

Einstein'ın sıklıkla işaret ettiği gibi, kuantum mekaniği ve temel izafiyet teorisinin bir arada bulunması son derece güç. Ama fizikçiler, bu ikisini etkileyici derecede başarılı tahminler yürütmeye imkân veren bir teori içinde birleştirmeyi sonunda başardılar; buna ilişkin deneysel ölçümlerle yalnızca on birinci ondalık basamakta sapma gösteren bir duruma ulaştılar.[14] Tabiat

12. "Masal fiziği", bilim yazarı Jim Baggott tarafından sevilen bir ifadedir; teorisyen ve üretken blogger Sabine Hossenfelder'in 2018'de yazdığı bir kitabın başlığı Lost in Math'tir [Matematikte Yitip Gitmek]; fizikçi Peter Woit'nin popüler blog'unun adı, "Yanlış Olması Bile Mümkün Değil" şeklindedir.
13. Iliffe (2007: 98)
14. Feynman (1985: 7)

bize yüksek sesle ve açıkça bu iki teorinin dikkate alınması gerektiğini söyler gibi duruyor. Günümüzün teorik fizikçileri bu başarıyı temel alarak yol alıyorlar; evrensel olmayı amaçlayan her yeni teorinin hem temel izafiyet hem de kuantum mekaniği teorileriyle uyumlu olması gerektiğinde ısrar ediyorlar. Bu ısrar kimsenin öngörmediği sonuçlar doğuruyor: yalnızca fizik alanında yeni gelişmeler doğurmakla kalmıyor (sicim teorisi dahil), aynı zamanda matematiğin geldiği noktayla da bir dizi bağlantı oluşturuyor. Matematik ve fiziğin birbiri içine örülüşü daha önce hiç bu kadar net olmamıştı: temel fizikteki yeni kavramlar matematikteki yeni kavramlara ve matematikteki gelişmeler de temel fiziktekilere ışık tuttu. Önde gelen birçok fizikçinin, yalnızca deneylerden değil, aynı zamanda izafiyet teorisi ve kuantum mekaniği kombine edildiğinde ortaya çıkan matematikten bir şeyler öğrenilebileceğini düşünmelerinin sebebi de bu.

Matematiğin fizikteki baş döndürücü etkinliği, beni öğrencilik yıllarımdan beri büyülemiştir. Matematik derslerimizde öğrendiğimiz soyut tekniklerin fizik derslerinde uğraştığımız problemleri çözmek açısından ne kadar uygun olduğunu görünce çok şaşırdığımı hatırlıyorum. Benim için en dikkat çekici noktalardan biri, bilinmeyen miktardaki x ve y'yi birbiriyle bağlantılandıran bazı matematiksel denklemlerin gerçek dünyayı tanımlayan gözlemlere de uygulanabiliyor oluşuydu; x ve y, deney araştırmacılarının ölçebildiği miktarları temsil etmiş oluyordu. O sıralar henüz yeni öğrenmiş olduğumuz matematikle desteklenen birkaç basit prensibin, golf toplarının izlediği yoldan gezegenlerin yörüngelerine kadar her şeyi doğru şekilde tahmin etmek için kullanıldığını görmek beni hayrete düşürüyordu.

Hatırladığım kadarıyla okuldaki öğretmenlerimizden hiçbiri, soyut matematiğin kendini fiziğe böylesine zarafetle, hatta mucizevi denebilecek şekilde sunuşu hakkında yorumda bulunmamıştı.[15] Üniversitedeyken, temel matematiği işin içine katan teorilerin gerçek dünya hakkında bu kadar çok şey söyleyebilmesinden daha da fazla etkilenir olmuştum: akım taşıyan tellerin yakınındaki manyetik alanların biçimlerinden atomların içindeki parçacıkların hareketine kadar birçok konuda çok şey söylüyordu. Matematiğin fizik için son derece vazgeçilmez

15. Yang (2005: 74).

oluşu bilimsel hayatın ayrılmaz bir unsuru gibi görünüyordu. Hikâyenin diğer tarafını ise çok sonraları görebildim: fizik de matematik için vazgeçilmezdi.

*

Bu kitaptaki başlıca amaçlarımdan biri, matematiğin fizikçiler için faydalı olduğunu ispatlamaya çalışmanın yanı sıra, evrenin işleyişine dair paha biçilmez ipuçları sunduğunun da altını çizmek. Newton'ın, yerçekimi yasasını oluşturmak ve uygulamak için matematiği çığır açıcı şekilde kullanışıyla başlayacağım; Newton, bu yasayı, gözlemlere ve titiz ölçümlere karşı tekrar tekrar test etmişti. Bir sonraki aşamada, tabiatı anlamamız açısından büyük sonuçlar doğuran bir matematiksel çerçeve kullanılarak elektrik ve manyetizmanın matematiksel yasalarının nasıl keşfedildiğini anlatacağım.

Sonrasındaysa iki çığır açıcı keşfi ele alıyorum: ilki temel izafiyet, ikincisi de kuantum mekaniği, yani fizik alanında yüzyıllardır görülen en devrimci teori. Einstein, yerçekimi anlayışımızı geliştirmek için izafiyeti kullanırken, kendisi için pek bilinmedik bir disiplin olan matematikten yararlanmak zorunda kalmıştı ve bu yaklaşımın getirdiği başarı, ileri matematiğin fizikçiler için faydası hakkındaki görüşünü değiştirmiş oldu. Benzer şekilde, fizikçiler maddeyi anlamak için kuantum mekaniğini kullandıklarında, doğanın en küçük parçacıklarının her birinin davranışı hakkındaki bakış açılarını değiştiren aşina olmadıkları bir matematiğin unsurlarını kullanmak zorunda kaldılar.

1970'lerin ortalarından beri birçok yetenekli düşünür, matematik ile fizik arasındaki verimli ortak zemine çekilmiştir. Yine de çoğu fizikçi bu alandan uzak durmuş, daha geleneksel ve ihtiyatlı yolu seçerek doğanın bize kendi sırlarını deneyler ve gözlemler aracılığıyla açmasını beklemiştir. Princeton'da İleri Araştırmalar Enstitüsü Bölümünde Einstein'ın ardından gelen kişilerden biri olan Nima Arkani-Hamed, bu geleneksel yaklaşımı benimseyerek isim yapmıştır. Bununla beraber, yaklaşık on yıl kadar önce, atom altı parçacıklar arasındaki çarpışmaları araştırmaya başladığında o ve meslektaşları kendilerini dünyanın ileri gelen matematikçilerinden bazılarıyla aynı konular üzerinde çalışırken buldular. Ve Arkani-Hamed, kısa sürede ileri

matematiğin temel fizik açısından faydasını hararetle destekleyen fizikçilerden biri haline geldi.

Diğer yandan, tepeden tırnağa bir fizikçi olarak kalmaya da devam etmiştir: "Bir numaralı önceliğim her zaman fizik olacak: evrenin altında yatan yasaları keşfetmeye yardımcı olmaya çalışacağım" demektedir. "Doğaya mümkün olduğunca dikkatle kulak vermeliyiz, bize bir şeyler öğretebilecek her gözlem ve ölçümden faydalanmalıyız. Nihayetinde deneyler her zaman teorilerimizin yargıcı olacaktır." Ama matematiksel çalışması, fizik araştırmaları hakkındaki düşüncelerini radikal şekilde değiştirmiştir: "Doğayı yalnızca deneylere dikkat kesilerek değil, aynı zamanda deneylerin sonuçlarının en derin matematikle nasıl açıklanabileceğini anlamaya çalışarak dinleyebiliriz. Denebilir ki, evren bizimle sayılar aracılığıyla konuşmaktadır."[16]

16. Arkani-Hamed'le söyleşi, 10 Mayıs 2018.

1
matematik, bulutları dağıtıyor

"Antik dönem filozoflarının zihinlerini öylesine sık kurcalayan tüm o şeyler
İlim yuvalarını da yüksek sesli tartışmalarla nafile meşgul ettiler
Şimdi matematik dağıttı bulutları ve tüm bunlar, gözler önüne serildiler."

Edmond Halley,
Newton'a ve *Principia* eserine övgü, 1687

Einstein, başarıları konusunda alçakgönüllüydü. Gerçi bilim tarihindeki konumunu biliyordu, kendinden önceki devlerin omuzlarında yükseldiğinin farkındaydı ve bu omuzların en genişi de Isaac Newton'ınkilerdi. İngiliz Newton'ın ölümünden iki yüzyıl sonra Einstein şöyle yazdı: "Bu parlak deha, kendinden önce veya sonra hiç kimsenin yapamadığı ölçüde batı düşüncesinin, araştırma ve uygulamaların gidişatını belirledi."[1] Einstein'ın daha sonraları belirttiği gibi, Newton'ın en büyük başarıları arasında "teorik fiziğe dair kapsamlı, işleyebilen bir sistemin ilk yaratıcısı" olması da vardı.[2]

Newton hiçbir zaman "fizikçi" ve "bilim insanı" terimlerini kullanarak konuşmadı, bu terimler onun ölümünden en az yüz

1. Einstein (1954: 253).
2. Einstein (1954: 273).

yıl sonra ortaya çıktı.[3] Kendini daha ziyade Tanrı'ya bağlı bir insan olarak görüyordu, matematikçi ve doğa filozofu oluşu ona göre ikinci plandaydı, Tanrı'nın yarattıklarının bütününü mantık yürütme ve deneylerden oluşan bir kombinasyon kullanarak rasyonel olarak kavramayı deneyen biriydi. Doğa felsefesine matematiksel yaklaşımını ilk olarak 1687'de, *Principia* adlı eseriyle ortaya koydu. *Principia*, 3 ciltten oluşan, kendisini kısa süre sonra ünlü yapan bir kitaptı ve Newton'ın, Aydınlanmanın kurucularından biri olarak gösterilmesini sağladı. O, ilk basımın önsözünde, ortaya attığı şeyin, "yeni bir felsefe yürütme şeklinden" daha azı olmadığını açıkça belirtmişti.[4]

Newton, göründüğü kadarıyla tüm çağdaşlarının en iyi ilerleme yöntemi olarak benimsediği çalışma yolunu reddetmişti. Çağdaşları, tabiat sanki anlaşılması gereken dev bir makineymişçesine tabiatın nasıl işlediğini açıklayabilecek mekanizmalara ilişkin tahminler yürütüyorlardı. Newton ise maddenin hareketine, Yerküre'ye ve kâinat sistemine odaklandı; bunlar, *matematiği* kullanarak kesin olarak tanımlayabildiği unsurlardı ve Tanrı'nın yaratımlarının bir bölümüydü. En dikkat çekici nokta olarak da şu konuda ısrar ediyordu ki, bir teori yalnızca gerçek dünya hakkındaki en kesin gözlemlere dair yaptığı açıklamaların doğruluğuna göre yargılanmalıydı. Bu açıklamaların deneysel belirsizlikler doğurması halinde teorinin modifiye edilmesi ya da yerine yenisinin oluşturulması gerekiyordu. Günümüzde tüm bunlar çok aşikâr görünmektedir, ancak Newton'ın zamanında bu yaklaşım radikal bir düşünce konumundaydı.[5]

Newton, *Principia* adlı çalışmasını yayımladığında, Cambridge Trinity College'da, şimdi aralarında Heffers Kitapçısının da olduğu bir dizi dükkâna bakan odalarda sakin bir bekâr hayatı yaşayan kırk dört yaşında bir profesördü.[6] Neredeyse yirmi yıl kadar öncesinde üniversite onu Lucasian Matematik Profesörlüğü kürsüsüne atamıştı, halbuki o, konuyla ilgili hiçbir şey yayımlamış değildi. Matematik onun ilgi alanlarından yal-

3. Ross (1962: 72).
4. Cohen ve Whitman (Çev.), (1999: 27-29)
5. Cohen ve Whitman (Çev.), (1999: 29). Newton'ın bilim yapma şekline dair en net saptamalar için bkz. Newton'ın Principia adlı eseri: http://apex.ua.edu/uploads/2/8/7/3/28731065/four_rules_of_reasoning_apex_website.pdf
6. Newton'un o dönemdeki odası E3 Great Court idi.

nızca biriydi, Cambridge'de aslen yeni bir tür teleskop tasarlayıp yapmasıyla biliniyordu; bu teleskop da onun olağanüstü pratik yeteneklerinin bir kanıtıydı.

Dindar ve katı bir Protestan olan Newton, dünyanın yaratılmasında Tanrı'nın rolünü anlamak için dünyaya gelmiş olduğunu düşünüyordu ve Hıristiyan öğretisini, birçok insanın puta tapma ve batıl inanç eğiliminden faydalanan kimselerin ve yoldan çıkmış papazların elinden kurtarmaya kararlıydı.[7] Dolayısıyla bu ve diğer tüm çalışmalarına tükenmek bilmez bir enerjiyle ve çok yoğun bir konsantrasyonla eğildi, hatta bazen yemek yemeyi bile unutuyordu.[8] Bu asabi ve şüpheci akademisyene göre hayat bir şaka olamazdı; zaman zaman yüzünde bir gülümseme belirirdi, ama güldüğü çok az görülmüştü.[9]

Newton, tanıdıklarını odasına çok az davet ederdi ve başarılarına oranla çok az uzman onun yeteneğine hak ettiği ölçüde değer verirdi. Yeni bilgilerini paylaşmakla ilgilenmiyordu ve bir keresinde "eliyle yazdıklarının basılmasını" istemediğini belirtmişti; o dönemde yeni sayılabilecek basım kültürü ona göre değildi.[10] Yakın çevresine kimyager Francis Vigani de dahildi, ama büyük düşünüre bir rahibeyle ilgili "lakayt bir hikâye" anlatmış olması, Newton'ın onunla irtibatını kesmesi için yeterli oldu.[11]

Newton'ın doğa felsefesine ilişkin yeni planı ortaya birdenbire çıkmadı; onlarca yıllık fikir ve araştırma aşamalarından sonra geldi. *Principia*'nın giriş cümlelerinde minnet duyduğu kişilere yer verdi: ilk olarak; her şeyden öte, hareketi anlamanın gereğine odaklanmış olan antik Yunanlılara, sonrasında ise "tabiat fenomenini matematiksel yasalara indirgeme görevini üstlenmiş olan" yakın dönem düşünürlerine teşekkür ediyordu.[12] Newton'ın başarısının arka planını anlamak adına, Avrupalılara düşünme sanatını öğretmiş olan antik Yunanlılardan başlayarak bu etkenlere kısaca bakmak bilgilendirici olacaktır.

---

7. Iliffe (2017: 14-16)
8. Feingold (2004: 5)
9. Bkz. William Stukeley'nin ifadeleri, 55. takiben şurada yer alır: http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/diplomatic/OTHE00001
10. Iliffe (2017: 124)
11. Iliffe (2017: 4)
12. Cohen ve Whitman (Çev.), (1999: 27)

Antik Yunanlıların modern anlamda bilim (İngilizce "science" kelimesi, Latince "bilgi - ilim" anlamındaki "scienta" kelimesinden gelir) icra etmeye en çok yaklaştıkları nokta, filozof Aristo'nun (MÖ 384-322) çalışmalarıydı. Aristo, etrafımızdaki dünyanın karmaşasının altında doğanın, insanların keşfedebileceği ilkeler çerçevesinde işlerlik gösterdiğine inanıyordu ve ona göre bu ilkeler, işgüzar ilahi güçlerin sürekli karıştığı ilkeler değildi.[13] Antik dönemin tüm felsefe ekolleri arasında *physica*'ya (*physis* kelimesinden türetilmiş bir sözcük, "doğa" anlamını taşır) en fazla ilgi gösteren ekol Aristo ekolüydü; *physica*, alanı astronomiden psikolojiye kadar uzanan araştırmalar içeriyordu. "Fizik" kelimesi de buradan türemiştir, ancak on dokuzuncu yüzyılın başlarına kadar modern anlamını kazanmamıştır.

Aristo'nun çalışmalarının geniş bir sahaya yayılmış olması –kozmolojiden zoolojiye ve şiirden etiğe kadar– onu doğa hakkında belki de tarihimizin en etkili düşünürü yapmıştır. Doğal dünyanın, herhangi bir maddeyi etkileyebilen her türlü değişimin (bu değişimler arasında maddenin şekli, rengi, boyutu ve hareketi sayılabilir) ardındaki sebepleri açıklayan genel ilkelerle tanımlanabileceğine inanıyordu. Kitabı *Physica* da dahil olmak üzere bilim üzerine yazdıkları, çoğu modern okura tuhaf görünebilir; çünkü dikkatli gözlemlerinin katkısı olsa da dünyayı sadece saf mantık kullanarak algılamaya çalışıyordu.

Aristo'nun dünya görüşünün bir özelliği, işin içinde matematiğin olmayışıydı. Örneğin bilim hakkında düşünmeye başladığında, halihazırda binlerce yıllık temelleri olan aritmetik ve geometrinin unsurlarını kullanmayı reddetti. Matematiğin bu iki branşı da beşeri deneyimlere dayanıyordu ve gerçek dünya gözlemlerinden yola çıkarak bütünüyle genel bir soyutlamaya doğru yönelen ve böylece hayati bir adım atmış olan düşünürler tarafından geliştirilmişti. Örneğin insanlar iki sopa, iki kurt, iki parmak ve benzeri durumları 2 sayısının soyut kavramının varlığına doğru genellediklerinde aritmetiğin en temel unsurları başlamıştır; bu sayı herhangi bir somut objeyle ilişkili değildir. Bu derin bir kavrayıştı, gerçi ilk olarak ne zaman gerçekleşti-

13. Heilbron (2015: 5-9)

ğini söylemek kolay değil. Geometrinin başlangıcını -uzayda noktalar, çizgiler ve açılar arasındaki ilişkiler- tarihlendirmek daha kolay: yaklaşık MÖ 3000 yıllarında, antik Babil'de ve İndus Vadisi Uygarlığı'nda insanlar karayı, denizi ve gökyüzünü incelemeye başladıklarında bu adımlar atılmıştı. Ama Aristo'ya göre bilimde matematiğe yer yoktu çünkü matematiğin "izlediği metot doğa bilimiyle örtüşmüyordu".[14]

Aristo'nun matematiksel düşünceyi reddedişi, hocası Platon'un ve antik dönemin bir başka çok ünlü filozofunun, belki de hiçbir zaman var olmamış olan Pisagor'un (onun öğretileri başkalarının çalışması olabilir) felsefesine aykırıydı. Pisagorcular aritmetik, geometri, müzik ve astronomi konularında araştırmalar yaptılar ve tüm sayıların son derece önemli olduğu görüşünü benimsediler. Örneğin müzikal armonilerle geometrik objelerin özellikleri arasındaki ilişkiyi açıklamak konusunda tam sayıların gösterdiği olağanüstü fayda, Pisagor ekolünü, evrenin çalışma şeklini temel olarak anlamak açısından tam sayıların gerekli olduğuna inanmaya sevk etti.

Platon, matematiğin felsefe için temel konumda olduğunu düşünüyordu ve geometrinin dünyayı anlamayı sağlayacağı inancındaydı. Platon'a göre etrafımızdaki karmaşık gerçeklik, bir anlamda, matematiğin soyut dünyasında oldukça farklı şekilde varolan kusursuz matematiksel objelerin gölgeleriydi. O dünyada şekiller ve diğer geometrik objeler kusursuzdur; noktalar sonsuz ölçüde küçük, çizgiler kusursuz ölçüde doğrusal, düzlemler tam anlamıyla düzdür vb. Böylelikle Platon, örneğin aşağı yukarı dörtgen olan bir masa üstü yüzeyini, kusursuz bir dörtgenin "gölgesi" olarak algılar; bu kusursuz dörtgenin olabildiğince ince ve kusursuz ölçüde düz çizgilerinin hepsi 90 derecelik açı oluşturacak şekilde birbiriyle buluşur. Böylesi kusursuz bir matematiksel obje, gerçek dünyada var olamaz. Bu durum, modern matematikçilerin genellikle Platonik dünya olarak tanımladığı dünyanın bir özelliğidir; bu dünya, matematikçilere, etrafımızdaki dünya kadar gerçek görünebilmektedir.

Aristo'nun ölümünün ardından geçen çeyrek yüzyıl içinde; Yunan düşünür Öklid, matematiksel düşünceye yeni titizlik standartları getirdi. On üç ciltlik muhteşem eseri *The Elements*'te

14. Gingras (2001: 389)

geometrinin temellerini açık ve kapsamlı şekilde ortaya koymuş, bu alanda mantıksal uslamlamanın yeni standartlarını belirlemiştir. Okuması kolay olmasa da *The Elements*, matematik tarihindeki en etkili kitap oldu ve düşünürler üzerinde yüzyıllar boyunca güçlü bir etki bıraktı. Daha sonraki dönemlerde bu eserin büyüsüne kapılan büyük fizikçiler arasında Einstein da vardı; şöyle bir tespitte bulunacaktı: "Eğer Öklid gençlikteki hevesinizi tutuşturamıyorsa, o zaman bir bilim insanı olmak için yaratılmamışsınız demektir."[15]

Matematik, uygulamada da kullanışlı hale geliyordu. Arşimet, matematiksel fikirleri icatlarında kullanmak açısından bilhassa hünerliydi; örneğin o, suyu taşıyan Arşimet vidasında ve parabolik aynasında matematiği kullanmıştır. Yunanistan'daki birçok çağdaşı da geometrik mantık yürütme yöntemini kullanarak Güneş'in ve Ay'ın Dünya'dan uzaklığını, Dünya'nın çevresini ve Dünya'nın dönme eksenindeki kaymayı genellikle etkileyici derecede yüksek doğruluk seviyesinde ölçmüşlerdir. İnsanların Dünya üzerinde etraflarındaki objelerin davranışlarında gözlemledikleri düzenli davranışların, matematiksel yasalarla tanımlanabileceği düşüncesi yüzyıllarca uzaktaydı. Ama matematik, dünyaya bağlı insanlığa daha o dönemde duyularının ötesine geçerek yaratıcı mantık yürütme güçlerini göklere ulaştırma imkânı veriyordu.

Basit matematiksel kavramlar, bilimi ilerleten düşünürlerin birçoğu için kullanışlı olmaya başlamıştı. Ortaçağda matematik alanındaki en önemli gelişmelerin birçoğu İslam ülkelerinde ortaya çıktı, özellikle de şu anda yaklaşık olarak İran ve Irak'ı kapsayan alanda olduğu söylenebilir.[16] Bu bölgenin âlimleri matematik alanında etkileyici ilerlemeler kaydettiler; cebirin gelişimi de bunlar arasındaydı ve Arapça'da "kırık parçaların yeniden bir araya getirilmesi" anlamına gelen "al-jabr" kelimesinden geliyordu. Bu yenilikler; soyut sembolleri, örneğin x ve y'yi, nümerik değerler alabilen ve matematiksel olarak manipüle edilebilen çoklukları temsil etmek üzere kullanan modern cebirin temelini oluşturdu.

15. Einstein (1954: 271)
16. Heilbron (2015: 36)

On altıncı yüzyılın ortasında Shakespeare doğduğunda; matematik, fizik biliminin neredeyse her branşında (astronomi, hidrolik ve optik de bu alanlara dahildi) ön planda yer alırken, müzikte de rol alıyordu. Matematiğin dünyayla ne şekilde ilişkide olduğuna dair yeni fikirler cazibe kazanmaktaydı; bu yeni fikirler, 2000 yıl boyunca Hıristiyan ve İslam düşüncesini hâkimiyeti altında tutmuş olan Aristocu düşünce şeklini sorgulatıyordu. Bu anlamdaki en önemli katkılardan biri Nikolas Kopernik'in 1543 yılında evrenin merkezinin Dünya değil Güneş olduğunu öne sürmesiydi; bununla birlikte Bilimsel Devrim olarak bilinen sürecin başlangıcı işaretlenmiş oluyordu. Devrimin önde gelen iki öncüsü arasında, aynı zamanda matematikçi de olan iki gökbilimci vardı: Alman Johannes Kepler ve İtalyan Galileo Galilei. Dünyayı anlamanın en iyi yolunun, objelerin yüzeysel görünümlerine odaklanmak değil, harekete dair kesin tanımlar yapmak olduğuna inanıyorlardı. Onlara göre, hareket eden objeler üzerinde yapılan ölçümlerle matematiksel düzenlilikleri tanımlamak bilhassa önemliydi. Kepler, Güneş'in etrafında dolanan gezegenlerin hareketinde böylesi düzenlilikleri tanımlamayı başarmıştı; Galileo ise evimize daha yakın düzenlilikler keşfetmişti: örneğin, yere serbest düşüş yapmakta olan objelerin izledikleri yollar.

Dindar Kepler'e göre Tanrı, "evrenin mimarı" idi ve bu evreni, insanlığın geometriyi (Kepler'in kutsal bulduğu bir disiplini) kullanarak anlayabileceği bir plana göre yaratmıştı.[17] Tartışmalı isim Galileo, bilimsel teorilerin tahminlerini doğrudan gerçek dünyada yapılan gözlemlerle kıyaslamanın önemini sıklıkla vurgulamıştır: bu ısrarı, onu Einstein'ın gözünde "modern bilimin babası" yapmıştı; gerçi Galileo'nun elindeki deneysel verileri abarttığı söylenirdi.[18] Galileo bir matematikçi olarak da pasif biri değildi ve insanın doğal dünyayı anlaması açısından matematiğin önemini takdir ediyordu; 1623 yılında meşhur cümlesiyle tabiatın kitabının "matematik dilinde yazıldığını" ilan etmişti.[19] Onun düşünce anlayışı, önde gelen Avrupa şehirlerinin çoğunda

17. Gal ve Chen-Morris (2014: 167-168)
18. Einstein (1934: 164); Heilbron (2010: 33, 132, 135)
19. Christie, T., 'The Book of Nature Is Written in the Language of Mathematics': https://thonyc.wordpress.com/2010/07/13/the-book-ofnature-is-written-in-the-language-of-mathematics/ (2010); Heilbron (2010: iv, 34-41, 132-133)

kültürel trendin bir parçasıydı: sanatla mimaride geometrik perspektifin kullanımı neticesinde ve yeni muhasebecilik metotları aracılığıyla matematik, ticari ve sanatsal hayatın temel taşlarından biri olmaya başlıyordu.[20]

Bilim açısından merkezi konuma gelecek bir düşünceyi ne Kepler ne de Galileo bütünüyle yakalayabilmişti: yani doğal dünyanın, her yerde ve belki de her zaman geçerli olan yasalarla tanımlanabilir olduğu düşüncesi.[21] Aristo tarafından ortaya atılan, doğanın temel yasalara sahip olduğu şeklindeki düşünce en net şekilde Fransız Rene Descartes'ın eserlerinde görülmüştür. Descartes'ın eserleri 1640'ların başlarından itibaren birkaç yüzyıl boyunca Avrupa düşünce yapısına hükmedecekti; bu dönem, hem Galileo'nun ölümüne hem de Newton'ın doğumuna şahit olunan dönemdi. Descartes, Aristocu bilimi bir kenara bıraktı ve yerçekimini, ısıyı, elektriği ve gerçek dünyanın diğer unsurlarını, etkileyici ölçüde canlılıkla tanımladığı mekanizmalar kullanarak açıklamaya çalıştı; bunların doğru olduğuna dair kendisinin ya da bir başkasının herhangi bir doğrudan kanıtı olmadığını da aklında tutuyordu.[22]

Descartes, fikirlerini *Principles of Philosophy** adlı kitabında yayımlamış ve bu kitabın bir roman gibi doğrudan hızlıca okunmasını tavsiye etmiştir (metni anlamadaki güçlüklerin büyük bölümünün üçüncü okumada kaybolacağını söyler). Kitap çok az matematik kullanmıştır ve deney yapanların bu mekanik teorileri nasıl test edebileceğine dair herhangi bir yol göstermemiştir; mesela bu mekanik teorilerinden biri, türbülanslı dev girdapların her bir gezegeni Güneş'in etrafında döndürdüğü düşüncesidir. Londra'nın en önde gelen deney araştırmacısı Robert Hooke, Descartes'ın ateşli bir hayranıydı, ama yine de bilime getirilen zihinsel yaklaşıma karşı pek tahammülü kalmamıştı: "Gerçek şu ki, Doğa Bilimi zaten yeterince uzun süredir bir beyin ve hayal işi olarak kaldı: maddesel ve somut şeyler üzerinde yapılan gözlemlerin açıklığına ve sağlamlığına geri dönme zamanı geldi artık."[23]

20. Wootton (2015: 163-172)
21. Garber (2013: 46-50); Heilbron (2015: 5-6)
22. Heilbron (1982: 23)
* Descartes, *Felsefenin İlkeleri*, Çev: Mesut Akın, İstanbul: Say Yayınları (y.h.n).
23. Hooke'ta önsöz (1665: 5)

Hooke, 1665 yılında bu kelimeleri kaleme aldığı sırada; yirmi iki yaşındaki Isaac Newton hem matematik hem de doğa felsefesi alanlarında nefes kesici ölçüde yaratıcı çalışmalar yapıyordu. O dönem itibarıyla Antik Yunanlıların düşünce sistemine aşinaydı ve defterlerinden birinde eski ve meşhur bir skolastik deyiş göze çarpıyordu: "Platon bir dosttur, Aristo da dosttur, ama gerçeklik daha büyük bir dosttur."[24] Newton aynı zamanda Kepler, Galileo ve Descartes'ın keşiflerini de iyi biliyordu ve hem onların hem de diğer düşünürlerin Aristocu konsensusu nasıl alaşağı ettiğinin bilincindeydi. Newton'ın matematik eğitimindeki en belirleyici olay, Descartes'ın *Geometry*'sini okumasıydı: önde gelen Newton araştırmacılarından David Whiteside'ın kelimeleriyle, bu kitabın ilk yüz veya yaklaşık ilk yüz sayfasından itibaren Newton'ın "matematik ruhu alev almıştı".[25] Bu dönemde yapmış olduğu matematiksel keşifleri yayımlamış olsaydı, muhtemelen matematik alanında da dünyanın önde gelen uzmanlarından biri olarak kabul edilecekti, ama akranlarının neredeyse hiçbiri onun neler yaptığını bilmiyordu. Dünya bunları neredeyse çeyrek asır sonra, Newton bilimi doğal dünyanın daha sistematik araştırmalarına doğru kaydırdığında (matematiksel ve kantitatif gözlemlere dayalı araştırmalara kaydırdığında) fark etti. Tüm bunları, yazmış olduğu dev başyapıtında dünyaya sundu; insanlığın düşünce tarihindeki en önemli kitaplardan biriydi.

*

Sonrasında kendi adıyla anılacak olan kuyrukluyıldıza ilişkin gözlemleriyle hatırladığımız gökbilimci Edmond Halley'nin tetiklemesi ve ısrarı olmasa, Newton *Principia*'yı asla yazmayabilirdi. Newton'ın az sayıdaki arkadaşından biri olan Halley, neredeyse üç yıl boyunca, başyapıtını ortaya koymak konusunda isteksiz arkadaşını ikna etmeye, tatlı sözle razı etmeye ve ona yardımcı olmaya çalıştı. Ona kitabı basmanın maliyetini karşılamayı bile önerdi. Yaklaşık beş yüz sayfa uzunluğundaki *Principia*, 5 Temmuz 1687'de Londra'da satışa çıktı –bilim tarihi için özel bir gün olsa da o sırada büyük bir hadise değildi–. Yayıncı, yaklaşık altı yüz kopya bastı, ama hepsinin satılmasının güç olduğu or-

24. Feingold (2004: 10)
25. Whiteside (1982: 113-114)

taya çıkacaktı; hatta anonim bir yazar, "İnsan aklının gücünün en kayda değer örneklerinden birini" verdiği için kitabın "eşsiz Yazarını" öven bir değerlendirme yazısı yazdıktan sonra bile işler zor ilerledi (bu ifadeler Halley'e aitti).[26] Newton, yaklaşımını vahim derecede düz bir tarzda sunmuştu, bunun nedenlerinden biri, daha sonra ifade edeceği gibi, "matematiği yarım yamalak bilenlerin tacizinden kaçınmaktı."[27] Sonuç olarak kitap, kendi düzeyindeki bir avuç insan dışında kalan kişiler için anlaşılmaz görünüyordu: Newton'ın hayatta olduğu süreçte *Principia*'nın tamamını okuyanların sayısı yüzü geçmedi ve şurası kesin ki, okuyanlardan da çok azının kitabı anlaması muhtemeldi.[28]

Newton, Descartes'ın *Felsefenin İlkeleri* adlı eserine yaptığı pek de üstü kapalı olmayan bir çağrışımla, kitabının alt başlığı olarak *Doğa Felsefesinin Matematiksel Prensipleri* ifadesini kullanmıştır. Buradaki amaç, genel olarak felsefeye değil, bütünüyle doğa felsefesine –gerçek dünyaya– odaklandığını ve ilkelerinin özünde matematiksel yaklaşım olduğunu göstermekti.[29] Newton, Descartes'ın hatalarla dolu kitabını yakından incelemiş ve kitabın "varsayım mozaiğine" gitgide daha eleştirel yaklaşır olmuştu.[30] *Principia*, bir anlamda Descartes'ın doğa felsefesi anlatımına getirilmiş kısıtlayıcı ve matematiksel bir düzeltme niteliğindeydi: Newton, gerçek dünyanın, hem genellemeyle hem de hassas belirlemeyle matematiksel olarak açıklanabilen bölümüne odaklanmıştı.

Principia'da Newton, zaman ve mekânın herkes için her yerde aynı olduğunu varsayar.[31] Zaman, "uniform şekilde akar" ve mekân "herhangi bir dış faktöre bağlı olmadan" var olur. Öklid'in *Elements* adlı eserinde kullandığına benzer şekilde bıkıp usanmadan mantıksal ve düz bir üslup benimseyen Newton, bilim tarihinin belki de en cesur birleştirici analizlerini yapmıştır:

26. Sayfalar dana derisi içinde bir araya getirildiğinde maliyet yarıya düşüyordu: bu da, Londra'daki işçilerin yaklaşık 1 saatlik ücretine bedeldi. Halley'in değerlendirmesi: http://users.clas.ufl.edu/ufhatch/pages/02-teachingresources/HIS-SCI-STUDY-GUIDE/0090_halleysReviewNewton.html
27. Iliffe (2017: 200)
28. Shapin (1998: 123)
29. Feingold (2004: 25)
30. Iliffe (2017: 89)
31. Guicciardini (2018: 162)

herhangi bir objeyi Dünya'nın zeminine doğru çeken yerçekimi gücünün, gezegenler, Ay ve evrendeki diğer maddesel objeler üzerinde etkili olan gücün aynısı olduğunu öne sürmüştür. Bu gücü, daha sonraları tüm fizik öğrencilerinin aşina olduğu basit bir formülün temelini oluşturan matematiği kullanarak tanımlamıştır: birbirinden d mesafesi kadar uzakta yer alan ve kütleleri m ve M olan iki obje, boyutu GmM/d2oian ("ters kare kanunuyla")bir güçle birbirine doğru çekilir (G bir sabittir, her yerde her zaman aynı değerdedir, daha sonraları "Newton'ın yerçekimi sabiti" olarak anılacaktır). Newton'ın bunu, doğanın geçerli bir kanunu olarak gösterme şekli, o günden beri bilim için bir şablon olarak kalmıştır.

Newton, bu yerçekimi gücünün gezegenler üzerindeki etkisini tahmin edebilmek adına üç yeni hareket yasası kullandı; bunlar, modern bilim insanlarına oldukça muğlak görünen geometrik yöntemlerle uygulanabiliyordu. Modern bilim insanları, bu hesaplamaları kalkülüs olarak bilinen tekniği kullanarak yapıyorlar; bu işlemler Newton'ınkilerle özdeş sonuçlar veriyor. Newton ise kalkülüs metodunu *Principia*'yı yazmasından yirmi yıl önce eğrilerin matematiksel özellikleri hakkında kafa yorarken keşfetmişti ancak bunu başyapıtında kullanmamıştı. Bilindiği kadarıyla kalkülüs, Alman matematikçi Gottfried Leibniz tarafından Newton'ın çalışmalarından bağımsız olarak keşfedilmiş ve isimlendirilmişti. Sabit olmayan ama sürekli değişen –örneğin uzayda ve zamanda değişkenlik gösteren– fiziksel niceliklerle baş etmeyi sağlayan kalkülüs, bilimde kullanılan en güçlü matematiksel teknik haline gelmişti. Bununla beraber Newton, o dönemde korkutucu ve yeni bir matematik tekniği olarak görülen bu metodu en bilgili okurlarının bile bilemeyeceğinden haberdardı, bu yüzden de *Principia*'da kullanmamayı tercih etti. Bunun yerine, tüm başarılı Avrupa üniversitelerinde öğretilen ve önde gelen matematikçilerin hepsinin aşina olduğu geometrik matematik kullandı.

Newton'ın matematiksel mantığı, hayal gücünün kâinata uzanmasına imkân veriyordu. Yerçekiminin gezegenler, kuyrukluyıldızlar ve evrendeki diğer objeler üzerindeki etkilerini hesapladı ve bu hesaplamaların sonuçlarını gökbilimcilerin en hassas gözlemleriyle kıyasladı. Heyecan verici bir yaklaşımla, Güneş

etrafındaki gezegenlerin hareketine dair Kepler'in saptamış olduğu şaşırtıcı düzenliliklerin, yerçekimi yasası kullanılarak matematiksel olarak anlaşılabileceğini gösterdi. Newton ayrıca kuyrukluyıldızların ve Ay'ın hareketlerini de ele aldı; Dünya'daki gelgitlerin, Ay ve Güneş tarafından Dünya üzerinde uygulanan çekim gücünden kaynaklanışını açıkladı. Newton, bu olayların her biri için, teorisinin rakamsal tahminleriyle elindeki en hassas ölçüm sonuçlarını kıyasladı. Sonuçlar mükemmeldi, doğal dünyanın bir bölümüne dair o güne kadarki en iyi açıklamayı sunduğunu iddia etmesine imkân verecek kadar iyiydi.

Newton'ın Avrupalı meslektaşları, onun doğaya dair bu açıklamasının, Descartes'ın türbülanslı girdaplarından bütünüyle uzaklaşmasından hiç de memnun değillerdi. Bu eleştirmenlere göre, gezegenlerin hareketlerini, bu hareketlere neden olan mekanizmayı belirtmeden açıkladığını iddia etmesi kabul edilebilir bir şey değildi. Newton'ın tasarısıyla ilgili bir başka problem daha vardı: Güneş, göründüğü kadarıyla anlık etki eden bir güçle milyonlarca kilometre uzaktan Dünya'ya doğru nasıl bir mekanizmayla çekiliyor olabilirdi? Fransa'da *Principia*'nın anonim eleştirmenlerinden biri, kendisi gibi teoriden hoşnutsuz birçok kişi yerine konuşarak, Newton'ın bir fizikçi olarak değil, "yalnızca bir matematikçi" olarak çalıştığını söylemişti.[32]

Newton ve eleştirmenleri arasındaki tartışmalar onlarca yıl sürdü; Newton'ın 1696 yılında Royal Mint [darphane] başkanı oluşundan ve birkaç yıl sonrasında Royal Society [Kraliyet Bilim Topluluğu] başkanlığından sonra da devam etti. Eskisine göre daha az araştırma yapsa da, ortaya koymuş olduğu yerçekimi yasasını Dünya ve Güneş Sistemi hakkında yapılan bütün yeni ölçümlerle (en azından erişim sağlayabildiği ölçümlerle) karşılaştırmaya devam etti. Eleştirmenlerini çok dikkate almadı, neredeyse hepsini o kendine has saldırganca ve küçümseyici tavrıyla karşıladı; gerçi yeterince nezaketle yaklaşıldığında çalışmalarında değişiklik yapması gerektiği yönündeki önerilere açık davranabiliyordu. *Principia*'nın ikinci baskısı, kitabın editörü Roger Cotes tarafından yazılmış ve Newton'ın da kesinlikle onayladığı bir gözlem içeriyordu: dünyanın saf düşünce kullanılarak anlaşılabileceğini düşünen

32. Feingold (2004: 32). Ayrıca bkz. Heilbron (1982: 42)

veya Tanrı'nın evrendeki rolü konusunda Newton'ın görüşüyle hemfikir olmayan bir insan, "sefil bir sürüngendi".[33]

Nihayetinde Newton ve onun doğa felsefesine getirdiği matematiksel yaklaşım kazanan taraf oldu. 1722 yılında seksen yaşına ulaştığında Avrupa'nın önde gelen düşünürlerinin neredeyse tamamı evrene dair onun yaklaşımını kabul etmiş durumdaydı. Meslektaşları *Principia*'ya ve ardından gelen bir diğer başyapıtı *Opticks*'e şapka çıkarıyordu; bu kitap da bütün büyük eserler gibi birçok yeni soru ve sorgulama biçimi doğurmuştu. Ama Newton işin henüz bitmediğini gayet iyi biliyordu. Gökbilimciler, gezegenlerin yörüngelerinin sabit olduğunu teleskoplarıyla doğrulamışlardı ama o bunu ispatlayamıyordu; ayrıca teorisinin Ay'ın hareketlerine ve Dünya'daki gelgitlere dair birçok detayı açıklayabildiğini de kanıtlayamamıştı. Maddenin temel parçacıkları arasındaki etkileşimleri tanımlayan yeni matematiksel yasalar keşfedememiş ve bunun neticesinde de "felsefe yürütme şeklini" genişletmeyi başaramamıştı; bunları keşfetmiş olsa belki de elektrik, manyetizma, ısı, fermantasyon ve hatta hayvanların büyümesi gibi diğer fenomenleri açıklayabilecekti.[34]

Newton, 31 Mart 1727'de seksen dört yaşında öldü. Haftalarca ağır hasta yatarken bir sırrını açarak hâlâ bakir olduğunu söylediği doktoru Richard Mead'in gözetiminde kalmıştı.[35] Newton, birkaç gün sonra Westminster Abbey'deki resmi cenaze töreninin ardından yine aynı yerde toprağa verildi. Mezar taşına yazılan ifadelerde otoriteler tarafından büyük titizlikle seçilmiş satırlar yer alıyordu ama arkadaşı ve akrabası John Conduitt (günümüzde Newton'ın "imaj hakları" olarak bilinen haklarını kontrol edecek olan kişiydi) tarafından kaleme alınmış daha eski bir versiyonun giriş kelimeleri belki daha yerindeydi:[36]

> Isaac Newton
> Burada toprağa verilmiş yatıyor
> Deneylerin rehberliğinde
> Ve matematiğin meşalesini taşıyarak
> Doğanın kanunlarını gösteren ilk kişiydi o

33. Cajori (Çev.), (1946: xxxii)
34. Iliffe (2007: 99)
35. Iliffe (2017: 17)
36. Conduitt, Newton'ın yarı-yeğeni Catherine Barton'ın eşiydi. Iliffe (2016: 111)

İngilizler Newton'ı gelmiş geçmiş en büyük doğa filozofu olarak hatırlar. İskoç düşünür David Hume tarafından daha sonraları kaleme alınan ifadelerle, "Newton, insanlığın eğitimi ve donanımı adına gelmiş geçmiş en büyük, en eşsiz dehaydı".[37] Avrupa'nın diğer ülkelerindeyse hikâye farklıydı: Avrupa'da meslektaşları onu, matematiği doğal dünya üzerinde gereksiz yere kullanmış birinci sınıf bir matematikçi olarak algılıyordu.[38] Newton'ın bir doğa filozofu olarak üstünlüğünü kabul etmeleri yaklaşık yarım yüzyıl kadar sonra, diğer uzmanların Güneş Sistemini anlamak için yerçekimi yasasını kullanarak Newton'ın programını tamamlamalarının ardından oldu. Bu tamamlama sürecinin İngiltere'de değil de, genel olarak en sert eleştirmenlerinin yer aldığı ülkede –Fransa'da– gerçekleşmiş olması, yaşasaydı muhtemelen Newton'ı da şaşırtırdı.

*

Newton'ın cenazesinde yasını tutanlar arasında o dönemde anavatanından sürgün edilmiş olan kıvrak zekâlı Fransız yazar ve aktivist Voltaire de muhtemelen yer alıyordu. O ve *Principia*'yı Fransızca'ya ilk çeviren kişi olan Emilie du Chalet, Fransa'yı nihayetinde Newton'ın bilim icra etme yöntemini kabul etmeye ikna etmiş olan üretken entelektüeller grubu içinde önde gelen kimselerdi. *Principia*'nın yazarının ölümünden çeyrek yüzyıl sonra Fransızlar artık Anglomanya'nın etkisine girmiş bulunuyorlardı.[39]

Fransa'daki Newtoncılar arasında zaman zaman Fransız Newton olarak da anılan Pierre Simon Laplace da vardı. Felsefeye merak duymayan buz gibi bir rasyonalist olan Laplace, etrafındaki dünyayı ve evreni açıklamak için matematik yeteneklerini her fırsatta kullanmaya çalışıyordu, bu anlamda da Newton'ın yerçekimi yasasını da imkân buldukça kullanıp test etti. Normandiya kırsalında papazlık eğitimi almıştı, sonrasında ise Paris'e gelip matematikçi olarak bir kariyer peşinde koşmaya başladı ve etkileyici bir hızla yol aldı.[40] Kısa sürede Fransız bilim aristokrasisinin doruklarına tırmandı.

37. Arieti ve Wilson (2003: 238)
38. Guicciardini (2018: 211)
39. Feingold (2004: 110)
40. Gillispie (1997: 3-6, 67-69)

Laplace ve meslektaşları, Newton'ın programını geliştirmek için büyük oranda kalkülüsle bağlantılı yeni bir matematik zenginliği oluşturdular. Gerçi bu matematiksel tekniğin Newton tarafından değil, Newton'ın hiç hoşlanmadığı Gottfried Leibniz tarafından oluşturulmuş versiyonunu kullandılar. Alman matematikçinin metotlarının kullanımı çok daha kolaydı ve daha önemlisi geliştirilmesi de daha kolaydı. Günümüzde her fizikçinin eğitiminin bir parçası olan kalkülüs tekniklerinin birçoğu, büyük matematikçiler tarafından Leibniz'in çerçevesi üzerinde çalışılarak oluşturulmuştu (bu matematikçilerin arasında Laplace'ın ilk akıl hocası Jean le Rond d'Alembert, Turin doğumlu Joseph Louis Lagrange ve İsviçreli uzmanlar Leonhard Euler ve Johann Bernoulli de vardır). Belki de en önemli başarıları, gerçek dünyayla ilişkili niceliklerin (örneğin hız, sıcaklık ve manyetik alan gibi) değişim oranını veren diferansiyel denklemleri geliştirmiş olmalarıydı. Böylesi denklemlerin klasik örneklerinden biri de Newton'ın ikinci hareket yasasının modern versiyonudur; bu yasaya göre, bir kütle üzerine etki eden bir kuvvet, kütlenin hızındaki zamana göre değişimin kütleyle çarpımına eşittir.[41] Bu denklem, doğa felsefecileri için müthiş bir lütuf konumundadır: prensipte, her türlü kütlenin hareketini tahmin edebilmelerini sağlıyordu, yeter ki ellerinde bu kütleye etki eden kuvveti veren bir formül olsun.

Diferansiyel denklemlerin her teorisyen için olmazsa olmaz bir araç olduğu ortaya çıkmıştır. Bu denklemler, fiziksel nicelikler arasında sık sık şaşırtıcı yeni bağlantılar yaratır, alışıldık fikirler üzerinde yeni perspektifler oluşmasına imkân verir ve doğanın işleyiş şekline dair beklenmedik kavrayışlar sunar. Gerçek dünyayı tanımlayan diferansiyel denklemler bir anlamda şiirle akrabadır: yazar Seamus Heaney'nin daha sonraları ifade ettiği üzere, eğer "şiir esrime halindeki dilse", bu durumda diferansiyel denklemler de esrime halindeki matematiksel dildir.[42]

Laplace'ın, Avrupa'daki diğer uzmanların ve Paris'teki meslektaşlarının çalışmaları aracılığıyla doğa felsefesi alanındaki uluslararası liderlik, İngiltere'den kanalın diğer tarafına geçti.

41. Guicciardini (2018: 217-219)
42. Heaney, bu ifadeyi *The Annals of Chile* değerlendirmesinde oluşturmuştur: http://www.drb.ie/essays/language-in-orbit

Durum Britanya'da sıkıntı oluşturdu, Kraliyet entelektüelleri, Laplace'ın ve takipçilerinin matematiksel soyutlamalara fazlasıyla bel bağladıklarını ve somut gözlemlere yeterince eğilmediklerini söyleyip sızlanıyordu. Londra'nın en bilgili doğa filozofu Thomas Young, Fransız'ı, doğa felsefecilerini yanlış yola saptırmakla itham ediyordu: "Bay Laplace cebirin çiçekli bahçelerinde istediği kadar yürüyüp dans edebilir, ona gülmeyiz, yeter ki yola çıktığı noktaya geri dönmekten daha kötüsünü yapmasın."[43] Bunlardan etkilenmeyen Laplace, çetin bir gayretle Newton'cı programı ileriye taşıdı, Newton'ın teorisinin, yerçekimine dair mekanik bir sebep sunmuyor diye yetersiz olduğunu söyleyen geçmiş nesillerdeki Fransız filozofların taleplerini görmezden geldi. Fransız matematikçiler ve filozoflar bu tartışmayı asla resmen sonlandırmadılar, ancak hakkında konuşmayı bıraktılar ve nihayetinde tartışma, Descartes'ın girdaplarıyla beraber sönüp gitti.

Doğal dünyayı anlamak yönünde Newton'ın yaklaşımının aksine, Laplace'ınki tanrısızdı. Newton, matematiksel tasarımının hatalı şekilde evrenin kararsız olduğu tahminine ulaştığını fark edince bu tutarsızlığı açıklamak için üstünkörü bir yola başvurdu ve Tanrı'nın gezegenlerin hareketlerinin değişmezliğini sağlamak adına zaman zaman müdahalede bulunduğunu söyledi.[44] Laplace ise böylesi bir yaklaşımdan uzak durmak istiyordu. Yaygın olarak inanılan bir anekdota göre; Napoleon, Laplace'a Tanrı'nın evrendeki yerinin ne olduğunu sordu; büyük fizikçi güvenle yanıtladı: "O bahsettiğiniz hipoteze ihtiyacım yok."[45] Matematiğin doğaya uygulanışı konusunda Newton'ın görüşüyle Laplace'ınki arasında önemli bir fark vardı. Newton, evrene dair en kesin tanımı matematik aracılığıyla oluşturup Tanrı'nın eserini daha iyi idrak etmeye çalışırken, Fransız halefi doğanın yalnızca matematiksel yasalar kullanılarak tanımlanabileceğine inanıyordu. Laplace'ın inancının özü, bu yasaların bir şekilde halihazırda var olduğuydu, keşfedilmeyi bekliyorlardı; duruma daha ziyade Platon'un matematik için düşündüğü gibi

43. Hahn (2005: 163-164)
44. Newton, bunu *Opticks* çalışmasının Queries 28 ve 31 kısımlarında ortaya koyar.
45. Hahn (2005: 172)

bakıyordu –günümüzde de çoğu bilim insanının görüşü de bu yöndedir–.[46]

Laplace, matematiksel yasaların bize yalnızca doğal dünyaya ilişkin olarak değil, aynı zamanda geçmiş ve gelecek adına da bir şeyler söyleme yetisine sahip olduğunu düşünüyordu. O ve meslektaşları, ilk kapsamlı matematiksel olasılık teorisini ortaya koyarak olayların akışının belirlenişinde şansın rolüne dair o müphem konuşmaları boşa çıkardılar. Laplace, evrenin bütünüyle deterministik (rastgele olmayan) bir yapıda olduğunu düşünüyordu –şimdi hakkında tam bilgiye sahip olduğunuzda, gelecek de (prensipte) bütünüyle hesaplanabilirdi–.[47] "Evrenin şimdiki halini, bundan önceki halinin bir etkisi ve bundan sonraki halinin sebebi olarak görebiliriz" demişti.[48] Laplace'ın evrensel matematik yasalarının gücüne dokunaklı bir inancı vardı: yalnızca birkaç tanesini bildiği halde diğerlerinin de var olduğundan ve evrendeki tüm parçacıkların matematiksel notalarla dans ettiğinden emindi.

Laplace ve meslektaşları, modern fizik disiplininin temellerini atmışlardır. Dolayısıyla modern fiziğin bir Fransız icadı olduğu söylenebilir; bu anlayışa göre fizik, bilgiyi sitematik hale getirmek, doğru ölçümler yapmak ve matematiğe dayalı teorileri kullanarak hesaplama yapmak adına sergilenen kolektif bir çabanın sonucudur.[49] 1765 yılında Denis Diderot ve Jean le Rond d'Alembert, Aydınlanma düşüncesinin klasik dokümanı *Encyclopedie*'de bu durumu şöyle özetlediler: "Matematiksel metot tüm bilimlere aittir, insan zihni açısından doğaldır ve her türden hakikatin keşfini sağlar."[50] Yeni matematik, fizik araştırmalarında hayati bir rol oynuyordu ve sonrasında fizik araştırmaları da büyük miktarda yeni matematik yaratıyordu.

*

Bugün bildiğimiz haliyle fizik disiplini, on dokuzuncu yüzyıla girilirken, yani Fransız İhtilali'nin kargaşasından yalnızca

46. Hahn (2005: 55)
47. Schaffer (2006: 36)
48. Laplace (1820: 12)
49. Cannon (1978: 111-136)
50. Heilbron (1990: 1)

birkaç sene sonra şekil almaya başladı. Fizikçiler olarak bilinen bir grup uzman, çalışmalarını ısı, elektrik, pnömatik, hidroloji üzerinde yoğunlaştırmaya başladı; biyoloji, kimya ve jeolojiyle az miktarda örtüşen diğer konular da vardı.[51] Laplace, birçok meslektaşının hayatına mal olan o terör yıllarında başını önüne eğdi ve nahoş bir şey olmuyormuş gibi işine devam etmeye çalıştı. Napoleon, dünya çapındaki astronomların, matematikçi ve fizikçilerin birçoğuyla yakın ilişki içindeydi ve fizik alanındaki araştırmaların en etkili ve en cömert destekçisi oldu,[52] özellikle de on sekizinci yüzyılın bilimsel çılgınlığı olan elektrik alanında. Avrupa'nın neredeyse tamamında akademisyenler, kitleleri elektrik bilimiyle eğlendirerek önemli paralar kazandılar; elektrik depolanmış güç kaynaklarından faydalanarak izleyicilerin saçlarını diken diken yapıyor, çok parlak kıvılcımlar ve yüksek sesli çarpmalar yaratıyorlardı. Bilim, tiyatroya dönüşmüştü. Aynı esnada deney araştırmacıları ve mühendisler de gitgide daha hassas ve daha doğru elektriksel ölçümler yapıyorlardı; fizikçiler de bunları kavramaya çalışmaktaydı.

Laplace yalnızca kendini işine adamış bir fizikçi değildi, siyasi olarak ileri gelenleri memnun etmeye de her zaman hazırdı. 1799 yılında Napoleon onu içişleri bakanı olarak atadığında bundan memnuniyet duymuştu ama Laplace'ın görevi yalnızca altı hafta sürebildi; Napoleon onun için şu sözleri sarf edecekti: "Her işin altında şeytanlık arıyordu... ve yönetime sonsuz küçüklük[53*] anlayışı getirdi."[54] Laplace bunlara aldırış etmeden çalışmalarına geri döndü; evreni anlamak için yerçekimi yasasını kullanarak Newton'ın programını tamamlamayı amaçlıyordu ve büyük bir başarıya ulaştı. Elde ettiği bulguları beş ciltlik başyapıtı *Celestial Mechanics* adlı eserinde sundu ve üçüncü cildini Napoleon'a adadı: "Bilimin aydın Koruyucusu ... Kahraman, Avrupa'yı uzlaştıran İnsan; Fransa ona refahını, büyüklüğünü ve ihtişamının en parlak dönemini borçlu".[55]

---

51. Heilbron (1990: 2)
52. Bertucci (2007: 88)
53. * Sonsuz küçüklük kalkülüsünden bahsediyor. (ç.n.)
54. Heilbron, J. L., "Two Previous Standard Models", yer aldığı çalışma, Hoddeson, L., vd. (1997: 46-47)
55. *Celestial Mechanics*'in bu üçüncü cildi 1802 yılında Amiens Antlaşması'ndan hemen sonra yayımlandı.

Paris yapılanması içindeki arkadaşlarından da destek alan Laplace, dünyanın ilk matematiksel fizik okulunu kurdu; okulun ana binası Paris'in üç mil güneyindeki Arcueil kasabasında yer alan kendi konağıydı.[56] 1806 ve 1822 yılları arasında, yaz ayları boyunca çoğu hafta sonu, himayesindeki onlarca yetenekli gençle ve okulu ziyarete gelen bilim turistleriyle birçok farklı konuda konuşmak üzere bir araya geldi (aynı dönemde komşusu Claude-Louis Berthollet de kimya alanında bir o kadar başarılı bir okul açmıştı). Laplace'ın karısı ve iki çocuğuyla paylaştığı evi statüsüne uyuyordu; özel üniformalı hizmetçileri, şatafatlı mobilyaları, duvarlarında Raphael tabloları vardı; kendisine ve konuklarına ulaşım hizmeti vermek için bir at arabası her daim emrindeydi.[57]

*

Laplace, dünyanın nihayetinde parçacıklardan oluştuğu ve bunların arasında da merkezi kuvvetlerin işlerlik gösterdiği şeklindeki Newton'ın vizyonuna dayanarak yol alıyordu. Amaç tüm bu kuvvetleri belirlemek, matematiksel teorilerle tanımlamak ve bu teorilerin tahminlerini en doğru gözlemlerle kıyaslamaktı.[58] Laplace'ın stratejisi, matematiksel açıdan Newton'ın yerçekimi yasasına benzer yasaları kullanarak, deney araştırmacılarının neredeyse her şeyin (bunlar arasında elektrik, manyetizma, ısı, ışık ve sıvıların kapiler akışı yer alır) işleyişinin altında yattığına inandığı kütlesiz ("ölçülemez") akışkanları tanımlamaktı. Bu yaklaşım, bazı kayda değer başarılar getirdi; bunlar arasında Etienne-Louis Malus'un 1808'deki keşfine dayanarak yapılan yorum da vardı; buna göre yansıyan ışığın özel polarizasyon özelliği olabilirdi.[59] Laplace ve öğrencilerine göre ölçülemez akışkanlar üzerinde kafa yormak, fiziği geliştirmenin açık ara en iyi yoluydu.

1810 yılı itibarıyla, doğal dünyayı Laplace tarzı inceleme yöntemi, daha sonraları tarihçi John Heilbron'un yaptığı ta-

56. Crosland (1967: 94-95)
57. Crosland (1967: 94-95)
58. Katı maddedeki parçacıklar üzerinde yerçekiminin etkisi hakkında Newton'ın yorumları için bkz. 'General Scholium' (1713): http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00056. Also see the final query of his *Opticks* (1704): http://www4.ncsu.edu/~kimler/hi322/Newton_Query31.pdf
59. Fox (1974: 89-90)

nımlamayla, fiziğin Napolyonik Çağ Standart Modeli haline gelmişti.[60] Bu yaklaşım genel bir çerçeve olarak o kadar kapsamlı görünüyordu ki, fiziği bütünüyle açıklama vaadi sunuyordu. Göründüğü kadarıyla başlıca güçlük, teorinin tüm detayları üzerinde çalışmak ve tahminlerinin tüm deneysel sonuçlarla örtüştüğünden emin olmak noktasındaydı. Yıllar boyunca Laplace, önde gelen Avrupalı bilim insanlarının şerefine kadeh kaldırdığı kişi oldu; kendisi de fizik araştırmalarını gerçekleştirmek adına açık ara en iyi yöntemi sunduğunu düşünüyordu ve bu amaç için zorlu bir program ortaya koymuştu. Ama Laplace'ın etkisi ve şöhreti 1815 yazıyla beraber hızla düşmeye başladı ve bu durumun, en güçlü destekçisi olan Napoleon'un Waterloo Savaşı'nda yenilmesinden birkaç ay sonrasına denk gelmiş olması tesadüf değildi.[61]

Laplace'ın statüsü hızla düşmekte olsa da, ölçülemez akışkanlar teorisi üzerinde eskisi kadar çok çalışmaya devam ediyordu, teorinin tahminlerini deneysel gözlemlerle eşleştirmeye çalışıyordu, özellikle de elektrik ve manyetizmayla ilgili olanlarla. Çoğu araştırmacı, bu iki fenomenin ayrı ve bağlantısız olduğunu düşünüyordu; ama Hans Christian Orsted'in 1820 yılında gösterdiği gibi, bu doğru değildi. Kopenhag'daki laboratuvarında, bir telden geçen elektrik akımının, teli sarmalayan bir manyetik alan yarattığını keşfetmişti; bu gözlem, Avrupa sathında meslektaşlarının ilgi odağı oldu. Elektrik ve manyetizmanın birbirlerinden ayrılmaz şekilde bağlantılı olduğunu gösteren ilk kanıttı bu ve tek bir çerçeve dahilinde anlaşılmaları gerektiğine dair ilk ipucuydu: bu çerçeve, elektromanyetizmaydı.

Laplace ve takipçileri Orsted'in gözlemlerini, parçacıkların merkezleri arasında etkinlik gösteren güçleri kapsamına alan teoriler çerçevesinde açıklamakta zorluk çektiler. Bu, Laplace'ın bir zamanlar karşı çıkılamaz görünen ölçülemez akışkanlar teorisini sıkıntıya sokan birçok problemden biriydi ve teori beş yıl içinde bir fiyaskoya dönüştü. Napolyonik Standart Modelin sınırları gitgide daha belirgin hale geldi, tıpkı başlıca mucidinin dogmatizmi gibi.

60. Heilbron (1997: 47-48)
61. Fox (1974: 109-127)

Hâkimiyeti yavaş yavaş yeni bir nesil ele geçirirken, Laplace o aşılmaz otoritesinin ve gücünün neredeyse tamamını kaybetti. O dönemde genç ve zeki fizikçilerin birçoğu, onun artık geçmişte kalmış bir insan olduğunu düşünüyordu; bu gençler diğer önde gelen düşünürlerin geleneği çerçevesinde çalışmayı tercih ediyorlardı. Bu düşünürler arasında Joseph Fourier de vardı; Fourier ölçülemez akışkanlarla ilgilenmiyordu, maddenin davranışını büyük ölçekte tanımlamaya odaklanmıştı. Isı akışını, atomlara ve atomlar arasındaki güçlere referans yapmayan ama diferansiyel denklemleri kullanan bir yaklaşımla açıklamayı başardı; bu yaklaşım, gözlemler açısından da iyi işleyen yöntemler sunuyordu. Fourier'in çalışması varlığını sürdürmektedir –günümüze kadar sürdürmektedir–, oluşturduğu denklem ve diğer matematiksel yeniliklerinin birçoğu her fizikçinin eğitiminin bir parçasıdır.

Fiziğin açıklanabilir bir alan haline gelmesiyle hemen hemen aynı dönemde matematik disiplini de şekil değiştirmeye başladı. Avrupa Kıtası filozofları, her şeyden önce kusursuz derecede titiz olmaya yönelen bir matematik anlayışı geliştirmeye başladılar. Bu alanda uluslararası bir lider ise Laplace'ın genç komşusu Augustin-Louis Cauchy'ydi. Cauchy, doğa felsefesine ilgi duyuyorduysa da özünde bir matematikçiydi, üstünkörü işlere, mantık hatalarına ve boşluklarına toleransı sıfırdı.[62] Uygulamaya yönelik herhangi bir kullanım göz önünde bulundurulmadan icra edilen saf matematikle, genel olarak gerçek dünya problemlerini çözmeye odaklı uygulamalı matematik arasında geniş bir ayrım yapmak aşama aşama daha elverişli hale geldi.[63] Laplace uygulamalı matematiğin prensi olmuştu, Cauchy ise saf matematikçilerin prensiydi.

Laplace, Newton'ın ölümünden neredeyse tam bir yüzyıl sonra, Mart 1827'de öldü. Laplace'ın cenazesi, yaklaşık üç hafta sonra, Viyana'da gerçekleşen Beethoven'ın cenaze töreni ölçeğinde olmasa da Paris'te büyük bir resmi olay konumundaydı.[64] Laplace, yas tutan meslektaşları arasında çok da sevilen bir figür değildi belki ama onu bir süper-insan olarak selamlıyorlardı;

62. Hahn (2005: 179)
63. Maddy (2008: 25-27)
64. Laplace'ın cenazesi, 7 Mart 1827'de Chapelle des Missions Etrangères de Paris'te gerçekleştirildi. Beethoven'ın cenazesi 29 Mart 1827'deydi.

Britanya'daki bir hayranının ifadeleriyle, "insanlığın tüm Büyük Öğretmenlerinin" üstüne yükselmiş biriydi o; Newton'ın bile kendisi için söylense keyif alacağı bir komplimandı bu.[65]

Laplace'ın *Celestial Mechanics* adlı eserini İngilizce'ye ilk çeviren kişi ve bir bilim yazarı olan Mary Somerville'in yazıları, birkaç yıl içinde bilim ve toplum açısından matematiğin değerinin daha fazla anlaşılması yönünde büyük katkı sağladı.[66] Newton'ın *Principia* adlı eserini yayımlamasının üzerinden 150 yıl geçmişti; o dönem itibarıyla neredeyse tüm uzmanlar, doğanın işlevinin altında matematiksel yasaların yattığında hemfikirdi ve önerilen tüm yasaların sürekli olarak gözlem sonuçlarıyla kontrol edilmesi gerektiğini düşünüyorlardı. Laplace, Newton'ın yaklaşımını sağlamlaştırmak, netleştirmek ve meyve verecek noktaya getirmek adına hayati bir rol oynamıştı. O ve meslektaşları, yerçekiminin bütün Güneş Sistemi'ni nasıl şekillendirdiğine dair anlayışımızı geliştirmişler ve evreni insanın hayal gücünün kapsamı dahilinde bir alan haline getirmişlerdi. Laplace'ın haleflerine göre başlıca güçlük ve amaç, aynı ölçüde bir kavrayışı Dünya'da gözlenen fenomenlere, özellikle de elektrik ve manyetizmaya getirebilmekti. Bilim insanlarının bu kadar heyecan verici şekilde gösterebildiği fenomenleri doğa felsefecileri ne zaman açıklayabilecekti? Göreceğimiz gibi bu açıklama, çoğu uzmanın beklediğinden daha geç geldi. Ve birçoklarını şaşırtacak şekilde elektromanyetizmaya dair varlığını sürdürebilen bir matematiksel teori, Fransızca veya Almanca değil, İngilizce olarak geldi, hem de İskoç aksanıyla.

65. Kompliman Henry Brougham tarafından yapılmıştır; alıntı, Secord (2014: 110)'da yer alır.
66. Secord (2014: 137)

2
elektrik ve manyetizma konularına ışık tutuluyor

"Matematiği her zaman objelerin en iyi şeklini ve boyutlarını elde etme metodu olarak algıladım ve bu yaklaşım yalnızca en kullanışlı ve ekonomik olanı bulmak anlamında değil, aynı zamanda esasen en ahenkli ve en güzeli yakalamak açısından da geçerli."

James Clerk Maxwell,
Francis Galton'un sorularına cevaben, yaklaşık tarih 1870

1800 yılından sonra fiziğin gelişimi, büyük oranda ölçümler yapma ve bunları matematiksel dille yazılmış yasalar açısından anlama tutkusuyla tetikleniyordu. Bu niceliksel devirde fiziğin büyük bölümünün rakamlarla ilgili olduğu kabul edildi –özellikle niceliği ölçmek ve tahmin etmekle ilgili olduğu düşünülüyordu–. 1850 yılı itibarıyla tüm Avrupa'da bilim insanları; optik, elektrik, manyetizma, ısı, hidrostatik, mekanik ve bir dizi başka fenomen hakkında daha önce eşi görülmemiş bir doğrulukla ve hassaslıkla deneyler gerçekleştiriyordu. Amaç, mümkün olan en az matematiğe dayalı yasayla dünya hakkında mümkün olduğunca fazlasını açıklamaktı. Bununla beraber fiziğe dair bundan daha fazlası da vardı; birçok devlet fiziksel araştırmaları desteklemeye hevesliydi, çünkü fiziğin bulguları endüstri açısından çok faydalıydı, fiziğin gelişimi ekonomik refah için gerekliydi.

Elektrik, bu yeni nicelik bulma hareketinin önderiydi. On sekizinci yüzyılın sonlarından itibaren, örneğin elektrik yüklü ob-

jelerle akım taşıyan teller arasındaki güçlerin ölçüm kalitesinde hızlı bir artış olmuştu. Araştırmacılar elektriksel fenomeni daha öncesinde hiç bu kadar doğrulukla inceleyememişti. Orsted'in elektrik ve manyetizma arasındaki yakın ilişkiyi keşfetmiş olması, ölçüm cihazları teknolojisinde daha fazla gelişimi tetikledi. Problem şuydu ki, elektromanyetik deneylerdeki bu gelişmeler, temeldeki teorilerin gelişiminin çok ötesine geçmişti.

O dönemde ilk kapsamlı elektromanyetizma teorisinin, birinci sınıf araştırma enstitülerinin büyük ilerleme kaydettiği Alman devletlerinde veya eyaletlerinde ortaya atılacağını düşünmek akla yakındı. 1830'lar itibarıyla matematik ve fizik alanlarındaki liderlik, Fransa'dan doğu komşusuna, Almanya'ya geçmişti; burada önde gelen birçok uzman, elektrik araştırmaları alanında başarılı çalışmalar yapıyordu –veya yapmıştı–. Bu Alman otoriteleri arasında akımla voltajı birbiriyle ilişkilendiren matematikçi ve öğretmen Georg Ohm da vardı. Yazmış olduğu gibi, elektromanyetizma konusunda bir "fikir birliği" arıyordu ve "matematiğin fenerini" kullanarak "fiziğin karanlık köşelerini" aydınlatmak istiyordu –neredeyse Newton'ın mezar taşına yazılabilecek türden bir ifadeydi bu–.[1]

Bu fener, elektromanyetizma üzerine ilk kez 1860'larda başarıyla tutuldu. Bunu gerçekleştiren kişi, varlıklı bir aileden gelen İskoç doğa felsefecisi James Clark Maxwell'di. Maxwell'in elektromanyetizma teorisi daha sonra gerçek dünyayı tanımlamak için kullanılan en önemli diferansiyel denklemlerden birinin kapsamına alındı. Bu matematiksel ifadeler, günümüzün fizikçilerinin ve elektrik mühendislerinin yüreğinde özel bir yere sahiptir; birçoğu, bu denklemlerin olağanüstü gücünü ilk fark ettikleri anı saygıyla hatırlar.

Maxwell'in teorisi, öğrenci Albert Einstein'a izafet teorisini geliştirmek adına da ilham verdi. Einstein'ın teorisi, bize; mekâna, zamana, enerjiye ve hatta kütleye dair radikal ölçüde yeni bir perspektif kazandırdı. Göreceğimiz gibi, daha sonraları Maxwell'in denklemleri doğanın tüm temel güçlerine dair modern anlayışımızın şablonunu oluşturdu; atom çekirdeğindeki parçacıklar üzerine etki eden ilkesel güçler de buna dahildir. Bu denklemler, mühendisler açısından da vazgeçilmez hale gelmiş-

1. Jungnickel ve McCormmach (2017: 51, 388); Iliffe (2016: 111)

tir. Maxwell'in başarısı, öğrencisi Oliver Heaviside'ın kendisi için düzdüğü methiyeleri haklı çıkarıyordu: O, "Shakespeare ve Newton'ın yanında durmayı" hak eden "ölümsüz bir ruhtu".[2]

Maxwell kendini bir fizikçi olarak görmüyordu. Fikirlerinin büyük bölümü metafiziğe dayanıyordu. Metafizik kelimesi ilk kez Aristo'nun öğrencileri tarafından kullanılmıştı; gerçeklik, varoluş, mekân, zaman ve ilişkili konuların anlamına yönelik felsefi arayışlara karşılık geliyordu. Böylesi arayışlar geleneksel bilimden ayrışır, çünkü ampirik deneylerle sınırlanmamışlardır. Maxwell yine de metafizik etrafına sınırlar koyma ihtiyacı hissediyor ve deney sonuçlarına dikkatle bakmak gerektiğini düşünüyordu: "İnsan zekâsının, deneysel çabalar olmadan kendi kaynaklarıyla bir fizik sistemi oluşturabileceğine inanmak için bir sebep göremiyorum."[3]

Maxwell kendini öncelikle bir doğa felsefecisi olarak görüyordu; doğal dünyanın kalbindeki düzeni mantık ve gözlem kombinasyonuyla anlamaya çalışıyordu. Newton gibi Maxwell de son derece dindardı, matematiksel açıdan yetenekliydi ve kabiliyetli bir deneyciydi, ayakları gerçek dünyaya basıyordu ve gözlemlere uyan teoriler bulmaya kararlıydı. Diğer yandan bu iki adam yetiştiriliş ve karakter açısından oldukça farklıydı: Newton'ın gençliğinde ailesi maddi olarak iyi durumda değildi, ama Maxwell çok varlıklı bir ailenin çocuğuydu. Edinburgh'da ailesinin mükemmel donanımlı evinde ve güney İskoçya Glenlair'de İngiltere sınırına yakın 6000 dönümlük arazi üzerindeki konaklarında büyüdü. Newton'ın aksine Maxwell'in kendisine yalnızca aklı için değil, aynı zamanda mizah anlayışı, cömertliği ve sıcaklığı için hayran olan birçok arkadaşı vardı. Newton göründüğü kadarıyla sanata çok az zaman ayırmışken (operaya bir kez gitmiş, onda da yarısında çıkmıştı) Maxwell edebiyatı, özellikle de Shakespeare'i seviyordu ve şiir okumasının yanı sıra hevesle yazıyordu.[4]

Yetenekli bir çocuk olan Maxwell, ilk teknik makalesini yalnızca on beş yaşındayken matematikteki oval eğriler hakkında yazdı ve makale Edinburgh Kraliyet Topluluğu'na okunurken

2. Oliver Heaviside'ın düşüncesiydi. Alıntı, Hunt (1991: 4)
3. Harman (1998: 35)
4. Iliffe (2007: 113); Campbell ve Garnett (1882: 22, 34, 90, 167, 180, 201)

dinleyiciler arasındaydı.[5] Üniversite çalışmalarına şehirde başladı, bilimi ve matematiği İskoç üniversitelerinin felsefi geleneği çerçevesinde öğrendi, Newton'ın eğitiminin de parçası olan birçok antik Yunan metni okudu. Maxwell matematikte ilerlemiş olsa da öğretmenlerinden birinin ifadesiyle matematiği "fazlasıyla hoyratça" uyguluyordu.[6] Kısmen matematiksel yeteneğini geliştirmek için, öğrenimini Cambridge Üniversitesi'nde tamamladı; burada matematik ve köklü uygulamalı bilimler alanlarında zorlu dersler aldı, bunların arasında gök mekaniği de vardı. Dersler onu matematik yönelimli bir doğa felsefecisi olarak oldukça donanımlı bir hale getirdi ve Avrupa'daki rakipleri karşısında daha sonra da göreceğimiz gibi ona çok önemli bir avantaj verdi.

*

Maxwell, 1854 yılının başlarında mezun olduktan sonra hukuk okumak veya kiliseye girmek şeklindeki bildik yolu izlememeye karar verdi. Bunun yerine, doğa felsefesi çalışmalarına devam etmeyi ve hakkında az şey bildiği bir konuya, elektromanyetizmaya odaklanmayı kafasına koydu. Şüphesiz ki, Avrupa'nın dört bir yanındaki laboratuvarlardan akıp gelen deneysel gözlemler yığınına matematiksel bir düzen getirme görevinin cazibesine kapılmıştı. Bu ilgisi, Londra Kraliyet Enstitüsü'ndeki Michael Faraday'ın bulgularıyla beraber zirveye ulaştı: Faraday, şaşılacak yetenekte bir araştırmacıydı; elektrik, manyetizma ve bunların ilişkileri konusunda birçok keşif yapmıştı.[7]

Maxwell, önde gelen Britanyalı matematik fizikçilerden William Thomson'la halihazırda iyi ilişkiler içindeydi; Thomson, alanında birçok branşta ismini duyurmuştu, özellikle de termodinamik alanında (ısı ve sıcaklık araştırmaları alanı). Maxwell, Thomson'a yazdığı mektupta kendisinin ve meslektaşlarının "elektriğe *yüklenmek*" niyetinde olduklarını söyledi ve nasıl ilerlemeleri gerektiği konusunda tavsiyesini istedi.[8] Mektup, Maxwell'in çarpıcı özgüvenini ve hırsını gösteriyordu: birçoğu

5. Campbell ve Garnett (1882: 45, 50, 197)
6. Warwick (2003: 137)
7. Harman (1998: 72)
8. Harman (ed.), (1990: 237-238)

Almanya'da yaşayan dünyanın önde gelen birçok teorisyeni tam da aynı konuya odaklanıyordu ve Maxwell onlarla boy ölçüşmeye hazırdı. Bu konuyu seçmekteki zamanlaması da iyiydi; çünkü Britanya'da uluslararası bir elektrikli telgraf ağı kurmaya başlayan birçok mühendis ve sanayici, konuyla ilgileniyordu. Britanya İmparatorluğu'nun büyük yararına olacağı kesin olan bu gereksinim, elektrik ve manyetizma teorisinin gelişimini tetiklemek ve Birleşik Krallık'ı bu alanda dünya lideri yapmak açısından büyük pay sahibi oldu.[9]

Maxwell, *yüklenişini* başlatmak adına daha akıllıca bir yöntem seçemezdi: Önce Faraday'ın *Experimental Researches on Electricity* [Elektrik Üzerine Deneysel Araştırmalar] adlı eserini okuyup, ihtiyaç duyduğu matematik üzerinde daha sonra düşünecekti.[10] Kitap, Maxwell'e kapsamlı bir elektrik ve manyetizma teorisinin açıklaması gereken gözlemlerin büyük bölümünü sunuyordu ve –hayati önem arz eder şekilde– alana dair bilimsel konsepti aktarıyordu.[11] Maxwell'in, başarılı bir teori oluşturma konusunda rakiplerini alt edebilmesinin sebebi de bu devrim niteliğindeki kavramı kullanmış olmasıydı. Kendisi kadar kuvvetli diğer birçok matematik zekâ da bu konu üzerinde çalışıyordu, ama feneri doğru yönde tutan bir tek o olmuştu.

Manyetik alanlar, mıknatıslar etrafına kavisli biçimlerde dizilen demir tozu görselleriyle bizim için artık daha tanıdık. On dokuzuncu yüzyılın büyük bölümü boyunca geleneksel düşünceye göre, tozlardan her biri üzerine etkiyen kuvvet, "belli bir mesafede gerçekleşen etkileşimle" işlerlik gösteriyordu, bu kuvvetler anlık olarak –sihirli bile denebilecek şekilde– boşluk boyunca iletiliyordu; boşluk ise inert bir zeminden başka bir şey değildi. Faraday buna karşı çıktı. Ona göre "*belli bir mesafede* gerçekleşen etkileşim" bir illüzyondu ve mıknatısla ilişkili alan, *boşluğun tamamını* etkiliyordu, her bir demir tozu üzerinde bir kuvvet uyguluyordu.

Avrupalı teorisyenler, alanlara dair tuhaf düşüncelerden uzak durmak istiyordu. Ancak Maxwell, Faraday'ın haklı olduğunu anlamıştı ve alan düşüncesinin matematiksel olarak

9. Schaffer (2011: 289-291)
10. Maxwell (1873a: ix)
11. McMullin (2002)

kesinleştirilmesinin ardından elektrik ve manyetizma açısından başarılı bir teorinin anahtarı olacağını görebiliyordu. Maxwell'in bu probleme "yüklenişi" bir sefere dönüştü: ilk aşaması yedi yıl sürdü ve meyve verecek noktaya gelmesi de onlarca yıl aldı. Bu süre içinde Maxwell, kendini önde gelen bir matematik felsefecisi olma noktasına getirdi ve çeşitli akademik pozisyonlarda görev yaptı; genellikle Glenlair'de bağımsız bir araştırmacı olarak çalışıyordu, mülkünün çevresindeki çiftliklerinden gelen kira gelirleriyle geçiniyordu. Çarpıcı bir görünümü vardı: 1.75 boyunda bir enerji deposuydu, üst düzey akademisyenlerin hepsinden beklenen uzun sakala ve bildiğini okuyan umursamaz tavırlara sahipti. Olağandışı ölçüde çok yönlü bir düşünürdü: diğer başarılarının yanı sıra Satürn'ün etrafındaki halka yapıyı açıkladı, ilk üç renkli fotoğrafı tasarladı ve asma köprülerin yapısındaki gerilimleri hesaplamak için yeni bir yöntem buldu. Bu gibi başarılarının en çok bilineni olarak da, birbiriyle çarpışan gaz moleküllerinin incelendiği mikroskop altı dünyasının hareketli ortamına girdi ve gazların normal dünyada nasıl davrandığını tahmin etmek adına istatistiksel mantık kullandı; bu tahminleri, araştırmacılar (Maxwell'in kendisi de buna dahil) ve deneyler tarafından daha sonraları teyit edilecekti.

1857 yılı baharında Maxwell, elektrik ve manyetizma teorisi üzerinde dört yıl sürecek yoğun bir çalışma başlattı. Faraday'ın sezgisel yolla ulaştığı manyetik alan konseptini hassas ve kesin bir matematiksel forma ulaştırmaya çalışarak işe koyuldu. Alanı meydana getiren kuvvet çizgileriyle, sıkıştırılamaz bir sıvının akışı arasında analoji oluşturarak bu amacını gerçekleştirmeye çalışıyordu. Sıvının hareketini tanımlayan denklemlerden başlayarak elektrik ve manyetik alanlar için de geçerli olabilecek benzer denklemler türetti. Bu, ümit verici bir başlangıçtı. Birkaç yıl sonra elektrik ve manyetizmayı her yere nüfuz eden eterle ilişkilendiren çok daha cüretkâr bir teorinin peşinde koşmaya başladı; bu teori aracılığıyla ışığın genel olarak dalgalar halinde yol aldığı varsayıldı. Başlangıç olarak, eteri moleküler vortekslerle boşta dönen kasnakların bir birleşimi olarak ele alan yeni bir mekanik model geliştirdi, eter manyetik alana tutulduğunda ikisi de hareket halinde oluyordu. Maxwell'in modeline göre bu mikroskobik hareket, gündelik dünyada gözlemlediğimiz

elektrik yüklere ve elektrik akımlarına sebebiyet vermektedir. Maxwell, vortekslerin ve boşta dönen kasnakların hareketini tanımlayan denklemleri oluşturdu. Bu hareketli mekanizmanın, elektrik ve manyetik alanların etkileşimlerine benzer olduğunu varsayarak onları tanımlayan denklemleri ortaya koydu. Çağdaşlarından biri, daha sonraları, onun bu yaklaşımını yerinde bir ifadeyle, Maxwell'in "neredeyse mucize denebilecek fizik analizi" olarak tanımlayacaktı.[12]

1861 yılının başlarında Maxwell, araştırmacıların elektrik ve manyetizma üzerine yaptıkları gözlemlerin neredeyse tamamını açıklayacak şekilde modelini düzenlemişti. Teorisinin ilk versiyonunda elektrik ve manyetik alanların değişim oranı ve bununla ilişkili diğer nicelikler yirmi diferansiyel denklem kullanılarak açıklanıyordu ve bunların birçoğu da Maxwell'in mekanik modelinden izler taşıyordu.

Maxwell'in ilk elektromanyetizma teorisi, sonraki yaz yaptığı ve modern bilim tarihinin en büyük birleştirici analizlerinden biri olan yaklaşımının temelini oluşturdu.[13] Maxwell, Glenlair'de bu model üzerinde uzun uzun düşündü ve düzensizliklerin eterden kolayca geçebildiğini fark etti, tıpkı dalgaların jölede akabildiği gibi. Teorisini tam olarak matematiksel formüle oturtmuş olması bu noktada semeresini verdi: diferansiyel denklemler, dalgaların şeklini, yapısını ve hızını tam olarak saptamasına imkân veriyordu. Maxwell yalnızca birkaç satırlık hesaplamayla dalgaların eterin içinden sabit bir hızla geçtiğini gösterdi; bu hızın değeri de araştırmacıların yakın zamanda tam olarak ölçtüğü niceliklere dayanıyordu. İskoçya'daki evinde ölçüm sonuçları elinde değildi, ama birkaç hafta sonra Londra'da bu sonuçlara baktığında önemli bir keşif yaptı: dalganın tahmin edilen hızı, ışığın boşluktaki hızıyla deneysel belirsizlikler dahilinde aynıydı. Bunları ikişerli gruplar halinde bir araya getirdi: ışık, elektrik ve manyetik fenomenlerin sebebi olduğunu düşündüğü aynı ortamın titreşimlerinden oluşuyordu.

Bu yaklaşım müthiş cesur ve birleştirici bir fikirdi. Maxwell, elektromanyetizma ve optiğin (ışığın) farklı disiplinler olarak

12. Bu yakın çağdaşı, astronom George Darwin'di: Warwick (2003: 137)
13. Arthur, J. ve Forfar, D., 'The Changing Notation of Maxwell's Equations' (2012): http://www.clerkmaxwellfoundation.org/newsletter _2012_10_23.pdf

muamele görmemesi gerektiğini söylüyordu. Bunların yerine, yalnızca tek bir disipline –elektromanyetizmaya– ihtiyaç vardı ve ışık yalnızca bunun bir sonucuydu. Maxwell, haklı olduğu konusunda kendine güveniyorduysa da, bu fikrinin –teorisinin en cesur öngörüsünün– deneysel olarak henüz doğrulanmamış olduğunu biliyordu.

Maxwell, 1865 yılında bu teorinin geliştirilmiş bir versiyonunu sundu ve bunu "büyük silahlar" olarak adlandırdı.[14] Bu, eterin işin içinde olduğu herhangi bir mekanik modele benzemiyordu; görünürde herhangi bir vorteks veya boşta dönen kasnak yoktu. Teori daha ziyade elektrik ve manyetik alanların değişim oranını ve bunlarla ilişkili nicelikleri tanımlayan diferansiyel denklemlere dayanıyordu, sonuçlar da deney araştırmacıları tarafından kontrol edilebiliyordu.[15] Maxwell'in arkadaşı William Thomson'a göre (genel olarak Britanya'nın en yetkin matematiksel fizikçisi olarak tanınırdı) bu versiyon "bir geri adımdı" ve bu adımı attığı için Maxwell'i asla tam olarak affedemeyecekti.[16] Thomson, doğaya dair teorilerin salt kuru ve neredeyse anlaşılmaz matematik terimleriyle ortaya konmasından hoşlanmıyordu: bunların, zihninde canlandırabileceği mekanizmalar üzerine oturtulmasını istiyordu. Thomson, sonraki birkaç yıl içinde faaliyete geçecek olan ilk transatlantik telgraf kablo hattını kurmaya çalışan fizikçilerle yakın işbirliği içindeydi. Bu girişime katılımı sayesinde daha sonraları gösterişli bir konak ve 126 tonluk bir yat satın alma imkânına kavuşacaktı; ayrıca Glasgow Üniversitesi'ne de cömert bir bağış yapıp pahalı yeni ekipmanlar hediye etti. Kraliçe Victoria'nın onu soylular sınıfına almasından sonra Lord Kelvin olarak tanınmayı seçti; Kelvin, laboratuvarının yakınlarında akan derenin adıydı, gerçi bazı arkadaşları biraz da gülerek daha uygun bir unvan alması gerektiğini söylüyorlardı: onlara göre Lord Kablo daha iyiydi.[17]

Maxwell telgraf konusuyla yakından ilgileniyordu, ama teorisi ilk aşamada buna acilen ihtiyacı olan uzmanlara çok fazla yardım sunarmış gibi görünmüyordu. Maxwell'in teorisi gö-

14. Maxwell'den kuzenlerinden birine, Charles Hope Cay, 5 Ocak 1865: Harman (ed.), (1995: 203)
15. Maxwell'den Thomson'a, 20 Şubat 1854: Harman (ed.), (1990: 237-238)
16. Flood, McCartney ve Whitaker (2008: 118-119)
17. Hunt (2004: 186)

ründüğü kadarıyla toplum üzerinde herhangi bir etki yaratmamıştı; toplumda, Charles Darwin tarafından yaklaşık altı yıl önce yayımlanan *On the Origin of Species*'in [Türlerin Kökeni] ardından gelen tartışmalar gündemdeydi. Ama uzun vadede bu iki eserin birbirine yakın önem arz ettiği ortaya çıkacaktı. Çok sonraları, 1960'ların başlarında Amerikalı fizikçi Richard Feynman, Maxwell'in teorisinin bir gün tarih yapraklarında "on dokuzuncu yüzyılın en önemli olayı" olarak yorumlanacağını söyleyecekti.[18] Bu iddiayı duysalar muhtemelen hem Maxwell'in meslektaşları hem de Maxwell'in kendisi çok şaşırırdı; teorinin önemini o sırada henüz hiç kimse kavrayabilmiş değildi.

*

Maxwell, gençlik yıllarından beri matematikle gerçek dünya arasındaki ilişkiden çok etkilenmişti. Meslektaşlarıyla sık sık matematiğin doğal felsefe alanındaki etkileyici kullanışlılığından bahsederdi, ama otuz dokuz yaşına geldiği 1870 yılına kadar bu görüşlerini kapsamlı şekilde sunmadı. 15 Eylül Perşembe günü görüşlerini bir seminerde, uzmanların olduğu bir ortamda değil, halka açık bir toplantıda sundu; mekân da beklenmedik bir adresti –Liverpool Adliyesi–, mermer sütunları, ahşap panelleri olan büyük bir salondu –St George Salonuydu–, şehrin merkezinde yer alan bir neo-Yunan yapıydı.[19]

Maxwell, bilimi ve uygulama alanlarını geliştirmeyi amaçlayan İngiliz Bilim Derneği (British Association for the Advancement of Science - BAAS) yıllık toplantısında konuşuyordu.[20] Charles Dickens, aylık bir yayında Mudfog Makalaleri adlı köşesinde bu derneği "her şeyin gelişimi derneği" diyerek alaya almış olsa da, BAAS'ın yıllık toplantısı, yeni bilimsel fikirleri toplumun binlerce meraklı üyesiyle paylaşmak adına en etkili platform konumundaydı. Maxwell, konuşmasına "Matematiğin Fizikle İlişkisi Üzerine" başlığını vermişti, bu konuda çokça saygı duyulan bir otorite durumundaydı: iyi bir doğa felsefecisi, saygı duyulan bir matematikçi ve canlı bir konuşmacıydı.[21] Kariyerinin

18. Feynman, Leighton ve Sands (1964: 1-11)
19. *The Athenaeum*, No. 2237, s. 329, 10 Eylül 1870
20. Campbell ve Garnett (1882: 161-162)
21. *The Observer*, 2 Ekim 1870, s. 3

bu aşamasında bazı açılardan Britanya fiziğinin Darwin'iydi: önde gelen bağımsız bir akademisyendi, gerçi çok daha az tanınıyordu.

Maxwell, adliyedeki kürsüye geldiğinde (toplantıdaki matematik ve fizik konuşmalarının büyük bölümü burada gerçekleşmişti) esprili, alçakgönüllü ve konusuna hâkim görünüyordu. Açıkça görüldüğü üzere yalnızca dinleyici kitlesi içindeki uzmanlarla değil, aynı zamanda matematik ve fizik konularında uzman bilgisine sahip olmayan insanlarla da iletişime girmek istiyordu.

Konuşmasına her zamanki gibi kendisiyle dalga geçer tonunda başladı: bu konular arasındaki ilişki hakkında konuşabilecek kapasitede biri olmadığını söyledi, çünkü bu konu "fazlasıyla olağanüstü" bir konuydu.[22] Ama kısa sürede bu meydan okumayı kabul etti ve "zihnin bir etkinliği" olarak tanımladığı matematik ile "moleküllerin dansı" fizik arasına keskin bir çizgi çizerek başladı. Ona göre matematikçilerin en temel amacı, "tüm bilginin kökenindeki ... ideal ahengi" sergilemekti ve bunu da "her şeyden önce, simetriyi gözeterek" yapmaya çalışıyorlardı. Bu oldukça derin bir gözlemdi, ama Maxwell'in bu konu üzerinde daha fazla durmamış olması şaşırtıcıdır, çünkü bu kavram dinleyici kitlesi içindeki çok az kişinin yabancılık çekeceği bir kavramdı. Çoğu insan, "simetri" kelimesini memnuniyet verici bir orantı duygusu anlamında kullanır; biçimdeki düzendir, genellikle doğal dünyada –örneğin çiçeklerin, hayvanların ve kıymetli taşların şekillerinde– ve insan eliyle yapılmış birçok yapıda –örneğin klasik tasarımlı binaların cephelerinde– görülür. Matematikçiler içinse "simetrinin" kesin bir anlamı vardır; "simetri", bazı matematiksel objelerin, belli bir değişiklik yapıldıktan sonra aynı görünmelerine imkân veren özelliği ifade eder. Örneğin düz bir kâğıt yüzeyi üzerindeki bir kare, 90 derece döndürüldükten sonra da aynı görünür ve kâğıt üzerine çizilmiş bir çember de, kaç derece döndürülürse döndürülsün aynı görünecektir. Yüzyıllar boyunca matematikçiler bu konuyu incelemiştir; son yirmi otuz yıllık zaman diliminde de grup teorisi olarak bilinen bir disiplinin parçası olarak öne çıkmıştır.

22. Maxwell (1870: 419-422)

Maxwell, matematiğin fizikten temelde farklı olduğunun altını çizdi: fizik, gerçek dünyaya dair gözlemleri anlamaya çalışmakla ilgilenir, nihayetinde doğanın farklı yönlerini ilişkilendiren yasalar oluşturmaya çalışır. Maxwell, bir yandan bu yasaların bulunması ve sonrasındaki kullanımının matematikçilerin yeteneğiyle kolaylaştırıldığını, diğer yandan fizik alanındaki keşiflerin, matematikçilerin "asla tasavvur edemediği" yeni biçimler ortaya çıkardığını düşünüyordu. Böylece, bilge bir şekilde; matematiğin soyutlamalarının, deneylerin somut gerçekliklerine (onun ifadesiyle deneyler, "düşüncenin gerçeklerle evlendiği" yerdi) niçin bu kadar iyi uyduğunu açıklamaya çalışmak gibi zorlu bir felsefi problemden sıyrılmış oluyordu.[23]

Maxwell'e göre doğa felsefesi (fizik de buna dahil), geniş bir kiliseydi ve cemaati içindeki herkese özen göstermekle kalmıyor, aynı zamanda öğretilerine şüpheyle yaklaşanları da umursuyordu. Kahramanı Michael Faraday gibi doğa felsefesinin yüksek rahiplerinden bazıları matematikten rahatsızlık duyuyor, hatta dehşete kapılıyordu. Maxwell, teorisyenlerin hepsinin konuya aynı şekilde yaklaşmadığının altını çizdi. Bazıları, soyut kavramları, gerçek dünyayla nasıl bir ilişki içinde olduklarını bilmeden salt sembolik biçimde algılayabiliyordu. Ancak diğerleri –kendisi dahil– matematiksel kavramların, "tasavvur ettikleri sahneyle" nasıl bir ilişki içinde olduklarını anlamak istiyorlardı. Maxwell'in ifadesiyle, böylesi teorisyenlere göre enerji ve kütle gibi kavramlar yalnızca soyutlama değildi, bunlar "güçlü sözcüklerdi, ruhlarını çocukluk anıları gibi harekete geçiren sözcüklerdi".[24]

Maxwell, kendisinin ve Avrupa'daki diğer teorisyenlerin çağdaş matematik kullanarak doğayı anlamaya çalışmasını büyük gayretle açıklamayı denedi. Önde gelen İrlandalı matematikçi William Rowan Hamilton tarafından tanımlanan, boşluktaki dönme hareketini açıklamak adına oldukça zarif bir yöntem olan ve dördey (kuaterniyon) olarak bilinen sayılardan bilhassa etkileniyordu.[25] Maxwell açısından bir o kadar cazip olan bir

23. Maxwell (1870: 419)
24. Maxwell (1870: 420)
25. Wood, C., "The Strange Numbers That Birthed Modern Algebra", *Quanta Magazine*, 6 Eylül 2018, online.

diğer alan da topolojiydi, Topoloji, Yunanca "topos" ve "logos" kelimelerinden geliyordu; "yer" ve "sebep" anlamındaydı. Rakipsiz Alman matematikçi Carl Friedrich Gauss'un bir öğrencisi olan Johann Benedict Listing tarafından ismi verilen topoloji, esnetildiğinde, büküldüğünde ve deforme edildiğinde aynı kalan obje ve yüzeylerin özellikleriyle ilgilenir. Bu alan bazen geometrinin bir türü olarak görülse de, aralarında makul bir ayrım vardır. Normal geometri, nümerik olarak örneğin açılar ve uzunluklarla belirtilen üçgenler ve çemberler gibi şekillerle ilgilenir. Topoloji ise daha farklıdır: temel olarak aynı şekle sahip objeleri, bu objeler farklı da görünse aynı sınıfta varsayar. Dolayısıyla, tuhaf görünüyor olsa da topolojistler bir üçgenin, karenin ve çemberin şekli arasında ayrım yapmaz, çünkü her birinin tek bir kesintisiz çizgiden oluşan birer sınırları vardır. Topolojistler benzer şekilde bir donutla çay fincanının şekli arasında da ayrım yapmaz, çünkü her birinin tam olarak birer deliği vardır.

Gauss ve Listing, Maxwell'i ilgilendiren bir başka matematik alanında da çığır açtılar: kısmen günlük hayatımızda da karşılaştığımız düğümlerle, bağlı iplerle veya kesilmeden çözülemeyecek diğer materyallerle alakalı düğümlerle ilgilenen düğüm teorisi.[26] Maxwell'in arkadaşları William Thomson ve Peter Tait, maddenin kendisinin de yaratılış anında eter içinde dönen vortekslerdeki düğümler tarafından üretilmiş olabileceğini düşünüyorlardı. Thomson ve Tait, her biri bir duman halkasına benzeyen düğümlü vortekslerin maddenin temel

26. Düğüm teorisi, matematikte, üç boyutlu kapalı eğrilerin araştırılmasına yönelik kuramdır. Bu tür eğriler, ilmik atıldıktan sonra uçları birleştirilen herhangi bir ip parçasına benzetilebilir. Tek bir devreye karşılık gelen düğümün topolojik eşdeğeri çemberdir. Ama çemberle özdeş değildir, çünkü düğüm, bir ya da daha çok noktada kendi içerisinden geçirilmedikçe çember biçimine dönüştürülemez. Bu durum ise, düğümün iki boyutlu grafiğinde, eğrinin kendisiyle kesişmesi demektir. En basit düğümlerde, bu türden üç kesişme bulunur; bu nedenle düğüm, üç basamaklı olarak kabul edilir. En basit türden düğümün bile, birbirine dönüştürülemeyen iki yapılandırması vardır. Basamak yükseldikçe belirgin düğüm sayısı da hızla artar, ama 20. yüzyılın ortalarına değin, belirli bir basamakta elde edilebilecek düğüm sayısının hesaplanmasını olanaklı kılan herhangi bir yöntem bulunamadı. Öte yandan, yüksek basamaklardan bazı düğümlerin, daha düşük basamaktan düğümlerin birleşimi biçiminde ifade edilebileceği gösterildi. Örneğin, altıncı basamaktan düğümler olan camadan ve acemi bağlan, yonca yaprağı biçimindeki iki düğüme indirgenebilir (y.h.n.).

yapı taşlarından, yani atomlardan başka bir şey olmadığına inanıyordu. Göründüğü kadarıyla her bir kimyasal elementin atomları belli bir düğüm tipine karşılık geliyordu (örneğin bir düğüm varyasyonu hidrojen atomunu oluştururken, bir diğer varyasyon oksijen atomunu oluşturuyordu vb.)[27]

Bu fikri oldukça heyecan verici bulan Maxwell, durumu ana hatlarıyla Liverpool'daki dinleyicilerine de açıkladı. Fikrin öncüleri "çok büyük matematiksel güçlüklerle" karşılaşmış olsa da bu yaklaşım çığır açabilirdi: bu vorteks düğüm teorisi; "gözlenen fenomeni açıklayabilmek adına icat edilmiş" yöntemler kullanarak maddenin bileşenlerine dair teoriler üretmek yerine, yalnızca "madde ve hareketle" ilgileniyordu.[28] Alt metin açıktı: fizikçiler, matematikçi meslektaşlarından çok şey öğrenebilirdi.

Maxwell, elektrik ve manyetizmadan bahsederken kendi teorisini tanıtma fırsatını kullanmadı, yalnızca, alanın yeni kavramını kapsamayan Alman alternatifi karşısında kendi teorisini niçin tercih ettiğini açıkladı. Maxwell, Avrupalı fizikçilerin kendi spekülatif elektromanyetizma teorisi hakkında çok az şey bildiğinin ve bu teoriyi pek de ciddiye almadıklarının farkındaydı. Birçok konuda yetkin Hermann Helmholtz –Britanya fiziğini yakından bilen ilk Alman fizikçi–, daha öncesinde özel olarak kaleme aldığı ifadelerde şunları söylemişti: "Maxwell'in teorisi ... bugüne kadarki en parlak matematiksel fikirlerden biri. Ama bununla beraber ... kuvvetlerin yapısına dair geçerli fikirlerin tamamından o kadar uzak ki, hakkındaki düşüncemi kamuya açık olarak beyan edip tatsız ifadeler kullanmak istemem."[29]

Maxwell, seminerdeki konuşmasını yapmadan önceki akşam muhtemelen Liverpool Filarmoni Salonu'nda toplanmış olan kalabalığın arasındaydı ve dolayısıyla BAAS'ın yeni başkanı, yıldız konuşmacısı, biyolog Thomas Henry Huxley'nin açılış konuşmasını dinlemiş olması yüksek bir ihtimaldi. Huxley birkaç ay öncesinde özel bir röportajda verdiği demeçte, "matematiğin, gözlem hakkında, deney hakkında, tümevarım hakkında, nedensellik hakkında hiçbir şey bilmeyen bir araştırma alanı" olduğunu söylemişti. Prestijli bilim dergisi *Nature*'ın sayfalarına

27. Silver (2006: 158-162)
28. Maxwell (1870: 421)
29. Helmholtz'dan Tyndall'a, 18 Ocak 1868, alıntı, Cahan (2018: 377-378)

taşınan yanlı saptamalardı bunlar.[30] Huxley'nin gazeteciler tarafından çokça övülen Liverpool'daki semineri ise matematik hakkında böylesi tartışmalı saptamalara sahne olmadı, ancak "bilimin büyük trajedisine işaret ediyordu: muhteşem bir hipotezin çirkin bir gerçekle doğranması" olarak ifade etmişti bunu. Bu ifade, aynı korkuları paylaşan önde gelen birçok teorisyenin kullanacağı ünlü bir söz olacaktı.[31]

Eğer Maxwell gerçekten de Huxley'nin başkanlık konuşmasını dinleyen kalabalığın içinde yer aldıysa, elektromanyetizma teorisinin araştırmacıların deneylerinin ellerinde ölüp ölmeyeceğini merak etmiş olmalıdır. Bir yıl sonra, Cambridge Üniversitesi'nin yaptığı bir teklifi kabul ederek, deneysel fizik alanında üniversitenin ilk profesörü oldu. 1871 sonbaharında görevi aldı ve üniversitenin yeni Cavendish laboratuvarının yapılışını planlayıp yönetmeye başladı, bu esnada da 875 sayfalık *Treatise on Electricity and Magnetism* [Elektrik ve Manyetizma üzerine tez çalışması]adlı çalışmasını tamamladı. Maxwell'in bu konuyla ilgili tüm yazdıkları arasında en kapsamlı ve en korkutucu ölçüde matematiksel olanı buydu; eseri birçok modern matematiksel kavram içeriyordu, bunlar arasında topoloji ve düğüm teorisi de vardı.[32] Bu matematiksel fikirlerin, elektrik ve manyetizmaya dair daha iyi bir kavrayış sağlamasına yardımcı olacağını düşünüyordu: yeni matematik ve deney sonuçları, evreni anlamamıza ışık tutabilirdi. Bu görüş, Birleşik Krallık'taki meslektaşları tarafından yaygın olarak paylaşılmıyordu: örneğin Thomson, matematiğin "sağduyunun soyut hale getirilmesinden ibaret" olduğunu düşünüyordu –matematik, fizikçilerin hizmetkârı olmalıydı, rehberi değil–.[33]

Maxwell'in Cavendish Laboratuvarı müdürlüğü görevi acı bir şekilde kısa kesilecekti. 1877 yılının baharında ciddi bir sindirim sorunu yaşamaya başladı ama kendini işine ve diğer ilgi alanlarına vermeye devam etti. Bir yıl sonra son şiiri olacak olan bir şiir yazdı; Percy Shelley'nin *Prometheus Unbound* adlı eserine bir

30. Sylvester, J. J., 'A Plea of the Mathematician', *Nature*, p. 237, 30 Aralık 1869
31. Huxley, T., B.A.A.S Başkanlık konuşması, 1870: http://aleph0.clarku.edu/huxley/CE8/B-Ab.html. Konuşma hakkında bir rapor için, bkz. *Nature*, 22 September 1870, s. 416; ve*The Observer*, 2 Ekim 1870, s. 3.
32. Silver (2008: 1267)
33. Smith ve Wise (1989: 363)

öykünmeydi, düğüm teorisine kuvvetli referanslar içeriyordu.[34] 1879 yılı baharında artık bedeni küçülmüş, hastalıklı görünüyordu, ayakta duramaz haldeydi ama elektromanyetik tezinin yeni bir basımı üzerinde çalışmaya devam ediyordu, ayrıca fizikteki güncel problemlere ilişkin mektuplar yazıp yolluyordu. Takip eden Kasım ayında kırk sekiz yaşındayken mide kanserinden öldü. Son günlerini Cambirdge'deki evinde geçirmişti, eşi ve arkadaşları ona Shakespeare ve İncil'den pasajlar okuyordu, kendisi de ölüm döşeğinde, yaratıcısı tarafından bu kadar nazik muamele gördüğü için şükrediyordu.[35] Doktorlarından birine göre, "daha önce hiçbir insan ölümü bu kadar bilinçli ve sakin karşılamamıştı."[36]

Maxwell son nefesine kadar eterin gerçekliğine inandı. 1830'ların başından itibaren (Victoria da 1830'larda kraliçe olmuştu) bu görüşünü Birleşik Krallık'taki neredeyse tüm meslektaşlarıyla paylaştı. Daha sonraları bilim tarihçisi John Heilbron ,eter teorisi taslağını Victoria Dönemi Standart Modeli olarak adlandıracaktı; bunun nedenlerinden biri de bu teorinin, Victoria yönetimini karakterize eden "materyalizme, karmaşa ve kayıtsızlığa" uygun düşüyor olmasıydı.[37] Günümüzde bazı bilim insanları Maxwell'in etere daha şüpheci yaklaşmamış olmasına şaşmaktadır; ayrıca Maxwell, Newton dönemindeki seleflerini, bilimi Descartes'ın vortekslerinden kurtardıkları, dolayısıyla da "gökyüzündeki örümcek ağlarını temizledikleri" için övmüş biriydi, dolayısıyla bu durum etere yaklaşımını daha da şaşırtıcı kılıyordu.[38] Bununla beraber Maxwell, kendisinin ve meslektaşlarının yaptığı varsayımlar hakkında doğanın hükmünü dinlemeye her zaman istekliydi: ölmeden dokuz ay önce Washington DC'deki bir yetkiliye yazdığı mektupta, deney araştırmacılarının, eter içindeki hareketi belirleyip belirleyemeyeceklerini kontrol etme ihtiyacından bahsetti.[39]

34. Silver (2008: 1266-1267)
35. Campbell ve Garnett (1882: 421)
36. Campbell ve Garnett (1882: 199)
37. Heilbron (1997: 48-50)
38. Maxwell, J. C., 'Action at a Distance', Kraliyet Enstitüsü semineri Şubat 1873: Niven (ed.), (2010: 315)
39. Maxwell'den David Peck Todd'a (National Almanac Office), Washington, DC, 19 Mart 1879: Harman (ed.), (2002: 767-769)

Maxwell, varlığını tahmin ettiği dalgaların gerçek mi yoksa matematiksel olarak disipline edilmiş hayal gücünün bir ürünü mü olduğunu asla öğrenemeyecekti. Fizikçi Heinrich Hertz, Almanya'daki laboratuvarında elektromanyetik dalgaların varlığını ilk kez kanıtlayıncaya kadar neredeyse on yıl daha geçecekti ve aslında Almanya, Maxwell'in teorisine muhalefetin en yoğun olduğu yerdi. Elektromanyetizma teorisi konusunda uzman olan Hertz, yaptığı keşfin, Faraday'ın alan konseptine dayanmayan herhangi bir elektrik ve manyetizma teorisi için ölüm çanlarının çalması anlamına geldiğini biliyordu.

Hertz'in keşfinin ortaya çıkışı; bazı fizikçileri, çoğunlukla da Britanyalı ve İrlandalı fizikçileri Maxwell'in zorlu teorisiyle yakından ilgilenmeye ve kullanımını daha kolay hale getirmeye yöneltti. Bu grubun en kapasiteli matematikçisi, telgraf konusu uzmanı Oliver Heaviside'dı; bilime pratik ve gerçekçi yaklaşımlar getiren sivri dilli tuhaf biriydi, matematiksel züppeliklerle de kaybedecek zamanı yoktu. Heaviside yirmi dört yaşında emekli oldu ve bir daha hiç başka iş yapmadı, ama elektromanyetik teoriye dair gereksiz olduğunu düşündüğü Maxwell'in matematik formüllerini ortadan kaldırmak için bıkıp usanmadan çalıştı.[40] Heaviside'a göre, "yalnızca matematiksel fonksiyonlara kapılmadan mümkün olduğunca fiziğe yakın kalmak" önemliydi.[41] Daha sonraları topluca Maxwellians olarak anılacak olan o ve arkadaşları, Maxwell'in teorisini daha net, daha kısa ve daha erişilebilir bir hale getirmek için yıllarca çalıştılar. Nihayetinde başardılar da, elektrik ve manyetizma hakkında fizikçilere yeni analizler sundular –özellikle de elektrik ve manyetik sistemler içinde enerjinin akışı hakkında–; bunların birçoğu Maxwell tarafından oluşturulan fikirlerin oldukça ötesine geçti. Heaviside'ın söylediği gibi, "Maxwell yalnızca yarım Maxwellian'dı."[42]

Maxwell, daha sonraları kendi adı verilecek olan dört diferansiyel denklemi yazmış kişi değildi aslında: ilk olarak Heaviside tarafından yazılmışlardı. Bu denklemler deneysel olarak saptanmış dört fenomeni açıklamaktadır: elektrik yükler, etraflarındaki

40. Hunt (2012: 48-50)
41. Hunt (1991: 202)
42. Heaviside, bu saptamayı Mart 1895'te yapmıştır (Bruce Hunt'ın özel iletişimiyle); Hunt (1999: 2)

boşlukta bir elektrik alan yaratır; manyetik kutuplar daima çiftler halinde ortaya çıkar; değişen bir manyetik alan bir elektrik alan yaratır; ve bir elektrik akımı bir manyetik alan yaratır, tıpkı değişen elektrik alanın yarattığı gibi. Bu denklemler, elektrik mühendisleri ve iş insanları için çıkarılan ticari bir dergi olan *Electrician*'da bir dizi makale halinde, yüzlerce sayfalık düzyazı ve matematik ifade arasında yer aldı. Bu makalelerden ilki yayımlandığında Maxwell'in ölümünün üzerinden en az beş yıl geçmiş durumdaydı.[43] O –ve Faraday– bu denklemlerin, gelişmekte olan elektrik endüstrisinde çalışan teorisyenler için, özellikle de kablosuz telgrafı geliştiren fizikçiler ve mühendisler için en önemli araçlardan biri haline gelmiş olduğunu görmekten büyük memnuniyet duyardı.

Maxwell, ölümünden altı yıl önce yaptığı bir saptamada, Faraday'ın "mesleki olarak matematikçi olmasa da" bu alanda getirdiği açıklamaların, "üst düzey bir matematikçi olduğunu" gösterdiğinin altını çizmişti.[44] Doğa felsefecilerinin, "Faraday'dan hemen sonraki büyük filozof" ortaya çıktığında oluşacak olan bilimin adını bile bilmediğini öne sürmüştü. Maxwell, "bu filozofun" kendisi olduğunu düşünemeyecek kadar mütevazıydı. Büyük teorisyenler grubunda kendisine katılacak bir sonraki düşünürün, kendi elektromanyetizma teorisine itirazın en yoğun olduğu Almanya'dan çıkacağını da bilemezdi. Bu halef, kendisini Maxwell'in hiç yapmadığı bir şekilde tanımlayacaktı: kendisine teorik fizikçi diyecekti.

*

Birleşik Alman ülkesini oluşturacak olan Alman eyaletlerindeki ve prensliklerindeki fizikçiler 1860'lardan beri sürekli gelişim içindeydi. Sanayileşme daha önce görülmemiş bir hızla artarken; devletlerin idari otoriteleri, eğer Birleşik Krallık'la ve yükselmekte olan ABD ile rekabet etmek istiyorlarsa, fiziğe yatırım yapmanın hayati olduğunu biliyorlardı. Diğer disip-

43. Bugün bilindiği şekliyle dört "Maxwell Denklemi", 1885 tarihli *The Electrician* adlı çalışmasında yer alan uzun 'Electromagnetic Induction and Its Propagation' dizilerinin ilk kısmında yer almıştır, şu adresten erişim sağlanabilir: https://catalog.hathitrust.org/Record/001481346
44. Maxwell (1873b: 398)

linlerdeki uzmanlar da rüzgârın ne yönden esmekte olduğunu görüyor ve dikkatlerini fiziğe yöneltmeye başlıyorlardı. Başka branştan fiziğe geçenlerin en ünlülerinden biri, dönemin en etkili bilim insanlarından biri olan Hermann von Helmholtz'du; ana odağını fizyolojiden fiziğe çevirmişti, Maxwell'in teorisinin, matematiksel açıdan daha zorlu fizik teorilerinin revaçta olacağı bir trendin habercisi olduğunu düşünüyordu.[45]

Helmholtz haklıydı ve bu trend Almanya'daki birçok fizikçiyi deney araştırmacısı ve teorisyen olmaya teşvik etti. Ama matematiği kullanarak gerçek dünyayı anlamaya çalışanlar yalnızca teorisyenler değildi; uzman matematikçiler de onlara katılmıştı. Matematiğin başkenti kabul edilen Göttingen'de Bernhard Riemann'ın peşinde olduğu şey, neredeyse her şeyin matematiksel teorisi olabilecek bir yaklaşımdı; aynı esnada saf matematiğin sınırlarını da genişletiyordu.[46] O dönem itibarıyla matematik, artık yaratıcı bir disiplin olarak kökleşmiş hale gelmekteydi. Romantizm Almanya'da entelektüel tartışmaların havasını etkilemeye devam ederken, matematiğin bir sanat mı yoksa bilim mi olduğunu sormak sık rastlanan bir durum haline gelmişti ve daha da temel olarak, matematiğin icat mı yoksa keşif mi olduğu tartışılıyordu. Bu son soru, felsefenin tüm derin problemleri gibi asla son bulmayacak, herkesçe kabul edilen bir cevap bulunamayacak bir soruydu; tıpkı doğanın kanunlarının icat mı yoksa keşif mi olduğu sorusu gibi.[47]

Almanya'da teorik fiziğin şekil almaya başladığı dönem bu dönemdi. Bu alt-disiplinin uzmanları laboratuvarlarda çok az zaman geçiriyor, bunun yerine, varolan fizik yasalarını anlamaya ve yenilerini keşfetmeye odaklanıyorlardı. Teorik fizikçiler bilim yapmak adına kendilerine has bir yol geliştirdiler. Matematikten ve eldeki tüm deneysel verilerden yararlanarak mümkün olan en az sayıda yasayla cansız dünyaya dair mümkün olan en kapsamlı kavrayışa ulaşmaya çalışıyorlardı (buna karşılık matematiksel fizikçiler esasen fizik araştırmalarında ortaya çıkan zorlu matematiğe odaklanmışlardı). Sanayiciler, kendini

45. Cahan (2018: 377-379, 442-444, 500-501, 548, 573-574, 604-605, 607, 609-610, 612, 620, 624-625)
46. Jungnickel ve McCormmach (2017: 197-198)
47. Gowers (2011: 3-12)

ilk kez teorik fizikçi olarak tanımlayan bu araştırmacıların birçoğunun, özellikle de termodinamik ve elektromanyetizma alanında çalışanların elde ettiği bulgulardan sıklıkla faydalandılar. Bu alanlardaki keşifler, modern endüstri sistemlerinin ve motorlarının maksimum verimlilik, güç ve kârla çalışacak şekilde tasarlanmasına imkân verdi.

Almanya'da teorik fizikçiler, 1871'de biten Fransa-Prusya Savaşı'nın kısa süre sonrasında Otto von Bismarck'ın İkinci Alman İmparatorluğu'nu kurduğu dönemde olgunluk kazandılar. Özellikle Prusya'da yönetim, ulusal önem arz ettiği düşünülen akademik alanlara büyük yatırımlar yapmaya başladı.[48] Fizik de bunlardan biriydi ve bireysel olarak fizikçilerin üzerindeki baskı artarak, onlardan alanlarına en büyük katkıyı yapmaları isteniyordu. Bu fizikçilerin çoğu öncelikli olarak deney araştırmacısıydı veya deneysel ve matematiksel araştırmaların bir kombinasyonunu yapmış kişilerdi, ama küçük bir bölümü teorik fizikçi oldu. Kurumlar; bilim tarihinde ilk defa, doğal dünyanın işleyiş şeklini saf düşünce yoluyla sorgulamak üzere uzmanlar çalıştırmaya başladı; bu uzmanların ellerini deneylerle kirletme mecburiyetleri yoktu.[49]

1875 yılından itibaren, öncelikli olarak Helmholtz'un ve meslektaşı Gustav Robert Kirchhoff'un araştırmaları neticesinde, Berlin; yeni Alman İmparatorluğu'nun başkenti olmanın yanında teorik fiziğin entelektüel başkenti de oldu.[50] Teorik fizik kısa sürede yarı otonom hale geldi ve böylesine yeni bir alan için alışılmadık ölçüde hızlı şekilde yüksek bir prestije kavuştu, Alman biliminin en keskin zihinlerinin birçoğunu cezp etmişti. 1889 yılında Helmholtz Berlin'de Teorik Fizik Enstitüsü'nü kurdu –daha sonra açılacak çok sayıda teorik fizik enstitüsünün habercisiydi– ve ilk yöneticisi olarak olağanüstü yetenekli Max Planck'ı göreve getirdi. Planck, deneysel fizik alanında hiçbir araştırma yapma girişiminde bulunmamış, su katılmamış bir teorisyendi: laboratuvarı kafasındaydı.[51] Yeni enstitünün yıllık bütçesi kısıtlı olsa da, teorik fizik alanında eğitim ve araştırma

48. Cahan (1989: 11-15)
49. Jungnickel ve McCormmach (2017: x-xii)
50. Cahan (2018: 458)
51. Jungnickel ve McCormmach (2017: 283)

yapmak adına canlı bir merkez yaratması için yeterliydi. Başarısı kısa sürede karşılığını buldu: otuzlu yaşlarının başında kısa sürede Alman fiziğine yön veren yeni jenerasyonun gayri resmi lideri oldu; Alman fiziği oldukça köklü bir yapıydı ve neredeyse bütünüyle erkeklerden oluşuyordu.[52]

Planck, öğrencilik döneminde teorik fizik alanında kariyer yapmasına karşı çıkılarak yetiştirilmişti, çünkü fiziğin ilkeleri büyük oranda zaten keşfedilmişti; ama bu, onu caydırmadı. Konunun geleneklerine dair anlayışımızı derinleştirmek istiyordu. Planck oldukça tutucu bir düşünürdü, bu yüzden de bilim tarihindeki en devrimci keşiflerden bazılarını gerçekleştirmiş kişinin o olması biraz ironiktir. Teorik fiziğin muhtemelen ilk büyük zaferi olan bu önemli adıma yakından bakmaya değer diye düşünüyorum.

Planck, 1900 yılının son haftalarında Berlin'de oldukça sönük görünebilecek bir konu üzerinde çalışıyordu: farklı sıcaklıklarda fırın duvarlarına çarpan elektromanyetik radyasyonu anlamaya niyetliydi. Bu araştırma, Almanya ulusal fizik ve teknoloji araştırma merkezine ait bir projenin parçasıydı ve amaçları arasında, radyasyonu daha iyi anlamak ve Alman sanayi şirketlerine daha verimli elektrik lambaları üretmeleri adına destek sağlamak da vardı.[53] Deney araştırmacısı meslektaşlarının sağladığı yeni verilerle kafası karışan Planck, bunları yalnızca altlarında yatan teorinin matematiğini eşip deşerek açıklayabileceğini anladı; daha sonra anlattığına göre bu, "çaresizlikten doğan bir eylemdi".[54] Kendisini de şaşkınlığa düşürecek şekilde, meslektaşlarının ortaya koyduğu bu verileri yalnız ve yalnız o dönemdeki hiçbir fizikçinin yüz vermeyeceği bir varsayımla açıklayabileceğini anladı.

Planck'in kâfirce varsayımına göre, fırın duvarları içindeki madde radyasyonla yalnızca belli, kesin miktarlarda etkileşime giriyordu, bu miktara "*quanta* [miktar]" adını verdi. Bu yaklaşım genel olarak kabul edilmiş olan ve Maxwell'in teorisiyle de desteklenen anlayışla, yani radyasyon enerjisinin kesintisiz olarak iletildiği anlayışıyla taban tabana zıttı. Planck daha sonra quanta'nın varlığının "bütünüyle düzgün bir varsayım olduğunu

52. Sime (1996: 24-26)
53. Cahan (1989: 7, 127, 143, 145, 148, 150-155)
54. Heilbron (1996: 10, 19-21); Pais (1982: 369-371)

ve olumlu bir sonuç almaya çalışmak dışında buna gerçekten çok da kafa yormadığını" yazacaktı –ona göre quanta gerçek değil, hayaliydi–.[55] Ama çılgınca görünen bu hipotezin doğru olduğu ortaya çıkacaktı: Planck, farkında olmadan, kuantum mekaniği olarak bilinecek olan teorik fizik branşının ortaya çıkışına giden yolda ilk adımı atmıştı. Bu alanın, atomik dünyanın işleyişini anlamak adına Planck'ın kararlılığından doğmuş olmasının yanı sıra, matematiği deşmesinin bir sonucu olduğunu da hatırlamak yerinde olur. Ayrık enerji transferi kavramının –kesintili değişimler de içerecek şekilde–, incelikli matematik kullanılarak nasıl açıklanacağı hiç belli değildi, matematik neredeyse her zaman düzenli ve sürekli olarak değişen biçimlerle alakalıydı. Quanta dünyasının, daha sonra keşfedilecek bir matematikle açıklanmak zorunda kalacağına dair ilk işaretlerden biriydi bu.

Planck, bilime her zaman dikkatli bir yaklaşım getirirdi. Teorik fiziğin "bütünlük ve kompakt yapıyı" amaçlaması gerektiğini düşünüyordu: gerçekten evrensel olabilecek, gerçek dünyada yapılan tüm gözlemleri açıklayabilecek, "her yerde, her zaman, herkes ve her kültür" için geçerli olabilecek matematiksel yasalar bulmaya çalışmalıydı.[56] İnsanlardan bağımsız bir gerçekliğin var olduğuna inanıyordu ve bu dış dünyanın en iyi şekilde anlaşılabilmesi için fiziğin, insan kökenli izlerinden mümkün olduğunca arındırılması gerektiği düşüncesindeydi: "kişiselleştirmenin gerçek anlamda ortadan kaldırılışı" diyordu buna. Fiziğe getirilen bu yaklaşım, genç Albert Einstein'ın düşüncesiyle neredeyse aynıydı; Planck onun düşünceleriyle ilk kez 1905 yılında, Einstein doğa yasalarına yeni ve parlak bir ışık getirdiğinde karşılaştı.

*

Einstein'ın en güçlü karakter özellikleri –olağanüstü merakı, kararlılığı ve özgür düşünce yapısı–, on altı yaşındayken çekilmiş bir fotoğrafta bütünüyle görülebilir haldedir.[57] Diğer öğrencile-

55. Planck'tan R. W. Wood'a, 7 Ekim 1931, alıntı, Hermann (1971: 23-24)
56. Planck (1915: 6); ayrıca bkz. Planck (1949: 13)
57. Google görsel arama, 'Einstein 1896': https://www.google.co.uk/search?q=bern+wiki&client=firefox-b-ab&biw=1363&bih=1243&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwigm5iIxJ7SAhWLAsAKHQcDDyUQ_AUICCgD#tbm=isch&q=Einstein+1896&imgrc=5wvIK_ohjapZqM

rin arasında salaş haliyle gülümsemeden durmaktadır, kravatı gevşek bağlanmıştır, bakışları ciddi ve azimli bir insan izlenimi uyandırmaktadır; işte size belli noktalara varacak olan ve bunu bilen bir genç adam. Genel inanışın aksine, öğrencilik yıllarında hem fizik hem de matematikte olağanüstü yetenekliydi. On iki yaşına geldiğinde Öklid matematiğine merak saldı ve kalkülüsü öğrenmek için dört senesini verdi. Ortaokuldaki öğretmenleri, ona matematiğin fizikçiler için yalnızca bir araç olduğunu söylüyordu. Zürih Politeknik okulunda (daha sonraları Zürih'te İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü veya ETH olarak bilinen okul) fizik ve matematik alanlarında asi bir lisans öğrencisi olduğu yıllarda bu görüşe sıkı sıkıya bağlıydı.[58] Okulun en iyi matematikçilerinden biri olan Hermann Minkowski, daha sonraları yaptığı açıklamada, Einstein'ın matematiği hiç takmadığını ve "gerçek bir tembel" olduğunu söyleyecekti.[59] Einstein zamanının büyük bölümünü yüksek seviye matematiğe ayırmak için bir sebep görmüyordu: o güne değin görebildiği kadarıyla teorik fizikçiler yalnızca görece net kalkülüste ve olasılık teorisinde mahir olmalıydı, örneğin Laplace ve çağdaşları bunlara büyük oranda aşinaydı. Yetkin, özgüvenli ve dikbaşlı Einstein her türlü otoriteye şüpheyle yaklaşıyordu ve hocalarının kendisine fizik alanında öğrenmesi gereken anahtar konuları söylemesine ihtiyaç duymadığını düşünüyordu. Eğitimi için en önemli olduğuna inandığı materyaller üzerinde genellikle yalnız çalışıyor ve sık sık dersleri ekiyordu; bu yüzden bazı hocalarına pek de hoş görünmüyordu.

Lisans öğrencisi Einstein'ı en fazla etkileyen konu, Maxwell'in elektromanyetizma teorisiydi.[60] Konunun müfredatta bile yer almadığını gören Einstein, teorinin en kilit diferansiyel denklemlerini ve fizik açısından yorumlamalarını kendi kendine çalıştı ve bu yaklaşım onun dünyaya bakışı açısından merkezi konuma yerleşti. İzlediği bu stratejinin sonucu gayet olumlu oldu. Part-time doktora öğrencisi olduğu yıllarda –aynı esnada Bern'deki patent bürosunda full-time çalışırken– Maxwell'in fikirlerinin elektromanyetizmaya dair yeni bir kavrayıştan daha

58. Cahan, D., 'The Young Einstein's Physics Education', yer aldığı çalışma, Howard ve Stachel (ed.), (2000); Pyenson (1980: 400); McCormmach (1976: xiv, xv, xviii, xix, xx, xxvii)
59. McCormmach (1976: xiv)
60. Schilpp (ed.), (1997: 33)

fazlasını sunduğunu gördü –aynı zamanda doğanın tüm yasalarına dair derin bir algı imkânı veriyorlardı–.

Einstein, bu fikrini ilk olarak 1905 yılında, doktorasını tamamladıktan kısa süre sonra yayımladığı muhteşem tezlerde sundu; o dönemde o ve eşi yeni doğmuş olan oğullarıyla da ilgileniyordu.[61] Bu makalelerden birinde Planck'ın fikirlerine dayanan bir analiz ortaya koydu, gerçekten devrimci saydığı katkılarından yalnızca biriydi bu.[62] Planck, ışık (daha genel anlamda elektromanyetik radyasyon) ve madde arasında yalnızca quanta halinde enerji alışverişi olabildiğini söylemişti, ama Einstein çok daha ileri gitti. Işık (ve tüm elektromanyetik radyasyon) enerjisinin ta kendisinin yığınlar veya quanta'lar halinde geldiğini öne sürdü. Bu yaklaşım, ışığın kesintisiz enerji yayacak şekilde dalgalardan oluştuğunu söyleyen geleneksel düşünceye ters düşüyordu. Fizikçiler bu dalga-temelli ışık anlayışını neredeyse yüz yıldır benimsemiş durumdaydı ve teori sarsılmaz görünüyordu –1905 yılı itibarıyla bu düşünce, Maxwell'in elektromanyetizma teorisinin yanı sıra yüzlerce deney sonucuyla destekleniyordu–. Bu sebeplerden Einstein'ın "ışık quanta" teorisi o kadar radikaldi ki, önde gelen fizikçilerin çoğu bunun safsata olduğunu düşündü ve on yıldan uzun süre ciddiye almadı.

Uzmanların ilgisini çeken ilk Einstein makalesi, özel izafiyet teorisi olarak bilinecek olan teziyle ilgiliydi: özel izafiyet deniyordu, çünkü yalnızca düz bir hat üzerinde sabit hızda hareket eden gözlemciler için geçerliydi (örneğin farklı hatlar üzerinde sorunsuz ilerleyen trenler). Einstein böylesi gözlemcilerin hepsinin, hem boşluktaki ışık hızının rakamsal değeri üzerinde hem de fiziksel fenomenin tabi olduğu yasaların matematiksel biçimi üzerinde her zaman uzlaşma içinde olduğunu düşünüyordu. Gözlemcilerin hiçbirinin eşsiz olmadığı düşüncesindeydi: her biri doğaya dair aynı objektif açıklamayı sunuyordu. Einstein'ın teorisine göre, "eter" gereksiz bir kavram konumundadır.[63] Maxwell'in denklemleri buna referans olmaz ve bu denklemlerin öngördüğü ışık hızı mutlak bir niceliktir, başka bir şeye

61. Stachel (ed.), (1998)
62. Einstein'dan Conrad Habicht'e, 18 veya 25 Mayıs 1905: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol5-trans/41
63. Einstein, A., 'Ether and the Theory of Relativity' (1920): http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Einstein_ether.html; Born (1956: 189)

göre göreceli bir hız değildir. Bu akıllıca analiz, yüzlerce yıllık "eter" kavramına ve dolayısıyla da Victoria Dönemi Standart Modeline son verdi.

Einstein, mekân ve zamana dair yeni bir perspektif sunmak adına bu fikirleri kullandı. Newton, zamanın ve mekânın herkes için aynı olduğuna inanmıştı, ama Einstein öyle düşünmüyordu. Ona göre mekân ve zaman ölçümleri herkese göre aynı değildir, çünkü gözlemcinin hareket durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Einstein, kendisinden bağımsız olarak başka uzmanlar tarafından da ele alınmış fikirler geliştiriyordu; bu uzmanlar arasında Fransız matematikçi Henri Poincare ve Hollandalı teorik fizikçi Hendrik Lorentz de vardı. Maxwell'in denklemlerinin özel bir matematiksel simetrisi olduğunu belirtmişlerdi: denklemlerdeki niceliklerin değerleri, denklemlerin biçimini sabit bırakan bir şekilde değiştirilebiliyordu. Einstein her ne kadar bu konuyu ele alan ilk fizikçi olsa da, günümüzde çoğu uzman, Einstein'ın bu teoriyi, altında yatan basit denklemleri ve bunların yorumlarını herkesten daha net ortaya koymuş olduğunda hemfikirdir. *Hayati önem taşır şekilde, Maxwell'in denklemlerinin simetrisinin tüm diğer evrensel matematiksel doğa yasalarına uyduğunu öne sürmüştür.* Bunun derin bir anlamı vardır: eğer birisi bu simetriye sahip olmayan bir temel yasa öne sürerse, deney yapan araştırmacılar eninde sonunda bu yasanın yanlış olduğunu bulacaktı. Einstein daha sonra haklı çıktı: doğal dünya hakkında demir gibi sağlam bir hakikat tanımlamıştı.

Einstein'ın özel izafiyet teorisi üzerine ilk makalesi 1905 yılı yazında basılı halde yayımlandı. Birkaç ay sonra teorinin en ünlü sonucunu sundu: $E=mc^2$ denklemi; bu denklem, enerji, kütle ve boşluktaki ışık hızını birbiriyle ilişkilendiriyordu ("c" ışık hızını sembolize eder). O yıl yayımladığı diğer dört makale gibi izafiyet açıklaması da iyi kurgulanmış bir matematik yapı içeriyordu ve tüm bu yapı Laplace ve çağdaşları için anlaşılması oldukça kolay olacak biçimdeydi. Bu durum, fiziğin "temelde somut, sezgisel bir bilim" olduğu ve ileri matematiğin fizikçiler için önemli olmadığı şeklindeki Einstein'ın şiddetle bağlı olduğu fikri yansıtıyordu.[64] Bu yaklaşım Einstein'a güzel hizmet etmişti.

64. Solovine (ed.), (1986: 7-8)

Bununla beraber Einstein, doğayı anlama girişimlerinde matematiğin rolüne dair fikrini bir hafta içinde radikal ölçüde değiştirdi. Bu fikir değişikliği, Newton'ın teorisinin aksine Faraday tarafından tasavvur edilen tipte bir yerçekimsel alan konseptine dayanıyordu. Einstein, amacına ulaşmak için ilgilendiği bu alanları tanımlayan diferansiyel denklemleri keşfetmesi gerektiğini biliyordu: bu duruma "Maxwellian programme" adını vermişti.[65] İleri matematiğin fizikçiler için lüks değil, yaratıcılık anlamında en değerli araç olduğuna ilk kez ikna oluşu, bu şekilde yeni bir yerçekimi alan teorisi arayışı esnasında oldu.

65. Einstein (1954: 270)

3
yerçekimine yeniden ışık tutuluyor

> "Yerçekimi teorisi beni inançlı bir rasyonaliste dönüştürdü, yani yegâne güvenilir hakikat kaynağını matematiksel sadelikte arayan biri oldum."
>
> Albert Einstein,
> Cornelius Lanczos'a mektup, 1938

Einstein, yeni bir yerçekimi yasasına doğru giden yolda ilk adımını, 1907 yılında, Bern'deki patent ofisinde geçirdiği bir iş günü esnasında attı; ofisteki amirleri onu ikinci sınıf teknik uzman pozisyonuna yükseltmişti. En büyük fizikçiler arasında hâlâ pek bilinmeyen Einstein, akademik basamaklara daha ilk adımını atabilmiş de değildi: Bern Üniversitesi o dönemde kıdemsiz bir akademik pozisyon için yaptığı başvuruyu reddetmişti.[1] Araştırmalarının çoğunu boş zamanlarında yapıyordu ve çabalarının büyük bölümünü Avrupa'nın önde gelen birçok teorisyenini peşinde koşturan enerji quanta'yı anlamaya adıyordu.

Einstein çok daha az rağbet görmekte olan yerçekimi konusu hakkında da kafa yoruyordu. Yerçekiminin, özel izafiyet teorisi kapsamının ötesinde olduğunu biliyordu; çünkü bu teori, yere düşmekte olan bir elma gibi ivmelenen objelerin durumunu açıklamıyordu.[2] Ayrıca Newton'ın yerçekimi teorisinin bir alan

1. Pais (1982: 522)
2. Pais (1982: 179)

teorisi (Faraday ve Maxwell'in ortaya koyduğu türden bir teori) olmadığını da biliyordu, dolayısıyla teorik açıdan tatminkâr değildi.

Yeni bir yerçekimi teorisi geliştirmek açısından Einstein'ın ilk atılımı Kasım 1907'de, bir "düşünce deneyi" oluşturmasının ardından gerçekleşmiş görünmektedir.[3] Oldukça ani şekilde, ofisteki sandalyesinde otururken, bütünüyle serbest düşüş yapmakta olan bir insanın hissettiği yerçekimi kuvvetini düşünmeye başladı. "Bir insan serbest düşme yaparken ağırlığını hissetmeyecektir" dedi. Daha sonra söylediğine göre bu, hayatının "en mutluluk verici düşüncesiydi" ve sebebi de netti: eşdeğerlik ilkesini oluşturmuş oluyordu; bu düşünce, yerçekimini anlamanın yeni bir yolunun temelini teşkil ediyordu.[4] Ama nasıl ilerlemesi gerektiği açık değildi.

Yeni bir yerçekimi yasası arayışı zorlu ve yalnız bir yolculuk olacak gibi görünüyordu. Önde gelen teorisyenlerin hiçbiri ortada problem varmış gibi davranmıyordu ve meslektaşlarını bu yönde harekete geçiren biri de yoktu. Newton'ın yasası onlar için oldukça iyi duruyordu: son iki yüzyıl boyunca teori, öngörüleriyle çok ender çelişen gözlem ve deneylerle pekiştirilmişti. Einstein bu görevi üstlenirken bu problemli verileri teorik endişelerle açıklamaya çalışmak yönünde motive olmuş değildi aslında: asıl ihtiyaç, özel izafiyet teorisiyle bağdaşan bir yerçekimi alan teorisi bulmaktı. Einstein bu meydan okumanın ne ölçekte olduğunu idrak edebiliyordu: öncelikle böylesi bir alan teorisi, Newton'ın yasasının açıklamış olduğu on binlerce ölçümü yeniden ortaya koymak zorunda olacaktı. Ve dahası, yeni teorinin kabul edilebilmesi için, Newton'ın yaklaşımıyla açıklanamayan öngörülerde bulunarak üstünlüğünü ispatlamak gerekecekti.

Einstein'ın, ofis sandalyesindeki aydınlanma anından itibaren yeni bir yerçekimi yasası keşfetmesi süreci sekiz yılını aldı. Ortaya çıkan sonuç, Alman fizikçi Wilhelm Wien'in "şu andaki teorik fizik harikası" olarak deklare ettiği bir ana eser halini alacak ve nihayetinde Einstein'ı dünyanın en ünlü bilim insanı haline getirecekti.[5]

3. Ono (Çev.), (1982: 45-47)
4. Pais (1982: 178-179)
5. Jungnickel ve McCormmach (2017: 49)

Einstein, teorisini geliştirirken ileri matematiğe bakışını da değiştirdi. Göreceğimiz üzere, halihazırda bildiği matematiğin, yerçekiminin nasıl işlediğini anlamaya yetmediğini fark etti. Araştırmacıların uzun zamandır üzerinde çalıştığı anılarına göre; teoriyi, çılgınca geçen birkaç hafta içinde ileri matematik sayesinde tamamlayabilmişti, bu süre zarfında başlıca rakibinin kendisinden önce davranabileceği endişesiyle içi içini yemişti. Sonuç olarak ileri matematiğin teorik fizikçiler açısından faydası hakkındaki fikrini bütünüyle değiştirdi: bu bir lüks değildi, gereksinimdi. Ayrıca bu deneyim sonucunda Einstein şuna ikna olmuştu ki, teorisyenler, yeni deneylerin sonuçlarına değil, bunun yerine matematiğin rehberlik ettiği saf düşüncenin kullanımına odaklanmalıydılar.

1910 yılı itibarıyla, otuz bir yaşında olan Einstein, dünyanın önde gelen fizikçilerinin çoğunun dikkatini çekmiş durumdaydı. Birçoğu, Einstein'ın cüretkârlığından ve orijinalliğinden etkilenmişti. O yıl, quanta'yı anlamak için verdiği büyük oranda başarısız dört yıllık mücadelenin ardından, yeni bir yerçekimi anlayışı geliştirmeye odaklanmaya başladı. İlk aşamada, cebirden ziyade geometriyi kullanarak özel izafiyet teorisi hakkında daha taze düşünceler üretmesiyle birlikte sağlam bir ilerleme kaydetti. Bu yeni bakış açısı, yani bu parlak fikir aslında Einstein'a ait değildi, Einstein'ın ETH'deki matematik hocalarından biri olan Hermann Minkowski'nin aklına gelmişti. Minkowski, uzay ve zaman ayrı olmadığı için, bu kavramların, "uzay-zaman" şeklinde isimlendirdiği unsurlar olarak değerlendirilmeleri gerektiğini öne süren ilk kişi olmuştu. Minkowski'nin bakış açısına göre ayrı uzay ve zaman "yalnızca gölgeler halinde solmaya mahkûmdu ve yalnızca bir tür birlik bu ikisinin bağımsızlığını koruyabilirdi".[6] Gözlemcinin uzay ve zaman ölçümlerini cebirsel formüller kullanarak ilişkilendirmek yerine, olayları uzay-zaman diyagramları üzerinde yansıtmanın (düz bir kâğıt üzerine kolaylıkla çizilebiliyordu) olup biteni görselleştirmeyi kolaylaştırdığını öne sürmüştü.

Einstein ilk aşamada bu yeniliği "gereksiz bilgiçlik" olarak değerlendirip göz ardı etmişti, ama uzun yıllar sonra Minkowski'nin uzay-zaman çerçevesini yeni bir yerçekimi teorisi için

6. Galison (1979: 97)

kabul etti.[7] Aynı esnada, gözlemlerin teoriyi nasıl test edebileceğini düşünüyordu; teorinin, Merkür'ün Güneş etrafındaki hareketinde gözlenen ince detayı açıklayabilmesi gerekiyordu. 1911 yılına gelindiğinde Einstein, herhangi bir ışık huzmesinin –enerji ve eşdeğer kütle taşıyan bir huzme– izlediği yolun, devasa büyüklükte bir objenin, örneğin Güneş'in yakınından geçerken etkilenmesi gerektiği sonucuna vardı ve buna uygun bir yerçekimi teorisi bu sapmayı doğru tahmin edebilmeliydi.

Einstein, yerçekimini daha iyi anlamaya çalışan tek fizikçi değildi. 1912 yılında, rakiplerinden biri olan Göttingen teorisyeni Max Abraham'ın geliştirdiği formüllerin güzelliğinden ve sadeliğinden oldukça etkilenmişti. Einstein haftalar içinde rakibinin fikirlerinin estetik cazibesinin kendisini yanlış yönlendirdiğini fark etti: Abraham'ın biçimsel matematiğe fazlasıyla bağlı kaldığını düşünüyordu ve gerçekliğe yeteri kadar yakın değildi. "İnsan, fiziksel düşünmeden biçimsel işlem yaptığında böyle oluyor!" diye ateş püskürdü, Abraham'ın teorisinin "bütünüyle savunulamaz" ve "bütünüyle kabul edilemez" olduğunu da ekliyordu.[8] Einstein böyle bir hatayı kendisi yapmayacaktı.

Yaklaşık olarak bu dönemde, boş (düz) uzay-zamanın madde tarafından büküldüğü düşüncesi kafasına dank etti; bu fenomen, birisi üzerine yattığında bir yatağın çökmesiyle büyük oranda aynı şekilde gerçekleşiyordu.[9] Uzay-zaman bükülmesi maddenin hareketini belirliyordu: somut ifadeyle, herhangi başka bir net güç etkisi hissetmeyen parçacıklar, mümkün olan en düz yolu izlemektedir. Bu, hayati bir analizdi, ama Einstein bunu matematiksel terimlerle nasıl açıklayacağını bilmiyordu: bunu yapabilmek için uzman bir matematikçinin yardımına ihtiyacı vardı. Böylece 1912 yazının sonlarında öğretim görevlisi kadrosu almak üzere Zürih Politeknik'e vardığında eski dostu ve üniversite yıllarından sınıf arkadaşı Marcel Grossmann'ı buldu; Grossmann o sırada matematik bölümü başkanıydı. Einstein ona yalvardı: "Bana yardım etmelisin yoksa çıldıracağım."[10]

7. Pais (1982: 152). John Norton'ın altını çizdiği noktaya göre, Einstein uzay-zaman dair dört boyutlu yaklaşımı ilk olarak 1913 yılındaki taslak makalesinde benimsemiştir: Norton (2018)
8. von Dongen (2010: 10); Norton (2000: 143)
9. Janssen ve Renn (2015: 298)
10. Pais (1982: 212)

Grossmann'ın rehberliğini takip eden Einstein, bükülmüş uzay-zamanı kullanarak yerçekimini anlamak için ileri matematik kullanmaktan başka seçeneği olmadığını anlamıştı. Boşluktaki yerçekimi kuvvetinin, boşlukta değişkenlik gösteren pürüzsüz bir matematiksel fonksiyonla tanımlandığı Newton'cı resmi kullanarak yeni bir teori geliştirmek mümkün olmayacaktı. Bunun yerine tensör olarak bilinen bir matematiksel obje biçiminde ifade edilen bir dizi benzer fonksiyon kullanmak zorunda olacaktı. "Tensör" kavramı, modern anlamıyla on dört yıl öncesinde Göttingen teorisyeni Woldemar Voigt tarafından, maddesel objelerdeki baskı ve gerilimlerle ilişkili olarak ortaya atılmıştı.[11] Yaklaşık bir yüzyıl öncesinde de yine Göttingen'de matematikçi Carl Friedrich Gauss, bir üçgenin iç açılarının toplamının her zaman 180 derece olmadığı bükülmüş yüzeyler teorisine öncülük eden kişi olmuştu. Gauss, alışılmış tipte üç boyutlu uzayda bükülmüş yüzeyler konusu üzerinde çalışarak diferansiyel geometrinin temellerini atmıştı. Öğrencisi Bernhard Riemann –Göttingen'de Gauss'un haleflerinden biri–, daha sonra bu tekniği daha yüksek boyutlu alanlara uygulamak üzere genişletti.

Einstein, bu matematiği rafta bekler halde bulunca büyük heyecana kapıldı. Fizikçilerin dört boyutlu bir uzay zaman teorisi geliştirmesine yardımcı olmak için hassasiyetle hazırlanıp kullanılmayı bekler durumda görünüyordu.[12] Bu olay, Einstein'ın daha sonra matematik ve fizik arasında "önceden oluşturulmuş ahenk" diye tanımlayacağı duruma klasik bir örnek teşkil ediyordu: bu ifade, Newton'ın çağdaşı Leibniz tarafından oluşturulmuş bir ifadeydi ve Einstein'a daha yakın dönemde Göttingen'in matematik erbapları tarafından fiziksel dünyaya dair insan algısı ile saf matematik arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılıyordu.[13]

11. 'Tensör' kelimesi, matematikçi William Rowan Hamilton tarafından 1846'da bulunmuştur.

12. Gray (2008: 187); Einstein (1954: 281); 'This Month in Physics History: June 10, 1854: Riemann's Classic Lecture on Curved Space', APS News, Cilt 22, No. 6, Haziran 2013: https://www.aps.org/publications/apsnews/201306/physicshistory.cfm

13. Leibniz, bu harmoniyle ilgili iddiasını en özlü şekilde 1695'teki makalesinde

Kısa süre sonra Einstein ve Grossmann birlikte çalışmaya başladı; Einstein fizikte liderlik ediyordu, Grossmann da matematikte. Peşinde oldukları yerçekimi teorisi, özel izafiyet teorisinin bir genellemesi olacaktı; yalnızca düz hat üzerinde sabit hızlarda hareket eden gözlemciler için değil, aynı zamanda her türlü hareket halindeki gözlemci için geçerli olacaktı. Bir başka deyişle, genel izafiyet teorisi yeni bir yerçekimi teorisi olacaktı. Einstein bu teoriyi iki uçlu bir yaklaşım kullanarak oluşturmak amacındaydı, matematiksel ve fiziksel iki uç.[14] Bir yanda, matematiksel strateji teoriyi en mantıklı ve şık şekilde kurgulamaya odaklanıyordu, diğer yanda fiziksel strateji teoriyi gözlemleri ve ölçümleri açıklayan kavramlar üzerine oturtmaya çalışıyordu. Einstein, iki strateji arasında hareket ederek doğru yanıta ulaşacağını ummaktaydı.

Einstein şüphe duymuyordu: bu teori o güne kadar üzerinde çalıştığı açık ara en külfetli problemdi. Elbette elinde çok değerli bir rehber de vardı: Newton'ın yerçekimi yasasının başarısını yeniden yaratacak ve bu yasanın altında yatan belli ilkeleri izleyecek bir alan teorisi peşinde olduğunu biliyordu. Her bir muhtemel gözlemci için doğaya dair açıklamaların tümünün eşit ölçüde geçerli olduğuna ikna olmuştu. Bu felsefi varsayım neticesinde teorisinin denklemlerinin her gözlemci için aynı olması gerektiğine inanıyordu. Kovaryans (ortak değişken) olarak bilinen bu özellik kelimelerle kolayca ifade edilebilir olsa da Einstein bu konsepti, ustalık kazanmanın güç olduğunu düşündüğü tensör matematiğinin içine yerleştirmekte zorlanıyordu.

Grossmann'ın yardımıyla Einstein, teoriyi oluşturmak için tensörleri ve diferansiyel geometrinin bazı tekniklerini kullandı. Yaklaşık dokuz aylık ortak çalışmanın ardından iki adam, Taslak teori dedikleri şeyi ürettiler; teoride kusurlu diferansiyel denklemler vardı, ama kesinlikle gelecek vaat ediyordu. Denklemler kovaryant değildi; Einstein bu durumu "teorideki çirkin karanlık nokta" olarak görüyordu ve Merkür'ün açıklanamayan hareketi

---

ortaya koymuştu: A New System of Nature': https://plato.stanford.edu/entries/leibniz/#PreEstHar. See Kragh (2015); Einstein (1954: 226); Not 9: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-doc/107

14. Gutfreund ve Renn (2015: 22-23)

için ortaya koydukları tahmin, gökbilimcilerin gözlemleriyle örtüşmüyordu.[15] Einstein lekeyi silmeye çalıştı ama nihayetinde istemeden de olsa daha iyisini yapamayacağına karar verdi.[16] Mart 1914'te bir arkadaşına şöyle söyledi: "[teorinin] doğruluğuyla ilgili artık en ufak bir şüphem yok"; ayrıca şunu da ekledi: "yerçekimi nazlı ve inatçı. Tabiat bize aslanın yalnızca kuyruğunu gösteriyor."[17] Ama yalnızca birkaç ay içinde aslanı gözlerinin akına kadar görecekti.

O dönem itibarıyla Einstein'ın yeteneği, artık önde gelen teorik fizikçiler tarafından büyük oranda kabul edilmiş durumdaydı. Max Planck, Prusya Bilim Akademisinde güzel bir iş teklif ederek onu Alman başkentine çekmeye çalışıyordu. Nisan 1914'te şehre varışının ardından Einstein işe koyulmaya hevesliydi; ama çok geçmeden konsantrasyonunu bozacak gelişmeler yaşadı. Evliliği çöktü ve karısı iki oğullarıyla birlikte Zürih'e döndü, sükûnetle karşılamaya çalıştığı bir darbeydi bu. Bir apartman dairesine yerleşip her zamankinden daha bile yoğun çalışmaya başladı, gerçi yine de kuzeniyle ve uzun vadeli sevgilisi Elsa Löwenthal'le buluşmaya vakit buluyordu. Birkaç ay içinde siyasi atmosfer kararmış, Avrupa savaş havasına girmişti. Bulunduğu başkentte, savaştan ve Almanya'nın askeri planlama merkezinden oldukça uzak mesafedeyken duruma "acıma ve üzüntü karışımı" bir duyguyla bakıyordu.[18] İlk kez siyasi görüşlerini kamuya açık şekilde paylaştı; Alman militarizmine karşıtlığını açıkça ortaya koyan sert sözcüklerle yazılmış bir bildiriye imza attı. Kısa süre sonra da şiddetli siyasi eylemlerin ve Yahudi karşıtı saldırıların hedefi olacaktı.

Aynı esnada tensörlerinin içinde kaybolup gitmişti, fizik sezgilerinin pusulası da buhrandan kaçmasına yardımcı olamıyordu. Yeni iş arkadaşları da –çoğu fizikçi gibi– kuantum teorisindeki son gelişmelerle meşgul oldukları için onun işleriyle çok ilgilenmiyorlardı. Bununla beraber, Göttingen'deki

15. Einstein'dan Lorentz'e, 16 Ağustos 1913: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol5-trans/374?ajax
16. Gutfreund ve Renn (2015: 24-25)
17. Einstein'dan Heinrich Zangger'e, 10 Mart 1914: http://einsteinpapers. press.princeton.edu/vol5-trans/402
18. Rowe ve Schulman (ed.), (2007: 64-67). 'Manifesto to the Europeans' metni: https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/40

matematikçi ve fizikçiler, Einstein'ın araştırmaları hakkında daha fazla şey öğrenmeye hevesliydi ve 1915 yazının başında konu üzerinde altı uzmanlık semineri vermek üzere Einstein'ı davet ettiler. Dinleyiciler arasında dünyanın en yetkin ve etkili matematikçilerinden olan Felix Klein ve David Hilbert de vardı. On altı yıl öncesinde, Hilbert'in *Foundations of Geometry* [Geometrinin Temelleri] adlı eseri Öklid'in yüzlerce yıllık formülasyonlarını bir dizi aksiyomla yerinden etmiş, geometriyi daha sağlam bir zemine oturtmuştu. Hilbert, ultra-saf matematik bilgesi olsa da matematiği sık sık gerçek dünyaya uygulamaya çalışmış, ama bunda çok başarılı olamamıştı: birinci sınıf bir teorik fizikçinin sahip olacağı türden bir fizik analiz yeteneğine sahip değildi.

Einstein, Berlin'e mutlu döndü; taslak yerçekimi teorisinin meziyetleri konusunda Hilbert ve Klein'ı ikna etmişti.[19] Ama Göttingen matematikçilerinden bazıları, ziyaretçilerinin boşa çabaladığını ve kendi matematiksel derinliğini aşan bir yerde çırpındığını düşündü. Klein şu kokuyu almıştı: "Einstein özünde bir matematikçi değil, daha ziyade muğlak fiziksel-felsefi güdülerin etkisiyle çalışıyor." Netice olarak Klein'a göre bu durum, kısmen de olsa Einstein'ın teorisinin "kusurlarının" sebebiydi.[20] Einstein büyük bir matematikçi olmadığının gayet farkındaydı ve kendini bir arkadaşına "matematik cahili" olarak tanımlamıştı, denklemlere "şaşkın bir öküz gibi" bakıyordu.[21]

Einstein daha sonra Göttingen'in matematik canavarlarına tamamlanmamış teorisini sunmuş olmaktan dolayı haklı sebeplerle pişman olacaktı. Berlin'e döndükten birkaç hafta sonra teorisinin son denklemlerini bulmak adına David Hilbert'le at başı bir yarışa girmek zorunda kalacaktı. Hilbert, Einstein'ın sunduğu teorinin tamamlanmamış olduğunu anlamış ve bu teoriyi tamamlamak için çalışmaya başlamıştı; muhtemelen bir fizikçi olarak geç kalmış bir kariyer zaferi kokusu almış durumdaydı.

Birinci Dünya Savaşı, o sonbahar birçok Berlinli için hayatı daha da stresli hale getiriyordu. Ekim 1915'te sokaklarda bir isyan

19. Einstein'dan Wander ve Geertruida de Haas'a, 16 Ağustos 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/149?ajax
20. Howard ve Norton (1993: 35-36)
21. Einstein'dan Paul Hertz'e, 22 Ağustos 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/150

dalgası başlamıştı, büyük oranda İngiliz deniz ambargosundan ve Almanya'nın kaynaklarını askeriyeye ayırmasından kaynaklanan gıda kısıntılarını protesto ediyorlardı.[22] Bu güçlükler, kendi tabiriyle "dehşet verici" bir yoğunlukla çalışan Einstein için çok önemli değildi: peş peşe içilen sigaralar, yalnızca yemek yemek, kemanını çalmak ve birbirlerinin ilerleyişi hakkında Hilbert'le yazışmak için verilen aralar vardı.[23] Einstein, egoizmden nefret ediyor olmasına rağmen yeni yerçekimi teorisinin nihai versiyonunun yalnızca kendi adını taşıması gerektiğini düşünüyordu. Neyse ki Kasım ayının başlarında parçalar nihayet yerine oturdu. Onun açıklamasına göre, denklemlerinin gözlemlere uymasını sağlamaktan vazgeçince hayati atılımı yapmıştı; bunun yerine teorinin matematiğinin mümkün olduğunca sade ve doğal kalmasında ısrar ediyordu. İleri matematik –öğrenciyken kaçındığı zorluk seviyesindeki bir matematik– onu burnundan tutup doğru diferansiyel denklemlere ve teorinin nihai versiyonuna götürmüştü, böyle olduğuna inanıyordu.[24] Dünyayı anlamak adına matematiği nasıl kullanması gerektiğine dair yaklaşımı bu inanç tarafından şekillendirilecekti.

Einstein, araştırmasındaki ilerlemeyi o ay içinde Berlin'deki Prusya Akademisi'nde haftalık olarak vereceği dört seminerle sunmayı kabul etti. 4 Kasım Perşembe günü ilk seminerini sunarken, nihai denklemlerini henüz bulmuş değildi, Merkür'ün şaşırtıcı hareketini açıklayıp açıklamadıklarını da kontrol etmemişti, ama çözümün yakın olduğu konusunda halihazırda kendinden emindi. Teorisini tamamlamadan önce verdiği o seminerde bile teoriyi Gauss ve Riemann'ın öncüsü olduğu "genel diferansiyel kalkülüsün gerçek bir zaferi" olarak ifade etti.[25] 25 Kasım'da seminerler dizisinin sonuncusunu izlemeye gelen kitle, bir doğa yasasının sunumunu izlemek gibi ender rastlanan bir

22. Smith (2000: 68-80)
23. Einstein'dan Arnold Sommerfeld'e, 9 Aralık 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/187; Einstein'dan Michele Besso'ya, 17 Kasım 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/176
24. Einstein'ın arayışının son safhaları, Isaacson (2007: 214-222, 594n67) kısmında güzel anlatılır.
25. Gutfreund ve Renn (2015: 32); http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/110. Diferansiyel kalkülüsün Einstein'ın ismini verdiği diğer öncüleri: Christoffel, Ricci and Levi-Cevita.

ayrıcalığa sahip oldu. Teorinin merkezi denklemi, Einstein'ın kullandığından çok az bir farkla şöyledir:

$$G\mu\nu = 8\pi T\mu\nu$$

Sol taraftaki, daha sonraları Einstein'ın tensörü olarak bilinecek olan matematiksel simge, madde ve enerjinin, uzay zamanın geometrisini nasıl büktüğüne dair bilgi taşır. Sağ tarafta ise tensör $T\mu\nu$, maddenin yerçekimsel alandaki hareketini tanımlar.

Einstein'ın tensör denklemlerinin açılımı, bir dizi diferansiyel denklemi ortaya koyacak şekilde kolaylıkla yapılabilir. Bu denklemler, Merkür'ün anormal hareketini açıklayan bir yerçekimi alan teorisinin matematiksel temelini oluşturmaktadır; denklemler kovaryanttı (her gözlemci için aynıydı), Newton'ın yerçekimi teorisini de içeriyordu ve dolayısıyla Newton'ın başarılı tahminlerinin her birini yeniden ortaya koyuyordu. Einstein amacına ulaşmıştı.[26]

Mutluydu ama oldukça yorgundu, tek endişesi teorinin bir başka versiyonunu hemen hemen aynı esnada tamamlamış olan Hilbert'in öncelik iddiasında bulunması ihtimaliydi. İlişkileri kısa süreliğine tatsız bir hal aldı, ama birkaç ay içinde yeniden dost oldular. Araştırmacıların daha sonra teyit ettiği gibi, bu işte Hilbert'ten çok az bir zaman önce görevi tamamlamıştı; Hilbert de bunu daha sonra ifade edecekti.[27] Einstein yerçekimi teorisini bütünüyle tamamladıktan bir gün sonra, "kıyaslanamayacak kadar güzel" olduğu yorumunu yaptı.[28] Bunlar belki onun en mütevazı sözleri değildi ama doğruydu. Fizikçiler ekseriyetle genel izafiyet teorisini yalnızca harika bir teori olarak değil, aynı zamanda Ernest Rutherford'un (alışılmadık bir matematiğe dayanan teorilere genellikle sıcak bakmayan biridir) kelimeleriyle "muhteşem bir sanat eseri" olarak da görürler.[29]

Einstein teorisi muhtemelen en az Taj Mahal kadar, Botticelli'nin *Birth ofVenus*'u ve Shakespeare'in *Yirmi Dokuzuncu*

26. Einstein'dan Sommerfeld'e, 9 Aralık 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/187
27. Gutfreund ve Renn (2015: 32-33)
28. Einstein'dan Heinrich Zangger'e, 26 Kasım 1915: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/178
29. Rutherford, alıntı, *The Manchester Guardian*, s. 20, 1 Mayıs 1932

Sone'si kadar güzeldi. Birçok insanın gözünde bu eserlerin evrenselliği, sadeliği ve kaçınılmazlığı vardır; Einstein'ın teorisi de bir şekilde tam da doğru haliyle gelmişti ve gücünü azaltmadan farklı bir şekilde ortaya koymak mümkün değildi. Kesinlikle olması gerekenden daha sınırlı, daha zayıf veya daha karmaşık değildi. Tüm zamanlar için, tüm evren için geçerliydi ve birkaç sade ilkeye dayanıyordu; bu ilkeler de etkinliğini bozmadan değiştirilemeyen bir denklem doğuruyordu. Daha sonrasında teorinin gözlem ve deneylerle uyum göstermesi de, insanlığın en büyük entelektüel başarılarından biri olarak tanınmasına destek oldu. Einstein'ın bu yeni teorisi, iki yüzyıldan fazla süre hüküm sürmüş olan bir yerçekimi teorisine baskın çıkmış, Newton'ın teorisinin yerine yeni bir uzay, zaman ve madde anlayışı getirmişti. Uzay-zaman eğrisi ve maddenin hareketi birbirinden ayrılmaz şekilde bağlantılıdır; Einstein, her birinin diğeri olmadan var olamayacağını göstermiştir: bunlar yerçekiminin doğurduğu sonuçların *yin yang*'ıdır.

Teorinin diferansiyel denklemleri de harika olarak tanımlanabilir. Daha önce de ifade ettiğim gibi, bilimsel teorilerdeki bu tip denklemler coşkulu bir matematiksel dil olarak düşünülebilir: iyi bir şiir gibi, bildik fikirler üzerinde yeni bakış açıları yaratabilir ve hatta doğanın işleyiş şekline dair yeni analizler sunabilirler. Bu durum Maxwell'in elektromanyetizma diferansiyel denklemleri için de kesinlikle doğrudur: akıllıca kombine edildiklerinde elektromanyetik dalgalara dair şekliyle, boyutuyla ve hızıyla birlikte –tıpkı sihir gibi– bir matematiksel tanım yaratırlar. Yerçekimi teorisini tamamladıktan altı ay sonra Einstein'ın gösterdiği gibi aynı şey kendi diferansiyel denklemleri için de geçerlidir. Bunları zarif bir şekilde kombine ederek; o günden beri yerçekimi dalgaları olarak bilinen, uzay-zaman kumaşındaki kırışıklıklar olarak tasavvur edilebilecek duruma dair bir tanım keşfetmiştir.[30] Deney araştırmacılarının elektromanyetik dalgaları saptamaları uzun yıllar almıştı ve Einstein'ın teorisi, yerçekimi dalgalarının gözlenmesinin daha bile zor olacağına

30. Einstein'ın yerçekimi dalgalarını anlayış hikâyesi oldukça eğlencelidir: Betz, E. 'Even Einstein Doubted His Gravitational Waves', *Astronomy*, 11 Şubat 2016: http://www.astronomy.com/news/2016/02/even-einstein-had-his-doubts-about-gravitational-waves

işaret ediyordu. Tıpkı Maxwell gibi Einstein da bu dalgalar ilk kez doğrudan saptandığında hayatta değildi: fizik ve mühendisliğin bunu gerçekleştirebilmesi 2015 yılında oldu, yeni yerçekimi teorisinin doğumunun üzerinden bir yüzyıl geçmiş olacaktı.

Einstein yerçekimi dalgalarını ilk kez öngördüğünde, kendi yerçekimi teorisini kozmolojiye, yani evrenin yapısını ve gelişimini inceleyen alana uygulamaya başladı. Yerçekimi uzay-zamanın bütününü büyük oranda şekillendirdiği için, Einstein'ın teorisi, bu alana yeni yaklaşımlar kazandırmaya adaydı, Einstein da bunun farkındaydı. Sonraki yıl, yani 1917'de denklemlerinin bir bütün olarak evrene nasıl uygulanabileceğine dair ilk görüşlerini yayımladı; bu adım kolay bir adım değildi, çünkü gökbilimciler, galaksimizin ötesindeki madde yapısına dair görece çok az şey biliyordu. Takip eden birkaç yılda Einstein modern kozmolojinin ana kurucusu haline geldi; gerçi evrenin statik olduğu yönündeki yanlış inancından vazgeçip genişlemekte olduğunu kabul etmesi on üç yıl sürecekti, çünkü Einstein'ın denklemleri en sade biçimleriyle bu genişlemeyi ortaya koymuş oluyordu, astronomlar da daha sonra bu keşfi yapacaktı.[31]

*

1915 yılının sonlarında dünyadaki fizikçilerin büyük bölümü Einstein'ın yeni bir yerçekimi teorisi keşfetmiş olduğundan haberdar değildi. Birinci Dünya Savaşı Berlin'le dış dünya arasındaki iletişimin büyük bölümünü kapatmıştı ve ilişkilerin normale dönmesi birkaç yıl alacaktı. Bununla beraber Einstein'ın teorisi Almanya'da ve bazı komşu ülkelerde ilgi çekmiş ve hem fizikçiler hem de matematikçiler arasında bir tartışma yaratmıştı. Teorinin merkezî matematiği olan diferansiyel geometri, uzman matematikçiler arasında kısa sürede popüler bir konu haline geldi; yaptıkları keşifler kısa sürede yerçekimi teorisinin daha iyi anlaşılmasını sağlarken matematiksel araştırma anlamında da yeni alanlara yönelim oluşturdu. Einstein, diferansiyel geometri ışığını fizik üzerine tutmuştu; şimdi de yerçekimi fiziği ışığı, diferansiyel geometri üzerine yansıyordu.

31. Kragh ve Smith (2003: 141, 156-157); Weinstein, G., 'George Gamow and Albert Einstein: Did Einstein Say the Cosmological Constant Was the "Biggest Blunder" He Ever Made in His Life?', (2013): https://arxiv.org/abs/1310.1033

Dünya Savaşı sona ermeden önce iki matematikçi, fiziğe kalıcı katkılar yapmak için Einstein'ın yeni yerçekimi teorisini kullanmıştı; yeni fikir kaynağı olarak teorinin olağanüstü bereketinin altını çiziyorlardı. İlk keşif Hermann Weyl tarafından yapılmıştı, gerçek dünyanın işleyişine dair derin bir sezgi besleyen dünya çapındaki birkaç matematikçiden biriydi. 1904 yılında, on sekiz yaşındayken David Hilbert'in etkisine kapılmıştı. Weyl, Hilbert'i "birçok fareyi matematiğin derin sularına doğru çeken" fareli köyün kavalcısı olarak tanımlıyordu.[32] Weyl'in bir matematikçi olarak Zürih ETH'de iyi gitmekte olan kariyeri 1915 yılında Alman ordusuna alınmasıyla kesintiye uğradı, gerçi sonraki yıl ordudan terhis edildi, kendi deyimiyle zihni, Einstein'ın yeni teorisiyle "yanıp tutuşuyordu".[33]

1918 yılında Weyl mucize gibi görünen bir keşif yaptı: Einstein'ın teorisini ve Maxwell'in elektromanyetizma teorisini birleştirmenin muntazam bir yolunu bulmuştu.[34] Bu yaklaşımın kökeninde Weyl'le öğrencilerinden biri arasında geçmiş bir sohbet vardı: noktalar arasındaki mesafelerin, uzay-zamanda her bir noktada farklı şekilde kalibre edilmiş cetvellerle ölçülmesi halinde denklemlerin aynı kalması gerektiği düşüncesine dayanıyordu. Weyl, bu yeni matematiksel simetrinin kendisini "evrensel doğa yasasına giden yola" soktuğuna inanıyordu. Tek problem, bu güzel fikrinin yanlış olmasıydı.[35] Fikrinin yanlış olduğunu Einstein'dan öğrendi; aslında Einstein'ın da bu fikre verdiği ilk tepki, bunun "birinci sınıf bir dehanın hamlesi" olduğu şeklindeydi. Ama birkaç gün sonra Einstein, Weyl'ın teorisinin gerçek dünyaya uygulanamayacağını fark etti; çünkü teori –deneysel kanıtların aksine– her bir atomun boyutunun, o atomun geçmişine bağlı olduğu anlamını doğuruyordu. Fikir hatalı görünüyordu. Ama on bir yıl sonra Weyl, Einstein'ın itirazlarını boşa çıkaracak şekilde teorisini modifiye etmenin bir yolunu buldu.[36] Bu modifiye fikir, Weyl'in kalibre teorisi dediği

32. 'Pied Piper' tanımı için Weyl's: Weyl (2009: 2)
33. Weyl (2009: 168)
34. Weyl (2009: 168)
35. Einstein'dan Weyl'e, 6 ve 8 Nisan 1918: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/550?ajax; Atiyah (2002: 12)
36. O'Raifeartaigh (1997); Jackson ve Okun (2001)

yaklaşımın temelini teşkil etti ve düzeltilmiş haliyle tabiata dair modern anlayışımızın temel taşlarından biri oldu.

Weyl'in bu fikrini yayımlamasından iki ay sonra, arkadaşı Emmy Noether tarafından matematik ve fiziğin ilişkisine dair anahtar nitelikte bir yaklaşım bulundu. O dönemin tüm kadın matematikçileri gibi o da kariyerinin peşinde koşarken engel üstüne engelle karşılaştı. 1900 yılında on sekiz yaşındayken ilk atılımını yaptı: Erlangen Üniversitesi otoriteleri ona derse girme izni verdi; aslında henüz iki yıl öncesinde üniversite senatosu, öğretim kadrosuna kadınları dahil etmenin "tüm akademik düzeni yerle bir edeceğini" deklare etmişti.[37] Üniversite daha sonra ona bir doktora derecesi verdi; hatta sonrasında Noether kendi tezini "boş laf" olarak tanımlamış olsa bile muazzam potansiyelini gösteren bir çalışmaydı. Erlangen'de yedi yıl ücret almadan çalıştı; sonrasında Hilbert ve Klein onu Göttingen'e davet ettiler, burada sevilen bir meslektaş ve hoca oldu. Yüksek sesli ve enerjikti, hareketleri sertti ama çok iyi kalpliydi. Weyl daha sonraları onun için "bir somun ekmek kadar sıcaktı" diyecekti.[38] Hilbert ve Klein, Noether'in dikkatini Einstein'ın yerçekimi teorisini geliştirmek açısından karşılaşılan matematiksel güçlüklere yöneltince, fizik bilimine yapacağı muazzam katkının önü açılmış oldu: tabiata dair matematiksel teorilerin simetrisiyle laboratuvar deney sonuçları arasındaki bağlantıyı oluşturdu.

Bu bağlantı bir teorem formunda geldi, daha sonra Noether'in ismi verildi: eğer fizik yasaları yakın gelecekte ve yakın geçmişte aynıysa, herhangi bir fiziksel proseste de korunan bazı nicelikler olması gerekir. Noether'a göre enerjinin korunumu, ne olup bittiğini açıklayan temel denklemlerin simetrisinin doğrudan bir sonucudur; zaman değişkeni sürekli olarak değiştirilirse denklemler aynı kalır. Bu yaklaşım, birbirine çarpan kozmik objelerden atomik partiküller arasındaki etkileşimlere kadar tüm çarpışmaları açıklayan genel korunum yasalarından yalnızca biridir. Noether, tabiata dair matematiksel açıklamaların gerçek dünyada nasıl test edilebileceğine ilişkin derin bir analiz sunmuş oluyordu; soyutla somut arasında hayati bir ilişki kurulmuştu.

37. Brewer ve Smith (ed.), (1981: 3, 10-14, 17-18, 25, 29, 37-38)
38. Dick (1981: 121)

Ama akademik hayatında ulaşacağı daha yüksek zirveler vardı. 1920'lerde adım adım dünya çapında bir cebir uzmanına dönüştü, katı bir soyutlamayla tutkulu bir genellemeyi birleştiren bir tarzı vardı. Ama Göttingen'deki otoriteler ona en sıradan öğretim görevlisi pozisyonunu bile kadın olduğu için çok gördüler; öfke içindeki Hilbert, fakülte toplantısında şu sözlerle isyan ediyordu: "Biz bir üniversiteyiz, erkek soyunma odası değiliz."[39] Hitler'in yönetime gelmesinden kısa süre sonra, Noether elli bir yaşındayken ABD'ye göç etti, ama önde gelen hiçbir üniversite ona bir kadro önermeye hazır değildi.[40] Pennsylvania'daki kız okulu Bryn Mawr College'de misafir öğretim üyesi görevini kabul etti. Amerikan yaşam tarzına hemen alıştıysa da on sekiz ay içinde hayatını kaybetti; rahminden kavun büyüklüğünde bir kistin alındığı operasyonun ardından yaşam mücadelesini kazanamadı. Ölümünden on iki gün sonra Weyl, üniversitede yaptığı konuşmada, onu "büyük bir matematikçi, cinsiyetinin ürettiği en büyük matematikçi ve harika bir kadın" olarak tanımladı.[41]

*

Birinci Dünya Savaşı'nın sonunda Einstein yorgundu ama bir fizikçi olarak performansı hâlâ zirvedeydi. Einstein, nihai yerçekimi teorisini oluşturmasında matematiğin oynadığı rolden etkilenmiş olsa da, teorisyenlerin gerçek dünyada yapılmış gözlemlere dair mümkün olan en doğru açıklamayı yapmaya odaklanmaları gerektiğinde hâlâ ısrarcıydı. Bu durum, "kalibre" fikrinin ilk versiyonunu çürütmek için kullanmış olduğu fizik mantığından açıkça görülebiliyordu; ayrıca matematikçi Felix Klein'ın Maxwell'in denklemlerinin simetrisi hakkında ortaya koyduğu bir fikre getirdiği eleştiride de benzer bir yaklaşım görülüyordu: "Bence [meseleye getirilen] bütünüyle biçimsel yaklaşımlara, bulgusal bir araç olarak gereğinden fazla değer

39. Weyl (2012: 54)
40. Weyl, Noether'i IAS yetkililerine muhtemel bir fakülte üyesi olarak önermiştir, ama önerisi sonuç vermemiştir: http://cdm.itg.ias.edu/utils/getfile/collection/coll12/id/81193/filename/80764.pdfpage/page/198
41. Dick (1981: 152)

veriyorsunuz."[42] Einstein'ın ayakları hâlâ büyük oranda yere basıyordu.[43]

Einstein, teorisine güveniyorduysa da yakın zaman içinde hayati bir teste tabi tutulacağını ve Güneş'e yakın geçen yıldız ışıklarının bükülme miktarını tahmin edip edemeyeceğinin sorgulanacağını biliyordu; bu etki en iyi şekilde *tam güneş tutulması* olduğunda ölçülebilirdi. Bir sonraki güneş tutulması tarihi olan 29 Mayıs 1919'da bu ölçümü yapmak üzere İngiliz astronomlar bir keşif gezisi organize ettiler; bu tarih, Einstein'ın ikinci evliliğinden birkaç gün öncesine denk geliyordu. Yaklaşık üç ay sonra Einstein'ın astronomlardan aldığı habere göre, yaptıkları ölçümler Newton'ınkinden ziyade kendi teorisiyle tutarlılık içindeydi; gerçi astronomlar bu verileri kendi bakış açıları yönünde yorumlamışlardı.[44] Einstein hemen annesine bir not gönderip "mutlu haberleri" verdi ve kendisine yeni bir keman alarak bu gelişmeyi kutladı.[45]

Güneş tutulması keşif gezilerinin Einstein tarafından öngörülememiş sonuçlarından biri de elde edilen bulguların kendisini ünlü yapacak olduğuydu. Güneş tutulması verilerinin 6 Kasım'da bir dizi önemli bilim insanının ve dramatik haberler yapmakta ustalaşmış çok sayıda gazetecinin katılımıyla iyi organize edilmiş bir toplantıda sunulmasının ardından Einstein toplumsal bir figür haline geldi (*New York Times*, golf muhabirini göndermişti, ama muhabir katılmadı).[46] Ertesi gün Londra'daki *Times*'ın manşetinde şu ilan ediliyordu: "Bilimde Devrim ... Newton'ın Fikirleri Çöpe Atıldı" ve kırk yaşındaki Einstein neredeyse bir gecede uluslararası bir şöhret oldu. Hayatı bir daha asla eskisi gibi olmayacaktı. Gelecek vaat eden bilim insanlarından günde altmış mektup alıyordu, basın için makaleler yazmaya başladı ve sık sık Berlin'den ayrılarak meslektaşlarıyla görüşmeye, tüm dünyadan hayranlarına seminerler vermeye gitti. Seyahatlerinde, muğlak görünen yeni bir fizik teorisinin, hayatın çok sayıda farklı alanından insanı ilgilendirmesine şaşıyordu; teorisinin

42. Einstein'dan Felix Klein'a, 15 Aralık 1917: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/446
43. Hentschel (1992)
44. Earman ve Glymour (1980: 81-85)
45. Isaacson (2007: 259-260)
46. Sponsel (2002: 466); Isaacson (2007: 264)

bir caz çağı sohbeti haline gelmiş olmasına da hayret ediyordu.

Roman yazarı John Updike daha sonraları şöyle yazacaktı: "Şöhret, takıldığı yüzü kemiren bir maskedir": ince düşünülmüş bir özlü sözdü bu, ama Einstein için geçerli değildi.[47] Şöhretle şımarmadı, herkesçe ulaşılabilen ve akademik mevkileri ne olursa olsun diğer araştırmacılardan yardımını esirgemeyen biriydi. Prusya Akademisi'ndeki öğrencilerinden biri olan Eugene Wigner, Einstein'la ilgili anılarında, onun meslektaşları arasında "gerçekten sevgi uyandıran" biri olduğunu söyleyecekti.[48] Bir başka araştırmacı Esther Salaman da Einstein'ı benzer sıcak duygularla hatırlıyordu. Onu bir keresinde mütevazı evinde ziyaret etmişti; evindeki çalışma odasında bir teleskop, Dünya ve Güneş sisteminin metal modelleri ve kitap rafları dışında çok az şey vardı. Duvarlarda Newton'ın iki gravür resmi, filozof Arthur Schopenhauer'in ve alan teorisinin önde gelen iki kurucusu Michael Faraday ve James Clark Maxwell'in resimleri dışında resim yoktu.[49] Einstein, Salaman'a şunu söylemişti: "Herkesten çok Maxwell'e borcum var."[50] Birleşik bir yerçekimi ve elektromanyetizma teorisi bulma girişimlerine başladığı yer bu küçük çalışma odasıydı, bu arayış gitgide saplantı halini alacaktı.

Einstein, matematik ve fizik arasındaki ilişki üzerinde uzun uzun düşünüyordu; buna örnek olarak Berlin'de 1921 yılının başlarında verdiği "Geometri ve Deneyim" seminerinin metnini gösterebiliriz. Sözlerine başlarken matematiğin diğer tüm bilimsel branşlardan daha fazla saygı gördüğünü, çünkü kesin ve aksi iddia edilemez olduğu düşünülen önermelere dayandığını ifade etti; diğer yandan bilimsel saptamalar "belli ölçüde tartışmalı durumdaydı ve sürekli olarak gerçek bulgular tarafından çöpe atılma tehlikesi içindeydi". Şöyle yorum getirdi: "Matematiğin önermeleri, gerçekliğe referans yaptıkları ölçüde kesinlikten uzaklaşırlar ve kesin oldukları ölçüde, gerçekliğe referans yapmaktan uzaklaşırlar." Oscar Wilde'ın hoşuna gidecek türden bir paradoks ifadesiydi bu.[51]

47. Updike (1989: 252)
48. Wigner (1992: 70)
49. Tobenkin, E., 'How Einstein Lives from Day to Day', *New York Daily Post*, 26 March 1921; Reiser (1930: 194), (Anton Reiser, Rudolf Kayser'in, Einstein'ın üvey kızının kocasının rumuzudur.)
50. Salaman (1955: 15)
51. Einstein (1954: 233)

Einstein sunumuna başladığı andan itibaren teorik fizik alanında araştırmaların nasıl yapılması gerektiğine dair vizyonunun, Hilbert'in saf matematikle ilgili düşünce şekline yakından benzediği açıktı: ikisi de aksiyomlar (yani doğruluğu kendinden menkul saptamalar) üzerinden ilerleyerek tam bir genelleme yakalamaya çalışıyordu. Einstein gözlem ve deneylerin önemini hafifleterek teorik fiziğe dair zihinsel bir yaklaşım sunmuştu.[52] Uzay-zaman geometrisinin izafiyet teorisi için nasıl merkezi noktada olduğunu açıkladı; ona göre geometri, tabiata dair diğer teorileri geliştirmek açısından belki de en iyi yöntemi teşkil ediyordu.

Einstein, yeni yerçekimi teorisini elektromanyetizmayı da açıklayacak şekilde genişletmek yönünde Weyl, Arthur Eddington ve diğer bilim insanları tarafından gösterilen çabalarla ilgilenir hale gelmişti. Bunun çok zor olduğunu bilmesine rağmen, teorik fizikçilerin mümkün olan en az sayıda yasayla tabiatı anlamaya çalışmaları açısından böylesi bir teorinin en öncelikli ödev olduğunu düşünüyordu. Birleşik teori arayışına en ciddi şekilde 1925 yılında girişti, o esnada diğer teorisyenler maddeyi en küçük ölçekte açıklamaya çalışan kuantum mekaniği çalışmalarına öncülük ediyorlardı.

Einstein, yerçekimi teorisini bulmaya çalışırken, son aşamalarda değerini kanıtlamış olduğuna inandığı alışılmadık bir metodu yeni teori arayışı esnasında da kullanıyordu.[53] Yine de yeni yaklaşımını meslektaşlarına açıklamak konusunda oldukça ketumdu, hatta sekiz yıl sonrasında, Mayıs 1933'te Oxford Üniversitesi'nde uzmanlara sunmak yerine halka açık bir seminerde açıkladı. Oxford'da kendini evinde gibi hissediyordu; üniversiteyi önceki iki yıl içinde ve on yıl öncesinde de ziyaret etmişti.[54]

1933 baharında artık kırk dört yaşındaydı ve yaşını gösteriyordu; milyonlarca kişinin fotoğraflardan ve haberlerden aşina olduğu bitkin yüzünü çevreleyen kıvırcık yele gibi saçı ağarmıştı. Avrupa'dan ayrılmak üzereydi, Aralık 1932'de Hitler iktidara

52. van Dongen (2010: 42)
53. Einstein'ın terosik fiziğe matematiksel yaklaşımı yaklaşık olarak 1921 yılından itibaren şekil almıştır: van Dongen (2010: 92); Einstein'dan Lorentz'e, 30 Haziran 1921: http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol12-trans/142?ajax
54. Fox, R., 'Einstein in Oxford', *Notes and Records*, Royal Society, London, Mayıs 2018, s 1-26

gelmeden birkaç hafta önce Almanya'yı terk etmişti. Belçika kıyısında kendini mütevazı bir eve kapatan Einstein, Birleşik Krallık'taki bir arkadaşına şöyle yazdı: "Eğer [Nazilere] bir veya iki yıl daha zaman verilirse dünya Almanların elinden çıkma hoş bir deneyim daha yaşayacak."[55] Birkaç ay içinde ABD'de yeni bir hayata başlayacaktı, Princeton'da yeni açılan İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde bir kadro aldı. Enstitü, dünya çapındaki düşünürler için huzurlu ve mütevazı düzenlenmiş ortamıyla araştırma yapmak adına bir cennet gibi tasarlanmıştı, idari görev veya eğitim verme mecburiyetleri de bulunmuyordu. Kendisini "lükse karşı" biri olarak tanımlayan Einstein, enstitünün "alev ve ateş" şeklindeki kurucu vizyonunu destekliyordu; talep ettiği miktarın iki katı olan bir ücreti de gönülsüz kabul etti.[56] Enstitü yetkilileri Einstein'a, fakültenin her bir üyesinin (ister sanat tarihi gibi bir alanda ister teorik fizik alanında) eşit ücret aldığı konusunda teminat vermişlerdi (bu politika hâlâ uygulanmaktadır).

Einstein'ı Oxford'da arkadaşı Frederick Lindemann ağırlıyordu. Lindemann üniversitede fizik profesörüydü, o da Almanca konuşuyordu ve Winston Churchill'in yakın bir arkadaşıydı. Einstein, Christ Church College'da kalıyordu; kolejde görev yapmakta olan bir fizikçi, bir klasikçi ve bir felsefeci ona manifestosunun orijinal Almanca metnini çevirmesi konusunda yardımcı oldu. Metne çarpıcı bir başlık attı –*Teorik Fizik Metodu Üzerine*–, bu metot herhangi bir metot değildi, kendisinin kullanmakta olduğu *o metottu*.[57] 10 Haziran günü öğleden sonra geç saatlerde Rhodes House'da (kent merkezinde yeni açılmış bir kır eviydi) o yılın Spencer Semineri konuşmasını yaptı.[58] Bu seminer, ders

55. Einstein'dan Lindemann'a, 7 Mayıs 1933, LINDARCHIVE D57/12
56. "Lükse karşı" yorumu Veblen'in Flexner'e yazdığı mektupta yer alır, 7 Temmuz 1932: IASARCHIVE, Dirac dosyaları. Einstein, "Alev ve Ateş" yorumunu 1932 yılı baharında Postdam'dan IAS yetkililerine göndermiştir. ('Ich bin Flamme und Feuer dafür'): s. 118 8.kutu https://library.ias.edu/sites/library.ias.edu/files/page/DO.FAC_.html. 1932 yılında Einstein yıllık 3000 dolarlık bir maaş talep etti ancak IAS direktörü Abraham Flexner'in baskısıyla nihayetinde yıllık 10.000 doları kabul etti, gerçi bu rakam da daha sonra aynı maaşta bir matematikçinin getirilmesiyle 15.000 dolara yükseltildi. IASARCHIVE Director Office dosyası, 1932-1934
57. Çevirmenler; felsefeci Gilbert Ryle, klasikçi Denys Page ve fizikçi Claude Hurst'tü: LINDARCHIVE D58/4
58. *Oxford Mail*, s. 4, 12 Haziran 1933

döneminin en önemli sosyal etkinliklerinden biriydi. Zemin kattaki geniş salonda ahşap tavanın altında yaklaşık iki yüz kişilik bir kitle, onun her sözünü can kulağıyla dinledi. Kürsüdeki Einstein 1.75 boyunda tıknaz yapılı, göze çarpan bir figür çiziyordu; göbeği, üzerine tam oturmayan takım elbisesinin yeleğini zorlar gibiydi.

İngilizce verdiği ilk konferanstı, yumuşak bir ses tonuyla, koyu bir aksanla konuşuyordu. Geniş çaplı bir kitleye seslendiğinin farkında olduğundan sade ve anlaşılabilir bir dil kullanıyor, denklemlere yer vermiyordu. Kendisini "yalnızca bir fizikçi" olarak tanımlamıştı, ama bir doğa felsefecisinden aşağı kalır yanı da yoktu ve konuşmasını bu iki gömleği de taşıyarak yapıyordu.[59] Konuşmasının girişindeki hoş sözlerden sonra geriye dönüp antik Yunan'a, yani "batı biliminin beşiğine" bakarak ana konusuna başladı.[60] Birkaç dakika sonra artık kendi sahasındaydı: modern teorik fiziğin durumu ve "insanın bilgi birikiminin, deneyim ve aklının iki ayrılmaz bileşeniyle" ilişkilenme şekli. Einstein'a göre fiziğin kavram ve yasalarını çıkarım yapmak yoluyla anlamak imkânsıza yakındı, ona göre bu yasalar "insan zihninin özgür kreasyonlarıydı"; bu ifade, yirmi otuz yıl öncesinde Alman matematikçiler Georg Cantor ve Richard Dedekind tarafından matematiksel kavramları tanımlamak için kullanılmıştı.[61] Çoğu bilim insanı verimli yeni kavramlar ve güçlü teoriler üretmenin güvenilir bir yöntemi olmadığına inanır: eğer böyle bir metot var olsaydı, her bilim insanı bunu kullanırdı. Ama Einstein, başarıya giden asli yolu bildiğinden emindi.

Yaklaşık yirmi dakika konuştuktan sonra mesajının ana noktasına geldi. Teorik fizikçilerin, doğanın temel yasalarının en iyi şekilde matematiksel dille yazıldığı gerçeğini kullanarak ilerleyebileceğini söyledi, hatta yeni deneysel sonuçların tetikleyiciliğini bile kullanmayabilirlerdi. Bunun mümkün olduğunu öne sürdü, çünkü bir teorinin matematiksel çerçevesi daha iyi bir teori üretmek için yaratıcılıkla geliştirilebilirdi. Einstein'ın ifadesiyle "yaratıcı ilke matematikte yatmaktaydı".

---

59. Viereck (1929: 17)
60. Konuşma metni: Einstein (1954: 270-276) ve biraz farklı bir çevirisiyle: Einstein (1934: 163-169)
61. Gray (2008: 167, 174, 187, 294)

Einstein'ı dinleyenler, yeni tabiat yasaları keşfetmek yönündeki bu alışılmadık yaklaşımı daha detaylı açıklasa muhtemelen minnettar olacaktı. Bu yasalar özünde doğrudan gerçek dünyayla ilişkili nicelikler arasındaki modellerdir: amaç, tek bir model kullanarak tabiata dair mümkün olduğunca çok şey açıklamaktır. Herhangi bir fizik yasasının kapsamını genişletmenin geleneksel yolu, orijinal yasanın altında yatan matematiksel modeli doğa hakkında daha bile fazla şey tanımlayan daha büyük bir modele doğru genişletecek yollar önermektir. Bununla beraber Einstein, teorik fizikçilerin yaratıcı olmalarının daha iyi bir yolu olduğuna inanıyordu.

Modellemenin de matematikçilerin alanı olduğunu biliyordu. Sayı teorisyeni G.H. Hardy'nin daha sonraları *A Mathematician's Apology*[Bir Matematikçinin Özrü] adlı eserinde yazmış olduğu gibi, bir matematikçi, fikirlerden kalıcı modeller çıkarabilen kişidir.[62] Bununla beraber, bu modeller soyuttur ve gerçeklikle alakaları olmayabilir. Teorik fizikçiler ve onlardan önce gelen doğa felsefecileri, bu matematiksel modellerden bazılarının gerçek dünya nicelikleri arasındaki ilişkileri de tanımlayabildiğini keşfetmişlerdir. Einstein'a göre doğanın bu matematiksel niteliğinden faydalanılabilirdi: tabiatın bazı bölümleri için geçerli olan bir yasanın altında yatan matematiksel modeli genişleterek, gerçek dünya hakkında daha fazla şey açıklayan daha kapsamlı bir yasa keşfetmek mümkün olmalıydı. Einstein, bu yolla teorik fizikçilerin, matematiği yaratıcı şekilde kullanarak yerleşik yasaları genişletebileceklerine inanıyordu.

Bu yaklaşım radikal ölçüde yeni bir strateji olarak görünüyordu ve Einstein'ın dinleyicileri arasındaki bilim insanları muhtemelen şaşkına dönmüştü. Newton'ın "felsefi düşünme metodunun" zaferinden beri doğa felsefecileri doğal dünyayı sadece düşünerek anlamayı umamayacaklarını kabul etmişlerdi; ilerleme kaydetmenin yegâne güvenilir yolu teori ve deney kombinasyonu kullanarak fikirler geliştirmekti. Ama şimdi dünyanın en başarılı teorik fizikçisi "tam bir teminat vererek", "Antik dönemdekilerin hayalini kurduğu gibi saf düşüncenin gerçekliği kavrayabileceğini" söylüyordu ısrarla: Newton'ı olmasa

62. Hardy (1992: 84-85)

da Platon'u memnun edecek sözlerdi bunlar.[63] Einstein, kendi yerçekimi teorisini tamamlarken bu matematiksel stratejinin gayet güzel işlediğini söyleyerek kitlesine teminat verdi. Böylesi muazzam bir başarı göz önünde bulundurulduğunda kimsenin onunla tartışmaya niyeti yoktu.

Einstein seminere nazik bir ikazla başlamıştı: teorik fizikçiler tarafından kullanılan metotları gerçekten bilmek istiyorsanız, "onların ne dediklerini dinlemeyin, dikkatinizi ne yaptıkları üzerinde toplayın."[64] Ama dinleyicilerin, perde arkasında neler olup bittiğine bakıp Einstein'ın yerçekimi teorisini oluşturuş şekline dair yaptığı açıklamayı kontrol etme imkânı yoktu. Bir araştırmacı grubunun Einstein'ın not defterlerini inceleyebilmesi ancak onlarca yıl sonra mümkün olabildi. Hem matematiksel hem de fizik mantık içeren iki başlı bir strateji kullandığına dair net kanıtlar buldular; Einstein, teorisini tamamlayana kadar bu şekilde devam etmiş, ama sonrasında fizik mantığın rolünü biraz daha önemsiz gibi göstermişti.[65]

Göründüğü kadarıyla Einstein'ın yeni araştırma felsefesinin temelinde, yerçekimi alan denklemlerini bulma arayışının son ayındaki çalışmalarından kalan biraz dağınık anılar vardı. Hollandalı bilim tarihçisi Jeroen van Dongen'e göre, "Einstein, yerçekimi teorisinin oluşumunda matematiğin oynadığı rolü fazla büyütmüştü, muhtemelen eleştirel yaklaşan meslektaşlarını, yerçekimi ve elektromanyetizmaya dair birleşik bir teori bulmaya çalışırken kullandığı metodun değeri konusunda ikna etmek istiyordu."[66]

Einstein, seminerinin kapanış dakikalarında, Maxwell ve Faraday'ın ortaya koyduğu tipte alanlar kullanarak doğayı anlamaya çalışma yönteminin önünde "büyük bir engel" olduğunu kabul etti: Einstein'ın teorisi, maddeye en küçük ölçekte uygulandığında işlermiş gibi görünmüyordu.[67] Düzenli şekilde

63. Einstein (1954: 274)
64. Einstein (1954: 270)
65. Einstein'ın defterlerini inceleyen akademisyen grubunda Jürgen Renn, John Norton, Tilman Sauer, Michel Janssen ve John Stachel de vardı. Einstein'ın iki başlı stratejisi üzerine: Gutfreund ve Renn (2015: 22-23)
66. Van Dongen'dan gelen e-mail, 13 Kasım 2015. Ayrıca bkz. van Dongen (2010: 119-121)
67. Einstein (1954: 275)

değişkenlik gösteren alanlar Planck'ın enerji quanta'sının varlığını veya atom altı partiküllerini meydan getiren küçük madde yığınlarını açıklayamıyordu. Yeni kuantum mekaniği teorisi bu zorluklarla baş edebiliyordu, ama Einstein gerçek dünyaya dair temel bir teori olması açısından kuantumun yetersiz olduğundan emindi ve bu teoriyi birleşik alan teorisi taslağına dahil etmeye çalışmadı.

Einstein'ın kuantum mekaniğine güvensizliği onu ana akım fizik gelişmelerinden yarı yarıya kopuk hale getirmişti; Oxford'daki dinleyici kitlesinin bazı üyeleri bu durumun gayet farkındaydı. Ayrıca yine birçoğu, fizik alanında önceki on yılın en büyük başarısının, yani kuantum mekaniğinin keşfinin, Einstein'ın matematiksel programıyla gerçekleşmediğinden de haberdar olacaktı. Bunun yerine teorisyenler iki uçlu bir yöntem –fiziksel ve matematiksel– kullanarak, deneyler sonucu ortaya çıkan keşifleri açıklayabilecek radikal ve yeni bir teori ortaya koymaya çalışmışlar ve kuantum mekaniği teorisini oluşturmuşlardı. Dahası, bu yaklaşım son birkaç yılda Einstein'ın yalnız başına gerçekleştirdiği birleşik teori arayışından daha fazla sonuç getirmişti; hemen hemen hiçbir fizikçinin Einstein'ın liderliğini izlememesinin sebebi de muhtemelen buydu.

Einstein'ın yerçekimi teorisiyle kuantum mekaniği arasındaki bir benzerlik, ikisinin de geçmişi yüzyılı bile bulmayan tipte yüksek matematik kullanıyor oluşuydu. Şimdi temel kuantum mekaniğinde yer alan yeni matematiğe bakalım ve belki de sürpriz denebilecek şekilde Einstein'ın metoduna yakın benzerlik taşıyan bir teorik fizik metodu oluşturmak yönünde bu yeni matematiğin nasıl yol gösterici olduğunu inceleyelim. Görünen oydu ki, fizikçiler doğayı en küçük ve en büyük mesafelerde anlamak istiyorduysa –genel deneyimlerin çok ötesine uzanacak şekilde–, yüksek matematikle içli dışlı hale gelmekten başka çareleri yoktu.

4
kuantum matematiği

"Matematikle fizik arasında derin bağlantılar var gibi görünüyor. Tanrı'nın, fiziki dünyayı muhteşem matematik özellikler barındıracak şekilde yaratmış bir matematikçi olduğunu söyleyerek bu bağlantıyı ifade etmek isterim."

Paul Dirac,
Yeshiva Üniversitesi semineri, Nisan 1962

İnsan imgelemi, maddenin özünde ne olduğunu kavramaya çalışmaktansa evreni, yerçekimini şekillendiren gücü anlamayı daha kolay bulmuştur. Atomların varlığı, antik dönem Yunan filozofları tarafından tasavvur edilmelerinin üzerinden neredeyse iki bin yıl geçtikten sonra, ancak yirminci yüzyılın başında şüphe götürmez şekilde kanıtlanabilmiştir. Sonrasında bile atomların içinde ne olup bittiğini anlamak hiç kolay olmamıştır.

Atomların varlığı kesin olarak kanıtlandığında da Democritus ve diğer filozofların düşüncesinin aksine, bölünmez gruplar olmadıkları açıkça görülmüştür. Aksine atomların da bileşenleri vardır, örneğin elektronlar bu bileşenlerden biridir. Sorun şuydu ki, Newton'ın hareket yasaları ve Maxwell'in elektromanyetizma denklemleri atomların iç yapılarına uygulandığında sonuçlar mantıksız geliyordu: bu yasalar, tabiatın bir bölümünü açıklamak konusunda ilk kez kesinlikle başarısız kalmış oluyordu. Örneğin her bir atom çekirdeği (nükleus) etrafında yörünge çizen elektronların genellikle yalnızca kesin, belli değerde enerji

taşıyor olmalarını (deneyler de bunu teyit ediyordu) mevcut yasalarla açıklamak imkânsızdı. Newton ve Maxwell'in yasasına göre düşünüldüğünde, negatif yüklü elektronlar, pozitif yüklü nükleer çekirdeklere çoktan düşmüş olmalıydı. Atomların varlığı bütünüyle bir gizemdi ve 1920'lerin başlarında, önde gelen birçok fizikçi, atomik dünyanın insanların anlayamayacağı kadar zor olduğu korkusuna kapılmış durumdaydı.[1]

1925 yılında kuantum mekaniğinin keşfinden sonra kötümserlik havası dağıldı. İzafiyet teorisinin aksine, kuantum teorisi gerçekten devrimci bir teoriydi. Einstein'ın sıklıkla altını çizdiği gibi, izafiyet, "yüzyıllar boyu izi sürülebilecek bir çizginin doğal devamıydı" ve Newton'a, Maxwell'e ve diğer bilim insanlarına kadar uzanıyordu.[2] Buna karşın kuantum mekaniği, geçmişle bağları net şekilde koparmayı gerektiriyordu ve fiziğin çehresini değiştirecekti. O dönemdeki fizik camiasının günümüzdeki muadilinden farklı olduğunu söylemek yerinde olacaktır. Fizikçi Samuel Goudsmit'in 1970'lerde yazmış olduğu gibi, modern fizik, "hayal kırıklıklarıyla, tehlikelerle dolu modern ve heyecan verici bir metropole" benzeyebilecekken, 1920'lerde daha ziyade "kendi içinde küçük husumetleri olan, Peyton Place'in cinsellik içermeyen versiyonuna benzeyen küçük bir köy" gibiydi.[3]

Yeni kuantum mekaniği teorisi, atom altı parçacıkların davranışını açıklıyordu, gerçi genellikle ortak aklın aksine işliyordu, gündelik dünya verileriyle şekilleniyordu. Fizikçiler, büyük ölçekli dünyada işlev gösteren matematiksel yasaların, insan duyularının kendi başına irdeleyip algılayamayacağı küçük ölçekli parçacıklar için de geçerli olduğunu varsaymakta fazla sabırsız davranmışlardı. Kuantum mekaniğinin tuhaflığı kısmen matematiğinde saklıydı; bu matematiğin de bir kısmı teorisyenler için çok yeniydi; tıpkı Gauss ve Riemann'ın bükülmüş uzay hakkındaki düşüncelerinin Einstein için bir zamanlar yeni olduğu gibi. Yerçekimi teorisini geliştirmek için Einstein'ın onların matematiğini öğrenmek zorunda kaldığı gibi, kuantum devrimcileri de ancak kendi matematiksel konfor alanlarını terk ettikten sonra ilerleme kaydedebildiler. Ama başka seçenekleri

1. Wigner (1992: 84-85, 92)
2. Einstein (1954: 246)
3. Goudsmit (1976: 40)

yoktu: teori, o güne kadar keşfedilmemiş atom altı dünyada yol almanın yegâne yoluydu. Fizikçiler, özel ve genel izafiyet de dahil olmak üzere kuantum mekaniği izleri taşımayan bütün teorileri retro olarak damgaladılar: onlara göre böylesi teoriler "klasik fiziğin" bir parçası olmaya mahkûmdu.

Kuantum mekaniği tek bir bilim insanının değil, genel olarak Avrupa'da yerleşik uluslararası bir camianın eseriydi. Teorinin ilk belirtileri, iki teorisyen tarafından birbirlerinden bağımsız şekilde ortaya konmuştu; oluşturdukları versiyonlar aynı sonuçları veriyordu, ama oldukça farklı görünüyordu ve farklı matematik tipleri üzerine inşa edilmişti. İki versiyon da Einstein'ın özel izafiyet teorisiyle uyumlu değildi –bu durum, göreceğimiz üzere daha sonra düzeltilecek bir defoydu–.

Teorinin bir prototip versiyonunu ilk yayımlayan kişi Alman Werner Heisenberg'di, yirmi üç yaşında, Göttingen'de yaşayan parlak zekâlı bir gençti. Heisenberg'in yaklaşımında konum ve hız gibi bir elektronun hareketini tanımlayan niceliklerin her biri kare şeklinde bir dizi veri ile temsil edilir –sıra ve sütunları oluşturan sayılar halinde verilir–. Bu teoride bu sayıların her biri, bir elektron çiftinin enerji seviyelerinin bir özelliğidir ve parçacığın bunlar arasında sıçrama olasılığını temsil eder. Bu diziler Heisenberg için yeniydi, ama kısa süre sonra matematikçiler için uzun zamandır bildik bir konu olduğunu öğrendi; matematikçiler bu dizilere "matrisler" diyordu. Matematikçilerin bu diziler hakkında çok şey bildiği ve fizikçilerin kullanımı için hazır durumda teoriler üretmiş oldukları ortaya çıktı.

Diğer kuantum mekaniği formülasyonu ise çoğu fizikçinin aşina olduğu bir matematik kullanıyordu ve anlaşılması çok daha kolaydı. Heisenberg'in teorisinden birkaç ay sonra, Avusturyalı profesör Erwin Schrödinger tarafından yayımlandı; Schrödinger, bu yayından önce de halihazırda birinci sınıf bir teorisyen olarak kabul ediliyordu. Fransız teorisyen Louis de Broglie tarafından ortaya atılmış bir kuantum fikri üzerinden ilerlemişti. De Broglie, hareket eden her bir elektronun bir dalgayla ilişkili olduğunu öne sürmek adına özel izafiyet teorisini kullanmıştı.[4] Bilindiği kadarıyla, Schrödinger oluşturduğu denklemi ilk kez kız arkadaşlarından biriyle Alpler'de yaptığı bir kaçamak esnasında

4. Weyl (2009: 225)

kafasında canlandırmıştı. Denklem, en azından prensipte herhangi bir atomun enerji değerlerini hesaplayabilmesine imkân veriyordu.[5] Tüm atomların en basiti –yani hidrojen atomu– söz konusu olduğunda enerji düzeylerinin hesaplanması görece daha kolaydır ve sonuçlar deneylerle gayet güzel örtüşmektedir. Bunun neticesinde Schrödinger denklemi yirminci yüzyılın en çok kullanılan bilimsel denklemi haline geldi ve atomla ilgilenen bilim insanları için vazgeçilmez oldu.

Bu iki kuantum mekaniği versiyonu ortak bir özellik paylaşıyordu: ikisi de karmaşık sayılar adı verilen konuyu içeriyordu. Bu sayılar matematikçilerin yüzyıllardır aşina olduğu kavramlar olsa da çoğumuz için alakasız kalır, çünkü günlük yaşamımızda kullandığımız unsurlar değildir. Matematikçiler en basit karmaşık sayı olan "i"yi, "-1"in kare kökü olarak tanımlar (dolayısıyla $i \times i = -1$). Bu tanım, "hayali" rakamlardan oluşan matematiksel bir dünyanın ve bunlarla ilişkili matematiksel objelerin kapılarını açar. Bu objelerin faydalı olduğu ortaya çıkmış olsa da nihayetinde işe yarar kurmacalar konumundadırlar. Bununla beraber, kuantum mekaniğinin ortaya çıkışıyla bu durum bütünüyle değişmiştir: karmaşık niceliklerin doğurduğu tahminler,araştırmacıların ölçüm cihazlarındaki nümerik okumalarıyla kıyaslayabilecekleri sıradan reel sayılardan oluşuyordu yalnızca; ama kuantum mekaniğinin temel denklemleri için vazgeçilmezdiler.

Kuantum mekaniği, tabiata dair oluşturulmuş teoriler arasında tamamlanmamış halde, netleştirilmeyi bekler durumda olan ilk temel teoriydi. Ne Heisenberg, ne de Schrödinger teorinin tam bir versiyonunu sunabilmişti: fizikçilerin teorinin anlamına ilişkin bir konsensusa ulaşmaları yıllar aldı (teorinin anlamı bugün bile hâlâ tartışmalıdır). Ama teorinin devrimci yapısı oldukça netti. İnsan gözlemcilerden ayrı şekilde bağımsız bir gerçekliğin var olduğuna dair ortak inanç ortadan kalkmıştı: kuantum mekaniği, kişinin, etkileşimde olduğu her şeyi etkilediğini söyler, bu müdahaleyi minimize etmek için ne kadar özen gösterilirse gösterilsin bu durum değişmez. Laplace'ın dünya görüşünün temelinde olan determinizm de böylece kaybolmuş-

5. Miller, A. I., 'Erotica, Aesthetics and SchrÖdinger's Wave Equation', yer aldığı çalışma, Farmelo (2002: 80)

tu. Kuantum mekaniğine göre kuantum dünyası özü itibarıyla tahmin edilemez durumdaydı. Örneğin, bir elektronun durumu, sonrasında bu elektron üzerinde yapılan farklı gözlemlerde o duruma özgü ve belli bir sonuç vermez, prensipte bile belli bir sonuç beklentisine girilemez. Bu düşünce, Laplace'a mezarında takla attırmaya yetecek cinstendi ve Einstein da buna inanmayı reddetmişti: meşhur tabiriyle "Tanrı zar atmaz" diyordu.[6] Ama atom dünyasında tahmin edilemezlik anlayışı, kuantum mekaniğinin merkezinde kaldı ve daha da önemlisi hiçbir araştırmacı bundan ciddi bir şüphe duymadı.

Bu tahmin edilemezlik meselesi, kuantum mekaniğinin öncülerinin birçoğunun çalışma alanı haline gelmişti, bunlar arasında en genç olanlardan biri Paul Dirac'tı. Teori ilk çıktığında yirmi üç yaşında olan Dirac, alışılmadık bir karakter çiziyordu: sessiz, savruk ve çekingen biriydi; gerçek dünyadan ziyade atom dünyasında daha rahat ediyordu. Kuantum mekaniği yenilikçilerinin matematiksel yönü en gelişmiş üyesi olarak teorik fiziğe bir dizi radikal yaklaşım getirdi, bunların arasında saf matematik alanında geliştirdiği, türünün en gelişmiş örneği fikirler de vardı.

Dirac da tıpkı Einstein gibi yeni temel fizik teorileri geliştirmenin anahtarının, altında yatan matematiğe odaklanmak olduğuna inanmıştı. Şimdi bu iki disiplinin arayüzünde yaptığı keşiflere ve bu disiplinler arasındaki ilişkinin geleceğine dair eşsiz vizyonuna biraz göz atacağız.

*

Dirac, kuantum mekaniği partisine geç katıldı. 1925 yılı yazında Cambridge dışında neredeyse hiç tanınmıyordu, Cambridge'de de içe dönük bir doktora öğrencisiydi, gelecek vaat etse de pek de kayda değer olmayan birkaç makale yazmıştı. Kuantum mekaniği alanına giriş yaptıktan sonra kendi tarzını buldu ve Almanya'daki bazı rakiplerinin kendisini önde gelen matematikçilerden biri sanmasına neden olacak makaleler yazdı.[7] Konuya yaklaşımı eşsizdi, dolambaçsız ifadeler ve güçlü bir matematik kullanıyordu, özenli bir mantıkla birlikte meslektaş-

6. Einstein'dan Born'a, 4 Aralık 1926. Çev. değişikliği Born (2005: 88) şöyle söyler: "Zar oyunu oynamaz."
7. Farmelo (2009: 452, ref. 49)

larının neden bahsettiğini genellikle anlamadığı hayal gücüne dayalı sıçramalar da yapıyordu.[8]

Dirac'ın matematiğe ilgisi, yirminci yüzyılın ilk on yılı içinde, Brsitol'da büyüdüğü dönemde daha çocukken filizlenmişti. Kuantum mekaniğinin kurucuları arasında mütevazı bir ailede büyümüş olan tek kişi oydu, çok az paraları vardı. Annesi, 1933 yılında, "[Dirac'ın] matematik yeteneğinin nereden geldiğini söylemenin zor olduğunu" söylemişti; ailesinde hiç kimsenin konuya en ufak ilgisi yoktu.[9] Dirac'ın çocukluğunda öğretmenleri onu matematik derslerinden çıkarıp yalnız başına okuması için ağır kitaplar vermişlerdi. Kısa sürede temel kalkülüsü öğrendi ve hatta Bernhard Riemann'ın tanıştırdığı bükülmüş uzay geometrisi üzerinde çalışmaya başladı; bükülmüş uzay geometrisi, o dönemde yalnızca yüksek lisans yapan öğrencilere verilen bir dersti.[10] Ama daha sonra bu konuya pek ilgi duymadığını söyleyecekti, çünkü konunun "gerçek fiziksel dünyayla" herhangi bir bağlantısı yok gibi görünüyordu.[11] Dirac'ın ifadesiyle Kasım 1919'da genel izafiyet teorisi "tüm dünyada patladıktan" sonra, Almanya'da pek bilinmeyen bir figür tarafından keşfedilmiş olan bu yeni teori hakkında bulabildiği en ufak bilgi zerresini bile toplamaya çalışıyordu.[12] Einstein, teorisinin nihai versiyonunu geliştirmek için bükülmüş uzay matematiğini kullanmıştı; Dirac da hemen hemen aynı esnada bunları öğrenmeye çalışıyordu ve gerçek dünyayla bağıntısız olduğunu düşünme yanılgısına düşmüştü. Birkaç yıl sonrasında Dirac'ın imgelemini izafiyet teorisi ele geçirdi ve ona kalıcı bir temel fizik tutkusu verdi.

Dirac'ın teorik fizik alanında araştırma yapma şekli, kısmen olağandışı üniversite eğitiminin bir sonucuydu –ilki mühendislik, ikincisi matematik olmak üzere iki alanda lisans dersleri almıştı–, sonrasında da Ekim 1923'te teorik fizik öğrencisi

8. Wigner (1992: 88-89)
9. Flo Dirac'la söyleşi, yer aldığı çalışma *Svenska Dagbladet*, Stockholm, 10 Aralık 1933
10. P. A. M. Dirac – Oturum 1, Oral History Interviews, American Institute of Physics (AIP), Thomas S. Kuhn ve Eugene Wigner 1 Nisan 1962: https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4575-1; Dirac (1977: 112)
11. Dirac (1977: 112)
12. Farmelo (2009: 35)

olmuştu. O dönem itibarıyla matematik alanında iki yaklaşım konusunda olgunlaşmıştı. Bunlardan biri, asıl önemli olan noktanın gerçek dünyaya güvenilir şekilde uygulanabilen doğru yanıtlar üretmek olduğu şeklindeki mühendislik düşüncesiydi; diğeri ise matematiği yaratıcı bir disiplin olarak gören, hayal gücü ve mantıksal titizlikle ilerletilmesi gerektiğini düşünen saf matematikçi inancıydı.

Doktorasının ilk iki yılında Dirac düzenli olarak bir dizi araştırma projesi üretti ve müfredat dışı matematik öğrenmek için büyük zaman harcadı. Cumartesi öğleden sonraları saf matematikçi Henry Baker'ın düzenlediği akademik çay partilerine katılıyordu. Bu partilerde amaç, Cambridge'deki genç matematikçileri bir araya getirip geometri alanındaki zorlu ve yeni fikirlerle yüzleştirerek onları geliştirmekti.[13] Dirac, yirmili yaşlarının başındayken katıldığı bu toplantılardan birinde, daha o yıllarda bile saf matematiğin ve teorik fiziğin birbirine öğreteceği çok şey olduğunu söylüyordu. Matematikçilerin, herhangi bir sayıda boyuta sahip olabilecek uzayı düşünerek çalıştığının altını çizdi; bu boyut sayılarından hiçbiri onlar için özel değildi. Ama dört boyutla ilgili özel bir şey vardı: fizikçiler, temel yasalarını üç boyutlu uzayı ve bir boyut olarak da zamanı kullanarak oluşturuyordu. Dirac, doğanın matematikçilere bir şey söylemeye çalıştığına inanıyordu. "Mevcut evrenin dört boyutlu olmasının temel bir sebebi olması gerek" diyordu ve şunu da ekliyordu: "şundan eminim ki, bu sebep keşfedildiğinde dört boyutlu uzay, geometriciler için diğer uzaylardan daha ilgi çekici olacaktır."[14]

Bu yaklaşım, Henry Baker'ı biraz üzmüş olabilirdi. Bunun dışında Dirac, saf matematiğin, diğer bilimlerin hizmetçisi olmadığını düşünüyordu: matematikçilerin çalışmalarına yol gösteren unsur tabiat olmalıydı, peki ama neden? Şöyle devam etmekteydi: "Tabiatın yapısının neden böyle olduğuna dair daha fazla sebep keşfedildikçe, uygulamalı matematikçiler için en fazla önem taşıyan sorular, saf matematikçiler için de en önemli ilgi alanları haline gelecek."[15] Çoğu saf matematikçi, fikirlerinin

13. Farmelo (2009: 72-73)
14. El yazısı konuşma metni, DARCHIVE S2, B46, F10
15. Baker'ın vefat ilanından alıntı, *The Times*, s. 14, 19 Mart 1956

gerçek dünyayla nasıl ilişkilendiğine pek az kafa yormuştur; ama Dirac, doğanın önemli bir ilham kaynağı olduğunu bir gün fark edeceklerini düşünüyordu. Zamanının yarım yüzyıl önündeydi.

Dirac'ın yaratıcılık açısından altın dönemi sekiz yıl sürdü. Bu süreç 1925 yılı sonbaharının başlarında, Heisenberg'in kuantum mekaniğiyle ilgili ilk makalesini okumasının ardından başladı ve teorinin belli bir yönüne odaklandı. Heisenberg'in teorisine göre konum, hız ve diğer fiziksel nicelik çiftlerinin kendine has bir özelliği vardı: A ve B nicelikleri çarpıldığında, AxB çarpımı, BxA çarpımıyla aynı sonucu vermiyordu: nicelikler değişme özelliğine sahip değildi. Bu olay tuhaf görünür, çünkü hepimizin okulda öğrendiği kurala, herhangi iki sayının çarpımının çarpım sırasından bağımsız olarak sonuç verdiği kuralına (örneğin 5x9 ile 9x5 aynı sonucu vermektedir) ters düşmektedir. Bu sıradan sayıların değişme özelliği vardır. Heisenberg, değişme özelliği olmayan sayıların, teorisi için bir defo niteliğinde olmasından endişe ederken, Dirac bu konuda daha rahattı.[16] Yaptığı müfredat dışı okumalarda değişme özelliği olmayan matematiksel objelerle halihazırda karşılaşmış durumdaydı: Maxwell'i ve daha birçok önemli düşünürü büyülemiş olan dördeylerden* haberdardı.[17] Dirac'a göre değişme özelliğinin olmayışı korkulacak bir şey değildi, ama kuantum teorisinin tam kalbindeydi ve geliştirilmeyi bekliyordu.

Cambridge çevresinde yalnız başına yaptığı pazar yürüyüşlerinden biri esnasında Dirac, AB-BA arasındaki farkın gündelik hayattaki maddelerin hareketine dair klasik teoride yer alan benzer görünümlü matematiksel bir ifadeyle ilişkili olabileceğini düşündü. Dirac, bu önseziyi, Newton'ın öncülük ettiği "klasik" mekanikle yeni kuantum mekaniği arasında bir köprü kurabilmek için kullandı. Neticede bu yaklaşım, atomik alandaki harekete dair taze bir anlayış geliştirilmesine imkân verdi. Bu yaklaşımın merkezinde, değişme özelliğinin olmayışı kavramı

16. Dirac, kabul konuşması, J. Robert Oppenheimer Prize, s. 4, DARCHIVE, S2, B48, Fi32

* Matematikte, dördeyler (ya da kuaterniyon, kuaternion, dördübir), karmaşık sayılar cisminin değişmesiz genişletmesidir. İlk defa İrlanda'lı matematikçi Sir William Rowan Hamilton tarafından 1843 yılında tanımlanmış ve 3 boyutlu uzaydaki matematiğe uygulanmışlardır (y.h.n.).

17. Dirac AIP söyleşisi, Oturum 1, 1 Nisan 1962

vardı; daha sonraları yirminci yüzyıl matematiğinin en önemli konularından biri olacaktı.[18]

Dirac, bir yıl sonra Heisenberg ve Schrödinger'in kuantum mekaniğine dair çizdikleri tabloları incelediğinde matematiğin kurallarını esnetmeye başladı. Yaptığı hesaplamalarda bir matematik fonksiyonunu saf matematikçilerin aklını başından alacak ölçüde liberal şekilde kullandı; geleneksel matematiksel metotlarla başa çıkılması mümkün olmayan bu fonksiyon bir grafik olarak çizildiğinde, fonksiyonun profili sonsuz ölçüde ince ve sonsuz ölçüde yükselen çok sivri bir dikene benziyordu. Dirac, neredeyse kesin diyebileceğimiz bir bilgiye göre, bu fonksiyonla Oliver Heaviside'in makalelerinde karşılaşmıştı, gerçi fonksiyon başka birçok matematikçi tarafından da Heaviside'dan bağımsız olarak bulunmuştu.[19] Dirac, özür dilemesini gerektirecek bir şey yaptığını düşünmüyordu; fonksiyonun, matematiğin meşru bir parçası olması gerektiğine inanıyordu, çünkü doğru olduğunu seziyordu ve yanlış olamayacak kadar iyi işlediğinin farkındaydı. Yirmi yıl kadar sonra matematikçiler, "Dirac delta fonksiyonu" adı verilen bu fonksiyonun, yeni bölüşüm kuramının önemli bir parçası olduğunu kabul ettiklerinde Dirac haklı çıkmış oldu.[20]

1927 yılı yazında Dirac bir kez daha farkında olmadan matematiğin sınırlarına doğru ilerliyordu. Kuantum mekaniğinin ilk versiyonlarının özel izafiyet teorisiyle bağdaşmamasına uzun zamandır kafa yoruyordu ve basit bir soru tasavvur etti: İki teoriyle de uyum gösteren bir parçacığın en sade matematiksel tanımı nedir? Cambridge'de bu sorunun yanıtını bulmak için işe koyuldu ve birkaç aylık yoğun çalışmanın ardından, tahmin edilenden çok daha basit bir cevaba ulaştı. Elektronlar, fizikçilerin o güne kadar görmediği ölçüde kompakt bir denklem kullanılarak hem özel izafiyet hem de kuantum mekaniği ile uyumlu bir şekilde tanımlanabiliyordu. En sade haliyle, herhangi bir genel kuvvet altında olmayan bir elektron tanımlanırken denklem şu şekildeydi:[21]

18. Atiyah (2001: 656)
19. Farmelo (2009: 113)
20. Johnson, S. G., 'When Functions Have No Value(s)': http://math.mit.edu/~stevenj/18.303/delta-notes.pdf
21. Dirac (1977: 142)

$$(p_0 - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 - \alpha_3 p_3 - \alpha_4 mc)\,\psi = 0$$

p_0 sembolü, m kütlesine sahip bir elektronun enerjisini belirtirken; diğer p sembolleri, uzayın üç yönünün her birinde parçacığın momentumunu temsil etmektedir.[22] α sembolleri daha ziyade gizem olan unsurları temsil eder: daha sonraları "Dirac matrisleri" olarak anılacak olan on altı sayılık karesel dizilerdir bunlar. Elektronun bu tanımına göre, parçacığın davranışı bir Schrödinger dalgasıyla kodlanmak yerine ψ ile belirtilen matematiksel bir unsurla belirlenir, daha sonra bu unsura "spinor" adı verilecektir.[23] Dirac daha sonrasında bu unsurların onlarca yıl önce Göttingen matematikçisi Felix Klein tarafından keşfedilmiş olduğunu öğrendi; Klein bunları dönen bir fırıldağın hareketini tanımlamak için kullanmıştı.[24]

Dirac'ın göstermiş olduğu gibi, denklemi, elektrona dair o güne kadar gizem olarak kalmış iki özelliği açıklamaktadır. Her bir elektronun niye döndüğünü (araştırmacılar, elektronun döndüğünü birkaç yıl öncesinde keşfetmişti) ve bununla ilişkili olarak niçin bir manyetik alana sahip olduğunu ilk kez açıklamış oluyordu. Bu iki özellik, hem özel izafiyet hem de kuantum mekaniği teorileri ile uyumlu bir yapı bulma ısrarının bir neticesi olarak bulunmuştu.[25] Bu, kayda değer bir başarıydı ve Dirac'ın rakipleri de kısa sürede bu başarıya şapka çıkardılar. Heisenberg, Dirac'a Göttingen'den hayranlık bildiren bir mektup yazdı; Göttingen'in birçok şöhretli bilim insanı, denklemi bir mucize olarak değerlendiriyordu.[26]

Dirac, denklemini; birkaç sene sonra, 1931 yılında, insan aklının zaferlerinden birini doğuracak şekilde kullanmanın bir yolunu buldu. Deneysel gözlemlerin desteğini almadan,

22. Momentum, klasik olarak "kütle × hız" olarak tanımlanır.
23. "Spinor" kelimesi, teorik fizikçi Paul Ehrenfest tarafından 1920'lerde oluşturulmuştur.
24. Van der Waerden, Pasa G., 'Spinor Analysis' (1929): https://arxiv.org/abs/1703.09761. Dirac, spinorların geometrik özelliklerini yeni şekillerde yorumlamıştır; bilim profesörü Tom Pashby, yakın dönemde Dirac'ın yayımlanmamış notlarını okuduğunda fark etmiştir. Bkz. Pashby'nin makalesi, 'How Dirac Found His Electron Equation' (hazırlık aşamasında).
25. Farmelo (2009: 211-215)
26. AHQP ile Léon Rosenfeld söyleşisi, 1963; Heisenberg'den Dirac'a, 13 Şubat 1928, DARCHIVE Kutu 22, Dosya 11.

denklemin, anti-elektron olarak adlandırdığı şeyin varlığına işaret ettiğini söyledi; bu anti-elektron elektronla aynı kütleye, ama zıt elektrik yüke sahip olmalıydı.[27] Başka teorisyenler de böylesi bir parçacık tasavvur etmişti, ama hiçbiri bunu matematiksel bir çerçevede tartışmamıştı. Dirac'ın fikirlerini yayımlamasından on bir ay sonra, California Teknoloji Enstitüsü'nde çalışan Amerikalı araştırmacı Carl Anderson –Dirac'ın öngörülerinden habersizdi–, özel dedektöründe anti-elektronu keşfetti. Daha sonraları Werner Heisenberg, anti-maddeye dair bu başarılı öngörüyü " yüzyılımızın fizik alanındaki en büyük atılımlarının belki de en büyüğü" olarak tanımlayacaktı.[28]

Atomik düzeyde, Dirac'ın keşfi bize hiçlik hakkında yeni bir perspektif kazandırmıştır: bir boşluk basitçe boş olamaz; kuantum mekaniği ve özel izafiyet kuramları, bilim insanlarını sürekli olarak aniden fırlayıveren ve birbirini imha eden parçacık-anti parçacık çiftleri tasavvur etmeye yöneltmişti, bunlar asla doğrudan gözlenemeyen süreçlerdi. Kozmik düzeyde ise, bilim insanları, daha sonraları evrenin, ilk zamanlarında yarı maddeden yarı anti-maddeden oluştuğu yargısına vardılar: Dirac, evrenin ilk dönemlerinin içeriğinin yarısını kafasında canlandırabilmek için özel izafiyet ve kuantum mekaniği kuramlarını kullanmıştı.

Dirac'ın denkleminin başarısı, hem özel izafiyet hem de kuantum mekaniği kuramlarını bir araya getirmenin gücüne dair ilk işaret niteliğindeydi. Birçok fizikçi, iki teoriyi kombine etmenin son derece zor, hatta imkânsız olacağını düşünmüştü. Ama bu kötümserlik ortadan kaldırılmış oluyordu: Dirac, bu kombinasyonun uyumlu bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermişti ve teoriler arasındaki birlik zengin getiriler doğurmuştu. Bu kitabın geri kalanında göreceğimiz gibi bunlar hayati derslerdi: temel teorik fizik alanında daha sonraki dönemlerde kaydedilecek en önemli ilerlemelerin birçoğu, yeni fikirlerin bu iki teoriyle çelişmediğine inanmanın sonucu olarak ortaya çıkacaktı. İzafiyet teorisi ve kuantum mekaniği, modern teorik fiziğin yol gösterici ikizleri ve yeni matematiğin kaynağı olacaktı.

27. Dirac (1931: 61)
28. Mehra (ed.), (1973: 271)

Dirac, anti-elektronun var olup olmadığını sorgularken farklı bir çizgide de araştırma yapmaya başladı; bu araştırma onu bir kez daha yeni matematiksel fiziğin Büyük Kanyonu olacak durumun içine sürükledi, ki teorisyenler bunu hâlâ araştırmaktadır. Araştırmasına yine basit bir soruyla başlamıştı: elektrik yükü neden özel miktarlarda geliyordu? Elektron küçük bir negatif elektrik yüke sahiptir, protonun yüküne eşit miktarda ve zıttır, ama bu boyutun fraksiyonları olan yüklere sahip parçacıklar neden yoktu? Tabiat neden elektrik yükün herhangi bir miktarda var olmasına imkân vermiyordu?

Dirac, bu soruya normal kuantum mekaniğinin biraz farklı bir varyasyonunu kullanarak yanıt buldu; böylece bir manyetik tek kutbun, izole edilmiş kuzey veya güney manyetik kutbunun matematiksel tanımını ortaya koyabiliyordu. Daha önce hiçbir araştırmacı bu parçacıklardan birini gözlemlememişti: her çocuğun bildiği gibi manyetik kutuplar her zaman kuzey-güney çiftler halinde ortaya çıkarmış gibi görünür. Yine başka düşünürler de daha önce böylesi bir parçacık tasavvur etmişlerdi, ama hiçbiri bunu tutarlı bir matematiksel çerçeveye oturtamamıştı.

Dirac bu soruya dolaylı bir yaklaşım getirdi. Bir elektronun bir noktadan bir döngü içinde orijinal pozisyonuna hareket etmesi halinde ne değişeceğini tasavvur etmek için matematikçi Hermann Weyl'in öncülüğünü yaptığı incelikli bir teknik kullandı. Bu matematiksel düşünce deneyinin bir sonucu olarak, bir manyetik tek kutba ait ilk kuantum tanımını, elektronu tanımlayan manyetik kuvvet çizgilerinin şeklini düşünerek bulmuş oldu. Dirac'ın daha sonraları belirteceği üzere, manyetik alan çizgilerinin matematiği onu "dosdoğru tek kutba (monopole)" götürmüştü.[29] Tek kutbu, daha sonraları "Dirac sicimi" olarak anılacak olan sonsuz uzunlukta ve ince bir bobinin ucu olarak tasavvur etmişti. Dirac'a göre sonsuz uzunluktaki sicim deneysel olarak gözlenemezdi, ama manyetik tek kutup prensipte saptanabilir durumdaydı.

Dirac, teoriyi; monopolün manyetik yükü ile elektronun elektriksel yükünün boyutu arasındaki ilişkiye dair basit ve hassas

29. Dirac (1982: 604)

bir saptama yapmak için kullandı: birlikte çarpıldıklarında n/(4π) niceliğine eşit olmalıdırlar ve burada n bir tam sayıdır (π de bildiğimiz π sayısı olarak herhangi bir dairenin çevresinin çapına oranıdır, yaklaşık değeri 3.14'tür). Araştırmacıların bu monopollerden birini tüm evrenin herhangi bir yerinde bulmaları halinde teorinin, elektrik yükün niçin yalnızca bir temel miktarın pozitif ve negatif çarpımları halinde var olduğunu açıklayacağını bile göstermiştir.

Dirac kendi yaklaşımını ortaya koyarken, teorinin faydasına dair kendisinden beklenmedik ölçüde öznel bir yorum da yaptı: "Tabiatın bu teoriden faydalanmaması sürpriz olurdu."[30] Ama tabiat nezaketsizdi: monopollerin var olduğuna dair herhangi bir kanıt görünmüyordu, gerçi Dirac'ın formülü özelinde onun istediği tonda dans edebiliyorlardı. Teorinin gerçek dünyayla ilgisi olmasa da Dirac'ın kullandığı matematik, matematikçilerin ilgisini çekmişti, bu matematikçilerin bazıları onunla aynı alanda çalışıyordu. Dirac topoloji alanında ufuk açıcı bir çalışma yaptığının farkındaymış gibi görünmüyordu; daha önce gördüğümüz gibi esnetildiğinde, büküldüğünde veya deforme edildiklerinde değişmeyen soyut obje ve yüzeyleri konu alan topoloji, James Clark Maxwell'in de ilgisini çekmiş bir alandı. Dirac monopol teorisini oluşturmak için kullandığı tekniklerin bazılarının, matematikçi Heinz Hopf'un hemen hemen aynı zamanda Berlin'de keşfetmiş olduğu tekniklerle büyük oranda aynı olduğunu daha sonraları öğrendi.[31] Ama bu konu deney odaklı fizikçiler için çok ilgi çekici değildi: manyetik monopollerin Dirac'ın hayal gücünün ürünleri olmaktan öteye gidebilmesi adına henüz herhangi bir işaret yoktu. Dirac'ın monopol teorisinin uzak görüşlülüğü ancak daha sonraları anlaşılabildi.*

30. Dalitz (ed.), (1995: 516); Dirac (1931: 71)

31. 't Hooft (ed.), (2005: 272)

*Manyetik monopol(veyamanyetik tek kutupluveyamanyetik tekkutup), parçacık fiziğinde yalıtılmış tek bir manyetik kutbu olan (sadece manyetik kuzey veya manyetik güney kutuplarına sahip) kuramsal bir temel parçacıktır.[1]Daha teknik terimlerle açıklanacak olursa, bir manyetik monopol net manyetik yükü olan bir parçacıktır. Bu teori, köklerini manyetik monopollerin varlığını öngören parçacık teorileri, özellikle büyük birleşim (Grand Unifying) ve süper sicim teorilerinden alır. Çubuk şeklindeki mıknatısların manyetik alanı ve elektromanyetikler manyetik monopollerden kaynaklanmazlar (y.h.n.).

Dirac, üretken döneminin son senesi olan 1933 yılında da önemi yine çok sonraları bütünüyle anlaşılabilen kısa bir makale yazdı. Batı dünyasında nispeten az sayıda fizikçinin okuduğu bir Sovyet dergisinde yayımlanan makale, Dirac'ın en sevdiği konulardan birini ele alıyordu –maddeyi büyük ölçekte açıklamak için uzun zamandır kullanılan metotların, atomik dünyayı açıklamak için nasıl adapte edilebileceği konusu–. Dirac, on dokuzuncu yüzyıl matematikçisi Joseph Louis Lagrange'ın öncüsü olduğu bir metodun benzerini kullanarak atomik parçacıkların hareketini açıklamak adına yeni bir yöntem önerdi; asıl amaç bu yolla sıradan maddenin hareketini açıklayabilmekti. Dirac, temel teorinin büyük bölümünü oluşturdu ancak eksik halde bıraktı. Dokuz yıl sonra, Princeton'da lisans öğrencisi olan Richard Feynman bu ipin ucunu aldı ve kuantum mekaniği alanında yeni bir hesap yapma yoluna imkân veren iyi işlenmiş bir cevhere çevirdi.[32] Bu yöntem, teorisyenlere atomik dünya hakkında paha biçilmez bir rehber sunan matematiksel bir objeyi temel alıyordu.

*

Dirac'ın felsefeye ayıracak zamanı olmamıştı. Bristol'de genç bir öğrenciyken, felsefenin büyük oranda "daha ziyade belirsiz" konuşmalardan ibaret olduğunu ve "fiziğin gelişimine herhangi bir katkı" sunamayacağını düşünüyordu.[33] 1938 yılının sonlarında, Edinburgh Kraliyet Topluluğunun düzenlediği ve geleneksel olarak fiziğin felsefi yönlerine eğilen Scott seminerinde konuşmayı kabul ettiğinde, fiziğin felsefesi hakkında düşüncelerini ilk kez halka açık olarak dile getirmiş oldu.[34] Bu seminer Dirac'a bir değerlendirme yapma imkânı verdi, araştırmacı olarak en iyi yılları geride kalmış görünüyordu ve içinde bulunduğu koşullar değişmişti: meslektaşlarını şaşırtacak şekilde âşık olmuş, evlenmiş ve yerleşik aile hayatına geçmişti. Aynı esnada Avru-

32. Richard Feynman – Oturum 2, Oral History Interviews, American Institute of Physics (AIP), Charles Weiner, 5 Mart 1966: https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-2
33. Dirac (1977: 111); ayrıca bkz. Dirac AIP söyleşisi, Oturum 2, 6 Mayıs 1963: https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oralhistories/4575-2.
34. Dirac, seminer vermesi için 1939 Scott Ödülü sahibi olarak çağrılmıştı. Dirac (1938-1939)

pa'daki siyasi atmosfer de o ay itibarıyla kararmaktaydı ve savaş kaçınılmaz görünüyordu.

O sıralarda yapılmış iki deney, teorik fiziğin nasıl işlemesi –ve işlememesi– gerektiğine dair Dirac'ın görüşlerini değiştirmişti. İlk olarak, Amerikalı bir grubun, atomik dünyada enerjinin korunmuyor olabileceğine dair iddialarda bulunup sonrasında da bu iddiaları geri çektiğini görünce, önde gelen deney araştırmacılarının çalışmalarına olan saygısı azalmıştı. İkincisi, yirminci yüzyıl biliminin zirvesi olması gerektiğine inandığı olayın korkunç bir hayal kırıklığıyla sonuçlanmasına şahit olmuştu: James Clark Maxwell'in elektromanyetizma alan teorisinin, hem kuantum mekaniğiyle hem de özel izafiyet teorisiyle tutarlı olacak şekilde geliştirilmiş bir versiyonu. Dirac ve diğer birkaç önde gelen teorisyen, elektrik yüklü atom altı parçacıklar arasındaki elektromanyetik etkileşimlere dair bir teori ortaya koymuştu. Teori oldukça dağınık durumdaydı. Daha da kötüsü, "kuantum elektrodinamiği" gibi korkunç bir adla anılır hale gelen teori, elektronlar etkileşime girdiğinde olaya dahil olan enerjilerin normal nümerik değerleri olmadığını, sonsuz olduğunu söylüyordu ve bu da elbette kesinlikle anlamsızdı.[35] Bu tatsızlıkları halının altına süpürmenin çeşitli yolları vardı, ama Dirac'ın bakış açısına göre bunların hepsi ümitsizdi; teorinin "çıkar yolunun olmadığına" inanıyordu.[36]

Scott Seminerini vermesine birkaç hafta kala Dirac, kendisinin ve diğer teorisyenlerin önceki 20-30 senelik dönemdeki tecrübelerinden öğrenebildikleri dersler üzerinde düşünmeye başladı. Kuantum elektrodinamiğinin çirkinliği karşısındaki rahatsızlığı, görünürde devrim niteliğindeki yeni deneysel bulgularla birlikte, Dirac'ı doğanın muhtemel en uygun matematiksel tanımını aramak yönünde yeni bir yöntem önermeye sevk etti. Onun düşüncesine göre, teorik fizikçiler her yeni şaşırtıcı deneysel bulguyla dikkatlerini dağıtmamalıydı, ama bunun yerine en iyi teorilerinin matematiği üzerinden ilerleyecek şekilde uzun vadeli amaca odaklanmalıydılar. 1931 yılında, manyetik monopol makalesinin başında bu felsefenin ilk versiyonunu ortaya koymuştu.

35. "Korkunç" sıfatını kullanmak açısından Feynman'ı takip ediyorum: Feynman (1985: 6)
36. Dirac (1936a: 299)

Girişteki saptamalarında teorik fizikçilerin, yeni deneysel verileri anlamaya daha az konsantre olmaları gerektiğini söylüyordu; bunun yerine, "teorik fiziğin mevcut temelini oluşturan matematiksel formalizmi genelleştirme girişimlerinde saf matematiğin tüm kaynaklarını" kullanmayı seçmeliydiler.[37] Ortaya attığı fikirlerin, iki yıl sonrasında Einstein'ın verdiği Spencer Seminerini etkilemiş olması muhtemeldi; benzer şekilde, fizik alanında matematiğin rolüne ilişkin olarak Einstein'ın spekülasyonları da Dirac'ı etkilemiş olabilirdi.[38] Benzer düşünce tarzlarına sahiptiler, çoğu meslektaşlarının kolayca göz ardı edemeyeceği kadar geleneksellik karşıtı çizgilerde dolaşıyorlardı.

Dirac, 6 Şubat 1939 günü, kasvetli bir akşamüstü, İskoçya Kraliyet Topluluğu merkez binasında yaptığı konuşmaya "Matematik ve Fizik Arasındaki İlişki" adını verdi. Dinleyici kitlesi, Edinburgh yakınlarındaki salona doğru ilerlerken muhtemelen çok büyük beklentiler içinde değildi: konuşmacı ilmiyle ünlüydü, hitabet yeteneğiyle değil.[39] Kitap raflarıyla çevrelenmiş yüksek tavanlı bir oda olan seminer salonu mütevazı ama konforlu bir ortamdı; kürsü etrafına yaklaşık 150 ahşap sandalye dizilmişti. Toplantı, saat 16.30'dan kısa bir süre sonra, topluluk başkanı İskoç doğa bilimci ve klasikçi D'Arcy Wenthworth Thompson tarafından açıldı; başkanın saygın duruşu ve ak sakalı ona Eski Ahit'ten fırlamış bir vaiz havası veriyordu. Bilimin nasıl yapılması gerektiğine dair Thompson'ın sağlam fikirleri vardı ve doğal felsefenin "yüreğinin ve ruhunun" matematiksel güzellikte yattığına inanıyordu.[40]

Ne D'Arcy Thompson ne de dinleyici kitlesi içindeki bir başkası orada kendilerini neyin beklediğini biliyordu: efsaneye dönüşecek bir seminer olacağından haberleri yoktu. Yirmi birinci yüzyılın başlarında önde gelen birçok fizikçi ve matematikçi, Dirac'ın seminerini olağanüstü sağduyulu ve derinlikli olarak görecekti; dilinin sadeliği dikkate değerdi, matematiksel jargondan neredeyse bütünüyle arınmıştı. 2016 yılında, büyük matematikçi Michael Atiyah şu yorumu yaptı: "Matematikle

37. Dirac (1931: 60)
38. Einstein, Dirac'ın spinorları kullanımıyla bilhassa ilgileniyordu. Bkz. Dongen (2010: 96-109)
39. Farmelo (2009: 300-301); Vicki Hammond'dan ek bilgi için, RSE
40. Thompson (1917: 778-779)

fizik arasındaki ilişkiye daha sonraları ne olacağına dair bundan daha iyi bir tanım muhtemelen olamazdı."[41]

Seminere bizzat şahit olmuş dinleyicilerden herhangi birinin anlatımı elimizde olmasa da, Dirac'ın, kitlesine alışıldık dolaysız anlatımı ve netliğiyle tiyatrallığa başvurmadan hitap etmiş olması muhtemeldi. Kitle içinde konunun uzmanı olmayan kişiler bulunduğunu bildiği için konuşmasına birkaç temel gözlemle başladı. Doğanın, sıradan bir gözlemci için belirgin olmayan matematiksel bir niteliğe sahip olduğunu söyledi; ona göre bu matematiksel nitelik, gerçekleştirilmemiş deneylerin bile sonuçlarını fizikçilerin tahmin edebilmesini sağlıyordu. Doğanın bu matematiksel niteliğinin şu sözlerle tanımlanabileceğini düşünüyordu: "Evrenin oluşturuluş biçimi, tanımlanması için matematiğin kullanılmasına imkân verir."[42]

Dirac, konuşmasının devamında fazla beklemeden teorik fizik alanında bir araştırma manifestosu olabilecek etkiye sahip kısma geldi. Yeni bir ilke önerdi: matematiksel güzellik ilkesi. Buna göre, araştırmacılar daima, doğal dünyaya dair teorilerinin zeminini oluşturan matematiksel yapıların güzelliğini maksimize etmek yönünde çalışmalıydılar. Bu sözler karşısında D'Arcy Thompson muhtemelen hiçbir şaşkınlık belirtisi göstermemiş olsa da, odadaki diğer dinleyiciler şaşırmış olmalıydılar; çünkü Dirac, fizik araştırmalarının, oldukça öznel olabilecek bir niteliğin izinde gitmesi gerektiğini söylüyordu. Dirac, matematiksel güzelliğin –tıpkı sanattaki güzellik gibi– tanımlanamayacağını belirterek bu itirazın önüne geçmeye çalıştı; "matematik alanında çalışan insanların bunu idrak etmekte genellikle güçlük yaşamayacağını" öne sürüyordu. Sonrasında da sözlerine matematiksel güzelliğe odaklanışını sürdürerek devam etti, bu ifadeyi en az on yedi kez kullandı.

Dirac bu stratejiyi, kuantum mekaniği ve izafiyet kuramlarının keşfinden çıkarılan dersler üzerine kurmuştu, şöyle söyledi: "iki durumda da, daha öncesinde başarılı olmuş ama defoları olan bir teori, temelindeki matematiği açıkça daha güzel olan başka bir teori tarafından yerinden ediliyordu." Kuantum mekaniği için şunu belirtti: "Eski mekaniğin tüm şık özellikleri [Newton'ın

41. Atiyah'la söyleşi, 15 Nisan 2016
42. Dirac (1938-1939: 122)

çalışmasından gelenler], daha da güzel görünecekleri yeni mekaniğe taşınabilir." Aynı şeyin, Newton'ın teorilerinden Einstein'ın özel ve genel izafiyet teorilerine geçiş için de geçerli olduğunun altını çizdi. O esnada dinleyicilerden hiçbiri onunla tartışmaya girmemiş olsa da, bazıları muhtemelen Dirac'ın bu kadar az sayıda vakadan –önemli örnekler olsalar da– yola çıkarak, matematiğin temel fizikteki kullanımına dair gelecekteki tüm uygulamalar adına çıkarımda bulunmasını şüpheyle karşılamış olmalıydılar. Ama Dirac şüphecilere fırsat vermedi: "Araştırmacı, Tabiatın temel yasalarını matematiksel biçim dahilinde ifade etmeye çalışırken matematiksel güzellik peşinde koşmalıydı."[43]

Bu fikir kesinlikle yeni değildi –Platon da bu paralelde fikirler geliştirmişti, tıpkı ondan sonraki birçok düşünür gibi–[44]; bu düşünürler arasında Dante de vardı, Dante'nin *İlahi Komedya*'sı, evrenin yapısı ve işleyişinin altında yattığına inanılan matematiksel ilkelere ortaçağda çok kafa yorulduğuna dair birçok işaretle doludur.[45] Yirminci yüzyıl itibarıyla, doğanın evrensel yasalarının yalnızca yüksek matematik yardımıyla yazılabileceği açıkça anlaşılmıştı. Dirac'a göre, evrenin kalbindeki düzeni anlamak için gitgide daha ileri bir matematiğe ihtiyaç duyulduğu şeklindeki nispeten daha yeni anlayış, fizik alanında yeni teoriler üretmek adına bir yöntem öne sürmüş oluyordu.

Doğal dünya hakkında düşünmek adına oluşturduğu yeni strateji, altı yıl öncesinde Einstein'ın Oxford'da ortaya koyduğu yönteme benziyordu: iki adam da herhangi bir temel fizik yasasının kapsamını genişletmenin en iyi yolunun matematiksel çerçevesini geliştirmeye odaklanmak olduğunu düşünüyordu; yani altında yatan fikirlerin modelini genişletmeye odaklanmak gerekiyordu. Einstein'a göre en iyisi, bu modeli fizikçiler için en doğal yolla genişletmekti; Dirac'a göre ise model, matematikçilerin bilhassa güzel olduğunu düşündüğü şekilde genişletilmeliydi.

Dirac'ın sözlerinden çıkan anlama göre matematiksel güzellik ilkesinin neticesi, teorik fizikçilerin oldukça fazla ileri matematik öğrenmesi gerekeceği şeklindeydi. Eğri uzay geometrisi ve değişme özelliği olmayan nicelikler (daha önce yazmış olduğu

43. Dirac (1938-1939: 124)
44. Wilczek (2015: 4, 60-67)
45. Shaw (2014: xvi, 175, 180)

gibi, "bir zamanlar bütünüyle insan zihninin kurmacaları" olarak kabul ediliyorlardı) artık sırasıyla yerçekimini ve kuantum dünyasını tanımlayan teoriler için olmazsa olmaz kabul ediliyordu. Sözlerini şöyle tamamladı: "Saf matematiğin büyük alanları temel fizikteki gelişmelerle uzlaşır hale getirilmek zorunda olacaktır."[46]

Fizik ve matematik gitgide daha ilişkili hale gelmektedir, diyordu Dirac. Ama iki alanın oldukça farklı olduğunu vurguladı ve bir karşılaştırma yaparak ne demek istediğini göstermeye çalıştı: "Matematikçi, kurallarını kendisinin belirlediği bir oyun oynarken; fizikçi, kurallarını Tabiat'ın koyduğu bir oyun oynar." Şunu da ekliyordu: "Zaman ilerledikçe matematikçilerin ilginç bulduğu kuralların, Tabiatın seçtikleriyle aynı kurallar olduğu gitgide daha net şekilde anlaşılıyor." Bu durum, bu iki alanın ilişkisinin en şaşırtıcı yönlerinden birinin kalbine gidiyordu: doğanın en temel yasalarının altında niçin araştırmacı matematikçiler için bilhassa büyüleyici olan –farklı sebeplerle büyüleyici olan– bir matematik yatıyordu? Dirac, iki alanın nihayetinde birleştirilebileceğini öne sürdü, "saf matematiğin her bir dalının fiziksel uygulamaları olacaktı, bunların da fizik alanındaki önemi matematikle ilişkisine orantılı olarak değişecekti".[47]

Dirac, tüm bunların boş laftan fazlası olduğunu düşünüyordu. Güzel matematik alanlarını seçerek meslektaşlarını matematiksel güzellik ilkesinden faydalanmaya teşvik etti, sonrasında da bunları gerçek dünyaya uygulamaya çalışabilirlerdi. Taşın altına elini koyup "olağanüstü güzelliğiyle" fizikçiler için faydalı olabilecek bir matematik dalını kendisi tanımladı: matematikçilerin kanıtlamış olduğu üzere, normal tam sayılarla bağlantısı olan karmaşık sayıların fonksiyonları. Konuşmasının son dakikalarında bu bağlantının bir gün en küçük ve en büyük objeler (atomik objelerden kozmolojik olanlara kadar) üzerindeki araştırmalar arasında bir bağlantı oluşturabileceğini iddia etti; böylece "geleceğin fizik biliminin temelini oluşturacaktı". Altını çizdiği üzere bu durum, dönemin fizikçilerinin, filozofların antik döneme dayanan hayallerini gerçekleştirmelerine yardımcı olabilecekti: "tüm Tabiatı tam sayıların özellikleriyle

46. Dirac (1938-1939: 124)
47. Dirac (1938-1939: 124)

ilişkilendirmek"; iki bin beş yüz yıl önce Pisagor'dan alkış alabilecek bir vizyondu bu.[48]

*

Teorik fizik araştırmaları açısından matematiğin önemine dair Dirac ve Einstein'ın görüşleri benzer olsa da izledikleri matematiksel programın meziyetlerine diğer meslektaşlarını ikna etmek adına hiçbir zaman birlikte çalışmadılar. Bu durum şaşırtıcıdır, çünkü bu iki adam sıklıkla bir araya geliyordu ve bir tür ittifak kurmak adına bol miktarda fırsatları vardı. 1934 yılı sonbaharından itibaren Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde sık sık aynı alanda çalıştılar; Dirac bazı yıllık izinlerini de üniversitenin misafirhanesinde geçiriyordu.[49] Denilenlere göre bu iki zeki adam genellikle samimi konuşuyorlardı, ama işbirliği yapmalarına dair herhangi bir düşünce hiç oluşmamıştı.

Einstein, on beş yıl sonrasında bir arkadaşına yazdığı mektupta Dirac'la ilgili hislerini anlattı. Einstein, Dirac'ı sevdiğini ve hem bilimsel hayal gücüne hem de öz eleştiri yapabilme özelliğine hayran olduğunu yazmıştı; ama aralarında bir iletişim problemi vardı. "Mantıksal sadelik üzerindeki mutlak ısrarımı ve ilkesel meselelerde teori kanıtlarına –hatta en etkileyici olanlarına bile– şüpheyle yaklaşmamı anlayamıyor. Yaklaşımımı hayalperest ve ters buluyor."[50] Einstein, kariyerinin bu safhasında deneysel gözlemleri kendi inançlarıyla çeliştiklerinde bile pek kafasına takmadı; diğer yandan Dirac, teorisyenlerin böylesi konularda fazla dik kafalı olmamaları gerektiğini düşünüyordu: çok sayıda farklı deney bir teoriyi çürütüyorduysa, teori toprağa gömülmeliydi ya da en azından rafa kaldırılmalıydı.[51]

Dirac da yirminci yüzyılın en başarılı teorisyeni olarak gördüğü Einstein'a hayranlık duyuyordu ve Einstein'ın yerçekimi teorisini teorik fizik alanında saf-düşünce yaklaşımının "zirvesi" olarak görüyordu.[52] Ama Dirac, Einstein'ın birleşik bir

48. Dirac (1938-1939: 129)
49. Farmelo (2009: 252)
50. Einstein'dan Infeld'e, 20 Eylül 1949, EARCHIVE
51. Dirac, P. A. M., 'Basic Beliefs in Theoretical Physics', Miami, 22 Ocak 1973, DARCHIVE S2, B49, F28
52. Dirac, 'Basic Beliefs in Theoretical Physics' *op. cit.*

alan teorisi peşinde inatla ve verimsiz şekilde koşmasını dost sohbetlerinde eleştiriyordu. Bu girişim "daha ziyade acınası" diye yazmıştı Dirac; Einstein'ın "matematiksel temelinin [birleşik alan teorisi için] yeterince geniş olmadığı", bu yüzden başarısız olduğu yorumunu yapıyordu.[53]

Einstein gibi Dirac da teorik fizik yapma konusunda hızlı yol alamıyordu. Scott seminerinden sonraki yedi aylık süreçte İkinci Dünya Savaşı yaklaşmıştı ve teorik fizikçilerle matematikçilerin çoğu –Dirac dahil– odak noktalarını temel araştırmalardan askeri projelere doğru çevirmişlerdi. Savaşın ardından temel araştırmalar kısa sürede yeniden başladı ve bilime damgasını vurmaya kararlı yeni bir teorik fizikçi nesli ortaya çıktı. Bu Jön Türklerin birçoğu Dirac'ı rol model olarak görüyordu, kuantum mekaniğini ilk kez 1930 yılında yayımlanmış olan Dirac'ın *The Principles of Quantum Mechanics* adlı çalışmasından öğrenmişlerdi. Yeni filizlenmekte olan bu teorisyenler, Dirac'ın tasavvur ettiği gibi saf matematikçilerle ortak bir amaç yolunda ilerleyecek miydi? Tam tersini yapacakları ortaya çıktı.

53. Dirac, 'Basic Beliefs in Theoretical Physics' üzerine notlar, *op. cit.*

5
uzun ayrılık

"Yirminci yüzyıl matematiğinin en büyük kazanımı nihayet kendini fiziğin kelepçelerinden kurtarmış olmasıdır."

Marshall Stone, matematikçi
(bu sözü onun söylediği düşünülmektedir)

"1950'lerde ... matematikçilerin yardımına ihtiyacımız yoktu. Çok zeki olduğumuzu ve kendi başımıza daha iyisini yapacağımızı düşünüyorduk."

Freeman Dyson,
teorik fizikçi

Geçen yüzyılda hem matematik hem de fizik alanlarında uzmanlaşmış az sayıda akademisyenden biri olan Freeman Dyson şu anda doksan iki yaşında karşımda oturuyor ve hâlâ çivi gibi dimdik. Hiç kimse onu ikili oynamakla suçlayamazdı; birçok konuda güçlü fikirleri vardı, özellikle de uzmanı olduğu iki konu arasındaki ilişki konusunda: "Teorik fizik ve saf matematik birlikte yol aldıklarında en iyi noktaya ulaşabiliyordu, birbirlerini yeni fikirlerle zenginleştirebiliyorlardı."[1]

Dyson, ilk olarak Newton'ın ileri matematiği hareket konusunda uygulamasından sonra bu iki alanın birlikte meyve verdiğinin altını çizer. Leonhard Euler ve onlarca yıl sonrasında

1. Dyson'la söyleşi, 25 Ağustos 2018

Carl Friedrich Gauss, hem matematik hem de fizik alanlarının ön saflarında yer alan ve iki alanda da katkı sağlayan Newton sonrası düşünürlere örnek gösterilebilir. Bu ilerlemeler yirminci yüzyılın başları boyunca da devam etti, o dönemde Fransız Henri Poincare iki alanda da birinci sınıf çalışmalar yaptı. Ancak Dyson –o zamanlar henüz acemi bir araştırmacıydı–, İkinci Dünya Savaşı'nı takip eden aylarda teorik fizikle saf matematiğin birbirinden uzaklaştığını fark etti, bu durumu "uzun bir ayrılık" olarak tanımlıyordu.[2]

Dyson'ın hatırladığı kadarıyla o dönemde bu iki alan birbirine ihtiyaç duymuyordu, yalnız başına başarıya ulaşacaklarına inanıyorlardı. Teorisyenler yalnızca öğrenciyken öğrendikleri matematiği kullanarak elle tutulur ilerleme kaydettiler, diğer yandan çoğu saf matematikçi de fizikçilerden herhangi bir katkı gerektirmeyen bir programa odaklandılar. "Tüm bunlar aslında benim için şanslı gelişmelerdi" diyordu bana Dyson gülümseyerek: "Matematik konusunda yetenekliydim ve bu yeteneğimi fiziğe uygulamakta da sıkıntı çekmiyordum." Dyson, "bu ayrılıktan faydalandığını" kabul etse de, şu anda bu durumu iki disiplin için karanlık bir dönem olarak görüyor ve iki tarafın birbirlerine ihtiyaç duyduklarını anlayıp yeniden konuşmaya başlamalarının neredeyse otuz yıl almış olmasını üzüntüyle anıyor.

Saf matematikle teorik fizik arasındaki ayrılık, Paul Dirac'ın 1939 yılındaki Scott seminerinde iki alanın bir gün birleşebileceği ihtimalinden bahsetmesinden yalnızca birkaç yıl sonra başlamıştı.[3] Einstein da teorik fizikçilere, en iyi teorilerinin matematiğini geliştirmeye odaklanmaları yönünde telkinde bulunmuştu; fizikçilerin bir gün işlerine yarayabilecek yeni matematik konularını takip etmeleri gerektiğini söylemek istiyordu. 1950 yılı itibarıyla Einstein, Princeton'da yalnız kalmış bir figür konumundaydı: "O bizden uzak duruyordu, biz de ondan uzak duruyorduk" demişti bana Dyson; hakkında konuşacakları pek bir şeyleri olmadığı için onunla bir araya gelmemiş olmasından hiç pişmanlık duymuyordu.[4] Bununla beraber Dyson, sık sık Dirac'la konuşuyordu, ama onun matematiksel güzelliğe odaklanma

2. Dyson'la söyleşi, 16 Ağustos 2013
3. Dirac (1938-1939: 909)
4. Dyson'la söyleşi, 22 Ağustos 2017

tavsiyesini pek dikkate almamıştı: Dyson klasik yöntemlerle, yani tabiatın ta kendisinin bize ne söylediğini deney sonuçları aracılığıyla anlamaya çalışarak fizik yapmayı tercih ediyordu.

Bu bölümde bu uzun ayrılığa büyük oranda fizikçilerin bakış açısından ve yıllar sonra geriye dönüp bakabilmenin avantajıyla yaklaşacağım. Fizik o dönemde yine dağınıklık içindeydi: tabiata dair teorik fizikçilerin özlemini duyduğu bir birleşik teori, 1920'lerin ortalarında Einstein'ın o yöndeki arayışlarını başlattığı dönemdeki kadar uzak görünüyordu. Yine de, İkinci Dünya Savaşı'nın hemen sonrasındaki bu dönem boyunca ufuk açıcı birçok yeni fikir ve teknik ortaya çıktı. Biz de yirmi otuz yıl sonrasına gidip, tabiata dair birleşik bir anlayışın yeniden söz konusu olduğu dönemde hayati önem taşıdıkları netleşecek olan fikirlere konsantre olacağız.

Ayrılık boyunca fizikçiler iyi bildikleri köklü matematiği kullandılar ve matematik araştırmacıları için ilgi çekici olabilecek pek az fikir ürettiler. Aynı esnada, önde gelen matematikçilerin büyük bölümünün fiziğe karşı hiçbir ilgisi yoktu, çünkü kendi alanlarının temellerini yeniden düşünmek ve netleştirmek gibi püriten bir misyon peşindeydiler. Bu hareketin, matematik alanında 1890'lardan 1930'lara kadar süren modernist bir dönüşüme atfedilebilecek derin kökleri vardı. Tarihçi Jeremy Gray'in işaret ettiği gibi, hemen hemen aynı dönemde sanat alanında görülen birçok harekete benzer bir oluşumdu bu.[5] Modernist bir disiplin, geleneksel yaklaşımları reddeden ve otonom bir fikirler dizisine doğru yol alan bir topluluğun eseri olarak tanımlanabilir; bu fikirlerin de çoğu biçimseldir ve günlük hayatla uzaktan ilişkilidir. Birçok etkin modernist, edebiyatta (T. S. Elliot ve Virginia Woolf gibi) ve görsel sanatlarda (kübist Pablo Picasso ve Georges Braque dahil) faaliyet gösterirken, matematiğin birçok branşında da modernistler vardı.

Modernist matematiğin ilk vaizi David Hilbert'ti. Hilbert, gücü ve cazibeyi birleştiren göz doldurucu tarzıyla matematiğin tamamının müphem mantık kalıntılarından arındırılması gerektiğini öne sürmüştü. Sezgi ve çıkarımların matematikte yerinin olmadığına inanıyordu. Ona göre matematik, alakasız fikir ve çıkarımların keşmekeşinden sakınmalıydı: yekpare,

5. Gray (2008: 1-14)

tutarlı ve mantıklı bir yapı oluşturmak peşinde koşmalıydı. Tüm matematikçilerin onunla hemfikir olduğu söylenemese de meslektaşları arasında kendi neslinden olanlar için izlenecek programı ortaya koymuş oluyordu. Ancak 1931 yılı itibarıyla matematiğin tamamını aksiyomlar kullanarak ortaya koyma programı sekteye uğramış oluyordu. Bu yaklaşımın ezeli düşmanı Avusturyalı mantıkçı Kurt Gödel'di; her bir matematiksel aksiyom sisteminin ne kanıtlanabilen ne de kanıtlanamayan saptamalar içerdiğini gösteren çığır açıcı bir kanıt yayımlamıştı.[6]

Ancak buna rağmen matematiksel saflıkçılık bütünüyle ölmüş değildi. 10 Aralık 1934'te yetenekli ve hırslı genç matematikçilerden oluşan bir grubun Paris'te Latin bölgesinde yer alan Pantheon yakınlarındaki mütevazı bir kafede bir öğle yemeği için toplanmasıyla yeniden doğuş dönemleri başladı.[7] Ecole Normale'den eski sınıf arkadaşları olan bu grup, kalkülüsü başından itibaren tüm süsünden arındırılmış şekilde sunan bir kitap yazmayı amaçlıyordu; kitap, kusursuz ölçüde mantıklı olmalıydı ama diğer yandan her matematikçinin, hatta fizikçilerin ve mühendislerin bile anlayabileceği dilde yazılmalıydı. Grup, yazılarında insan öznelliğine dair tüm izleri ortadan kaldırmak adına bir takma isimle hareket etti. Askeri yetenekleri çok da takdir görmeyen Fransız general Charles Bourbaki'den esinlenerek Nicolas Bourbaki adını seçtiler. Charles Bourbaki, Fransa-Prusya savaşındaki küçük düşürücü yenilginin ardından tabancayla intihar etmeyi denemiş ama ıskalamıştı, mermi başını sıyırmıştı. Bourbaki, Fransa askeri tarihinde yalnızca kısa bir not konumunda olsa da, Nicolas Bourbaki hiç yaşamamış matematikçilerin en etkilisi oldu.

Bourbaki matematikçileri gizli bir topluluk halini aldı. Düzenli olarak toplanıyorlar, kendi geleneklerini, uygulamalarını ve kurallarını oluşturuyorlardı, elli yaşına ulaşıldığında zorunlu emeklilik de bu kurallar arasındaydı. Grubun tutkusu, aşama aşama rafine hale getirerek matematiğin tamamını yeniden yazma amacına dönüştü; alanın aksiyomlarını benzeri görülmemiş bir netlikle ortaya koymak, matematiğin bütününü ve parçalarının her birinin mantık yapısını açıkça ifade etmek

6. Dyson (2015: 74)
7. Mashaal (2000: 6)

niyetindelerdi. Kusursuz bir titizlikten aşağısına hoşgörüyle yaklaşılmayacaktı.[8] Matematiğin gerçek dünyaya uygulanmasına yakın ilgi gösteren David Hilbert'ın aksine Bourbaki bununla ilgilenmiyordu.

"Fransız Bourbaki", 1940 yılında ilk yayınının giriş kısmını, *Elements of Mathematics*'i çıkararak dış dünyaya da kendini tanıttı. Yayının bu başlığı, iki bin yıldan fazla süre öncesinde Öklid'in geometri alanındaki tezi için seçmiş olduğu başlığa bilinçli bir göndermeydi.[9] Önde gelen matematikçilerin birçoğu askeri projelerle meşgul olsa da, Bourbaki'nin etkileyici titizliğine, hassasiyetine ve teknik meziyetine dair haberler hızla yayıldı. Savaşın ardından şöhreti uluslararası hale geldi ve birçok gönüllüyü yanına çekti, bunların arasında yüzyılın en büyük matematikçilerinden olan İsviçreli Armand Borel ve Almanya doğumlu Alexander Grothendieck de vardı. Programlarını konuşmak üzere yılda üç kez buluşuyorlar ve yapısı anarşiye kaçan toplantılarında bir sonraki yayınlarının detaylarını oluşturuyorlardı; toplantının başkanı yoktu ve her bir katılımcının araya girip söz söyleme hakkı vardı. Bir katılımcının yorumladığı şekliyle, bu toplantılardan herhangi birine ilk kez katılan biri, "bu toplantının bir çılgınlar toplantısı olduğu izlenimini edinirdi".[10] Yirminci yüzyılın sonuna kadar Bourbaki'nin kadın üyesi olmadı.[11]

Bourbaki Fransa'da yerleşik olsa da savaşın ardından etkisi ABD'ye de sıçradı, saf matematik alanında araştırmaların merkezi olmak anlamında gitgide ilerliyordu.[12] Bir şeyler yapmaya her zaman hevesli olan grup, 1940'ların sonlarında Amerikan Matematik Topluluğu üyeliği için iki kez başvuruda bulundu; iki başvuru da teknik sebeplerle reddedildi, ilk ret sessizce oldu, ikincisi ise matematik camiası içinde uluslararası tartışmalara yol açtı.[13]

---

8. Mashaal (2000: 71)
9. Mashaal (2000: 11)
10. Alıntı, Jean Dieudonné, 'Bourbaki: The Pre-war Years': http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Bourbaki_1.html
11. Beaulieu (1999: 220)
12. Gray (2008: 185); Barany (2018)
13. Pitcher (1988: 159-162). Bourbaki, 1948 yılında Chicago Üniversitesi'nin bir adayı olarak ve 1949'da da Fransız Matematik Topluluğuyla yapılan karşılıklılık esasına dayalı anlaşma çerçevesinde AMS üyeliği için başvurdu.

Bu dönemde en güçlü Amerikalı matematikçilerden biri, geometrici Oswald Weblen'di. Princeton Üniversitesi'nde görevli bir matematikçiydi, İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün kurulmasındaki başlıca itici güç olmuştu.[14] Enstitünün otoriteleri Ekim 1932'de onu fakülte üyesi olarak atamıştı. Avrupa'daki siyasi aşırılıktan –özellikle de anti-semitizmden– kaçarak ABD'de sığınma arayan çok sayıdaki ünlü akademisyenin en ünlüsü olarak Albert Einstein da bir yıl içinde fakültede onun yanına katıldı. Bu akademisyenler arasında Alman Hermann Weyl ve enstitüye 1933 yılında katılmış olan Macar John von Neumann da vardı. Bu genç organizasyon, o dönem itibarıyla dünyadaki en şöhretli matematik fakültesine sahipti ve Einstein'ın varlığı da bu oluşumu birçok önde gelen teorik fizikçi için bir mıknatıs haline getirmişti.

Enstitü, 1939 yılında yeni tesislerine taşındı; bu tesis, Princeton merkezinden arabayla birkaç dakika mesafede, ağaçlardan ve çimlerden oluşan 100 hektarlık tablo gibi bir kırsal arazi üzerindeydi. Enstitünün ana binası Fuld Hall, tuhaf bir İngiliz kilisesi gibiydi ve sonrasında dünyanın önde gelen akademisyenlerinin birçoğu için zamanla aşina oldukları bir yer haline geldi. Einstein'ın yeni akademik yuvası, matematikçilerle fizikçiler arasındaki ortaklığı kolaylaştırmak açısından uygun konumlandırılmıştı, ama o ilk yıllarda böylesi ortaklıklar ender görülüyordu. Weyl ve von Neumann, fiziğe daha önceleri değerli katkılar yapmış kişilerdi, ama fizik alanında tekrar araştırma başlatmakla pek ilgilenmiyorlardı. Kendi uzmanlık alanları dışında maceraya atılmaya hazır olan uzmanlar arasında Princeton'a 1940 yılında gelmiş ve Einstein'ın sıkı bir arkadaşı olmuş Kurt Gödel de vardı. Genel izafiyet teorisiyle ilgilenmeye başlayan Gödel, analitik yeteneklerini Einstein'ın denklemlerine uyguladı ve kısa süre sonra bu denklemlere yeni ve göründüğü kadarıyla tuhaf bir çözüm getirdi. Bu çözüm, gözlemcilerin görünürde zamanda geriye yolculuk ettiği dönen bir evren anlamına geliyordu; Einstein'ın endişe verici bulduğu bir olasılıktı bu.[15] Dirac, ilk olarak

14. G. Dyson (2012: 32-33)
15. Buser, M., Kajari, E. ve Schleich, W. P., 'Visualization of the Gödel Universe,' *New Journal of Physics*, 30 Ocak 2013: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/15/1/013063

Veblen tarafından çalışılmış bir teoriyle ilgileniyordu; bu teori, "konformal" olarak tanımlanan özel bir tip alanla alakalıydı ve Dirac bu teorinin elektronlara uygulanabileceğini düşünüyordu. Dirac, bu fikri 1935 yılında Veblen'le tartıştıktan sonra matematiksel vizyonunu yayımladı, gerçi çok az sayıda meslektaşı bununla ilgilendi.[16]

Savaştan hemen sonraki süreçte ortam, teorik fizikçiler ve saf matematikçiler için birbirlerinin çalışmalarına katkı yapmaları açısından olgunlaşmış değildi. Freeman Dyson'ın hatıralarına göre, 1948 yılında enstitüyü ilk kez ziyaret ettiğinde "enstitünün fizikçileri ve matematikçileri farklı dünyalarda yaşıyordu".[17]

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki on beş yılda teorik fizik, saf matematikle az miktarda örtüşerek ilerledi. Daha sonra göreceğimiz gibi, fizikçiler yeterince anlaşılamayan deneysel bulgulardan anlam çıkarmaya çalışarak mümkün olduğunca hızlı yol almaya çalıştılar; bu esnada da alışılageldik bir matematik kullanıyorlardı. Birkaç teorisyen de daha sonraları temel fizikçiler ve saf matematikçiler açısından önemli olduğu ortaya çıkacak olan gelişmeler kaydettiler, gerçi fizik dünyasını aydınlığa kavuşturabilmiş değillerdi.

Savaş sonrasındaki o yıllarda fizikçiler için öncelikli konulardan biri, bazı katıların elektriği niçin sıfır dirençle ilettiğini (süper-iletkenlik) ve bazı sıvıların da aşırı ölçüde düşük sıcaklıklarda niçin sıfır viskoziteyle aktığını (süper-akışkanlık) anlamaktı. Bu iki fenomen, yalnızca kuantum mekaniği kullanılarak açıklanabilirdi. İkinci Dünya Savaşı sırasında Rus teorisyen Lev Landau, süper-akışkanlığın kısmi bir açıklamasını oluşturmak için teoriyi kullanmıştı. 1957 yılında da Amerikalı bilim insanları John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer süper-iletkenlik hakkında yapılmış tüm deneylere incelikli bir açıklama getirmek için yine kuantum mekaniğinden faydalandılar. Bu teoriler ileri matematik içermedikleri için matematikçiler bunları rahatlıkla göz ardı edebiliyordu.

Bazı teorisyenler, o dönemde katı-faz fiziği olarak bilinen bu türden bir bilime burun kıvırıyor, temel seviyede kaldığını ve yetersiz olduğunu düşünüyorlardı. Herhangi bir madde

16. Dirac (1936a)
17. Dyson'dan e-mail, 12 Ocak 2018

numunesi, örneğin bir parça katı metal, birbiriyle etkileşim içinde olan trilyonlarca atom içerir ve kolektif davranışları yalnızca yaklaşık tahminler yapılarak anlaşılabilir. Katı-faz fizikçilerinin gerçek madde içindeki karmaşık ortama dair sadeleştirilmiş bir matematiksel tanımlama yapmaktan başka seçeneği yoktu. Bu sadeleştirmeler de bazı teorisyenleri rahatsız ediyordu, temkinli davranıp bunlardan uzak duruyorlardı: açık sözlü bir karakter olan parçacık teorisyeni Murray Gell-Mann, bu durumu "murdar-faz fiziği" olarak adlandırmıştı.[18] Bununla beraber bu fizik türü –günümüzde daha saygıdeğer bir ifadeyle "yoğun madde fiziği" olarak bilinmektedir–, birçok defa tüm evrene uygulanabilen teorilere ilişkin derin analizler doğurmuştur.

1950'lerde tutkulu teorik fizikçilerin en sevdiği laboratuvar, atom laboratuvarıydı. Yirmi yıl öncesinde tipik bir atomun, iki tip partikülden oluşan bir çekirdekten (pozitif yüklü protonlarla elektrik yükü nötr nötronlar) ve bu çekirdek etrafında yörünge çizen negatif yüklü elektronlardan oluştuğu düşünülmüştü. Böylesi kısa mesafelerde ve böylesi küçük kütlelerdeki partiküller arasında yerçekimi gücü o kadar küçüktür ki atomların davranışını belirlemedeki rolü göz ardı edilebilir. Atomların iç yapılarının işleyişi daha ziyade doğanın üç başka temel gücünün etkisi altındadır: atom elektronlarını çekirdeğe çeken elektromanyetik güç; bazı radyoaktivite tiplerini doğuran "zayıf" güç denen güç; ve "büyük güç", yani nötronlarla protonları atom çekirdeğinde sıkıca tutan güç. Bu zayıf ve büyük güçler yalnızca son derece kısa mesafelerde etkili olmaktadır (yaklaşık olarak bir metrenin milyarda birinin milyonda birinde), bu yüzden de çoğumuz bu durumu asla doğrudan gözlemleyemeyiz. Fizikçiler için asıl büyük sürpriz, daha önce bilinmeyen ve gitgide genişleyen atom altı parçacık havuzuydu; araştırmacılar bu partikülleri birbirine çarptırarak ve göklerden yağan kozmik ışınları gözlemleyerek atom altı parçacıkları keşfediyorlardı.

Yeni bir camia olan "parçacık fizikçileri" için bilhassa kafa karıştırıcı olan nokta, proton ve nötronun yeni keşfedilmiş akrabalarının özellikleriydi. Hepsi de o kadar kararsız yapıdaydı ki saniyenin milyonda birinden daha uzun süre yaşamıyorlardı.

18. Johnson, G., 'New Contenders for a Theory of Everything', *New York Times*, 4 Aralık 2001

Teorisyenler bu partiküllerin bozunmalarını anlamaya çalıştılar; insan imgeleminin bu yabancı alt-nükleer dünyaya nasıl girebileceğini ve içinde neler olup bittiğini nasıl anlayabileceğini öngörmek güç görünüyordu. Atom çekirdeği içinde gerçekleşenleri tanımlayabilecek matematiksel temelli bir yasa tahmininde bulunmak adına güzel matematiğe başvurmanın herhangi bir yolu yokmuş gibi görünüyordu: yeni keşfedilen partiküllerin etkileşimleri o kadar güçlüydü ki geleneksel metotlar işlemiyordu. Göründüğü kadarıyla yegâne uygulanabilir yol, basit matematiksel ilişkiler kullanarak araştırmacıların gözlemleri arasında modeller keşfetmeye çalışmaktı.

1930'ların ortalarında fiziğin merkezi Avrupa'dan çıkıp Atlantik'i aşmıştı ve İkinci Dünya Savaşı'nın sona erdiği dönemde fizik alanında dünyanın önde gelen merkezlerinin büyük bölümü artık Amerika Birleşik Devletleri'ndeydi. Savaş, ABD ordusunun Manhattan Projesi kapsamında geliştirilmiş iki nükleer silahı kullanmasının ardından günler içinde bitmişti. Proje, bilim ve mühendislik açısından teknolojik bir zafer niteliğindeydi, etkileyici bir hızla ve Amerikalılara özgü bir itkiyle gerçekleştirilmişti. Savaşın ardından projeye minnettar olan ABD hükümeti partikül fiziği araştırmalarına finans sağlamaya başladı; siyasetçiler bu araştırmaları ulusal güvenlik açısından elzem görüyordu.[19] Manhattan Projesinde çalışan en genç bilim insanlarından biri Richard Feynman'dı. Feynman benzersiz yetenekte bir teorik fizikçiydi; matematiğe getirdiği pragmatik yaklaşım meslektaşlarını sık sık hayrete düşürürken matematikçileri de bir o kadar ürkütüyordu.

Feynman, fizik bilimine ilk kalıcı katkısını 1940'ların başında Princeton Üniversitesi'nde doktora öğrencisiyken yaptı. Yetenek testi puanları Princeton yönetiminin dikkatini çekmişti: matematik ve fizik alanında o güne kadarki en yüksek puanları alırken İngilizce ve tarih alanlarındaki puanı normalde okula kabulünün mümkün olamayacağı ölçüde düşüktü. "İşlenmemiş bir cevher olmalı" diye düşündüler ve bu doğruydu: New York'un Queens kentinde yetişmiş bir çocuk olarak kaba sabaydı, şaşırtıcı ölçüde parlak zekâlıydı ama Ivy League Üniversitesi [Sarmaşık

19. Kevles (1995: 17)

Birliği Üniversitesi][20] akademisyeninden beklenen incelikten yoksundu.[21]

Feynman'ın ilk büyük atılımı, Princeton'da Nassau Tavern'da bir bira partisinin ardından geldi. Parti esnasında başka bir fizikçi, klasik mekanik ve kuantum mekaniği arasındaki ilişki hakkında Dirac tarafından yazılmış kısa bir makale okumuş olduğundan bahsetmişti. Aslında bu makale, herhangi bir heyecan yaratmış bir makale değildi. Dirac, makalede, on sekizinci yüzyılın sonlarında matematikçi Joseph Louis Lagrange tarafından ortaya atılmış bir klasik mekanik versiyonunun doğrudan kuantum dünyasına genellenebileceğini söylüyordu. Dirac'a ait bu analizi Feynman'ın yeni ve oldukça ilgi çekici bir yaklaşımla kuantum mekaniğine adapte etmesi uzun sürmedi; bu yaklaşımının doğurduğu tahminler Schrödinger denklemine dayanan geleneksel metotların tahminleriyle aynıydı.

Feynman'ın yaklaşımı, kuantum dünyasında bir partikülün bir noktadan bir diğer noktaya hareket etmesi ihtimalinin, "eylemi" kullanarak hesaplanabileceği düşüncesine dayanıyordu. Matematiksel açıdan ifade etmek gerekirse bu nicelik, partikülün bu noktalar arasında gidebilmesi beklenen tüm muhtemel yollardan gelen sonuçları toplayarak oluşturulur; bu muhtemel yollara olası zig zag kombinasyonları da dahildir.[22] Feynman'ın metodu, kuantum mekaniği partiküllerinin hareketinin, klasik mekanikle tahmin edilen hareketin niçin aynısı olmadığını da açıklar, gerçi büyük ölçekte iki teori de aynı tahmini üretmektedir. Daha sonraları Feynman'ın bu yaklaşımı, atomik ölçekteki harekete dair yeni tanımlar geliştirmeye çalışan teorisyenler için vazgeçilmez hale geldi. Bununla beraber bu başarı, matematikçiler açısından bir gizem konumundaydı. Matematikçiler; Feynman'ın, partikülün geçmiş hareketine ilişkin sonsuz sayıyla ilgili matematiksel tanımının anlamsız olduğunu düşünüyorlardı. Feynman onları

20. Ivy League(*Sarmaşık Birliği*),ABD'nin kuzeydoğusundaki sekiz vakıf üniversitesinin (aralarında Harvard, Princeton ve Yale'in de olduğu) oluşturduğu birlik. Günümüzde Ivy League terimi, akademik mükemmellik, öğrenci kabulünde seçicilik ve elitizm ile bağdaştırılmaktadır.

21. Wheeler (1989: 24)

22. Bu unsurlar pozitif sayılar gibi toplanmaz ama birbirleriyle su dalgaları gibi etkileşir, genliklerine ve fazlarına göre birleşirler, bu da onların yapıcı veya birbirlerini ortadan kaldırıcı olarak etkileşmesine neden olur.

umursamadı: onun için yegâne önemli nokta, yaklaşımının her zaman doğru sonuçlar vermesiydi.

Savaştan sonra Feynman, elektronlar arasındaki elektromanyetik güçler teorisini geliştirmek konusunda öncü rol üstlendi. Dirac ve diğerleri teoriyi halihazırda ortaya koymuştu, ama kullanılmasının imkânsız olduğu ortaya çıkmıştı, çünkü hesaplamalar hep sonsuzluk değerleriyle bozuluyordu, bu da hesaplamaları anlamsız kılıyordu. Feynman hesaplamaları sistematik olarak yapmak için teoriyi kullanmanın bir yolunu buldu; her biri, genel sonuca katkı sağlayan bir matematiksel ifadeyi temsil eden diyagramlar kullandı.[23] Bu görsel yaklaşım ilk aşamada genel olarak popüler olmadı: Wolfgang Pauli, bunu "hissi ressamlık" olarak tanımlamıştı.[24] Ama çoğu fizikçi, bu metodu, hesaplamaları yapmak adına müthiş verimli bir yöntem olarak görüyordu. Feynman'ın yöntemi, hemen hemen aynı dönemde teorisyenler Sin-Itiro Tomonaga ve Julian Schwinger tarafından geliştirilen ve yine aynı sonuçları veren tamamlayıcı tekniklerden çok daha kolaydı.

1947 yılında otuz beş yaşında olan Feynman, Cornell Üniversitesi'nde elektronları anlamak amacıyla görsel yaklaşımını geliştirmek için canla başla çalışırken, üniversiteye yeni gelmiş olan İngiliz lisans öğrencisi Freeman Dyson'la tanıştı. Dyson, kuantum elektromekaniği alanında Feynman'ın çalışma arkadaşı olacaktı. İçine kapalı ama güzel konuşan bir genç olan Dyson, müzikle uğraşan hali vakti yerinde bir ailede dünyaya gelmişti, Winchester College'da ve Cambridge Üniversitesi'nde eğitim almıştı; burada yeteneği Trinity College'ın matematik şöhretleri tarafından fark edilmişti. Bu şöhretler arasında *A Mathematician's Apology* adlı eserin yazarı da vardı; Dyson onu Rus matematikçi Abram Besicovitch'in lojmanındaki bilardo masasının başındayken tanımıştı.[25]

Dyson, Dirac'ın kuantum mekaniği hakkındaki efsane seminerinden hayal kırıklığı duymuş olsa da kuantum elektrodinamiğiyle ilgilenir hale gelmişti. Bu alanda yapılan pratik hesaplamaların sonuçlarını en iyi ihtimalle güvenilmez,

23. Feynman (1985: 77-128)
24. Enz (2002: 444)
25. Dyson (2018: 2)

en kötü ifadeyle anlaşılmaz gösteren sonsuz değerleri nasıl ele alacağını kimse bilmiyormuş gibi görünüyordu. Dyson da alandaki tüm uzmanların da hemfikir göründüğü şekilde modern matematiğin bu duruma pek yardımcı olamayacağını görüyordu. Daha sonraları bana anlattığı üzere, Cambridge fizikçileri, Bourbaki matematiğini bir "Fransız hastalığı" diye yererken frengi göndermesi yapmış oluyorlardı.[26]

Dyson, kuantum elektrodinamiğinin eksik halde bulunuyor olmasının, birinci sınıf bir matematikçi için fiziğin içine dalıp işi bitiren kişi olma fırsatı sunduğunu düşünüyordu. Böylece yirmi beş yaşında işe koyuldu ve odağını gerçek dünyaya çevirdi. Bu akıllıca bir hareketti: Dyson ilk başta pek fazla fizik bilmiyordu, ama birkaç ay içinde alanın önde gelen parlak isimlerinden biri oldu. Cornell Üniversitesi'nde yoğun olarak kuantum elektrodinamiği çalıştı, ama fizik alanındaki eğitimini geliştirmek için de her hafta birkaç saatini bir öğrenci laboratuvarında klasik deneyler yaparak geçirdi. Bir deneyde, üzerine elektronların yerleştiği yağ damlacıklarının hareketini gözlemledi, böylece elektronların özelliklerini araştırma imkânı bulmuş oluyordu. Bu deney, onu matematik ve gerçeklik arasındaki ilişki üzerinde düşünmeye götürdü: "Burada yağ damlacığının üzerinde elektron duruyordu ve benim hesaplamamın sonucu olmadan da nasıl hareket edeceğini gayet iyi biliyordu. Elektronun öyle ya da böyle benim hesaplamamı umursadığına kim ciddi ciddi inanabilir?"[27] Ama deney, elektronun bu hesaplamayı umursadığını gösteriyordu: elektron daima matematiğin tahmin ettiği şekilde hareket ediyordu.

Cornell'e varışını izleyen hafta içinde Dyson, Feynman'ın etkisine kapılmıştı. Genç Amerikalı'nın coşkusu, orijinalliği ve parlak zekâsı sessiz İngiliz'i şaşkına çevirmişti; Feynman'ın çılgın mizah anlayışına ve otoriteye karşı başkaldırısına doyamadığından bahsetmiştir bana.[28] Dyson'ın, ailesine sık sık yazdığı mektuplarından birinde bahsettiği gibi, Feynman "odaya en yeni beyin fırtınalarından biriyle giriyor ve bunu en gürültülü

26. Dyson'la söyleşi, 14 Ağustos 2015
27. Dyson (1979: 50)
28. Dyson (2018: 56, 59-62)

ses efektleriyle ve el kol hareketleriyle anlatmaya koyuluyordu". Dyson'ın gözünde Feynman "yarı deha yarı soytarıydı".[29]

Dyson için bilhassa etkileyici olan unsur, Feynman'ın yalnızca minimum seviyede bir matematikle yaratıcı seviyede teorik fizik yapabiliyor oluşuydu. "Matematiksel çaba Feynman'ın umursadığı en son şeydi" demişti Dyson daha sonraları.[30] Bununla beraber Feynman bir şekilde bilgisini ve fizik sezgilerini en akıllı meslektaşlarını bile sık sık şaşkınlığa düşürecek ölçüde büyük bir hızla hesaplamalar yapmak yönünde kullanabiliyordu. Kuantum elektroniğini oluştururken denklem kullanmıyordu, Dyson'ın söylediğine göre "yalnızca çözümleri yazıyordu. ... Olayların gerçekleşme şekline dair kafasında bir fizik şablon vardı ve bu şablon ona çözümleri minimum hesaplamayla doğrudan veriyordu."[31]

Dyson, kuantum elektrodinamiğine özel olarak odaklanmasından itibaren iki yıl içinde alanın önde gelen uzmanı oldu. Ve Dyson, adeta bir gövde gösterisiyle Feynman, Schwinger ve Tomonaga tarafından oluşturulmuş olan teorilerin aynı teorinin versiyonları olduğunu ortaya koydu; fizikçiler bu teorileri aradıkları nicelikleri istedikleri hassasiyette hesaplayacak şekilde kullanabilirdi. Dirac ve diğerlerini çokça zorlamış olan sonsuz nicelikler, fizikçilerin bütünüyle kabul edilebilir bulduğu bir yolla halının altına süpürülebilirdi. Saf matematikçiler (ve Dirac'ın ta kendisi de) bu yaklaşımın mantıksal olarak tutarlı olduğuna pek ikna olmamışlardı; ama fizikçilerin çoğu, Dyson'ın metotlarından bütünüyle memnundu. Çeyrek yüzyıl sonra başka matematiksel fizikçiler de bu sonsuz değerlerin nasıl ortadan kaldırılabileceğini açıkladılar, ama Dirac bu açıklamaları asla kabul etmedi.

Dyson'ın yaklaşımı tüm fizikçilere, hatta matematiksel yetenekleri en mütevazı seviyede olanlara bile temel parçacıkların elektromanyetik etkileşimlerinin etkilerini hesaplama imkânı veriyordu, ayrıca bu yolla elektronun manyetizmine ve atomik hidrojenin enerji seviyelerine dair doğru tahminlerde bulunabiliyorlardı. Daha da iyisi, elde edilen sonuçlar en hassas

29. Dyson (2018: 71)
30. Dyson (1972: 647)
31. Dyson (1979: 55-56)

deneysel ölçümlerle tutarlıydı ve hep tutarlı sonuç vermeye devam etti: kuantum elektrodinamiği, günümüzde de en hassas verilerle virgülden sonraki çok sayıda basamağa kadar örtüşmektedir ve hâlâ bilim tarihinin en iyi test edilmiş teorisi konumundadır.[32]

Dyson otuz yaşında İleri Araştırmalar Enstitüsü fakültesine atandı. Enstitü yöneticisi Robert Oppenheimer tarafından uzun zamandır destekleniyordu. Oppenheimer da Manhattan Projesindeki çalışması dolayısıyla ulusal kahraman mertebesine ulaşmış, seçkin ama biraz da sıradan bir teorik fizikçiydi. Gizemli ve tatlı dilli bir karakter olan "Oppy", bir saraylı gibi hoş ve cömert biri olabilirken, iki dakika sonra huysuz ve kaba birine dönüşebiliyordu. Dyson'ın hatıralarına göre "Oppenheimer'ın kör noktalarından biri ileri matematikti" ve bu durumun bir sonucu olarak da "enstitünün matematikçileriyle sürekli çatışma içindeydi".[33]

Oppenheimer, Einstein'ın 1949 yılında fakültedeki görevinden ayrılmasından önce bile enstitüye katılacak kadar zeki genç teorisyenleri mercek altına alıyordu; böylece enstitü bir teorik fizik ve saf matematik merkezi olarak şöhretini koruyabilecekti. Dyson'ı kadroya katmasından sonra iki yıl içinde Oppenheimer bir başka teorisyeni, Çinli Chen-Ning Yang'ı işe aldı. Yang, Dyson'ın tahminine göre Einstein ve Dirac'ın ardından "yirminci yüzyıl fiziğinin en seçkin stilisti" olmaya adaydı.[34]

1922 yılında Çin'in doğusunda orta büyüklükte bir şehirde doğmuş olan Yang, hem fizik hem de matematikte olağanüstüydü. Ülkesinin modern matematikle tanışmasına katkı sağlamış olan babası, Yang'ı bu iki yeteneğini birden geliştirmesi yönünde teşvik etmişti. Yang, daha ergenlik döneminde Einstein'ın, Dirac'ın ve hem deneyci hem de teorisyen olarak uzmanlaşmış olan az sayıda fizikçiden biri olan Enrico Fermi'nin çalışmalarına kendini vermişti.[35] Yang, özünde tümdengelimci bir teorisyendi:

32. Orzel, C., 'The Most Precisely Tested Theory in the History of Science', Uncertain Principles Archive, 5 Mayıs 2011: http://chadorzel.steelypips.org/principles/2011/05/05/the-most-precisely-testedtheo/
33. Dyson'la söyleşi, 14 Ağustos 2016; Yang (2013: 306)
34. Dyson (2015: 122)
35. Yang'la söyleşi, Simons Foundation (2011): https://www.simonsfoundation.org/2011/12/20/chen-ning-yang/: Sections 2-4

öncelikle kapsayıcı ilkeleri oluşturmayı, sonrasında da bu ilkelerin tahmin ettiği sonuçları gerçek dünyadaki gözlemlerle kıyaslamayı tercih eden biriydi. Yeni deneylerin sonuçlarına odaklanarak teorik fikirler geliştirmeye yönelik daha popüler tümevarımcı yaklaşım ona göre değildi.

Yang, babasının yolunu izlemeye ve doktora derecesi için Chicago Üniversitesi'nde okumaya karar verdi; burada Manhattan Projesinde önde gelen bilim insanlarından biri olmuş Fermi en seçkin fizikçi konumundaydı. Yang'ın bir deneyci kumaşında olmadığı açıktı. Laboratuvarda öğrenci arkadaşları onun gaflarıyla dalga geçerdi: "Nerede bang, orada Yang" diyorlardı.[36] O da akıllıca bir kararla odak noktasını teorik araştırmalara yöneltti. Amerikan yaşam tarzına ayak uydurmaya hevesli biri olarak şık takım elbiseler, kravatla beyaz gömlek giydi; çokça kullanılan Frank ön adını aldı, en sevdiği yazarlardan ve çok yönlü düşünürlerden biri olan Benjamin Franklin'den esinlenmişti. Yang kitap kurdu bir öğrenciydi ve yetenekleri arasında mizah duygusu yer almıyor olsa da, sürekli gülümsemeye hazır bir yüzü ve başarıya ulaşmak adına sarsılmaz kararlılığıyla çelişen yumuşak bir tarzı vardı.

Chicago'daki birçok yeni meslektaşı gibi Yang da atom çekirdeğindeki parçacıkları bir arada tutan güçleri anlamaya çalışmakla ilgileniyordu. ABD'nin Japonya'ya attığı iki nükleer bomba, bilim insanlarının bu tür bir gücü yıkıcı boyutlara ulaştırabileceklerini kanıtlamıştı; ama bu durumu açıklayan temel matematiksel yasalara dair herhangi bir fikirleri yoktu. Yang, nükleer partiküllerin etkileşim şekline yön veren simetrileri göz önünde bulundurarak çekirdekte işlev gösteren güçleri anlamaya çalıştı. Haziran 1948'de bu araştırma projesini tamamladı ve bunu yalnızca yirmi dört sayfa en üst seviye teorik fizikten oluşan bir doktora tezinde yayımladı.[37] İki yıl içinde İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde araştırma görevlisi kadrosu aldı, sonraki on altı yıl boyunca orada olacaktı.

---

36. Yang (2013: 314); Zhang (1993: 13-14); Yang (2005: 3-5, 305-306)
37. Yang, 'On the Angular Distribution in Nuclear Reactions and Coincidence Measurements' başlıklı tezini Chicago Üniversitesi yetkililerine Haziran 1948'de sundu.

Yang, Maxwell'in elektrik ve manyetizma denklemlerinin simetrisi üzerine uzun süre kafa yordu ve bu simetrilerin modern fizikçilere öğretecek bir şeyi olup olmadığını düşündü. Bu düşünce şekli, Dirac ve Einstein'ın düşüncesiyle, yani gerçek dünyayı bir şekilde açıklamayı halihazırda başarmış teorileri geliştirmek gerektiği düşüncesiyle paraleldi. Ama ne yazık ki bu yaklaşım, daha sonra hatırlayacağı gibi Yang'ı "bir kaosa soktu".[38] 1953 yılı yazında Brookhaven Ulusal Laboratuvarını ziyaret ettiği dönemde ise hızlı bir gelişme göstermeye başladı ve bu gelişme de onu dünya algımıza muazzam bir katkı yapmaya kadar götürdü.

Bu atılım, laboratuvarda deney araştırmacılarıyla yeni elde edilen veriler üzerine kafa yorarken gelmedi, ofis arkadaşı olan genç Amerikalı teorisyen Robert Mills'le konuşurken ortaya çıktı. Proje üzerinde ciddi olarak çalışmaya başlamalarından sonra Yang ve Mills, Maxwell'in denklemlerinin daha genel bir biçimini yazmanın yollarını bulmak üzere bazı akıllıca tahminler yaptılar ama bir yere varamamış gibi görünüyorlardı. Ama nihayetinde birkaç günlük yoğun çalışmanın ardından işler rayına oturdu. İki teorisyen öylesine bir alan teorisi ortaya koydular ki, uzay zamandaki her bir noktada teorinin alanlarına belli değişiklikler getirildiğinde bile teorinin denklemleri aynı biçimi koruyordu: buna da Yang-Mills ölçüm simetrisi denmeye başlandı. Matematikçi Hermann Weyl'in ilk kez 1929 yılında yazmış olduğu türden bir teorinin geliştirilmiş haliydi bu, elbette Yang ve Mills de bunu biliyorlardı.[39] Maxwell'in elektromanyetizma denklemlerini doğal şekilde genelleştirmeleri, potansiyel olarak başka tipte güçleri de, örneğin atom çekirdeğindeki partiküller arasındaki büyük güçleri de açıklayabilirdi.[40] Yang'ın daha sonraları anılarında belirteceği üzere, bu fikir çok güzel duruyordu, ama diğer yandan gerçek dünyayla ilgisi yokmuş gibi görünüyordu.[41] Yang ve Mills'in teorisi açısından en tuhaf

38. Yang (2005: 19-21); Zhang (1993: 14-15)
39. Ölçüm teorilerinin karmaşık geçmişine dair analiz, O'Raifeartaigh (1997: 3-10)
40. Bölgesel simetriyle ilişkili en az iki doğa gücü vardı: elektromanyetizma (Maxwell'in denklemleriyle tanımlandığı üzere) ve yerçekimi (Einstein'ın genel izafiyet denklemiyle tanımlandığı üzere).
41. Yang (2013: 318-319)

olan nokta, kütlesi olmayan ama yine de birbiriyle etkileşen partiküllerin varlığına işaret ediyor oluşuydu. Böyle bir atom altı partikül saptanmış olmadığı için, bu yeni teorinin doğru olmasının mümkün olmadığı yargısına varmak yegâne mantıklı yaklaşım olarak görünüyordu.

Yang, 23 Şubat 1954 Salı günü enstitüde düzenlenecek olan bir akşamüstü seminerinde bu durum hakkında konuşmayı kabul etti.[42] Genellikle özgüven saçan Yang, o gün muhtemelen endişeliydi: kusurlu fikirlere karşı pek de hoşgörülü olmayan birçok fizikçi karşısında tatmin edici olmadığı aşikâr bir teori sunacaktı. Başkanlık koltuğunda sürekli sigara içen Oppenheimer vardı; o dönemde hükümetin küçük düşürücü bir kararla güvenlik iznini askıya almış olmasının etkilerinden sıyrılmaya çalışıyordu. Ani parlayabilen ve gerginlik veren bir karakterdi, engin bilgilerini gösterme hevesi de can sıkıcı seviyedeydi. Einstein salonda yoktu, ama kitle içinde yeni göreve başlamış Freeman Dyson vardı, iri yapılı Wolfgang Pauli'nin yakınında oturuyordu; Pauli, olgunlaşmamış, hatalı veya "hatalı bile olamayacak kadar" yanlış düşünülmüş tüm fikirleri şiddetle eleştiren biriydi.[43] Ayrıca Pauli de aylardır Yang ve Mills'le aynı konular üzerinde kafa yoruyordu ve kaydettiği ilerlemeye dair iki hafta öncesinde enstitüde bir konuşma yapmıştı. O güne kadar kimsenin gözlemlemediği bu utanç kaynağı partiküllerle o da karşılaşmıştı, dolayısıyla o da bu yaklaşımın bir yere varmayacağı düşüncesindeydi. Yang, anlatımına bu koşullarda başladı ve kara tahtaya bir şeyler yazmaya başlamasından birkaç dakika sonra da Pauli ona kasıtlı olarak partiküllerin kütlesini sordu, Yang'ın tek yapabildiği zayıf bir cevap vermek oldu. Birkaç dakika sonra, Pauli'nin sorusunu tekrarlamasının ardından, Yang kendisinin ve Mills'in bu konuda belli bir çıkarıma ulaşmadıklarını söyledi. "Bu bir mazeret değil" diye dudak büktü Pauli. Seminer durma noktasına geldi ve ancak Oppenheimer'in "bırakın Frank devam etsin" demesinden sonra tekrar başlayabildi, konuşmanın geri kalanı için Pauli'yi de susturmuş oluyordu. Sonrasında kitle

42. Yang (2005: 19-20); Pais (2000: 244-245); Dyson'la söyleşi, 20 Ağustos 2017
43. Peierls, R. E., *Biographical Memoir of Pauli* for the Royal Society: http://rsbm.royalsocietypublishing.org/content/roybiogmem/5/174.full.pdf, s. 186 (1960)

dağılırken çoğunun ikna olmaktan çok uzak olduğu aşikârdı, içlerinden biri daha sonra dinlediği bu şeyi Yang ve Mills'in "hadsizliği" olarak tanımlayacaktı.

Yang ve Mills, bu acıklı olaya ve başka eleştirilere rağmen fikirlerini birkaç ay sonra yayımladılar. Neredeyse hiç kimse onları ciddiye almadı, bunun nedenlerinden biri, çözmeye çalıştıkları problem konusunda iki teorisyenin kafalarının karışık görünüyor oluşuydu. Bununla beraber bu makale Yang'ın güçlü ve büyüyen şöhretine zarar verecek herhangi bir şey yapmadı. Yaklaşık bir yıl sonra enstitüde kendisine teklif edilen görevi kabul etti, ofisi de Dyson'ın ofisinin bulunduğu koridorun aşağısındaydı.[44] Yang yeni görevini aldığı sıralarda Einstein hayata veda etmişti ve enstitüde yeni bir teorik fizikçi nesli egemen olmuştu. Bu yeni neslin üyeleri fikirlerini matematikçi meslektaşlarıyla paylaşmaya niyetliydi, ayrıca gerekli yeteneğe de sahiplerdi ama ortam verimli bir işbirliği için henüz yeterince olgunlaşmış değildi. Akşamüstü çayından sonra bazı günler Yang neşeli karakter Hermann Weyl ile konuşurdu, ama göründüğü kadarıyla öncüsü oldukları ölçüm teorilerini bir kez bile konuşmamışlardı.[45] Weyl, 1951 yılında Zurich'e döndü ve dört yıl sonra kalp krizinden öldü, Yang ve Mills'in çığır açan yaklaşımlarını nasıl geliştirdiklerinden hiç haberi olmadı. Yang, Weyl'e olan minnet borcunu biliyordu ve bunu unutamazdı: Yang ve ailesi Princeton'da uzun zamandır Weyl'in evi olan konuta yerleşti.

Enstitüye katılmasının ardından iki yıl içinde Yang kamuya da mal olmuş bir şöhret haline geldi. Şöhretinin kaynağı ölçüm teorisi üzerine genellikle görmezden gelinen çalışması değil, Çinli meslektaşı teorisyen Tsung Dao ("T.D.) Lee ile birlikte yapmış olduğu başarılı bir tahmindi. Göründüğü kadarıyla tüm fizikçiler doğanın sol ve sağ arasında temel bir ayrım yapmadığı düşüncesini kanıksamışlardı: Tanrı neden iki yönlü olmak dışında bir eğilimde olsundu ki? Lee ve Yang ise bu simetrinin dokunulmaz olmayabileceğini, atom altı partiküllerin, subnükleer "zayıf güçler" aracılığıyla etkileşimi neticesinde simetrinin bozulabi-

44. Enstitünün matematik bölümü Yang'a kadro vermek üzere 21 Aralık 1954'te oybirliğiyle karar aldı ve o da bu teklifi 9 Şubat 1955'te yazdığı mektupla kabul etti: IASARCHIVE, Director's Office Faculty Box 40
45. Yang (1986: 19-20)

leceğini açıkça ilan eden ilk kişiler oldular. Teorik fiziğin önde gelen isimlerinin neredeyse tamamı bu öneriyi saçma bularak alay etti. Ama şüpheciler yanılıyordu: Aralarında Chien-Shiung Wu'nun da bulunduğu deney araştırmacıları kısa süre sonra zayıf etkileşimlerin gerçekten de sol ve sağ ayrımı yaptığını gösterdiler. Lee ve Yang şöhrete ulaştı, gerçi Wu ulaşamadı: tüm dünyada gazete ve dergiler, hayatlarının sözleşmesini imzalamış iş insanları gibi ışıldayan bu teorisyenlerin fotoğraflarını yayımladı.[46] Bu iki adamın kendilerinden memnun görünmek için her türlü sebebi vardı, uzun zamandır dokunulmaz sayılan doğanın simetrisinin aslında kırılabildiğini ilk tahmin eden kişiler olmuşlardı.

Yang ve Mills'in atom altı partiküllere dair ölçüm teorilerinin önemi ise neredeyse yirmi yıl sonrasına kadar tam olarak anlaşılamadı. Ancak daha sonraları bu teorinin, şaşırtıcı bir gözleme karşı bir reaksiyon olmaktan ziyade, teorik fiziğe saf düşünce yoluyla yaklaşma anlayışının en büyük zaferlerinden biri olduğu anlaşılabildi. Fakat teori yeterince net ve kapsayıcı bir analiz değildi: İngiliz teorisyen David Tong'un 2015 yılında bana söylediği gibi: "Yang ve Mills" ölçüm teoremi, yapmaya çalıştığı şeyi sunmak açısından bütünüyle yanlış olarak değerlendirilebilecek makalelerin en güzel örneklerinden biri konumundaydı, ama bununla beraber teorik fiziğin önümüzdeki 100 yıl boyunca önünü açan bir çalışmaydı."[47]

*

Sezgilerle ulaşılamayan bir atom altı dünyaya (büyük ve zayıf elektromanyetik kuvvetlerin geçerli olduğu bir dünyaya) yönelik araştırmalar İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra artarken, yerçekimine yönelik araştırmalar durgunlaştı. 1948 yılında tutkulu Freeman Dyson, teorik fizik alanında etki yaratmaya hevesli şekilde Princeton'a varmasının ardından İngiltere'deki ailesine konunun durumuyla ilgili bir mektup yazdı:

"Genel izafiyetin günümüzde araştırma yapmak açısından en az gelecek vaat eden alanlardan biri olduğu çoğu kişi için aşikâr durum-

46. Bernstein (1962: 96)
47. Tong'dan gelen e-mail, 23 Şubat 2016

da. Fizik açısından bakıldığında teori bütünüyle kesinlik kazanmış durumda ve tüm deneylerle tamamen uyum içinde. Fizikçilerin genel görüşüne göre teori, birtakım yeni deneyler çıkıp teoriyi çürütene veya kuantum teorisinin izafiyeti de kapsayacak şekilde geliştirilmesine kadar aynı kalacak."[48]

Dyson gerçekten de bir nesil fizikçi adına konuşuyordu. Einstein'ın yerçekimi teorisi adeta dokunulmaz bir güzellik anıtı gibi dikiliyordu: nasıl geliştirilebileceğini hayal etmek güçtü, en azından öngörülebilir bir gelecekte.

Teoriyi test etmek adına ortaya konan genel yaklaşım da daha fazlasını vaat etmiyordu: o dönemki teknolojik sınırlar, deney araştırmacılarını, Einstein'ın teorisi ile Newton'ınki tarafından sunulan açıklamalar arasındaki sapmaları ölçmekten alıkoyuyordu. Genel izafiyet teorisinin bir araştırma alanı olarak potansiyeli hakkında Dyson'ın kötümser ifadelerinden on yıl sonra; Princeton'ın önde gelenleri, konunun hâlâ çıkmaz sokak olduğu kanısındaydı.[49] Birkaç teorisyen bu alana girdi, aralarında Richard Feynman ve Paul Dirac da vardı. Bu teorisyenler, katettikleri gelişmeleri gözden geçirmek üzere 1962 Temmuz ayı sonlarında Varşova Staszic Sarayı'nda gerçekleştirilen uluslararası bir konferansta buluştular. Feynman, toplantıdaki en popüler konulardan biri olan yerçekimsel alan kuantum teorisi hakkındaki konuşmasını yapmadan bir gece önce, California'daki eşine yerçekimi teorisinin durumundan yakınan bir mektup yazdı. Teorinin, gelişmekte olan bir araştırma alanı olmadığından bahsediyordu, "çünkü bu alanda hiçbir deney yok", bu yüzden de "en iyi adamlardan çok azı bu konu üzerinde çalışıyor" diyordu. Ve sözlerini şöyle tamamlıyordu: "burada bir sürü sersem var; ve bu da benim tansiyonuma iyi gelmiyor".[50]

Feynman'ın bu saptamalarının üzerinden çok uzun bir süre geçmeden yerçekimi fiziği araştırmaları dalgası geri dönmeye başladı. Princeton Üniversitesi'nden iki fizikçi, alan üzerindeki

48. Dyson'dan ailesine, 4 Ekim 1948: Dyson (2018: 105-108)
49. 'Çıkmaz sokak' ifadesi, önde gelen kozmolojist Jim Peebles'ın ortaya koyduğu bir tanımdır: 'General Relativity at 100: Celebrating Its History, Influence and Enduring Mysteries', *IAS Newsletter*, Güz 2015, s. 4: https://www.ias.edu/sites/default/files/documents/publications/ILfall15__0.pdf
50. Feynman'dan karısına, 29 Temmuz 1962, M. Feynman (ed.), (2005: 137). Konferansla ilgili detaylar, DARCHIVE, S2, B52, F28

ilgiyi artırmak açısından öncü rol üstlendiler: bu kişiler, daha öncesinde Feynman'ın doktora hocası olan John Wheeler ve usta deney adamı Robert Dicke'ydi; Dicke'nin öğrencileri, kendilerine "Dicke kuşları" diyordu.[51] Hâlâ uzun emekleme döneminden çıkmayı bekleyen Einstein'ın yerçekimi teorisi, aşama aşama ana akım fiziğin bir parçası haline geldi. Teorisyenler, teoriyi geliştirmek açısından büyük aşama kaydetmişlerdi, deney araştırmacıları ise sonunda teoriyi daha enine boyuna test etme imkânına sahipti; örneğin temel denklik prensibine dair ultra hassas kontroller yapabiliyorlardı.[52]

Feynman'ın düşüncesine göre fizikçilerin yerçekimini daha iyi anlayabilmeleri için gökbilimi alanında yeni veri akışı zaruriydi; gerçi bu veya başka herhangi bir konuda matematikçilerle işbirliği yapmaya asla ilgi göstermedi. Wheeler ise daha geniş çaplı bir yaklaşım benimsedi; fizikçilerin, matematikçilerin yardımından gayet güzel faydalanabileceği düşüncesine sahipti. Problem, fizik ve matematik camialarının ayrı düşmüş olmasıydı; modern matematiğin fiziğe katkısını birçok meslektaşından önce idrak etmiş olan büyük fizikçi Cecile de Witt de bu tespite katılıyordu. Wheeler ve de Witt, matematikle fiziğin büyümesi ve çeşitlenmesi neticesinde, bu iki disiplinin "iki farklı kültür" halinde ayrımından çok daha kötü bir durum ortaya çıktığını düşünüyorlardı: birkaç yıl öncesinde kendini fazla büyük gören yazar C. P. Snow tarafından tanımlandığı şekliyle, beşeri bilimlerle bu bilimler arasında hizipleşme ortaya çıkmıştı. Wheeler ve de Witt, matematik ve fizik alanlarında yaklaşık "yüz farklı kültür" olduğunu düşünüyordu: "Babil Kulesi'nin modern versiyonu" tarzında bir durum söz konusuydu. 1966 yılında bu konuda bir şeyler yapmaya karar verdiler, sonraki yaz iki alandan yaklaşık otuz genç uzmanı bir araya getiren bir toplantı organize ettiler.[53]

Sonuç olarak 1967 yılında Temmuz ayı ortalarından Ağustos sonlarına kadar Battelle Seattle Araştırma Merkezi'nde bir top-

51. Yerçekimi teorisi konusunda Wheeler'ın yaklaşımı için: Wheeler ve Ford (1998: 250-263); Dicke ve kuşları konusunda: https://www.nap.edu/read/9681/chapter/7

52. Dicke (1959: 623-624)

53. Battelle Toplantı tarihleri: 16 Temmuz-31 Ağustos 1967. Bkz. De Witt ve Wheeler (ed.), (1968: ix-xiii)

lantı gerçekleşti; birçok fizikçi ve matematikçi kendilerini uzun zamandır ayrı tutan bariyerlerin bazılarını yıkmaya başladı. Tesadüfen tüm bunlar yüz binlerce insanın hippi kıyafetleri içinde San Francisco'daki bir semtte toplandığı Hippi Yazı'nda gerçekleşti. Hippilerin toplandığı bölge, fizikçi ve matematikçilerin daha sınırlı bir karşılıklı aşk yaşadığı Seattle'ın 1300 km kadar güneyindeydi.

De Witt ve Wheeler tarafından davet edilen uzmanlar arasında, kozmoloji alanında çalışan hayal gücü en yüksek araştırmacılardan ikisi de vardı: Londra'da yaşayan otuz altı yaşındaki matematik profesörü Roger Penrose ve doktorasını henüz bitirmiş olarak Cambridge'de çalışan özgüveni çok yüksek genç yıldız Stephen Hawking. Hawking toplantıya katılamamıştı, dolayısıyla toplantıda modern kozmolojik araştırmaların sesi olmak görevi Penrose'a düştü. Penrose da Einstein'ın yerçekimi teorisinin güncel uygulamaları üzerine bir dizi konuşma yaptı. Teoriyi belli bir tür objeye uygulamak konusunda uluslararası bir şöhreti vardı; onun bu uygulamasında yerçekimsel alan o kadar güçlüydü ki ne ışık ne de madde çekimden kaçabiliyordu. Daha sonraları kara delik olarak bilinen buna benzer objeler on sekizinci yüzyılda Pierre-Simon Laplace ve İngiliz doğa felsefecisi John Michell tarafından da tasavvur edilmişti, ancak Einstein'ın yerçekimi teorisi bunlara dair çok daha canlı ve matematiksel açıdan hassas bir vizyon sunuyordu.[54]

Penrose, yerçekimi alanlarının kıvrılma ve bükülmelerini ortaya koymak için yeni topolojik teknikler kullanarak, kara delik bölgelerinde göründüğü kadarıyla tek tip olan uzay-zaman davranışını inceledi. Meslektaşlarından birkaçı onun bu yaklaşımını kabul etti, ama çoğu için mantık dışıydı ve Penrose öfkeli matematikçileri hesaplamalarının meşru olduğuna ikna etmek için çabaladı. Penrose'un hatırladığı kadarıyla aralarında Hawking'in de olduğu kozmologlar daha uzak görüşlüydü: "Benim argümanlarım uzay-zamanda makul şekilde bölgesel

54. Robert Oppenheimer ve öğrencisi Hartland Snyder, modern kara delikler teorisi hakkındaki ilk makaleyi 1 Eylül 1939'da yayımladılar: Jogalekar, A. 'Oppenheimer's Folly', Haziran 26, 2014: https://blogs.scientificamerican.com/the-curious-wavefunction/oppenheimer-8217-s-folly-on-black-holes-fundamental-laws-and-pureand-applied-science/

olan objeler için geçerliydi, ama Hawking fikirlerimi Big Bang için geçerli olabilecek şekilde genelleştirdi."[55]

Penrose ve Hawking ilk olarak 1965 yılında bir araya geldiler. O döneme kadar benzer kozmolojik problemler üzerinde birbirleriyle bağlantıları olmadan ve farklı yollarla çalışıyorlardı; yaklaşımlarının birleşmesi ancak iki yıl sonra olabildi. Penrose, Battelle toplantısında teorik kozmoloji üzerine bir dizi seminer verdi ve konuşmasını hazırlarken bir atılıma imza attı. Bir gece geometri üzerine neredeyse şafağa kadar uzun uzun düşünürken, yalnızca o güne kadarki algısını genişletmekle kalmayan, aynı zamanda Hawking'in son zamanda yayımladığı tüm sonuçları kapsayan güçlü bir teorem buldu. Penrose'un teoremi kendisinin ve başkalarının uzun zamandır şüphelendiği noktayı ispatlıyordu: Einstein'ın teorisinin ortaya koyduğu uzay-zaman tanımı belli matematiksel tekillikler içeriyordu. Böylesi noktalarda teorinin matematiği bozuluyordu ve hem uzay zamanın bükülmesi hem de bölgenin enerji yoğunluğu son derece büyük olmakla kalmıyor, aynı zamanda sonsuz oluyordu. Bazı uç koşullarda uzay zaman kavramının yıkıldığına dair ilk işaretti bu.

Penrose, Birleşik Krallık'a dönmesinin ardından Hawking'in de kendi çalışmalarında aynı sonucu bulduğunu duydu. Neticede farklı şekillerde uygulanabilen ve Einstein'ın yerçekimi teorisindeki tekillikler hakkında o güne kadarki tüm bulguları açıklayan klasik bir teorem ortaya çıktı.

Penrose ve Hawking'in araştırmaları, Einstein'ın yerçekimi teorisinde görülen 1960'lar rönesansının ilk parlak noktalarından biriydi. Gökbilimciler kara deliklerin var olduğunu tasdik etmiş olmasa da, teori tarafından bu objelere dair verilen tanım o kadar açık ve matematiksel olarak o kadar kesindi ki, şüphecilikle geçen senelerin ardından birçok teorisyen kara delikler hakkında sanki Ay kadar gerçeklermiş gibi konuşmaya başladı. Kara deliklerin cazip unsurları Hindistan asıllı Amerikalı astrofizikçi Subrahmanyan Chandrasekhar tarafından güzel özetlenmiştir: Chandrasekhar, daha sonraları yaptığı açıklamada, kara deliklerin evrendeki en sade ve en kusursuz makroskobik objeler olduklarını söyleyecekti, böyleydiler çünkü "oluşum-

55. Penrose'dan gelen e-mail, 1 Temmuz 2018

larında yer alan yegâne unsurlar bizim kafamızdaki uzay ve zaman kavramlarıdır" diyordu.[56] Bu eşsiz ölçüde "net" ortam (örneğin atomların iç yapısına göre çok daha az karmaşıktı), kara delikleri, güçlü yerçekimi alanlarında madde ve radyasyonun davranışı hakkındaki düşünce deneyleri için fizikçilerin favori laboratuvarı haline getirdi. Einstein'ın genel izafiyet teorisi kendi kendini test etmek adına ideal bir ortam yaratmıştı.

*

Roger Penrose, matematik ve fizik alanlarına başka katkılar yapmaya devam etti; tüm bu başarıları geometrik imgeleminin ürünüydü. 1967 yılında teorisyenlerin kuantum mekaniğini ve Einstein'ın yerçekimi teorisini birleşik bir şekilde anlamasını sağlayacağını umduğu yeni bir çerçeve sundu. Bu çerçeve için kullandığı matematiksel objelere "twistor" adını vermişti; tabiatı anlamak yönünde yeni bir yaklaşımın temelini oluşturma ihtimalinin olduğunu düşünüyordu.[57] İnce ruhlu Penrose, twistor'larını "çocukları" olarak görüyordu, onları gözlemek ve onlarla bir şeyler yapmak onun için zevkti; ama başkaları bunları pek kullanışlı bulmuyordu.[58] Penrose'un açıklamasına göre, bu twistor'lar matematiksel açıdan gerçekten temel teşkil edebilecek bir uzay oluşturur –bildiğimiz dört boyutlu uzay zaman buradan doğmaktadır–.[59]

Bu konsept, zorlu bir kavramdır diyebiliriz. Matematiksel açıdan yetkinlik sahibi bir parçacık fizikçisi bile bunu anlasa bile enine boyuna kavramayı güç buluyordu, ayrıca bu yönde belirgin bir ihtiyaç da yoktu; dolayısıyla bu fikrin ana akım bilimin bir parçası haline gelmesi zaman aldı.

Penrose yolundan şaşmadı. Fikrini tevazu ve şevkle tanıtarak başarıya ulaştı, tüm dünyada konu hakkında sayısız konuşma yaptı ve twistor'lara dair bir okul bile kurdu. "Daha en başından

56. Chandrasekhar (1992: Prologue)
57. Penrose, R., 'On the Origins of Twistor Theory', yer aldığı çalışma, *Gravitation and Geometry, a Volume in Honour of I. Robinson*, Bibliopolis, Naples (1987): http://users.ox.ac.uk/~tweb/00001/
58. Penrose'la söyleşi, 29 Mayıs 2014
59. Penrose ve Lionel Mason'dan gelen e-mail, 25 Haziran 2018. Bazı kişiler, Penrose'un fiziksel twistor tanımını daha kolay bulmaktadır: "uzay-zamanda hareket eden kütlesiz ve dönen bir parçacığın geçmişini açıklar".

beri bu fikrin çok güzel olduğundan emindim, çünkü o kadar güzeldi ki, doğal dünyanın büyük planı içinde kendine yer bulmaması imkânsızdı" diyecekti bana daha sonraları.[60]

Roger Penrose'un çalışması, hem saf matematik hem de teorik fizik açısından havada değişim kokusu olduğunun güçlü bir göstergesiydi. 1960'larda twistor'lar ve Einstein'ın yerçekimi teorisi hakkında yaptığı araştırmada, fizik alanında yeni fikirler geliştirmek açısından modern matematiğin elzem olduğunu, teorik fiziğin de matematik alanında yeni düşünceleri tetikleyebileceğini tekrar tekrar ortaya koydu. Uzun ayrılık kesinlikle daha fazla devam edemezdi.

*

1960'lar boyunca Freeman Dyson matematikle fizik arasındaki ilişkinin durumuyla gitgide daha fazla ilgilenir oldu. 1971 yılında, Amerikan Matematik Topluluğu onu sonraki yıl matematik ve uygulamaları hakkında bir seminer vermeye davet ettiğinde, bu alandaki kaçan fırsatlar hakkında konuşmaya karar verdi.[61]

Yaklaşık olarak o dönemde Dyson, kendi odak noktasını hesaplamalar yapmaktan uzaklaştırıp bilim hakkında yazmaya doğru kaydırmaya başlamıştı. Genellikle kışkırtıcı ölçüde gelenek karşıtı bir tonda yazdığı akıcı ama keskin makaleleri kısa sürede geniş bir takipçi kitlesi kazandı. Tüm bu erdemleri 17 Ocak 1972'de Las Vegas Sahara Otel'de yaklaşık 1500 matematikçiye verdiği seminerde sergileme fırsatı buldu. Fizik matematik ayrılığı konusunda fizikçi meslektaşı Res Jost'tan alıntı yaparak başladı konuşmasına: "Böylesi ilişkilerde genellikle görüldüğü gibi iki taraftan biri daha çok etkilenmiştir." Dyson, son yirmi yılda matematik altın çağına doğru hızla ilerlerken, "teorik fiziğin biraz pespaye ve tatsız hale geldiği" şeklinde Jost'un yaptığı saptamanın doğru olduğunu düşünüyordu.[62]

Dyson yeni deneysel sonuçlara dikkat etmenin önemine ciddiyetle inanıyorduysa da fizikçi ve matematikçilerin birbirle-

60. Penrose'la söyleşi, 29 Mayıs 2014
61. Dyson (1972); Pitcher, E. ve Ross, K. A., 'The Annual Meeting in Las Vegas', *Bull. Amer. Math. Soc.*, Vol. 78, No. 4, s. 497-507 (1972): https://projecteuclid.org/euclid.bams/1183533878
62. Dyson (1972: 635)

rinin çalışmalarına da dikkat kesilmelerinin olumlu olacağını düşünüyordu, hem de hemen. Fizikçilerin ve matematikçilerin kaydettiği ilerlemelerin "birbirimizi dinlemek konusundaki isteksizliğimiz dolayısıyla ciddi ölçüde sekteye uğradığı" vakaları ortaya çıkararak argümanını ifade etti. Bunun en belirgin örneği de Maxwell'in elektromanyetizma denklemleriydi. Dyson'ın düşüncesine göre eğer matematikçiler on dokuzuncu yüzyılın sonlarında Maxwell'in teorisine ilgi göstermiş olsaydı çok önemli kazanımlar ortaya çıkabilirdi: "yirminci yüzyıl fizik ve matematiğinin büyük bölümü on dokuzuncu yüzyılda yaratılmış olabilirdi".[63] Bunun belki de en iyi örneğinin özel izafiyet teorisi konusunda matematikçilerin fizikçilere üstün gelmesi olacağını öne sürüyordu. Dahası, matematikçiler Maxwell'in denklemlerinin bütünüyle keşfedilememiş simetrilerine daha yakından eğilmiş olsalardı, genel izafiyet teorisine (Einstein'ın yerçekimi teorisine) "giden yolu kısaltmış" olabilirlerdi.

Konuşması esnasında Dyson, matematiğin grup teorisi olarak bilinen dalının konusu olan simetrilerin hem matematikçiler hem de fizikçiler için öneminin altını çiziyordu. Grup teorisi, çoğu fizikçinin uzun süre gereksiz bir komplikasyon veya hatta kendi konularında "bir veba" olarak gördükleri, ama sonra vazgeçilmez bir değer olduğunu anladıkları bir başka matematiksel unsur klasiğiydi.[64] Grup teorisi, on dokuzuncu yüzyılın başlarında diferansiyel denklem çalışmalarıyla ortaya çıkmıştı, daha sonrasında da matematiksel teorilerin simetrilerini analiz etmek açısından son derece uygun olduğu anlaşıldı. Matematikçi Hermann Weyl ve fizikçi Eugene Wigner, 1920'lerde grup teorisini kuantum fiziğine uyguladılar; ama önde gelen teorisyenlerin birçoğu bunu önemsiz sayıyordu: Einstein teoriyi sadece bir detay olarak değerlendirip görmezden geldi, Pauli de "grup zararlısı" olarak adlandırdı.[65] Kırk yıl sonrasında ise

63. Dyson (1972: 639)
64. Sternberg (1994: xi)
65. Wigner (1992: 116-117). Paul Dirac, grup teorisine daha ilk başlardan beri ilgi göstermiş az sayıda teorisyenden biridir: kendini Grup Grubu olarak adlandıran Cambridge kulübünde bu konuyu sürekli olarak ele almıştır. Bkz. DARCHIVE: Invitations & programs, S2, B88, F6: 'Permutations of Matrices and Quantum Mechanics', 27 Kasım 1930

teorinin kesinlikle bir kımıl zararlısı olmadığı ortaya çıktı: her genç teorik fizikçinin eğitiminin vazgeçilmez bir parçasıydı artık.

Grup teorisi, bilhassa protonların, nötronların ve büyük kuvvetlere maruz kalan diğer benzer partiküllerin özelliklerini ve davranışlarını anlamak açısından faydalı olduğunu ispatladı (bu partiküllerin hepsi birden hadronlar olarak bilinmektedir, Yunanca "kalıplı" veya "kalın" anlamına gelen *hadros* kelimesinden gelir). Kısmen grup teorisine dayanan argümanlar, fizikçi Murray Gell-Mann'ı ve George Zweig'ı (birbirlerinden haberleri olmadan) hadronların bileşenlere sahip olduğunu önermeye itmiştir: quark olarak bilinen temel partiküller ve bunların anti-partikülleri olan anti-quarklar. Bilim insanları bu fikri kullanarak partiküllerin gözlemlenen özelliklerini kolaylıkla açıklamışlar ve hatta birçok "yeni" partikülün varlığını –doğru şekilde– tahmin etmişlerdir. Ancak tekil olarak quark ve anti-quarkların niçin yalnız başlarına ortaya çıkmadıklarını açıklayamamışlardır. Bu partiküller yalnızca protonlar, nötronlar ve diğer hadronlar içinde var olur gibi görünüyordu, dolayısıyla birçok fizikçiye göre quarklar bazı teorisyenlerin hiperaktif hayal güçlerinin ürünleriydi.

1972 yılı itibarıyla büyük kuvvete dair herhangi bir teori yoktu ve Dyson bunun en azından bir yüzyıl daha keşfedilemeyeceği tahminini yürütecek kadar ileri gitti.[66] Fizik alanında böylesi tahminlerde bulunmak riskli bir iştir ve bu tahminin de istisna olmadığı ortaya çıkmıştır. Bir yıl içinde Dyson'ın "Kaçan Fırsatlar" seminerinin anlamını yitirdiği bir durum ortaya çıktı: teorik fizik ile saf matematik arasındaki uzun ayrılık neredeyse hiç kimsenin öngöremediği kadar ani şekilde son buldu.

66. Hoddeson vd. (ed.), (1997: 200)

6
devrim

"Parçacık fizikçileri nihayet keşfe açık olgunlukta bir matematikle ifade edilmiş somut bir teoriye kavuşmuştu."

David Gross, 2014

12 Kasım 1974 Salı günü, öğle yemeğimi yedikten dakikalar sonra kendimi bir devrimin içinde buldum. Liverpool Üniversitesi'nde teorik fizikçilerin ortak odasında sandviçlerimi bitirdikten sonra bir koridora doğru yürüdüm ve bazı kıdemli meslektaşlarımla karşılaştım; belirgin bir heyecan içindeydiler. Kendi aralarında konuşuyorlar, ara ara gülüyorlardı; konu, yeni keşfedilmiş bir atom altı parçacık ve bunun tuhaf görünen özellikleriydi: benzer partiküllere göre yaklaşık üç kat daha ağırdı ve beklenenden üç bin kat daha uzun yaşam süresi vardı.[1] Partikül –daha sonraları J/ψ olarak adlandırılacaktı–, ABD'de birbirlerinden bağımsız olarak ve binlerce kilometre uzakta çalışan iki ayrı araştırmacı grup tarafından keşfedilmişti. Birkaç gün sonra teorik fizik departmanımıza gelen Amerikalı bir ziyaretçi *New York Times*'ın güncel bir ön sayfasının kupürünü getirdi. Gazete, "teorisyenlerin, bu parçacığı temel parçacıkla-

1. Deney gruplarının liderleri California'daki Stanford Lineer Hızlandırıcısından Burton Richter (parçacık ψ olarak biliniyordu) ve Long Island Brookhaven Ulusal Laboratuvarından Samuel Ting'di (parçacığın ismi burada *J* idi). Nihayetinde parçacık *J*/ψ olarak adlandırılır hale geldi.

ra dair mevcut bilgimiz çerçevesine uydurmak için çılgın gibi çalıştıklarını" belirtiyordu.[2]

Bu keşif, fizikçilerin Kasım Devrimi olarak adlandırdıkları gelişimin bir parçasıydı. Bunun yanlış bir adlandırma olduğunu ancak daha sonraları anlayabildim: o sonbaharda yaşananlar, ölçüm teorilerinin atom altı dünyada değerlerini kanıtladıkları uzun süreç içerisinde en dramatik bölümü oluşturuyordu. Fizikçiler alanlarındaki sürpriz gelişmeleri, genellikle ani, radikal değişimlerle veya bir rejimin yerine diğerinin getirilmesiyle alakalı olan "devrim" kelimesiyle adlandırmaya fazla heveslidir. Fizikçilerin devrim olarak adlandırdığı gelişmelerin çoğu, daha ziyade yoldaki keskin virajlara benzetilebilir, önümüzde yeni manzaralar açarlar, bir önceki manzara yolcuların zihninde hızla arka plana itilir.[3]

Kasım 1974 sonrasında atomları biçimlendiren bütün güçlerin bir ölçüm teorisiyle tanımlandığı aşikâr hale geldi: ölçüm teorisi, James Clark Maxwell'in elektrik ve manyetizma açıklamasının doğrudan türevi olan bir tür alan teorisidir. Modern alan teorisi, Maxwell'in hiç bilmediği fikirleri –kuantum mekaniği ve özel izafiyet teorisi– barındırır ve denklemleri de Yang ve Mills'in ortaya koyduğu simetriye sahiptir; Young ve Mills'in bu tahminleri, Maxwell'in denklemlerini genelleştirme girişimlerinin bir parçasıdır, Maxwell'den ilham almışlardır. Muhteşem İskoç'un ölümünden neredeyse bir yüzyıl sonra bile analizleri meyve vermeye devam etmiştir.

Modern ölçüm teorilerinin matematiği, çoğu profesyonel matematikçiye ilk bakışta ilgi çekicilikten uzak görünüyordu, ama bu düşüncenin dar görüşlü bir yaklaşım olduğu ortaya çıktı. Matematik, yaratıcı teorisyenlere gerçek dünya hakkında birçok hassas ve şaşırtıcı tahmin yapma imkânı veriyordu, örneğin yeni partikül tipleri ve hatta atom altı olaylar gibi. Birçok önde gelen teorisyen bu matematiksel içerikten tam kapasite faydalandı, etkileyici sonuçlara ulaştı. Buna çok benzer bir durum, uzun süre yerçekimi teorisi için geçerli olmuştu; Penrose, Hawking ve diğerleri heyecan verici ve hassas tahminler yapmak için

2. 'New and Surprising Type of Atomic Particle Found', *New York Times*, 17 Kasım 1974, s. 1
3. Heilbron (2013: 8)

yerçekimi teorisini kullanmışlardı, teorinin matematiksel temelinden faydalanıyorlardı. Dolayısıyla şurası açık ki teorik fizikçilerin ve matematikçilerin yeniden bir araya gelmek adına iyi sebepleri vardı.

*

Tüm şatafatına rağmen, başından ortasına kadar 1970'ler birçok açıdan tat kaçırıcı bir dönemdi. Neredeyse her gün gazetelerde Orta Doğu'da ve Güneydoğu Asya'da gerçekleşen savaşları, Amerika'daki Watergate skandalı sonrası esen kötümser havayı ve ekonomisi bocalayan İngiltere için sıkça söylendiği üzere "Avrupa'nın hasta adamının" feryatlarını okuduk.[4] Parçacık fiziği dünyasına geri dönmek beni çoğu zaman rahatlatıyordu: belli bir zümreye hitap eden ruhsuz bir disiplin olduğu yönündeki şöhretinin aksine, bu alan, kafa karışıklığıyla geçen on yılların ardından bir düzen ortaya çıkarken coşku ve iyimserlikle parlıyordu.

Proton ve nötronları atom çekirdeğinde bir arada tutan büyük güce dair nihayet bir alan teorisine sahip olmanın fizikçileri memnun ettiğini görebiliyordum. Oysaki Freeman Dyson'ın böylesi bir teorinin en az bir yüzyıl daha keşfedilemeyeceğini söylemesinin üzerinden yalnızca iki yıl geçmiş durumdaydı.[5] Yeni teori, nükleer parçacıklar arasındaki uzun zaman önce tanımlanmış güçlü etkileşim hakkında değildi, bileşenleri olan quarklar arasındaki güçlerle ilgiliydi; quarklara da gluon adı verilen, kütlesi olmayan başka parçacıklar aracılık ediyordu. Gluonlar, gerçek dünyada görünürdeki yoklukları Yang ve Mills'i küçük düşürmüş olan tipte parçacıklara örnek teşkil ediyordu: böylesi parçacıklar doğrudan tespit edilebilir olmasalar da artık teoride hayati bir rol oynuyorlardı.

Büyük güç teorisinin kilit özelliği 1973 yılında –Kasım Devrimi'nden önceki yıl– keşfedilmişti ve çoğu fizikçiyi şaşkına çevirmişti. Bu yeniliği getirenler, Amerikalı teorisyenler David Gross, David Politzer ve Frank Wilczek'ti; daha sonra "gluonlar" olarak adlandırılan parçacıkların aracılık ettiği herhangi iki quark arasındaki büyük gücü açıklayan Yang-Mills teorisinin

4. www.economist.com/blogs/buttonwood/2017/07/1970s-show
5. Hoddeson vd. (ed.), (1997: 200)

önemli bir özelliğe sahip olduğunun altını çiziyorlardı: quarklar birbirlerine yakın olduklarında neredeyse serbestmiş gibi davranıyor olmalıydılar. Stanford Lineer Hızlandırıcısındaki araştırmacılar tarafından nükleer parçacıklar hakkında yapılan şaşırtıcı gözlemler böylece birdenbire bir bulmaca olmaktan çıkıp quark ve gluonlara dair bir alan teorisi için açık bir kanıt haline gelmiş oluyordu.

Quarklar nükleer uzaklık skalasında geniş şekilde ayrıldıklarında ne olduğunu anlamak çok daha güçtü.[6] Aralarındaki büyük güce ortam sağlayan gluonlar kütlesiz görünmekle (tam da Yang ve Mills'in öngördüğü gibi) kalmıyordu, aynı zamanda quarklar arasındaki büyük güç de o kadar büyük hale geliyordu ki, asla bütünüyle birbirlerinden ayrılamıyorlardı. Ancak teorisyenler büyük oranda teorinin matematiksel karmaşıklığı dolayısıyla quarkların kalıcı olarak hapsedilmiş olduklarını ispatlayamıyordu. Bu "quark hapsetme problemi", fiziğin karşısına çıkan en büyük güçlüklerden biriydi ve hâlâ da öyle olmaya devam etmektedir. Bununla beraber neredeyse tüm fizikçiler, quarkların nükleer bir parçacık içinde bir proton gibi resmedilmelerini kabul etmektedir: quarklar, hem insaniyeti hem de etkinliği olağandışı olan bir hapishanenin esirleri gibi tasvir edilebilir: esirler neredeyse bütünüyle serbest hareket ederken kesinlikle kaçamamaktadır.

Güçlü etkileşime dair bu yeni anlayış şekil alırken, fizikçiler bir başka ölçüm teorisinde hızlı bir ilerleme içindeydi; bu teori, atomların iç işleyişini de idare eden zayıf ve elektromanyetik güçlere dair ortak bir çerçeve sunar durumdaydı. Bu güçleri aynı teori çerçevesinde tanımlamak, kuvvetleri ve etkinlik gösterdikleri mesafeler arasındaki büyük farklar dolayısıyla oldukça güçtü. Muhtemel bir şema ilk olarak Amerikalı Steven Weinberg ve Pakistanlı Abdus Salam tarafından 1967 yılında ortaya atıldı; modifiye edilmiş bir Yang-Mills teorisi kullanmışlar ve Sheldon Lee Glashow ve diğer bilim insanları tarafından sağlanmış daha önceki katkılardan faydalanmışlardı. Daha sonraları adlandırıldığı şekliyle Weinberg-Salam teorisi, birçok fizikçinin hantal bulduğu bir simetri-kırıcı mekanizma sunuyordu, gerçi

6. Bu parargraftaki gelişmeler, Gross ve Wilczek'in analizlerini ve bunlardan bağımsız olarak Weinberg'i takip etmektedir.

sol-sağ simetrisinin neden bozulduğuna dair ortaya koyduğu açıklama, Lee ve Yang'ın öngörmüş olduğu şekilde atom altı parçacıkların zayıf güç aracılığıyla etkileşim içinde olmaları koşulunu gerektiriyordu.

Weinberg-Salam teorisi, bu âna kadar gözlemlenmemiş –ve olağandışı ölçüde ağır– üç parçacığın var olduğu tahminini yürütüyordu; bu parçacıklar zayıf güce aracılık ediyordu ve deney araştırmacıları tarafından keşfedilebilir durumda olmalıydı. Teori, bunun dışında tüm evrene yayılan o âna kadar gözlenmemiş bir alanın varlığını da gerektiriyordu; bu alan, 1964 yılında İngiliz teorisyen Peter Higgs ve ondan ayrı olarak Belçikalı François Englert ve Amerika doğumlu Robert Brout tarafından tasarlanmış olan simetri-kırıcı bir mekanizmanın neticesi olarak öngörülüyordu.[7] Atomaltı etkileşimlere dair böyle bir mekanizma ortaya koyma gereksinimi, süper-iletken katılar teorisiyle paralellik kurulması neticesinde doğmuştu. Peter Higgs'in daha sonra altını çizdiği gibi, fiziğin bu alanından gelen fikirler, atom altı parçacıklara ait standart teorinin bu hayati parçasından neredeyse bütünüyle sorumluydu.[8] Evrene yayılan alanla ilişkili parçacık Higgs'in adıyla anılmaya başlayacaktı, çünkü Higgs, bu fikrin doğru olması halinde böylesi bir parçacığın var olması gerektiğini söyleyen ilk kişiydi; gerçi araştırmacıların bunu tespit etmesi büyük bir güçlük olarak kalmaya devam ediyordu.

Fizikçiler, Weinberg-Salam teorisini senelerce görmezden geldiler ve bunun için iyi bir sebepleri de vardı. Teoriyi kullanarak yapılan hesaplamalar sonsuzluk değerleri nedeniyle sekteye uğruyor, anlamlı tahminler yapmayı imkânsız hale getiriyordu (uzun süre kuantum elektrodinamiğini zehirlemiş olan problemleri hatırlatır). Weinberg-Salam teorisi adına yeni umutlar 1971 yılında Hollandalı lisans öğrencisi Gerard't Hooft'un teorinin kusursuz ölçüde mantıklı olduğunu söylemesiyle oluştu. Hooft, sonsuzluk değerlerinin sistematik olarak ortadan

7. Close (2013: Chapter 9). 5. bölümde gördüğümüz gibi, Yang ve Mills, kendi ölçüm teorilerindeki güç-taşıyıcı parçacıkların sıfır kütleye sahip olduğunu düşünüyorlardı. Englert, Brout ve Higgs, Yang-Mills alan teorisindeki güç-taşıyıcı parçacıkların kütle sahibi olmasına imkân veren bir mekanizma önerdiler.

8. Peter Higgs'le söyleşi, 1 Kasım 2018. Standart Model'in geçmişine dair bir analiz için: Higgs, P. W. 'Maxwell's Equations: The Tip of an Iceberg', *Newsletter of the James Clerk Maxwell Foundation*, s 1-2, No. 7 (Sonbahar 2016)

kaldırılmasını sağlayan bir prosedür keşfetmişti. Hooft, bunu başarmak için Feynman'ın atom altı parçacıklarla baş edilmesini sağlayan "toplam geçmişler" metodunu kullanıyordu. Bu metot, Weinberg'in pek güvenmediği bir teknikti, hatta ilk anda verdiği sonuca inanmamıştı.[9] Ama Hooft haklıydı. Metodun duyulmaya başlamasıyla birlikte Weinberg-Salam teorisine olan ilgi patlama yaptı ve deneylerin, tahminlerini destekleyen sonuçlar vermeye başlamasının ardından Weinberg'in makalesi modern bilimdeki en sık alıntılanan yayınlardan biri oldu.[10]

Ölçüm teorilerinin oluştuğunu görmek can verici bir deneyim oldu. Her ne kadar detayları çetrefilli olsa da bunlar teorisyenlerin ve araştırmacıların sürekli olarak birbirlerini zorladıkları, tam da beklediğim gibi yapılmış bilimsel araştırmalardı. Kasım Devrimi'ni tetiklemiş olan J/ψ parçacığının keşfinin kesinlikle sürpriz olmayacağına dair teorisyenlerin geliştirdiği kurşun geçirmez açıklamayı görmek heyecan vericiydi. J/ψ parçacığı, anti-parçacığına sıkı sıkıya bağlanmış ve daha önce gözlenmemiş bir tür quarktan meydana geldiği varsayılarak açıklanabiliyordu.[11] Ancak ölçüm, teorisyenlerin tahminleriyle sonuçların tamamı uyuşur halde değildi. Teoriyle deney sonuçları arasındaki bazı uyuşmazlıklar, yıllarca teori hakkında şüpheye ve belirsizliğe neden oldu.

1976 yılı itibarıyla neredeyse tüm fizikçiler, bütün temel atom altı parçacıkları ve bunlara etki eden büyük, zayıf ve elektromanyetik kuvvetleri açıklayabilen sağlam bir teoriye sahip olduklarına inanıyorlardı. Teori o kadar ikna ediciydi ve atom altı parçacıklar hakkında yapılmış binlerce deneye dair teorinin açıklamaları o kadar başarılıydı ki Standart Model olarak bilinir hale geldi. O dönemde bu isim için muhtemelen biraz erkendi, çünkü araştırmacılar modelde sunulan parçacıkların bazılarını henüz gözlemlememişti (zayıf ve büyük güçleri taşıyan parçacıklar ve Higgs parçacığı). Ama model, deneysel verileri açıklama konusunda Napolyon ve Victoria dönemlerinden kalma daha

9. 't Hooft (1971: 168); Weinberg'le söyleşi, 30 Haziran 2017
10. Weinberg (1993: 96)
11. Büyük güç kısa mesafelerde devre dışı kaldığı için, parçacıklar birbirlerine fizikçilerin beklediğinden daha zayıf şekilde çekilir, bu da, J/ψ'nin ömrünün neden bu kadar uzun olduğunu açıklar.

önceki Standart Modellerden şüphesiz çok daha başarılıydı. Parçacık fiziği Standart Modeli, önceki modellere göre çok daha hassas formüle edilmişti ve çok daha iyi temellendirilmişti, çünkü kuantum mekaniğinin ve özel izafiyet teorisinin granit temelleri üzerine kuruluydu; ikisi de birbirinden ayrı sayısız deneyle defalarca teyit edilmişti.

Sonraki on yıllar içinde Standart Modelin, atom altı dünyaya dair en coşkulu destekçilerinin bile beklediğinden daha iyi bir açıklama getirdiği ortaya çıktı. Ancak daha en başından beri modelin bazı zayıf noktalarının olduğu açıktı. Örneğin erken evrende karşılaşılan, devasa enerjilerle hareket eden parçacıklara uygulanamıyordu ve temel parçacıkların kütlelerinin niçin bu kadar değişkenlik gösterdiğini açıklayamıyordu. Belki de hepsinden kötüsü, model, değerleri açıklanamayan en az on dokuz nicelik içeriyordu. Teorinin birçok güçlü yanı olmasına rağmen, örneğin Einstein'ın yerçekimi teorisi gibi bir kaçınılmazlığa sahip değildi. Teorisyen David Gross'un söylediği üzere, Standart Model "açıkçası yeterince güzel değildi".[12]

*

Freeman Dyson, önde gelen bilim insanlarını entelektüel alanda yüksekten uçan kuşlara ya da bir problemden bir sonrakine sıçraması olası, ayağı yere basan kurbağaya benzetir. Dyson'a göre Einstein ve Dirac açıkça kuş konumundaydı, kendisi ise bir kurbağaydı ve Feynman da "kuş olmayı isteyen bir kurbağaydı."[13] Dyson'ın bakış açısına göre her akademik kuruluş iki tip için de yer ayırmalıydı, çünkü fizik ekosisteminde eşit değerdeydiler.

Dyson'ın bu sınıflandırması 1970'lerde fizik camiasına dair ilk izlenimlerime paralel görünmektedir. Ben de birçok kurbağayla tanıştım ve birlikte çalıştım –ve birçoğu da fiziğe faydalı katkılar yaptılar–, gerçi sayıları kuşlara göre çok fazlaydı, kuşların daha ender olmaları onlara hayranlığın büyümesine yol açıyordu. O dönemde en önde gelen kuşlar arasında Utrecht'te yaşayan Hollandalı Gerard 't Hooft ve Moskova'da yaşayan Sasha Polyakov vardı. Yıllarca ölçüm teorileri sahasının üzerinde uçmuşlardı, sık sık neredeyse aynı anda birbirine benzer parlak fikirlerle

12. Gross (1988: 8373)
13. Dyson'la söyleşi, 14 Ağustos 2015

çıkageliyorlardı: farklı yönlerden yaklaştıklarında bile fiziğin sınırlarını aynı oranda zorluyorlardı.

Utrecht'te yaşayan Hooft doktora öğrencisiyken, ölçüm teorilerinin sonsuzluk değerleriyle lekelenmemiş hesaplamalar için kullanılabileceğini gösterdikten sonra fizikçiler arasında ün kazanmıştı. Kısa sürede uluslararası konferanslarda yıldız mertebesine ulaştı; bu toplantılarda dinleyicileri biraz afallatsa da düşünmeye sevk eden konuşmalarıyla tanınıyordu. Fiziğe kendi tarzıyla yaklaşıyordu, diğer bakış açılarına kayıtsızlığı konusunda ve bir kraker kadar kuru tarzıyla Dirac'la benzeşiyordu. Polyakov oldukça farklıydı: teklifsiz ve cin gibiydi, yanına yaklaşan potansiyeli yüksek tüm fikirlere ilgi gösteriyordu. Demir Perde'nin arkasında bir ülkede yaşadığından toplantılara katılmak için Batı'ya pek ender geliyordu, ama bu toplantılarda fikirlerini paylaşmaya her daim hevesli, popüler bir figürdü.

Polyakov ve Hooft, ölçüm teorilerini geliştirmeye Kasım Devrimi'nden birkaç yıl önce odaklanmaya başlamış fizikçiler arasındaydı. Karşılaştıkları en ciddi problemlerden biri, Yang-Mills simetrisi içeren ölçüm teorisine ait kuantum denklemlerinin çözümünün –imkânsız değilse bile– zor olmasıydı. İlerlemenin potansiyel yollarından biri, denklemleri en gelişmiş kuantum formları dahilinde analiz etmek ve klasik fikirleri kullanarak yorumlanabilecek çözümler bulmaktı.[14] Daha önce gördüğümüz gibi, parçacık fizikçileri katı maddeler içindeki trilyonlarca atomun kolektif davranışını –"yoğun madde fiziği"– açıklayan teoriler adapte ettiler. Bu teorilerin ilkeleri ve denklemleri atom altı dünyaya uygulandıklarında da genellikle bir o kadar iyi işliyordu: görünen o ki tabiat, uyguladığı şablonun farklı kısımlarını aynı notaları kullanarak bir orkestra gibi idare etmeyi seviyordu.

Hooft ve Polyakov, kariyerlerinin başlarında, ölçüm teorileri geliştirdikleri dönemde iki başarıyı paylaştılar. İlkinde, 1931 yılında, Dirac'ın gösterdiği gibi alışıldık kuantum mekaniği kullanılarak tanımlanabilen manyetik monopol (bkz. 4. bölüm) getirilebilecek yeni yaklaşımlar keşfetmek için ölçüm teorileri kullandılar. Polyakov ve Hooft bir adım ileri giderek, parçacıkların, Yang-Mills simetrisi içeren ölçüm teorilerinde de bir

14. Jackiw (1996: 28)

o kadar doğal olarak yer aldıklarını gösterdiler.[15] Bu teorilere göre monopol, Higgs parçacığıyla ilişkili alanda küçük bir düğüm olarak tasvir edilebilecek çok minik bir madde damlasıydı. Manyetik monopole dair bu vizyon, Dirac'ın ortaya koyduğu yaklaşımla yakından ilişkilidir: iki monopol uzak bir mesafeden gözlemlendiklerinde aynı görünürken, yakından bakıldığında oldukça farklı görünürler.

Polyakov ve Hooft, Dirac'tan bir aşama ileri gittiler. Yang-Mills simetrisine sahip olan ve Standart Modelin ötesine geçen ölçüm teorilerinin neredeyse tamamının bir manyetik monopol içerdiğini kanıtladılar. Bir başka deyişle, manyetik monopollerin var *olabileceğini* söylerken Dirac'ın tam olarak doğru ifade kullanmadığını göstermiş oldular: modern ölçüm teorilerine göre bu parçacıklar var olmak *zorundaydı*. Ama ne yazık ki hiçbir araştırmacı bunu tespit etmeyi başaramamıştı. Dirac da bu hayal kırıklığıyla kendi modifiye kuantum mekaniği versiyonunun gerçek dünya için geçerli olmadığı düşüncesine vardı, ama Hooft ve Polyakov bu kadar kolay pes etmediler.

Hooft ve Polyakov, ikinci ortak başarılarında ise yeni bir atom altı olay türü tanımladılar; subnükleer dünyaya yeni bir bakış açısı kazandırmış oldular. Hikâye, 1975 yılının başlarında, Polyakov ve çalışma arkadaşları quark hapsini anlamaya çalıştıklarında başladı. Polyakov'un "uzay-zamandaki flaşlar" olarak tanımladığı unsuru içeren çapraşık bir mekanizma içindeki quark hapsini açıklayabilecek detaylı bir teorik şablon ortaya koymak üzere modern ölçüm teorisi kullandılar. Daha sonra bana açıkladığına göre, "bu flaşlar quarkları gelişigüzel itme ve çekmelere maruz bırakıyordu". Polyakov böylece fikrin altında yatan karmaşık matematiğin üzerine bir perde çekmiş oluyordu. "Sonuç olarak, quarklar tekil olarak serbestçe hareket edemez; bunun yerine sürekli bir kısıtlayıcı güce maruz kalırmış gibi bir bölgede sınırlanırlar."[16]

Hooft, yaklaşık bir yıl sonra bu fikri başka bir bağlamda geliştirdi ve bu "flaşlara" geçici var oluşlarına uyan bir isim verdi.

15. 't Hooft'la söyleşi, 20 Mayıs 2014; 't Hooft (1997: 96-100)

16. Polyakov'dan gelen e-mail, 11 Eylül 2017. Polyakov, kısıtlayıcı gücün, quark-antiquark çiftlerinde (meson adı verilen parçacıklar oluşturduklarında) ve üç quark kombinasyonlarında (baryon adı verilen parçacıklar oluşturduklarında) nötralize olduğunun altını çizer.

"İnstantonları* parçacıklar olarak değil de uzay-zamandaki noktalarda gerçekleşen olaylar olarak düşünmek en iyisi" dedi bana daha sonraları.[17] Bu olayları hiç kimse çıplak gözle gözlemleyemiyor olsa da araştırmacılar atomların kalbinin derinliklerinde kanıtlar buldu: eta mezon (spin hareketi olmayan en hafif parçacıklardan biri) olarak adlandırılan bu yapının kütlesi, temelde yatan teorinin instantonları içermesiyle mümkün olabiliyordu ancak.[18] Bunun da ötesinde Hooft, instantonların varlığı sayesinde bazı atom altı parçacıkların bozunmasına dair daha önce öngörülememiş yolların mümkün olabileceğini göstermişti, araştırmacıların da bu fikri test etmesine imkân veriyordu. Teorisyenlere göre instantonlar gerçek olaylardı, gerçi yalnızca iyi eğitimli, ölçüm teorilerinin matematiğini iyi bilen gözler bunu görebilirdi. Bu olaylar doğrudan gözlemlenebilir olmasa da, atom altı dünyada iç içe geçen alanların şeklini saptamak açısından önemli görünüyorlardı.

Bu yeni terim sahneye ilk çıkışını Hooft'un *Physical Review Letters* dergisine sunduğu makaleyle yaptı. Editörlerin verdiği karşılık kendisini şaşırtacaktı. Yeni kelimeyi bırakmasını istiyorlardı ısrarla, fizikçilerin lügatlarına kelime ekleme hızını azaltmaya çalıştıklarını kibarca belirtiyorlardı. Ama bu kelime gözden çıkarılamayacak kadar canlı ve kullanışlıydı; Hooft'un ayak diremesiyle editörler geri adım attı. Birçok teorik fizikçi bu kelimeyi artık her gün kullanıyor, hatta kelime Oxford İngilizce sözlükte bile yer alıyor.

Polyakov, instantonların matematiksel önemi olduğunu ilk öğrendiği günü hâlâ hatırlamaktadır. Moskova'nın merkezinden çalıştığı enstitüye doğru yaptığı uzun ve sarsıntılı otobüs yolculuğunda meslektaşlarıyla "yeni kitaplar, en son içki partisi –yani siyaset dışında her şey–" hakkında konuştuklarını hatırlıyordu. O gün, meslektaşlarıyla birlikte üzerinde çalıştığı instantonlar hakkında düşünüyordu ve bunları dünya çapında bir matema-

* İnstanton (veya yalancı instanton), teorik ve matematiksel fizikte ortaya çıkan bir kavramdır. İnstanton, kuantum mekaniğinde veya kuantum alan teorisinde sınırlı, sıfır olmayan bir hareketle hareket denklemlerine klasik bir çözümdür (y.h.n.).

17. 't Hooft'la söyleşi, 20 Mayıs 2014; 't Hooft (1997: 119-126)

18. Söz konusu parçacıklar elektrik açıdan nötr pi meson, eta meson ve eta-prime meson idi.

tikçi olan, hızlı algısıyla meşhur Sergei Novikov'la tartışmaktaydı.[19] Novikov ona döndü, gülümsedi ve matematiksel bir keşif yapmış olduğu için onu kutladı. "Ne demek istiyorsun?" diye sordu Polyakov. Novikov, instantonun topolojiyle hayati bir bağlantı teşkil ettiğini hemen sezmişti. Polyakov, James Clark Maxwell'in ve birçok başka on dokuzuncu yüzyıl teorisyeninin topolojinin büyüsüne kapılmış ve konunun ana akım modern fiziğe nispeten yakın zamanda girmiş olduğundan haberdar değildi. Birçok fizikçiye göre topoloji, denklemlerden ziyade sınıflandırmayla ilgilenen tuhaf bir matematik branşıydı. Nasıl ki taksonomistler, organizmaları ve fosilleri sınıflandırırken üzerinde çalıştıkları materyallerin detaylı yapılarıyla ilgilenmiyorsa, topolojistler de herhangi bir boyut sayısına sahip muhtemel uzay tiplerini şekillerinin detaylarıyla ilgilenmeden sınıflandırmayı amaçlıyordu. Bununla beraber bu iki disiplin normalde oldukça farklıdır: taksonomistler ilgilendikleri materyalleri kelimeler ve rakamlar kullanarak sınıflandırır, topolojistler ise matematiğin diğer bölümleriyle pürüzsüzce örülmüş soyut fikirlerden oluşan devasa bir oluşum kullanır.

"İlk başta topoloji hakkında hiçbir şey bilmiyordum" demişti Polyakov bana, ayrıca Novikov'la yaptığı sohbette "topolojiyi öğrenmekten başka seçeneği olmadığını" fark ettiğini ekledi. Yaklaşık bir yıl kadar sonra Polyakov, "tüm hayatı boyunca aslında nesir gibi konuşmuş olduğunu öğrenmenin şaşkınlığını yaşayan Moliere karakteri gibi hissetti kendini". Polykov bana bunu şöyle ifade etti: "Biz fizikçiler yıllardır topoloji yapmış olduğumuzu fark etmenin şaşkınlığı içindeydik."[20]

Gerard 't Hooft, instanton teorisini bu olayların atom altı parçacıkların davranışlarına nasıl ışık tutabileceğine odaklanarak geliştirmişti. Konuyla ilgili yazıları çoğu fizikçi açısından göz korkutucu ölçüde matematiksel görünse de, matematiği daima bir araç olarak gördüğünde ısrarcıydı. "Matematik, aksi halde son derece karmaşık olacak bir şeyler söylemenin soyut ve kompakt bir yolu" demişti bana; gerçi fizikçilerin "gözlerini gerçek dünya üzerinde tutmalarının da" hayati önem taşıdığını düşünüyordu.[21]

19. Polyakov'la söyleşi, 30 Mart 2016; Hoddeson vd. (1997: 247)
20. Polyakov'la söyleşi, 30 Mart 2016
21. 't Hooft'la söyleşi, 20 Mayıs 2014

*

Tabiat dikişsiz olsa da bilim insanları tabiata dair çalışmalarını zaman zaman bilgi akışını sekteye uğratan bölümlere –uzmanlık alanlarına– ayırmaya meyillidir. Lisans öğrencisi olduktan birkaç ay sonra keşfetmiş olduğum gibi, 1970'lerin başlarında parçacık fiziği ve astronomi farklı yönetilen ve genellikle farklı gelenekleri ve uygulamaları olan ayrı ayrı derebeyliklerdi. Çaylak bir parçacık fizikçisi olarak benden hiçbir zaman bir astronom tarafından yazılmış bir şeyi öğrenmem istenmemişti, hiçbir zaman bir astronomun konuşmasına katılmamış ve herhangi bir astronomla tanışmamıştım. 1977 yılının sonlarında son sınavımdan önce rehber hocamın dışarıdan gelip sınavı yapan hoca hakkında yaptığı şakayı hatırlıyorum; kara delikler ve evrenin sonu hakkında şaşırtıcı bir soruyla biraz eğlenmek isteyebileceğini söylemişti. Neyse ki sınavı yapan hoca merhamet gösterip geleneksel disipliner sınırlar içinde kaldı. Einstein'ın yerçekimi teorisinin son uygulamaları konusundaki sorularıyla beni sıkıştırmış olsaydı da şikâyet edemezdim: çünkü o dönemde parçacık fiziğiyle yerçekimi teorisi arasındaki bariyerler ufalanıp dağılıyordu.[22]

1970'lerin sonlarında, yani Freeman Dyson, ailesine genel izafiyetin "teorik fizikte en az gelecek vaat eden alanlardan biri olduğunu" söyledikten otuz yıl sonra konu olgun hale gelmiş durumdaydı.[23] Einstein'ın yerçekimi teorisi, gelişmeye başlayan bir alan olan modern kozmolojinin temelini oluşturuyordu, gerçi o dönemde teleskop teknolojisinin durumu hassas ölçümleri imkânsız kılmaktaydı. Astronomlar yine de bir gün evrenin ilk dönemlerindeki olaylara dönüp bakabilecekleri konusunda iyimserdi, böylece Einstein'ın teorisinin bazı tahminlerini (aralarında yerçekimsel dalgalar da bulunuyordu) araştırabileceklerdi. 1974 yılında Amerikalı astronomlar Russell Hulse ve Joseph Taylor, kozmik objelerin bu dalgaları yayabileceği yönündeki ilk net kanıtı keşfetti, gerçi çoğu uzman bunları doğrudan tespit etmenin büyük bir güçlük olacağını düşünüyordu.[24]

---

22. Rehber hocam Chris Michael'dı ve merhametli sınav hocam da Roger Phillips'ti; Phillips birkaç unutulmaz ay boyunca Dirac'ın öğrencisi olmuştu.
23. Dyson (2018: 107)
24. Twilley, N., 'How the First Gravitational Waves Were Found', *New Yorker*, 11

Kara delikleri tespit etme ihtimali daha çok şey vaat ediyordu, kara delikleri teorik olarak ele almak gözlemlemekten daha kolaydı. Bu durum şaşırtıcı değildir, çünkü Einstein'ın yerçekimi teorisi bu deliklerin bütünüyle kara olduğunu öngörüyordu, kendine fazla yaklaşan her şeyi içine emiyordu. Ancak Stephen Hawking'in buna en az inanan meslektaşlarına gösterdiği gibi bu klasik teori doğru değildir: kuantum mekaniği kara deliklerin radyasyon yaydığı anlamını doğurur ve her birinin de basit bir formül kullanılarak hesaplanabilecek bir sıcaklığı olduğunu söyler. Hawking, marifetini ortaya koyduğu bir hesaplamayla kuantum teorisini Einstein'ın yerçekimi teorisiyle, genellikle bu ikisini bir araya getirmek yönündeki girişimleri baltalayan çelişkileri ortadan kaldıracak şekilde ustalıkla birleştirmiştir. Yerçekimine dair tam bir kuantum teorisi hâlâ mümkün olmasa da, Hawking, kuantum fikirlerinin, bu en bildik temel güçlere yönelik radikal ölçüde yeni kavrayışlar sağladığını göstermiştir.

Astronomlar, evrenin 14 milyar yıl önce Big Bang'le başladığını yıllar evvel keşfetmişti; evren, sonrasında genişlemiş ve soğumuştu. İlk aşamalarda evren, temel parçacıklardan oluşan sıcak bir çorba gibiydi ve bu parçacıklar en güçlü parçacık hızlandırıcıların üretebileceğinin çok ötesinde enerjilere sahipti. Astronomların ve parçacık fizikçilerinin birbirlerinden öğrenecekleri çok şey vardı ve 1970'lerin sonlarında disiplinler arası işbirlikleri filizleniyordu.

"Astropartikül fiziğinin" en önemli itici güçlerinden biri, Standart Model'in öncülerinden ve aynı zamanda yerçekimi konusu uzmanı olan teorisyen Steven Weinberg'in yazdığı *The First Three Minutes* adlı çalışmaydı.[25] Evrenin başlangıcında ne olduğunu bildiklerine dair fizikçilerin ortaya koyduğu iddiaların sağlam bir zemini olduğundan şüphe duyanları ikna etmek için yazmıştı bu kitabı.[26] Yalnızca basit matematik kullanarak, son birkaç yüzyılda yapılan gözlemlere dayanan fiziğin yasalarının, milyarlarca yıl öncesini tahmin edip evrenin kökenlerine ışık tutmak için kullanılabileceğini göstermişti. Bu büyük bir iddiaydı: bu düşünceye

Şubat 2016: https://www.newyorker.com/tech/elements/gravitational-waves-exist-heres-how-scientists-finally-found-them

25. Weinberg (1972)

26. Weinberg (1983: 10); Weinberg'in bu kitabın yazılmasıyla ilgili hatıraları için: http://www.math.chalmers.se/~ulfp/Review/threemin.pdf

göre fizikçiler, fiziğin yasalarının her zaman aynı kalmış olduğu şeklinde tutucu bir varsayımda bulunarak masalarının başında oturabilir ve milyarlarca yıl öncesinde gerçekleşen ve benzer şekilde milyarlarca yıl sonrasında gerçekleşecek olan olaylara dair ince detaylar hakkında fikir yürütebilirlerdi. Tüm bunlar matematiksel çerçeveye oturtulmuş tabiat teorilerinin gücünü tasdik etmektedir. Weinberg'in altını çizdiği gibi: "[Fizikçiler olarak] hatamız, teorilerimizi fazla ciddiye alıyor olmamız değil, aksine onları yeterince ciddiye almıyor oluşumuz."[27] Kitabı sürpriz şekilde çoksatar oldu ve hatta birçok parçacık fizikçisini kozmolojiye ilgi göstermeye ikna etti.

*

1970'lerin sonları itibarıyla teorik fizikçiler özgüveni yüksek bir durumdaydı: birçoğu, eksik kalan noktanın keşfedilmesinin eşiğinde olduklarını düşünüyordu: bu eksik kalmış nokta, tüm tabiatın temel güçlerine ve partiküllerine dair birleşik bir teoriydi. Stephen Hawking de bu iyimserlerden biriydi. Nisan 1980'de Cambridge Üniversitesi'nde matematik alanında Lucasian Profesör unvanını –daha önceleri Newton ve Dirac'ın sahip olduğu unvanı– almasının ardından "Teorik Fiziğin Sonu Yakın mı?" başlıklı açılış konuşmasını yaptı.[28] Alışılageldik mizah anlayışını ve şevkini kattığı başarılı bir performanstı. Teorisyenlerin şevk verici bazı ilerlemelerinin altını çizdikten sonra ölçülü bir tahminde bulundu: "Burada bulunanların bazılarının hâlâ hayatta olduğu bir dönemde tamamlanmış bir teori görebiliriz [tüm temel fiziksel etkileşimlere ait bir teori]." Bu saptamalar fizikçiler arasında infiale neden oldu; bazıları aynı fikirde olduklarını belli ederken, diğerleri bilimin herhangi bir dalında gelecek adına kehanette bulunma cüretini gösterenlerin, öngörülemez keşiflerle küçük düşmeyi göze alması gerektiği uyarısını yaptı.

Hawking, bilinen tüm temel güçlere dair tutkulu, birleşik teoriler yönünde büyüyen bir trend olacağını öngörmek açısından haklıydı. Teorisyenler, kuantum mekaniği ve özel izafiyet teorisi temelleri üzerine sıkıca oturarak, evren hakkında en derin düzeyde düşünmek adına yeni ve devrimci yollar geliştirdiler.

27. Weinberg (1983: 128)
28. Hawking (1980)

Tabiatın bütünlüğünü anlama ihtimali pek ender bu derece erişilebilir ölçüde yakın görünmüştür. Hawking'in öngöremediği nokta ise –ve tahmin edememiş olduğu nokta– parçacık hızlandırıcılarından gelen şaşırtıcı yeni deneysel keşif akışının damlalar halini alacak kadar yavaşlamasıydı, teorisyenler için fikirlerini gerçek dünyada test etmek gitgide daha zor hale geliyordu. Bunun neticesinde de teorik fizikçiler, matematik tarafından rehberlik edilen saf düşünce olarak tanımlanabilecek bir yöntemle fikirlerini geliştirmeye itiliyorlardı. Fizik, yaratıcı fikirlerle doluyordu ama bunları test etmek adına hayal kırıklığı uyandıracak ölçüde yetersiz kalıyordu.

Bu kitabın geri kalanında bazı teorik fizikçilerin, yeni deneysel keşiflerin etkisi neredeyse hiç göz önünde bulundurmadan yeni kavramlara ve temel teorilere nasıl yaklaştıklarını aktarmaya çalışacağım. Şu noktayı akılda tutmak gerekir ki, kitabın ilk yarısı –Newton'dan parçacık fiziği Standart Modeline kadar– yaklaşık üç yüz yıllık bir süreci kapsarken, ikinci yarısı yalnızca yaklaşık kırk yılı ele alacaktır.

Ayrıca şunu da belirtmeliyim ki, düzgün ve başarılı bir sonuca doğru giden dikensiz bir yolculuk hikâyesi anlatıyor olmayacağım. Daha ziyade, evrenin nasıl işlediğine dair sürekli olarak daha derin bir algıya ulaşmamızı sağlayan keşifleri birbirine bağlayarak tabloyu aktarmaya çalışacağım. Bu tablonun büyük bölümü, teorisyenlerin tahminler yürüttüğü ve araştırmacıların da deneylerle bunları test ettiği, geleneksel bilimin dışında gelişen unsurlardan oluşuyor. Bunlar daha ziyade spekülatif bilim, hâlâ gelişmekte olan ancak genellikle gözlemsel testlere henüz müsait olmayan unsurlar. Ama yine de bunlar da bilim; yirminci yüzyılın iki büyük teorisine dayanıyorlar: kuantum mekaniği ve özel izafiyet. Doğru olma şansı olan herhangi bir yeni fikir bu iki teorinin ikisiyle de uyumlu olmak zorunda ve bu da başarılması oldukça güç bir nokta –modern teorik fiziğin bu kadar güç olmasının ana nedeni de belki bu–.

Hem kuantum mekaniği hem de özel izafiyetle uyum sağlama ihtiyacı, teorik fizikçileri uzun dönem yalnızca saf matematik tarafından işgal edilmiş alanlara sürüklemiştir. Bu fizikçiler, argümanlarının mantığının, kendilerini modası geçmiş ama yine de büyük potansiyel taşıyan eski ve bildik matematiksel fikirleri

kullanmaya zorladığını fark etmişlerdir sık sık. Bunun dışındaki hallerde fizikçiler, uzmanların daha önceleri gerçek dünyayla herhangi bir ilgisi olmadığını düşündükleri yeni matematiğe dair yaklaşımlar üretirler. Daha da dikkat çekici olacak şekilde, teorik fizik dünyasındaki fikirlerin aynıları saf matematik dünyasında aynı anda belirmişlerdir; bu da Leibniz'in yüzyıllarca önce belirttiği şekilde bu alanların önceden beri varolan uyumlarının altını çizer.[29]

Birçok açıdan, bu disiplinler arası alandaki teorisyenlerin, Einstein'ın 1933 tarihli Spencer Seminerinde ve Dirac'ın 1939 Scott Seminerinde ortaya koyduğu matematiksel programın ruhuyla çalıştığını düşünüyorum. Einstein, yerleşik teorilerin altında yatan matematiksel metotları genişletmenin "doğal" yolları olarak adlandırdığı şeyi haleflerinin nasıl da yaratıcılıkla geliştirdiğini görseydi muhtemelen hayranlık duyardı. Benzer şekilde Dirac da modern teorik fizik saflarında bu kadar güzel matematik üretildiğini görmekten memnuniyet duyardı –ama şaşırmazdı–. Fizikçileri sık sık, teorileri deneylerle hemen desteklenmediğinde şevklerini yitirmemeleri gerektiği konusunda uyarırdı ve sıkça şunu söylerdi: "Denklemlerinizin deneylere uymasından ziyade güzel olması daha önemli."[30]

Teorik fizik alanındaki en son maceralara odaklanmadan önce teorik fizikle saf matematik arasındaki uzun ayrılığın nasıl sona erdiğine bakalım. Freeman Dyson'ın 1972 yılının başlarında Las Vegas'taki kitlesinin önünde dile getirdiği, teorik fizikçilerin ve saf matematikçilerin "ters yönlerde ilerledikleri" saptamasından sonraki altı yıl içinde bu iki disiplin aynı yolda uygun adım yürümeye başlıyordu.[31]

---

29. Leibniz, bu uyuma dair argümanını en kısa ve öz şekilde 1695 yılındaki makalesinde ortaya koymuştur: 'A New System of Nature': https://plato.stanford.edu/entries/leibniz/#PreEstHar. See Kragh (2015); Einstein (1954: 226); Not 9, http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-doc/107

30. Dirac'ın konuşmasının kaydı, 'The Evolution of the Physicist's Picture of Nature': http://www.exhibit.xavier.edu/conf_qm_1962/4/, at 17:15; Dirac'ın konuşmasının üzerine notlar düşülmüş taslağı: DARCHIVE, S2, B48, F14; *Scientific American,* Mayıs 1963'te konuşmanın düzenlenmiş bir versiyonunu yayımlamıştır; bkz. Farmelo (2009: 376)

31. Dyson (2015: 46)

7
kötü bir birliktelik?

"Matematikçi meslektaşlarımın bazıları kötü bir yol arkadaşı olduğumu, bu yolculukta mantığın dağınık olduğunu ve matematiğin saflığının lekelenmiş olduğunu düşünüyorlar."

Michael Atiyah
Seksen yaşına bastığı doğum günü konuşmasından, 2009

1976 yılı baharında ilk kez bir saf matematikçiyi fizikçilere ait bir toplantıda konuşma yaparken gördüğümde, sanki bir uzaylıymış gibi tanıtılmasına güldüğümü hatırlıyorum. Konuşmacı, soyut Platon dünyasına yönelik yaratıcı hamleleriyle bilinen modern geometrinin başkomutanı Michael Atiyah'tı. Ölçüm teorileri hakkında konuştu ama insanların kalbini kazanan coşkulu neşesi ve matematiğinin anlaşılmazlığı dışında pek bir şey hatırlamıyorum. Dinleyicilerin aşina olduğu teoriler hakkında konuşuyordu ama yine de çok azımız söylediklerinden bir şeyler çıkarabiliyorduk.

Gerçi şu önemli noktayı anlayabilmiştim ki, dünyanın en önde gelen matematikçilerinden biri, o büyük ateş gücünü, birçok fizikçinin halihazırda oldukça iyi bildiğini düşündüğü teoriler üzerinde kullanıyordu. Atiyah ve çalışma arkadaşlarının yalnızca kendileri için değil, aynı zamanda fizikçiler için de ilgi çekici olabilecek yeni matematiksel araştırma yolları açtıklarını ancak aylar sonra anlayabildim.

Gerçi şunu kabul etmekten de utanıyorum ki, matematikle fizik arasındaki bu örtüşmenin, iki alanın da tarihlerinde birer dipnot olarak kalmaya mahkûm akademik bir ilgi konusu olduğunu düşünmüştüm –hatta öyle olmasını da ummuştum–. Sezgilerimin ne kadar zayıf olduğunu iki yıl içerisinde öğrendim. Ölçüm teorileriyle saf matematik arasındaki ortak zeminin çoğu kişinin tahmin ettiğinden çok daha verimli olduğu anlaşılmakla kalmadı, aynı zamanda ilerleyip genişlemesi de çok hızlı oldu. Alan, onlarca önemli matematikçi ve en önde gelen teorik fizikçilerin birkaçı tarafından ekilip biçiliyordu; bu teorik fizikçiler arasında, on yıllar boyunca bu konuda liderlik rolü oynayacak olan kişi de vardı. Bu bölümde göreceğimiz gibi, bu disiplinler arası araştırmanın içinde olan uzmanların sayısı azdı, ama hem matematik hem de fizik üzerinde sayılarıyla orantısız bir etki yarattılar. Ve uzun ayrılığa son verdiler.

*

Michael Atiyah'ın bu kadar çok matematikçiyi kendi alanlarını bırakıp fizikle ilgili teorilere odaklanmaya nasıl ikna edebildiğini 2014 yılındaki ilk tanışmamızda sadece dakikalar içinde anladım. Bir liderin, böylesi radikal bir değişimi gerçekleştirmek için meslektaşlarının entelektüel saygısını kazanmış olması gerekiyordu, Atiyah da bunu matematiğin birçok alanında çığır açıcı katkılar sağlayarak fazlasıyla yapmıştı. Ancak en etkili öncü kişiliklerde başka nitelikler de bir o kadar değerlidir, özellikle pozitiflik ve ikna edicilik; Atiyah bunların ikisine de fazlasıyla sahipti. Tipik araştırmacı matematikçilere hiç benzemiyordu. Şık giyimli ve neşeliydi –hatta biraz dalgacıydı bile denebilir–, alanı hakkında bazı meslektaşlarının biraz yakışıksız bulabileceği şekilde konuşmaktan çekinmezdi.[1] Bana şunları söylerken kalpten gülüyordu: "Arkadaşlarım, çılgın fikirleri fazlasıyla bağrıma bastığımı söylüyorlar."[2]

Atiyah, matematiğin geçmişi ve kendi konusunun ön saflarına doğru olan yolculuğu hakkında konuşmayı sever. Onunla 2014 yılında konuştuğumda ağzı kuruyuncaya kadar nutuk çekti, dostça bir tarzda ama alışılmadık derecede çenebaz bir eğitim

1. Atiyah (2006: 1)
2. Atiyah'la söyleşi, 16 Nisan 2014

çavuşu gibiydi. Bu özelliğinin izinin tören alanında bulunduğu yıllara kadar sürülebileceğini düşünüyorum; o yıllarda İkinci Dünya Savaşı'ndan kısa süre sonra, kendi tabiriyle "sönük bir askeri kariyer" dediği hayatı yaşamıştı.[3] 1949 yılında askerlik görevini bitirmesinin ardından matematik eğitimine başlamak üzere Cambridge Trinity College'a gitti; İskoç annesi ve Lübnanlı babası uzun zamandır onun bu iş için yaratılmış olduğunu düşünüyorlardı.[4]

Atiyah lisans öğrencisiyken, Dirac'ın kuantum mekaniği derslerine katıldı ve fizik alanında birkaç başka ders daha aldı; ama yüreğinde yatan aslan, matematiksel araştırmalar yapmaktı, bu onun için nefes almak kadar doğal bir şeydi. Geometriyi cebire tercih ettiğini fark etti: soyut x ve y'lerden ziyade, uzayla ilişkili, görselleştirilebilir gerçekliğe dayanan kavramlarla çalışırken çok rahattı. Teorileri gitgide geometrik matematikle çerçevelenen modern fiziğe katkı yapmak için gayet uygun kişiydi.

Atiyah, yine kendi tabiriyle bir "sözde fizikçi" olmasından neredeyse kırk yıl sonra bile saf matematikle teorik fizik arasında yaşanan onlarca yıllık yabancılaşmayı hâlâ hatırlıyordu –biraz da çapraşık duygularla hatırlıyordu–. İki disiplini iki tünel kazma ekibine benzetiyordu, iki grubun da diğerinin ne yaptığına dair herhangi bir fikri yoktu. "Tünellerin kesişmiş olması heyecan vericiydi" demişti. "Birleşim noktası sanki dâhi bir inşaat mühendisi tarafından tasarlanmışçasına güzel şekilde yerine oturuyordu."[5]

Atiyah'ın kafasındaki bu imaj, 1970'lerin başlarında tüm matematikçiler ve teorik fizikçiler için geçerli değildi belki; ama farklı bakış açılarına rağmen aynı konu üzerinde çalıştıklarını fark eden geometricilere ve ölçüm teorisyenlerine uyuyordu. Teorik fizikçiler atom dünyasına hükmeden güçleri anlamaya çalışıyordu, matematikçiler ise topolojinin ileri biçimleriyle ilgilenmekteydi. Bu konu, atomların içinde dolanıp duran çeşitli tipteki kuantum parçacıklarını açıklayan alanların muhtemel şekillerini ve konfigürasyonlarını araştırmak açısından kusursuz

3. Atiyah (2009: 63)
4. Atiyah (1984: 9)
5. Atiyah'la söyleşi, 16 Nisan 2014; Atiyah aynı metaforu şu çalışmada da kullanmıştır: Atiyah (2006: 2)

görünüyordu. Ölçüm teorileri ve modern geometri yalnızca bağdaşabilir olmakla kalmıyordu, aynı zamanda birbirlerinin gelişimine de yardımcı oluyorlardı. Ölçüm teorileri alanında yapılan araştırmalar geometri alanında yeni derin kavrayışlar oluştururken, geometri alanındaki bazı yeni keşifler de ölçüm teorileri alanında en yoğun deneysel verilerin bile ortaya koyamayacağı ölçüde taze bakış açıları yaratıyordu.

Matematik ve fizik arasında bağlantı geliştirmiş yakın dönemdeki tüm düşünürler arasında muhtemelen en yaratıcı kişi, Atiyah'ın en çok hayranlık duyduğu yirminci yüzyıl matematikçisi ve ölçüm teorisi öncülerinden olan Hermann Weyl'di, gerçi hiç tanışmamışlardı.[6] Atiyah,Weyl'in matematik konusundaki birçok görüşünü paylaşıyordu, özellikle de alanlarının büyük oranda alakasız disiplinlerin bir karmaşası olmak yerine bir bütün olması gerektiğini düşünüyorlardı; ayrıca matematikçiler titizlik takıntısı oluşturmak yerine yaratıcı fikirleri beslemeye konsantre olmalıydılar. Ve tıpkı Weyl gibi Atiyah da matematik araştırması yapmanın tek bir iyi yolu olmadığını düşünüyordu: "Çok sayıda farklı tipte matematikçi var ve biz hepsine ihtiyaç duyuyoruz."[7] İki adam da matematikçilerin, fikirlerini diğer disiplinlerdeki, özellikle de fizik alanındaki uzmanlarla paylaşmaları gerektiğini düşünüyordu.

Atiyah, yirmili yaşlarında, Fransa'nın güneyinde bir Bourbaki konferansına katıldı ve toplantı programının ince noktalarındaki birçok ağız dalaşına şahit oldu. Ama anlaşmazlıkların asla kontrolden çıkmadığını hatırlıyordu: yaz güneşi ve dostluk atmosferi, "tartışmaların silahlı çatışmaya dönüşmesini önleyen unsurlar olmuştu".[8] Atiyah, Bourbaki'nin başardıklarını değerli buluyorduysa da grubun kısıtlamaları içinde sıkışıp kalmaya niyeti yoktu. Bunun yerine kanatlarını açtı ve tıpkı Weyl gibi matematik alanında birçok farklı konuya katkı sağlayarak alanın en etkili yeteneklerinden biri haline geldi.

Weyl teorik fiziğe kariyerinin başlarında katkıda bulunurken, Atiyah gerçek dünyayla ilgilenmeye başlamadan önce yirmi yıldan fazla süre kariyerine matematikçi olarak devam etmişti.

6. Atiyah (1984: 19)
7. Atiyah (1974: 215)
8. Atiyah (2007: 1151)

"Alan değiştirip fiziğe geçmedim" diyordu. "1970'lerin ortalarında fizik bana doğru yöneldi."[9] Matematiğin önde gelen birçok yeteneğinin kendi konfor alanlarından çıktığı hareketin bir parçasıydı; uzmanlıklarını diğer bilimlere uygulamış ve öğrencilerini de kendi alanlarına daha açık fikirli yaklaşmaya teşvik etmişlerdi. Bu maceracı düşünürlerden biri de Amerikalı matematikçi Karen Uhlenbeck'ti. Uhlenbeck kendi anılarından bahsederken saf matematikçiler arasındaki "bu yeni açık fikirlilik" dalgasına katılmayı sabırsızlıkla beklediğini söylüyordu. Akım 1960'ların sonlarında başlamıştı. "Yeni bir dalganın parçasıydık, dışa dönüktük ve fizikçilerle, gökbilimcilerle ve hatta ekonomistlerle birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyuyorduk."[10]

Uhlenbeck'in söylediğine göre, "o dönemde Bourbaki'nin etkisi hızla azalıyordu." Programı hakir gören önemli isimler, eleştirilerinin dozunu gitgide artırıyordu: geometri, olasılık teorisi ve mantık gibi matematiğin açıkça önemli branşları hakkında önemli bir şeyler söyleyemezken program neden ciddiye alınsın diyorlardı.[11] Bourbaki'nin en şöhretli ve en eski üyelerinden biri olan Alexander Grothendieck'e göre, Napoleon'un generalinin adı yalnızca elitizmle dogmatizmin eşanlamlısı olmakla kalmamış, aynı zamanda grubun "kısırdoğaçlama karşıtlığıyla" da özdeşleşir olmuştu.[12] Bourbaki yine de ölmemişti, yaşam destek ünitesindeydi.

Bourbaki'nin sıkı korsesini giymek istemeyen yeni bir matematikçi nesli, yeni ve zengin bir matematik meyvesi ürettiler ve gerçek dünyaya uygulanışını hevesle keşfe çıktılar. Bunun bir örneği, "kaos teorisinin" hızlı gelişimiydi. Teori, uzun vadeli gelişimleri ilk aşamadaki hallerine oldukça duyarlı olan sistemleri ele alıyordu. Günümüzde matematiksel kaosun en iyi bilinen örneği, kelebek etkisi denen durumdur; bir kelebeğin kanatlarını çırpışı birkaç gün sonra binlerce kilometre uzaktaki bir yerin havasını etkileyebilir.[13] Teorinin altında yatan matematiksel yaklaşımın uygulamaları, gerçek dünya hakkında birçok yeni kavrayış imkânı yaratmıştır; örneğin hayvan popülasyonlarının

9. Atiyah (2009: 68)
10. Uhlenbeck'le söyleşi, 29 Mart 2016
11. Gowers (ed.), (2008: 825)
12. Mashaal (2000: 149)
13. Gleick (1988: 9-32, 45-53)

evriminden Satürn'ün uydularının stabilitesine ve bilgisyar şifrelerinin kodlanmasından borsa dalgalanmalarına kadar birçok olay bunlar arasında sayılabilir.[14]

Uhlenbeck'in söylediğine göre, birçok en üst seviye matematikçinin diğer alanlardaki uzmanlarla işbirliği yapma isteği, "tutkulu genç matematikçilerin parçacık fiziğine doğru maceraya atılmalarını saygıdeğer, hatta 'cool' bir durum" haline getirmişti. 70'lerin başında California Üniversitesi, Berkeley kampüsünde onun da saf matematikle teorik fizik arasındaki "ayrılık" olarak ifade ettiği durumun sona ermesiyle birlikte, gelenekçi matematikçilerin bu işbirliklerini küçümsediğini gördü. Bu yüzden de bu ortak girişimlerin başarısının, daha sonraları şüphecilerin "bütünüyle yanılmış olduğunu" kanıtladığını söyler. Uhlenbeck, bu durumdan alınması gereken dersler konusunda oldukça net konuşmaktadır: "Araştırmacı matematikçilerin fizikçilerin fikirlerine ihtiyacı var. Onlarsız yapamayacağımız bile söylenebilir."[15]

*

Atiyah yüzünü fiziğe doğru çevirdiğinde 1970'lerin ortalarına gelinmişti. Kırk altı yaşındaydı, Oxford Üniversitesi'ne iyice yerleşmişti, matematikte seçkinler kulübünün gerçek bir üyesiydi ve İngiliz Kraliyet Kulübünün de bir üyesi olmak üzereydi. Kendi alanına, yani genel anlamda geometriye onlarca ses getiren katkı yapmıştı ve genellikle de dönemin önde gelen matematikçileriyle işbirliği içinde çalışıyordu. Freeman Dyson'ın önde gelen fizikçi ve matematikçiler için yaptığı kuş ve kurbağa benzetmesinde Atiyah tipik bir kuştu; farklı matematiksel alanlar üzerinde uçuyor, daima aralarında bağlantı kurmaya çalışıyordu.

Hemen hemen o dönemde atom altı fizik alanında ölçüm teorilerinin başarısı Atiyah'ın ilgisini çekti. Yüksek enerjili parçacık hızlandırıcıdan akan neredeyse tüm verilere ilişkin Standart Model'in getirdiği açıklamalar onun için çok da ilgi çekici değildi; bununla beraber, ölçüm teorilerinde modelin temelini oluşturan matematiksel yapılar onu büyülemişti. Fizikçilerin bu teorileri yalnızca kaba taslak bildiğinden haberdardı ve matematikçilerin

14. May, R., 'The Best Possible Time to Be Alive', yer aldığı çalışma, Farmelo (ed.), (2002: 212-229)
15. Uhlenbeck'le söyleşi, 29 Mart 2016

fizikçilere çok daha derinlere inmeleri konusunda yardımcı olabileceğini düşünüyordu. Otuz yıl öncesinde Dyson'ın, kuantum elektrodinamiği konusunda matematikçilerin fizikçilere yardım edebilme fırsatı olduğunu gördüğü gibi, Atiyah da ölçüm teorileri alanına girmesi halinde büyük iş çıkarabileceğinden emindi.

Atiyah ölçüm teorileri konusunda ilk kez ne zaman heyecanlandığını hâlâ çok iyi hatırlıyor: 1976 sonbaharında Cambridge, Massachusetts'teki matematikçi meslektaşlarını ziyaretteydi. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) teorik fizikçi olan Roman Jackiw'den birdenbire bir telefon geldi; Atiyah'ın yardımını istiyordu. Jackiw, ölçüm teorilerini kuşatan ciddi problemlerden biri konusunda önemli bir otoriteydi: göründüğü kadarıyla, güçlü bir etkileşim içindeki parçacıkların bazı türlerinin ömürlerini tahmin edemiyorlardı, bunlar arasında fizikçilerin elektriksel yükü olmayan parçacık olarak bildikleri pion da vardı, protonun kuzeniydi. İlk kez 1948 yılında tespit edilmiş olan bu pionların ömrü uzun değildir: üretildikten sonra her biri iki fotona bozunmadan önce normalde saniyenin yüz milyonda biri kadar süre için var olmaktadır.

Teorisyenler bu davranışı anlamak için uzun süre çaba göstermişlerdi ve ölçüm teorileri de yardımcı olmamıştı. Jackiw ve aralarında John Bell ile Steve Adler'in de bulunduğu başka teorisyenler, bu problemin kökeninde klasik mekanikle kuantum mekaniği arasındaki temel bir farklılığın yattığını fark ettiler: örneğin, bir tenis topunun hareketini açıklayan denklemlerin simetrilerinden bazıları, atom altı parçacıkları açıklayan denklemlere uygulanamıyordu. Eğer ölçüm teorileri söylendiği kadar iyiydiyse, yüksüz pionların bu şaşırtıcı bozunmalarının altında yatan "kuantum anomaliyi" açıklayabiliyor olmaları gerekirdi.[16] Jackiw, bu problemin kökenini anlamak için matematikçilerin yardımına ihtiyaç duyduğu sonucuna vardı, böylece günlerden bir gün MIT'nin matematik departmanının kapısına dayandı. Departman, fizik bölümünden kilitli bir kapıyla ayrılmış durumdaydı.

Jackiw koridorlarda saatlerce yürüdü, matematikçilere problemini anlatıp ilgilerini çekmek istiyordu, ama nezaketen gösterilen alaka dışında hiçbiri onunla gerçekten ilgilenmedi. Ancak şansı

16. Whitaker (2016: 240-246); Fine ve Fine (1997: 307-323)

birden döndü, matematik fizikçi Jeffrey Goldstone ona "muhteşem Atiyah'ın" şehirde olduğundan bahsetti, belki o yardım etmek isteyebilirdi.[17] Jackiw birdenbire heyecanlandı: Atiyah ve Isadore Singer'ın 1963 yılında, Beatles'ın ilk long play'ini çıkardığı yıl yayımladıkları teorem kullanılarak kuantum anomalisinin anlaşılabileceğine inanmaya başladı.[18] Bu teorem, matematiğin daha önce alakasız görülen iki alanı arasında bütünüyle beklenmedik bir bağlantı oluşturuyordu: topoloji ve kalkülüs.[19] Jackiw, teorem ve teoremin atom altı parçacıklara muhtemel uygulanışı hakkında küçük bir gruba konuşma yapması için Atiyah'ı davet etti. Matematik zekâsı yüksek teorisyenlerden oluşan bu küçük gruba Jackiw'in kendisi de dahildi elbette.

Birkaç gün sonra Atiyah yüzünde parlak bir gülümsemeyle Jackiw'in geniş odasına doğru yürüdü. Odadaki raflardan kitaplar, kâğıtlar ve Mezo-Amerikan biblolar taşıyordu, ayrıca tüm sandalyeler de büyük ustanın sözlerini duymak isteyen genç teorisyenlerle doluydu.[20] Kibarca tanışmalarından sonra Atiyah yaklaşık iki saat konuştu, zaman zaman kara tahtaya bir şeyler yazmak ve soruları yanıtlamak için duruyordu. "Tam da ümit ettiğimiz gibi net anlaşılır bir sunumdu" diye hatırlıyor Jackiw ve sunum kısa süre içinde canlı bir sohbete dönüşmüştü.[21] Fizikçiler de zaman zaman söze girip Atiyah-Singer teoreminin atom çekirdeği içindeki kuantum alanlarıyla nasıl ilişkilendirilebileceğini soruyordu; Atiyah da bu sorulara, ilgisi biraz dağılarak da olsa her zamanki ikna ediciliğiyle yanıt veriyordu. Teoremin anomali problemini ele almak açısından uygun olduğu çok açıktı ve deney araştırmacılarının kontrol edebileceği tahminler de ortaya koyabilirdi. Ve gerçekten de birkaç ay sonra bazı teorisyenler "kuantum anomalilerinin" Atiyah-Singer teoreminin kullanılmasıyla anlaşılabileceğini kanıtladılar; teorem, elektrik yükü nötr olan pionlarla ilişkili kuantum alanlarını ele alan

17. Jackiw (1996: 29-30). Jackiw'le söyleşi, 17 Ağustos 2017.
18. ABD ve Avrupa'daki kütüphaneler, Atiyah ve Singer'ın İndeks Teoremi hakkındaki ilk makalesini İngiltere'deki "Please Please Me" long play'in çıkışından yaklaşık iki ay sonra aldı, 22 Mart 1963. Tahminimce iki olay da Philip Larkimn tarafından fark edilmemişti.
19. Raussen ve Skau (2005: 223-225)
20. Jackiw'den gelen e-mail, 18 Ağustos 2017
21. Jackiw'le söyleşi, 17 Ağustos 2017

denklemleri analiz etmek için kullanılabilirdi. Parçacık fiziğinde en dikenli problemlerden biri olan "kuantum anomalilerinin", parçacık fizikçilerinin çoğunun daha önce hiç duymadığı bir modern matematik metodu kullanılarak anlaşılabileceği haberi hızla yayıldı. Atiyah da, Singer'la birlikte ortaya koymuş olduğu teoremin, atom altı parçacıkları anlamak açısından bu kadar faydalı olmasından çok memnundu. Birçok fizikçi, topoloji ve kalkülüsü ilişkilendiren bir matematik teoreminin, kendi alanlarındaki bu kadar zor bir problemi çözebilmesine şaşırıyordu.

Atiyah'ın bana daha sonraları söylediğine göre; o ve Singer, teoremlerini geliştirirken "kurguladıkları matematiğin gerçek dünyayla herhangi bir ilişkisi olacağını hiç düşünmemişlerdi." Teorem üzerinde çalışırlarken tuhaf bir şey olduğunu da üzülerek ekledi: gerçek dünyayla hiçbir ilişkisi olmayan tüm o geometrik mantık yürütmelerinin içinden, elektron için Dirac'ın denklemini işaret eden bir matematiksel işlem çıkmıştı. "Sanırım bunun bir tesadüf olduğunu düşündük" diyordu Atiyah. "Orada neyin döndüğünü göremedik."[22]

Jackiw'in ofisindeki toplantının, o dönemde fizik ve matematik açısından çok önemli olduğu ortaya çıkacaktı. Atiyah'ın sunumunu dinleyen teorisyenlerden biri genç Edward Witten'dı. Witten o dönemde Atiyah'ın yarı yaşındaydı ve ileride matematiksel fizik alanının büyük ustalarından biri olacaktı. Atiyah, Witten'ın çok çarpıcı bir görünümü olduğunu hatırlıyor: 1.85 boyunda, sırtı dik, konuşması nazik ama özgüvenli, sesi de fiziğinden beklenebilecek olandan bile neredeyse bir oktav daha yüksekti. Kırk yıl sonrasında Atiyah bana o ilk buluşmada Witten'ın kendisi üzerinde bıraktığı izlenimi anlattı: "Ne olup bittiğini odadaki tüm fizikçilerden daha iyi bildiği açıktı. Şaşırtıcı ölçüde çabuk kavrayan biriydi, modern matematiksel fikirlere karşı olağanüstü ölçüde sağlam bilgisi vardı ve sürekli olarak bu bilgilerin fizikçiler açısından nasıl işe yarayacaklarını tartmaya çalışıyordu."[23]

Elli yıl öncesindeki Dirac gibi Witten da teorik fizik alanındaki kariyeri için alışılmadık bir yol izliyordu: ikisi de lisansüstü çalışmalarına devşirmeler olarak başlamıştı. Witten çocuklu-

22. Atiyah'tan gelen e-mail, 4 Temmuz 2017
23. Atiyah'la söyleşi, 16 Nisan 2014

ğundan beri astronomi, fizik ve matematiğe ilgi duyuyordu; yerçekimi teorisi konusunda otorite olan babası onu desteklemiş ve teşvik etmişti. Genç Witten ilk aşamada teorik fizik alanında babasını takip etmemeye karar verdi. Bunun yerine lisans öğrenciliğinde tarih ve modern diller eğitimi aldı, bir yıl George McGovern'ın başarıya ulaşmayan başkanlık kampanyası için çalıştı ve lisansüstü eğitimine ekonomi alanında başladı, ama bir dönem devam edip bıraktı. Sonrasında ise, yirmili yaşlarının ortalarında üniversitede bilim eğitimi almaya başladı.

İlk etapta matematiğin mi yoksa fiziğin mi yolundan gideceği konusunda kararsızdı, ama atom altı parçacıkların tuhaf özelliklerinden anlam çıkarmaya ilgi duyuşu onu teorik fizik alanında uzmanlaşmaya götürdü. Bu bilimler alanında lisans eğitimi olmamasına rağmen Princeton Üniversitesi onu ultra-rekabetçi lisansüstü programına kabul etti, Witten da başarıyla yol aldı ve 1976 yılında bölümü tamamladı.[24] Asistan olmak üzere Harvard'a geçmesinin ardından teorik parçacık fiziğinin önde gelen iki şöhreti olan Steven Weinberg ve Sheldon Glashow ile çalıştı. Bu ikili, atom altı parçacıklar konusundaki yeni deneysel verileri yeni düşünceler geliştirmek için kullanma yönündeki yetenekleriyle Witten'ı çok etkiledi. Witten ayrıca, modern matematiğin temel fiziğe ne şekillerde uygulanabileceği konusuyla ilgilenen teorisyen Sidney Coleman'la da yakınlaştı. Bu ilgi Witten'a da bulaştı ve bir yıl içinde teorik fiziğin küresel kovanları Witten'ın eşi görülmemiş yeteneğiyle vızıldar oldu. Atiyah'ın yorumladığı gibi: "Witten, bir disiplinin havasını etkilemekten daha fazlasını yapan tipte bir düşünürdü. O, iklimi tümden değiştiriyordu."[25]

*

1970'lerin ortaları itibarıyla tüm dünyadan fizikçi ve matematikçiler ölçüm teorileriyle geometrinin ilişkili olduğunu fark etmiş durumdaydı. Bağlantıyı ilk fark edenler arasında modern ölçüm teorisini bulanlardan biri olan Frank Yang da vardı. 1966 yılında kırk üç yaşında ve fiziğin önde gelen isimlerinden biri olarak İleri Araştırmalar Enstitüsü'nden ayrılıp Long Island'ın

24. Witten (2014)
25. Atiyah'la söyleşi, 16 Nisan 2014

kuzey kıyısındaki Stony Brook Üniversitesi'nden görev aldı.[26] Stony Brook'ta ona matematik bölümünün yeni ve tutkulu başkanı genç topolojist Jim Simons da katıldı. İkili tanıştı, iyi anlaştı ve ABD'nin Vietnam Savaşı'na girmesine karşı çıkmak için kampüste rekor seviyede para topladı. Bir sonraki ortak çalışmaları daha başarılı oldu. Bu ortaklık şöyle başladı: Simons'ın Yang'a söylediğine göre, ölçüm teorisi denklemlerinin biçimi ve Einstein'ın yerçekimi teorisi göründüğü kadarıyla şunu ortaya koyuyordu ki, bu teoriler, topolojinin "elyaf demeti" olarak bilinen bir branşıyla ilişkiliydi. Elyaf demeti terimi Yang için bir şey ifade etmiyordu. Simons, Yang'a Princeton'lı matematikçi Norman Steenrod tarafından yazılmış olan ve konuyla ilgili standart giriş niteliğindeki*The Topology of Fibre Bundles*(Elyaf Demeti Topolojisi) adlı çalışmayı okumasını tavsiye etti, ama Yang bu metni anlayamadı. Yine de vazgeçmedi: Simons'tan kendisine öğle aralarında fizik bölümünde ders vermesini istedi, en baştan başlayacaklardı. Bu derslerle birlikte Yang nihayet ne olup bittiğini anladı ve 1970'lerin ortaları itibarıyla ölçüm teorilerinin, en iyi şekilde topolojik matematik dilinde yazılmış olduğu sonucuna vardı.

Yang ve Harvard'da teorik fizikçi olan arkadaşı Tai Tsun Wu, birkaç ay sonra bir dönüm noktasına imza attılar. Ölçüm teorilerindeki kilit kavramlarla modern topolojide yer alan muadil kavramlar arasında çeşitli bağlantılar tanımladılar.[27] Wu-Yang sözlüğü olarak bilinen çalışmaları, fizikçilerin ve topolojistlerin birbirleriyle alanları hakkında konuşmalarına ve ölçüm teorilerinin fiziksel ve matematiksel yönlerine dair birleşik bir anlayışa doğru yönelmelerine imkân verdi. Sözlükteki başlıkları yalnızca uzmanlar anlayabiliyordu, ancak iki alandaki kilit kavramlar arasındaki birebir eşleşmelerin varlığı tüm fizikçi ve matematikçiler için öğretici nitelik taşıyordu. Matematikçiler sezgilerini kullanarak ölçüm teorisi üzerinde, fizikçiler de yine sezgilerini kullanarak topoloji üzerinde çalışabiliyordu.

Bu olay, saf matematikle teorik fiziğin gitgide daha fazla iç içe geçtiğinin bir başka göstergesiydi. Tepeden tırnağa bir fizikçi olan Yang, iki alan arasında keskin bir çizgi çekmekte hep ısrarcı

26. Yang (2005: 64)
27. Yang (2005: 460-472)

olmuştu: ona göre matematik Palaton'un idealar dünyasındaki soyut kavramlarla alakalıyken, fizik gerçek dünyada yapılan nicelik ölçümlerini (mezuradaki, zaman ölçüm cihazlarındaki vs. ölçümleri) anlamak hakkındaydı. Bununla beraber Yang, matematikle fizik teorileri arasındaki ilişkiye daha yakından baktıkça büyüsüne daha fazla kapılıyordu. Bir matematiksel alan teorisi ortaya koyan ilk kişi olan James Clark Maxwell'in, derin bir anlayışa ulaşabilmek için yalnızca harekete dair bir tanım değil, aynı zamanda "geometrik fikirlerin" kullanılmasının zaruri olduğunu bir yüzyıl önce öngörmüş olduğunu öğrendi.[28] Dirac, 1931 yılında manyetik monopol teorisini ortaya koymuştu ve Yang da bu teoriyle birlikte Dirac'ın kuantum mekaniği alanında geometrik düşünceye öncülük etmiş olduğunu biliyordu. Ancak Jim Simons'un yaptığı bir saptama Yang'ı şaşırtmıştı: Dirac bu fikirlerini oluştururken yan etki olarak topolojinin kilit teoremlerinden birini de keşfetmişti. Dirac'ın kullanmış olduğu bu temel topolojik teorem, bütünüyle ancak yirmi yıl sonrasında, dünyanın önde gelen matematikçilerinden biri olan Shiing-Shen Chern tarafından ortaya koyulacaktı.[29] Chern, Çin'deyken öğrenci Yang'ın hocası olmuştu ve daha sonrasında Birleşik Devletler'e göç edip California Üniversitesi, Berkeley'e yerleşmişti. Michael Atiyah'ın ifadesiyle, Chern "perde arkasındaki güçtü": kolaylıkla görüşülebilen biri değildi, ancak matematikçiler arasında bilgisi, doğal otoritesi ve mizah anlayışıyla çokça hayranlık duyulan biriydi.[30]

1950'lerden beri Yang ve Chern'in yolları zaman zaman kesişmişti, ancak çok derin konuştukları olmamıştı. 1975 yılında Yang bu durumu düzeltme zamanının geldiğini düşündü ve Chern'in San Francisco Koyu'nun doğusundaki evine gitti, saatlerce sohbet ettiler. Sohbet bir süre sonra matematik ve fizik arasındaki ilişkiye yöneldi ve Yang, atom altı güçler hakkındaki ölçüm teorilerinin, Chern'in ve meslektaşlarının "hiç ortada yokken" tasavvur ettikleri bir matematik çerçevesinde yazılmış olmasından büyük heyecan duyduğunu söyledi. Ama Chern

28. Maxwell (1873a: 399); Yang (1986: 20)
29. Yang'ın 1979 yılında belirttiğine göre Simons şu noktanın altını çizmişti ki, "Chern-Weil teoremini ilk bulan" Dirac'tı: Woolf (1980: 285); Yang (2013: 340)
30. Atiyah'la söyleşi, 15 Nisan 2016

bu görüşü kabul etmedi: "Hayır, hayır. Bu kavramlar tasavvur edilmedi" diye itiraz etti: "Doğal ve gerçektiler."[31]

Yang şaşırmıştı. Bir fizikçi olarak onun için gerçeklik temelde maddesel dünyayla alakalıydı: deneyim, hakikatin yegâne kaynağıydı.[32] Ama şimdi Chern, matematiğin soyutlamalarının da gerçek olduğunu söylüyordu.

*

Atiyah'ın, Jackiw'in MIT'deki ofisinde toplanmış bir grup fizikçiyle konuşmasından kısa süre sonra Jackiw ona şöyle sordu: "Sence matematikle fizik arasındaki bu yeni uyum kısa süreli bir macera mı yoksa uzun süreli bir ilişki mi olacak?"[33] Atiyah kaçamak yanıt verdi. Ama 1977 yılının başlarında evine, Oxford'daki Matematik Enstitüsü'ne dönmesiyle beraber ölçüm teorilerinin matematiğine diş geçirmek adına kendinde büyük bir kararlılık ve iyimserlik buldu. Birkaç ay sonra da Edward Witten enstitüye uzun bir ziyaret gerçekleştirdi ve matematikçilerle sohbetlere başka teorik fizikçiler de katıldı. Tüneller nihayet kesişmişti.

Oxford Üniversitesi matematik fakültesinde o sıralar Atiyah'a Roger Penrose da katılmıştı; Penrose, yerçekimi teorisindeki modern gelişmelerin öncüsü ve twistor teorisinin mucidiydi.[34] Hemen hemen aynı dönemde Atiyah'ın yakın arkadaşı ve aynı zamanda iş arkadaşı olan Isadore Singer, uzatmalı izin aldı ve ölçüm teorileriyle topoloji arasındaki bağlantılara yönelik olarak Yang'ın getirdiği yaklaşımlardan haberler taşıdı. Singer konuyla ilgili olarak yüksek katılımlı bir dizi seminer verdi; konuşmasına Wu-Yang sözlüğünün bir sunumuyla başlıyordu, Atiyah daha sonraları bu gelişmeyi "önemli bir an" olarak tanımlayacaktı.[35] Birkaç hafta içinde fakülte, modern ölçüm teorilerinin tahmin etmiş olduğu sub-nükleer olaylardan, instantonlardan konuşur hale gelmişti. Atiyah ve bazı başka matematikçiler, geometrik tekniklerdeki yeteneklerini ve birkaç başka yeni silahlarını, fizik-

31. Zhang (1993: 13, 14, 21)
32. Poincaré, benzer bir şey söyler (1902: 516): 'Deney, hakikatin yegâne kaynağıdır.'
33. Jackiw'le söyleşi, 17 Ağustos 2017
34. Atiyah (1988b: 1); Atiyah'la söyleşi, 15 Nisan 2016
35. Singer (1988: 200); Atiyah'la söyleşi, 15 Nisan 2016

çiler Gerard 't Hooft ve Sasha Polyakov tarafından tasarlanmış fikirleri ele almak için kullanmaya başladılar. Kısa sürede farklı instanton tipleri olduğu anlaşıldı ve bunlar, Atiyah-Singer teoreminin hayati bir rol oynadığı topolojik matematik kullanılarak sınıflandırılabilirlerdi.

Atiyah, ölçüm teorilerine odaklanmasının üzerinden uzun zaman geçmemişken kültür değişiminin dokunuşlarını hissetmeye başladı. Matematik camiasındaki yaşamın heybetli, ağırbaşlı temposunu kanıksayarak geçirdiği on yıllardan sonra ilk etapta fizik araştırmalarının nefessiz bırakan temposu karşısında biraz dağıldı. Fizik alanında henüz tam olgunlaşmamış bir fikri anlatan dikkat çekici bir makale bile aylarca süren canlı tartışmaları tetikleyebiliyor ve yüksek potansiyel vaat eden yeni düşünceler doğurup sonrasında toza toprağa karışabiliyordu.[36] Atiyah ve çalışma arkadaşları ilk projelerini tamamlamalarından kısa süre sonra başka yerlerdeki teorik fizikçilerin de çok daha az matematik kullanarak olsa da aynı sonuçlara ulaştıklarını öğrendiler. Böylesi deneyimler kesinlikle olağandışıydı.

1977 yılı ilkbaharında saf matematikle teorik fizik arasındaki yeni ilişki tam anlamıyla çiçek açıyordu. Washington DC'deki Amerikan Fizik Topluluğunun bir toplantısında, Roman Jackiw, ölçüm teorilerinin matematiği hakkında bir konuşma yaptı ve bir matematikçinin bakış açısını aktarması için kürsüye Isadore Singer'ı davet etti. Zamanı dar olan Singer, teknik detaylara girmek yerine yakın zamanda yazmış olduğu bir şiiri okudu:

Bu çağda ve bu günde
Fizikçiler bilge
Sayfalarca yazıyorlar
Ölçüm teorileri
Mevcut Mesele.
Matematikçilerse öylesine kör
Ağır ağır geriden geliyorlar
Kurnaz akıllarıyla
Bir teorem bulacaklar
Usulünce yazılmış ve imzalanmış olacak.
Ama ölçüm teorilerinin defoları var
Tanrı kem küm eder

36. Atiyah'la söyleşi, 11 Mayıs 2017; Atiyah (1988b: 2)

Perdesini çekerken
Fizik yasalarının üzerine
Belki de durum ümitsiz vaka.[37]

Şiir, ölçüm teorilerinin bütünüyle güvenilir bir fikir kaynağı olmadığını düşünen bazı matematikçilerin endişesinin altını çiziyordu. Ancak o an itibarıyla bu teoriler matematikçilerin temel gıdası durumundaydı.

Tahmin edileceği gibi Atiyah, bu yeni işbirliği alanının yol göstericisi oldu; kendilerine katılan herkesi matematik ve fiziğin ortak alanındaki yenilikçilere iştirak etmeye yöneltiyordu. Sonraki yıl, yani 1978'de Harvard'da bir dizi seminer verdi, kendisinin ve çalışma arkadaşlarının manyetik monopol teorisini geliştirmek için bulmuş olduğu yeni yöntemlere odaklanıyordu.[38] "Her yer hıncahınç doluydu" diye hatırlamaktadır David Morrison; o dönemde ölçüm teorilerine çok da ilgi duymayan bir saf matematik lisans öğrencisidir. Yine de "Atiyah'ı konuşurken dinleme fırsatını kaçırmamaya" kararlıydı bana anlattığına göre. Morrison'ın hatırladığı kadarıyla dinleyici kitlesinin yarısı matematikçi, yarısı fizikçiydi: "Aynı odada toplanmaları duyulmuş şey değildi." Atiyah kitleyi hayal kırıklığına uğratmadı: "Sözleri büyüleyiciydi. Ve bu sözler çoğumuzu bu konunun ilgi göstermeye değecek bir konu olduğuna ikna etti."[39]

Birçok teorisyenin şüpheleri vardı. Örneğin Edward Witten, kendisini ilgilendiren fizik problemlerine matematikçilerin ışık tutup tutamayacağı konusunda şüphe duyduğunu daha sonraları itiraf edecekti.[40] Ama uzayın yapısına dair bir dizi baş döndürücü analizin ardından bu şüphecilik havası değişti; Atiyah'ın ifadeleriyle bu analizler "matematik dünyasını şaşkına çevirmişti".[41] Bu keşifleri yapan kişi, Atiyah'ın üniversite ikinci sınıfta okuyan utangaç bir öğrencisi olan Simon Donaldson'dı. Donaldson sessiz sedasız, ölçüm teorilerinin yalnızca fizikçiler için değil, aynı zamanda matematikçiler için de bir fikir kaynağı olup olamayacağını araştırıyordu. 1982 yılında önsezilerinin

37. Jackiw (1996: 30)
38. Atiyah (1988b: 23-25)
39. David Morrison'la söyleşi, 23 Nisan 2015
40. Witten (2014)
41. Atiyah (1986)

doğru olduğu ortaya çıktı ve matematiğin bir bölümünde devrim yapan bir dizi yeni ve verimli fikir ortaya çıkardı. Atiyah bana bu konuyla ilgili şöyle söylemiştir: "Donaldson'ın parlak bir öğrenci olduğunu biliyordum, ama yaptığı şeyi görünce yine de gözlerime inanamadım."[42]

Donaldson bile başardığı şeyden dolayı şaşkındı; yeni şaşırtıcı buluşlar haftalar boyu birbiri ardına gelirken gözlerine inanamıyordu: "Bunun, insanın hayatında bir kere yapabileceği bir araştırma olduğunu tahmin edebiliyordum." Bir matematikçi olarak, ölçüm teorilerini çoğu fizikçinin tahmin edebileceğinin tam tersi şekilde kullanıyordu. Alanlara yönelik yeni analizler oluşturmak için denklemleri çözmek yerine, bu denklemleri alanların var olduğu dört boyutlu uzayı ele almak için kullandı. Bana söylediğine göre aslında ilk başta böyle bir stratejiyle yola çıkmamıştı, rastlantı eseri bu fikre ulaşmıştı: "Meslektaşlarımla konuştuğumda yaklaşımın zenginliğini idrak etmeye başlamıştım."[43] Bu sezgilerini sağlam teoremlere dönüştürmesi ise zor ama keyif verici bir yılını alacaktı.

Donaldson'ın yaptığı buluşa göre, instantonları tanımlayan ölçüm teorisi denklemlerinin çözümleri, dört boyutlu uzayların değişmezler olarak bilinen özel niteliklere sahip olduğu anlamını doğuruyordu. Bu değişmezler kullanışlıdır, çünkü matematikçilerin daha önce asla görmediği veya hatta tasavvur etmediği yollarla bu uzayların farklı tipleri arasında ayrım yapmayı sağlıyorlardı. Bu teknik, Donaldson'a, yalnızca dört boyutta varolan yeni tip bir gizemli uzay keşfetme imkânı da vermişti.[44] Atiyah'a göre, Donaldson sonuçlarını ortaya çıkardığında fikirleri "geometriciler ve topolojistler için o kadar yeniydi ki, yalnızca şaşkınlıkla karışık bir hayranlık içinde bakıyorlardı".[45] Fizikçilerin, atom çekirdeğinin derinliklerinde gerçekleştiğine inandıkları instanton olaylarını tanımlaması neticesinde, Donaldson, Platoncu matematiksel fikirler dünyasına yeni bir pencere açmış ve fizikçiler arasında fazla fark edilmemiş olsa da matematik üzerinde büyük bir etki yapmıştı.[46]

42. Atiyah'la söyleşi, 11 Mayıs 2017
43. Donaldson'la söyleşi, 4 Ağustos 2016
44. Yau ve Nadis (2010: 65-66)
45. Atiyah (1986: 5)
46. Witten'dan gelen e-mail, 17 Eylül 2017

Donaldson, ilkin Maxwell'in elektromanyetizma teorisinin bir genellemesi olarak geliştirilmiş olan Yang-Mills teorisini kullanarak uzayın doğasına ışık tutmayı başarmış oluyordu. Elektrik ve manyetizma denklemlerinin matematiksel biçiminin, uzay-zamanın dört boyutlu olduğu gözlemiyle bağlantılı olduğu görüntüsü ortaya çıkıyordu. Donaldson, bu bağlantının "anlayamadığımız daha derin bir şeyler döndüğü düşüncesini uyandırdığına" inanıyordu artık.

On yıllar öncesinde Paul Dirac bu türden bir kavramsal bağlantı öngörmüştü. Matematikçileri dört boyutlu uzaylara özel ilgi göstermeleri için uzun süre uyarmıştı, çünkü uzay-zaman dört boyutluydu: doğa bir anlamda matematikçilere bu uzayların önemini işaret ediyordu. Dirac 1939 yılındaki Scott seminerinde, "Matematik ve Fizik Arasındaki İlişki" başlıklı konuşmasında bundan bahsetmişti: "Belki de ... gelecekteki gelişmeler dört boyutlu uzayın tüm diğerlerinden daha büyük öneme sahip olduğunu gösterecektir."[47] Gerçi Dirac bu fikri ilk kez lisansüstü öğrencisiyken Henry Baker'ın çay partilerinden birindeki bir konuşmada ifade etmişti.[48] Donaldson'la bu alanda çalışmaya başlamasından otuz beş sene sonra tanıştığımda ona Dirac'ın konuşmasının bir kopyasını verdim, bu konuşmadan haberi yoktu. Kafasını sallayarak, "olağanüstü" dedi.[49]

*

Fizik-matematik ilişkisinde 1970'lerde gerçekleşen bu dönüşüm neredeyse tüm uzmanlar için sürpriz olmuştu, Freeman Dyson da bu şaşkınlığı yaşayanlardan biriydi. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, 1972 yılında verdiği bir derste bu iki alanın ayrılığından ve birbirlerinin programlarına destek verme fırsatını kaçırmalarından duyduğu üzüntüyü dile getirmişti. Yedi yıl sonra tonunu değiştirecekti.[50] Mart 1979'da Einstein'ın doğumunun yüzüncü yılını kutlamak üzere İleri Araştırmalar

47. Dirac (1938-1939: 125)
48. Baker'ın çay partilerinden birinde izafiyet üzerine yapılan konuşmaların metni: DARCHIVE S2, B46, F10
49. Donaldson'la söyleşi, 4 Ağustos 2016; Donaldson'dan e-mail, 28 Haziran 2017
50. Woolf (ed.), (1980: 500)

Enstitüsü'nde gerçekleştirilen bir toplantıda Dyson, geleceğin, matematikçiler ve fizikçiler için neler getirebileceğini tahmin etmeye çalışıyordu. Toplantıya alanın birçok önde gelen ismi katılmıştı, aralarında Michael Atiyah, Shiing-Shen Chern, Stephen Hawking, Roger Penrose, Steven Weinberg ve Frank Yang da vardı. Kapanış seremonisinde toplanmışlardı, seremonide enstitü yöneticisi, Başkan Jimmy Carter tarafından gönderilen bir teşekkür mektubu okudu.

Bir önceki oturumda geleceğin fiziği konusunda gerçekleşen canlı tartışma, katılımcıların zihninde tazeliğini koruyordu. Konuşmacılardan biri de iyimser bir yaklaşım getiren Dyson'dı; "[daha yüksek] matematikle fizik arasındaki bağlantıların büyüyeceğini ve sıkılaşacağını" öngörüyordu. Bir başka cesur tahminde bulunma riskini göze alarak şöyle devam etti: "Tahmin ediyorum ki önümüzdeki yirmi beş yıl içinde genel izafiyet, grup teorisi (simetriler hakkında) ve alan teorisinin birbirlerine saf matematik bağlarıyla bağlandığı birleşik fizik teorilerinin ortaya çıktığını göreceğiz."[51]

Dyson tedbirli davranarak bir şart koymuştu: "geçmişe bakarak tahminde bulunmak hiçbir zaman akıllıca olmamıştır" dedi ve asıl istediği şeyin "tartışmalar için bir temel oluşturmak" olduğunu söyledi.[52] Bu kez geleceği doğru şekilde görebiliyordu: fizikçiler, beş yıl içinde onun tarif ettiği çerçeveye oldukça benzeyen bir şeye sahip oldular. Daha sonra göreceğimiz gibi, bu çerçeve teorik fizikçiler ve saf matematikçiler için birbirlerinin yoldaşlığında daha da fazla gelişme imkânı verdi.

51. Woolf (ed.), (1980: 500)
52. Woolf (ed.), (1980: 500)

8
şaka mı, büyü mü: sicime giden yol

"Teorinin doğru olma şansı pek yoktu, ama yine de ciddiye aldık çünkü gerçek bir matematiksel büyüsü vardı."

Peter Goddard, 2016

Parçacık fiziği Standart Modeli, yirminci yüzyılda insanlığın en büyük kolektif başarılarından biri oldu. İnsanlık tarihinin zaman skalasında model oldukça kısa sürede şekil almıştı. Deney araştırmacılarının atomun varlığını şüpheye yer vermeyecek şekilde onaylamalarından yalnızca yetmiş yıl kadar sonra fizikçiler maddenin bu küçük yapı taşlarının içinde dolanan partiküllere dair başarılı, matematiksel açıdan kesin bir teori ortaya koymayı başarmışlardı. Bilhassa önem taşır şekilde bu teori, kuantum mekaniğine, özel izafiyet teorisine ve birkaç matematiksel simetriye dayanıyordu.

1983 yılı baharında parçacık fizikçileri, modelin en son başarılarını kutluyorlardı: deney araştırmacıları, zayıf gücü taşıyan üç parçacığın üçünü de tam da ölçüm teorisyenlerinin tahmin ettiği özellikleri taşır şekilde gözlemlemişti. Gerçi yalnızca on beş ay sonrasında fizikçiler Standart Modelin bir halefini ciddiye almaya başladılar. Bu yeni teorik yaklaşıma göre evren, nihayetinde parçacıklardan değil, küçük sicim parçalarından oluşuyordu.

Bu bölüm, modern fizik tarihinde doğrulanmamış teoriler arasında üzerinde en çok araştırma yapılanı olma unvanına sahip olan sicim teorisini ele alıyor. Daha sonra göreceğimiz gibi, teoriyi getiren hayati ipucu ilk olarak bir İtalyan fizikçi tarafından atom altı partiküllerin davranış şekillerine baktığı sırada fark edilmişti. Daha sonraları "ikili modeller" olarak bilinecek olan bu davranış şekilleri doğaya dair yalnızca aşağı yukarı açıklama getirirken, özellikleri teorik fizikçileri ve daha sonrasında da matematikçileri büyüledi. Bu modellerin kayda değer bir özelliği, daha önce hiç kimsenin fark etmediği bir tür matematiksel simetriydi ve bu simetri daha sonraları teorisyenleri süpersimetrinin varlığını önermeye götürecekti ki, süpersimetri de hikâyemizde önemli bir rol oynamaktadır. Daha sonra göreceğimiz gibi, bu simetrinin hem emsalsiz güzelliği hem de fizikçiler ve matematikçiler açısından kullanışlı oluşu daha sonraları birçok teorisyeni ikna edecekti ve doğanın büyük resminin bir parçası olduğuna inanmalarını sağlayacaktı; gerçi deney araştırmacıları bu simetriye dair doğrudan bir kanıt bulabilmiş değildir.

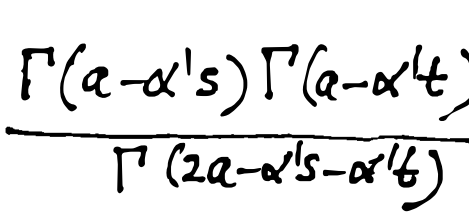
İkili modellerin kazandırabileceği çok daha fazla şey vardı; örneğin, sicim teorisini kullanarak bütün evrenin temel bir seviyede nasıl tanımlanabileceğine dair potansiyel olarak devrim niteliğinde bir bakış açısı sunulabilmesi imkânı vardı. Sicim teorisinin fizikçiler arasında ana akım haline gelişi ilkin 1984 yılında, ilk sicim teorisi devrimi olarak bilinen dönemde oldu. Tüm esaslı devrimler gibi çoğu uzman için sürpriz oldu. Önceki on yılda atom altı araştırmaların çoğu, Standart Model tarafından iyi tanımlandığı düşünülen nispeten daha az sayıdaki temel parçacık üzerine odaklanmıştı. Birçok fizikçi için ikili modeller üzerinde çalışmak küçük bir endüstri gibiydi, oldukça zorlu matematik kullanmalarına rağmen herhangi bir noktaya varmıyormuş gibi görünen birkaç zeki teorisyen tarafından yürütülen bir işletmeydi. İlk sicim teorisi devriminin etkisini incelemeden önce saati geri alıp 1950'lerin sonlarına ve 1960'ların başlarına doğru dönmek yerinde olacaktır; o dönemde atom altı dünyayı anlamak yönündeki eski ve modası geçmiş yöntemler daha ileri bir forma geçerek yeniden baş role dönmekteydi.

*

Standart Modelin öncülerinden Abdus Salam o günlere dair anılarından bahsederken, "1959 yılında alan teorisinin işe yaramaz olduğunu düşünen çok sayıda insan vardı" diyordu ve kendisini işaret ederek, "yalnızca budalalar ölçüm alan teorisi gibi bir şeyler hakkında konuşuyordu."[1] Önde gelen birçok teorisyen, James Clerk Maxwell'in keşfettiği, özel izafiyet teorisi, kuantum mekaniği ve belli simetriler tarafından desteklenen alan teorisinin modern bir versiyonunu kullanarak bazı atom altı parçacıkları açıklamanın imkânsız olabileceğini düşünüyordu. Alan teorisini, atom çekirdeğindeki proton ve nötronlar gibi büyük güce maruz kalan partiküllere uygulamaya çalıştıklarında bu güçlük daha da belirgin hale geliyordu. Bu parçacıklar arasındaki etkileşimler o kadar güçlüydü ki, alan teorisine ait standart teknikler işlemez hale geliyordu, öngörü hesaplamalarını imkânsız kılıyordu: görünüşe göre tek umut, saçılma genliği olarak bilinen yaklaşımı kullanarak partiküllerin davranışına dair genel bir açıklama yapmaktı. 1960'lar itibarıyla küçük bir teorisyen ordusu bu genlikleri araştırıyordu, matematiksel özelliklerini açıklamaya ve parçacık hızlandırıcılardan akıp gelmekte olan verileri yorumlamak için bunları kullanmaya çalışıyorlardı.

Saçılma genliği araştırmalarında uzmanlaşmış gruplardan biri, İsrail'de Tel Aviv'in yaklaşık yirmi kilometre güneyinde bulunan Rehovot kentindeki Weizmann Enstitüsü'nde yer alıyordu. Yaklaşık olarak 1968 Haziranında ilk ikili model orada, genç teorisyen Gabriele Veneziano'nun zihninde doğdu; doktorasını yeni tamamlamış, yirmi altı yaşında rahat bir gençti. Kendi ifadesiyle, yakınlardaki kafelerde takılırken kendini "bir düşünce deneyi" yapar halde buldu, pion olarak bilinen partiküllerin ikisi arasındaki çarpışmaları açıklayabilecek saçılma genliği yaklaşımını düşünüyordu.[2] Not defterine düşüncelerini karalarken, genlik açısından oldukça sade bir matematiksel formüle ulaştı. Bu formül, matematiksel fizik öğrencilerinin yüzyıldan uzun süredir aşina olduğu matematik fonksiyonlarını içeriyordu.

1. Crease ve Mann (1986: 238)
2. Veneziano'yla söyleşi, 9 Nisan 2018



Güçlü etkileşim içinde olan belli parçacıklar arasındaki çarpışmaları tanımlayan Veneziano formülü. Formül, Veneziano tarafından ilk olarak 1968 yılı Haziran ayında bir parça kâğıt üzerine yazılmıştır (bu fotoğrafta Veneziano tarafından bir peçete üzerine yazılmış hali görülmektedir). Formül, daha sonraları modern sicim teorisinin embriyosu olarak değerlendirilecekti. Formül Yunan büyük harfi gama (Γ) ile sembolize edilen üç özdeş matematik fonksiyonunun bir kombinasyonunu içerir. S ve t sembolleri farklı parçacıkların hareketiyle ilişkilidir; tüm diğer semboller sabitlere aittir.

Saçılma genliği formülü bir hazineydi ve Veneziano'yu parçacık fizikçileri arasında ünlü hale getirdi. Formülü, deneysel sonuçları detaylı olarak açıklıyor olmasa da, güçlü etkileşim içindeki partiküllerin birbirleriyle çarpıştıklarında nasıl davrandıklarına dair deney araştırmacılarının gözlemlediği kilit davranış biçimlerinin büyük bölümünü şaşırtıcı ölçüde başarıyla açıklıyordu. Daha önce buna benzer bir şeyi başarabilen bir formül hiç görülmemişti. Daha sonraları bana anlattığına göre, Veneziano "heyecanlıydı ama biraz da gergindi" çünkü formül gerçek olamayacak kadar iyi görünüyordu.[3] Bir illüzyon veya hatta bir saçmalıktan ibaret olabilir miydi? Birkaç hafta sonra CERN laboratuvarlarında teori bölümünü ziyaret ettiğinde formülü bazı meslektaşlarıyla konuştu. Atom altı saçılmayla ilgili olarak bilinen şeylerin büyük bölümünün böylesi olağandışı kısa bir matematiksel ifadeye paketlenebiliyor olmasından dolayı çoğu şaşkınlık içindeydi. Veneziano'nun Torino'da verdiği bir seminerin ardından, alanında etkili fizikçilerden biri olan Sergio Fubini, bu çarpıcı ölçüde kısa formülü "iyi bir esprinin" can alıcı noktasına benzetmişti.

3. Veneziano'yla söyleşi, 22 Mayıs 2017

Fubini'nin cesaret verdiği Veneziano, formülünü yayımlamaya karar verdi.[4] Viyana'da yaklaşık bin fizikçiyle birlikte on dördüncü uluslararası parçacık fiziği konferansına katıldığı sırada makalesi yayımlandı. Veneziano'nun formülü toplantının merak konusuydu.[5] Sonrasındaki yıllar boyunca teorisyenler formülle ilk karşılaşmalarını hiç unutmayacaklardı. Fizikçi David Olive, Avusturya'nın başkentinin merkezinde eski kraliyet sarayı olan Hofburg'un büyük salonundaki bir oturum esnasında Veneziano'yu dinleyişini şöyle hatırlamaktadır: "Salonun kötü akustiğine rağmen bu deneyim hayatımı değiştirdi."[6] Gerçi birçok bilimsel keşifte olduğu gibi, konuya yabancı biri tüm bu patırtının neyle alakalı olduğunu merak ediyor olabilirdi. Veneziano yeni bir yasa ya da ilke keşfetmiş değildi, şaşırtıcı deneysel gözlemleri açıklamış veya bir tahmin yürütmüş de değildi. Yapmış olduğu şey, onlarca yıl ötede görünen bir şey hakkında nihayet bir ilerleme katedebilecekleri yönünde fizikçileri ikna etmiş ve cesaretlendirmiş olmasıydı: güçlü etkileşim içindeki parçacıkların çarpıştıklarında sergiledikleri davranış şekillerine dair basit bir matematiksel yöntemin keşfine giden yol açılmıştı.

Veneziano modeli, fizikçilerin "ikilik" olarak tanımladığı bir özellik barındırıyordu: güçlü etkileşim içindeki iki partikül birbirinden saçıldığında ortaya çıkan sonuç, aynı sonucu veren iki farklı yolla hesaplanabiliyordu. Veneziano ve onlarca başka fizikçi, haftalar içinde başka ikili modeller geliştirmeye başladı; daha çok sayıda parçacığı açıklamayı ve bu modelin deney araştırmacıları tarafından toplanan verileri ne ölçüde açıklayabildiğini araştırmayı amaçlıyorlardı.[7] İkili modeller hassas matematiksel dille ifade edilmişti, ama deney araştırmacılarının elde ettiği verileri detaylı açıklayamıyordu. Bununla beraber birçok ikili model uzmanı bir şeyler elde edebilecekleri hissini taşıyordu; bu hissin başlıca nedenlerinden biri, bu modellerin

4. Veneziano'dan Rubinstein'a, 2 Temmuz 1968, yer aldığı çalışma, Gasperini ve Maharana (ed.), (2008: 52)
5. Gasperini ve Maharana (ed.), (2008: 55)
6. Cappelli vd. (2012: 17-33, 346)
7. Veneziano modeli yalnızca spini 0 veya 1 veya 2 vb. olan parçacıklar için geçerlidir –boson olarak bilinen parçacık sınıfıdır bunlar–. Fermion olarak bilinen ve spinleri ½ veya 3/2 veya 5/2 olan parçacıklara da uygulanabilmesi için teorisyenler modeli genişletmeyi istemiştir.

modern matematikle böylesi yakın bağlar içeriyor oluşuydu.

İkili modellerin gerçek dünyayla bağlantısının olduğu açıktı. Asıl sorun, fizikçilerin model tarafından açıklanan partikülleri tasavvur edebileceği şekilde bu modellerin yavan matematiğinin nasıl yorumlanabileceği sorusuydu. 1969 yazında daha net bir tablo oluşmaya başladı, o sırada teorisyenler Yoichiro Nambu, Lenny Susskind ve Holger Nielsen birbirlerinden habersiz olarak farklı benzetmeler kullanmışlardı –bunların arasında "sonlu uzunlukta ve belli ölçüde enerji içeren sicim", "yay", "lastik bant", "keman teli" ve "tek boyutlu yapı" da vardı–; amaç, ikili modellerin matematiği tarafından tanımlanan fiziksel gerçekliği açıklamaktı.[8] Gerçi bu küçük varlıkların hareketini kuantum mekaniği ve özel izafiyet teorisi ile uyumlu bir yöntemle açıklamanın bir yolunu da bulmak gerekiyordu. Bunu ilk yapan Nambu oldu; Ağustos 1970'te Kopenhag'da yapacağı bir konuşmanın temelini oluşturan ikili modeller hakkındaki bir konferans bildirisinde bunu ortaya koyacaktı. Ama ne yazık ki havaalanına doğru yoldayken aracı Ölüm Vadisi'nde bozuldu ve Danimarka'ya asla ulaşamadı. Sonuç olarak bildiri yalnızca toplantı katılımcılarına dağıtıldı, daha geniş bir kitleye ulaşmadı ve ikili modelcilerin rutin olarak "sicim teorisine" atıfta bulunur hale gelmeleri 1972 yılından sonra gerçekleşebildi.[9]

*

İkili modellerin güçlü yanlarından biri de birçok yeni fikir üretiyor oluşlarıydı; bazıları yalnızca subnükleer partiküllerle değil, aynı zamanda bütün evrenle ilişkiler içeriyordu. Bu fikirler arasında ilki, uzay-zamanın, gündelik deneyimlerimizde fark edebildiğimizden çok daha fazla boyut içerebileceğiydi. Bu daha yüksek boyutların varlığı, fizikçiler sicim parçalarının hareketini özel izafiyet teorisi ve kuantum mekaniği ile uyumlu şekilde açıklamaya çalıştıklarında ortaya çıkıyordu. Problem şuydu ki, sicimlerin hareketini açıklamaya yönelik her bir girişim, "hayalet durumların" varlığı anlamını doğuruyordu: hayalet durumu, bazı partikülleri tespit etme ihtimalinin sıfırdan az

8. Goddard (2018). Bkz. Tablo 1
9. Nambu'nun elde ettiği sonuç bir sonraki yıl, yani 1971'de bu sonuçtan bağımsız olarak Japon teorisyen Tetsuo Goto tarafından bulundu.

olduğu durumlar olarak açıklayabiliriz. Bu da kesinlikle anlamlı bir durum değildi.[10]

İkili modelleri öven makalelerin hakkını verebilmek için bu hayaletlerin her birinin defedilmesi gerekiyordu. Peki ama bu nasıl olacaktı? 1969 yılının sonlarında Arjantinli fizikçi Miguel Virasoro, gelecek vaat eden bir gözlem yaptı: ikili modellerin denklemlerinin sonsuz-boyutlu simetriye sahip olduğunu gösterdi; bu simetri, muhteşem matematiksel güzelliği için hayranlık duyulan bir cebirsel yaklaşımın ürünüydü. Bu gelişme, teorisyenlere hayaletlerin ortadan kaldırılabileceği ümidini verdi, gerçi rahatsız edici bir neticesi de vardı: Virasoro'nun cebirsel matematiğinin doğru olması halinde, modeller tam bir birim spini olan kütlesiz bir partikül içermek durumundaydı, bunlar daha ziyade fotonlar gibi olmalıydı ama fotonların aynısı değillerdi; ama böyle bir partikülün varlığına dair herhangi bir işaret yoktu. İkili modelciler bu rahatsızlığı göz ardı edip yollarına devam ettiler.

O dönemde otuzlu yaşlarının ortasında olan Britanya doğumlu Güney Afrikalı teorisyen Claud Lovelace, modeli matematiksel açıdan tutarlı hale getirecek bir yöntem bulmaya kararlıydı ve tuhaf bir sonucu olan bir öneriyle çıkageldi. 1979 yılında CERN'de çalışmasının ardından New Jersey'deki Rutgers Üniversitesi'nde görev almıştı, burada İncil'den fırlamış bir aziz gibi görünen uzun ak sakalıyla egzantrik bir figür konumundaydı. Princeton'daki Holiday Inn'de geçici olarak küçük bir odada konaklarken, ikili modelleri ortaya koymanın matematiksel açıdan tutarlı bir yolunu bulmaya çalışıyordu. Etrafındaki kâğıt ve kitap yığınlarının arasında (bu yığınların içinde modern fizik hakkında birçok kitap vardı ve bazıları Henri Poincare ile Bernard Riemann'ın matematiğiyle ilgiliydi), gerçek dünyaya uygulanabilir olmak için modellerin sağlaması gerekli bazı şartları belirtmenin bir yolunu buldu. En önemli nokta da şuydu ki, güçlü etkileşimlere ilişkin ikili model yaklaşımının anlamlı olması için uzay zaman boyutları sayısının kocaman bir "yirmi altı" olması gerektiğini öne sürüyordu.

10. Goddard (2013: 12-13); Olive, D., 'From Dual Fermion to String Theory', yer aldığı çalışma Cappelli vd. (ed.), (2012: 346-360)

Uzay-zaman boyutlarının sayısının standart dört sayısının üzerinde olabileceği fikri, fizik dünyasının üzerinde nerdeyse yarım yüzyıldır dolanıyordu. İlk kez 1919 yılında Alman matematikçi Theodor Kaluza tarafından Königsberg'de ortaya atılan bu fikir, daha sonraları İsveçli teorik fizikçi Oskar Klein tarafından Kopenhag'da geliştirildi.[11] 1926 yılında Klein, uzayın ekstra bir boyutunun var olabileceğini öne sürmüştü; gerçi "yeni" boyutu gözlemlemek zor olabilirdi, çünkü çok küçüktü: bu ekstra boyuttaki herhangi bir hareket küçük çevresiyle kısıtlanmış olacaktı, bu çevre yaklaşık olarak bir atom çekirdeğinin milyarda birinin milyarda biri kadardı; yani deney araştırmacılarının gözlem kapasitesinin çok uzağındaydı. Einstein bu fikri ciddiye aldı, ama fikir rağbet kazanmadı. Bu esnada matematikçiler daha çok boyutlu soyut uzayları ele almak konusunda gitgide daha rahat hale geliyordu ve gerçeklikle ilişkili olup olmamalarını umursamıyorlardı.

Asla gözlemlenmemiş bir uzay boyutu olduğunu öne sürmek cesaret istiyordu; yirmi iki gözlemlenmemiş boyut olduğunu öne sürmek ise gülünç denecek kadar ihtimal dışı görünüyordu. Lovelace'ın hatıralarına göre, bu fikri İleri Araştırmalar Enstitüsü'ndeki bir seminerde ilk kez sunduğunda bunu bir "şaka olarak" ifade etmişti ve iyi de karşılıkalmıştı: "Herkes gülmüştü."[12] Kırk yıl kadar sonra, 2012 yılında ikili modellerle ilgili çalışmaları hakkında kaleme aldığı bir anı yazısında fizik camiasının düşüncesine küçümsemeyle yaklaşmış olmasından hâlâ dert yanıyordu. Lovelace, makaleyi yetmiş sekiz yaşındayken yazmıştı, ailesi veya yakın bir arkadaşı yoktu, gerçi egzotik kuşların dostluğuna karşı bir tutkusu vardı. Kısa süre sonra öldü, evinde bir sürü muhabbet kuşu vardı.[13]

Lovelace'ın haklı olması halinde, bu ilave uzay boyutları, fizikçilere; daha fazla boyutlu uzayların hızla gelişen matematiğini kullanarak yeni teoriler geliştirmek adına beklenmedik bir esneklik verecekti. İkili modellerin en doğal şekliyle yirmi altı boyut halinde formüle edildiğine dair gözlemi, birkaç ay içinde

11. Klein (1926: 516)
12. Cappelli vd. (2012: 199)
13. Halpern, P., 'The Man Who Invented the 26th Dimension', *Medium*, 5 Ağustos 2014: https://medium.com/starts-with-a-bang/the-man-who-invented-the-26th-dimension-4be837ee8ff5#.ll5o-1j2wt

başka teorik fizikçilerin de teoriyi şaşırtıcı bir matematiksel keşif yapmak üzere kullanmalarıyla beraber daha mantıklı görünür hale geldi.

Bu teorisyenlerin ikisi, CERN'in teori bölümünde çalışıyordu; bölüm, laboratuvarın fonksiyonel ama sevimsiz binalarından birinde bir çift koridoru kapsıyordu. 1970 yılında bölüm, ikili modeller konusunda birçok uzman barındırıyordu ve Eylül ayında bu gruba yirmi beş yaşında olan ama halihazırda eski ekol teorisyen havasına bürünmüş Peter Goddard da katıldı. Dirac'ın fizik yaklaşımlarının sadık bir hayranı olan Goddard, deney araştırmacılarının yaptığı en son şaşırtıcı gözlemleri açıklamaya çalışmaya odaklanarak (zaman zaman "ambulans kovalamak" olarak tabir edilerek hor görülen bir uygulama) iddialı ve matematiksel açıdan ilgi çekici teoriler geliştirmeyi tercih ediyordu.[14] Goddard, CERN'de hayatının en güzel günlerini geçirdi, teori grubunun atmosferinde canlılık içindeydi; dışa dönük, işbirliğine yatkın ve kendisinin hatırladığı şekliyle modern teorik fiziğin gelenekleri karşısında "biraz da yıkıcıydı".[15]

Amerikalı teorisyen Charles Thorn, gruba Ocak 1972'de katıldı ve Goddard ile işbirliği yapmaya başladı; ikili modelleri istila eden hayaletlerin hayal ürünü olduğunu ispatlamayı umuyordu. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde de birçok teorisyen aynı problemle uğraşıyordu, bu problemin ikili modeller açısından taşıdığı risk daha fazla olamazdı: modeller, hayaletsiz çıkmamaları halinde çöpe atılabilirlerdi. Aylarca süren yoğun matematiksel emeğin ardından Goddard ve Thorn, bir bahar günü, akşamüstü saatlerinde CERN kafeteryasına girerken cevabı bulmak üzerelerdi. Goddard bana daha sonraları şöyle anlatacaktı: "Jetonumuz düştüğünde tam olarak hangi noktada yürüdüğümüzü hâlâ hatırlıyorum." Goddard ve Thorn, ikili modellerin, sıradan uzay-zamanda değil de Lovelace tarafından öne sürülmüş olan sayıda boyuta sahip uzay zamanda ortaya konmaları halinde hayaletlerden arınacağını anlamışlardı: bu sayı, yirmi altıydı.[16]

14. Bu terim 1970'lerde genel olarak kullanılıyordu. Kökenini bilmiyorum ama Amerikalı teorik fizikçi Julian Schwinger'a atfedildiğini duydum.
15. Goddard'la söyleşi, 22 Mart 2016
16. Goddard'la söyleşi, 19 Haziran 2017. Richard Brower ve Charles Thorn, uzay zaman boyutlarının sayısının yirmi altıyı aşması halinde modellerin anlamsız olduğunu daha önce kanıtlamışlardı.

Goddard ve Thorn -ve onlardan habersiz olarak MIT teorisyeni Richard Brower-, "hayaletsizlik teoremi" olarak tanınacak olan teorem tarafından hayaletlerin yokluğunun garanti edildiğini kanıtladı. Elde ettikleri sonuçları *Physics Letters* dergisinde yayımlamış olmalarına rağmen, dergi okurlarının çoğu, makaleyi muhtemelen yüksek matematik hakkında sandı, gerçi zaten öyleydi. Ama ikili modellerin tabiata dair tutarlı açıklamalar olmaları halinde, bu yüksek matematik de doğru olmalıydı.[17] Sonuç ise fizikçileri defosuz teorem üretmek konusunda fazla dağınık bulan saf matematikçiler için bütünüyle şaşırtıcı oldu. Çünkü şimdi karşılarında gerçek dünyaya ait teoriler olma iddiasını bile taşımayan modeller geliştirmekte olan fizikçiler tarafından kanıtlanmış bir teorem vardı. Goddard daha sonraları hatıralarında şöyle ifade edecekti: "Hayaletsizlik teoreminin benim üzerimde derin bir etkisi olmuştu. Teoremin ispatı, hiçbir saf matematikçinin kaleme almayı düşünemeyeceği mükemmel bir yapı ortaya çıkarıyordu."[18] Fizikçiler, matematikçilerin ihtiyaç duyduklarını bile bilmedikleri bir matematiksel ispat üretmişlerdi. Goddard, ikili modellerin matematiğinde mucizevi bir şeyler olduğunu düşünüyordu ve "bunları anlamaya çalışmaya değer olduğu" düşüncesindeydi, gerçi modellerin "doğru olma şansı oldukça düşüktü".[19]

1970'lerde saf matematiğin farklı bölümlerinin ön saflarındaki en zorlu problemlerin bazılarının fizikle, genellikle de ikili modeller dolayısıyla fizikle ilişkili olduğu ortaya çıktıkça Goddard tekrar tekrar şaşkınlığa düştü. Bunlara ilişkin en sevdiği örneklerden biri, grup teorisi -simetrilerin matematiği- hakkındaki bazı tuhaf keşiflerle ilişkiliydi ve bunların, Goddard ve diğer fizikçilerin geliştirdiği teknikler kullanılarak nihayetinde anlaşılır hale gelişini kapsıyordu. Hikâye, 1960'ların sonlarında Cambridge'de, teorik fizik alanında doktora öğrencisi olduğu dönemde başladı; matematik bölümündeki arkadaşlarını simetri alanındaki yeni araştırmalar hakkında konuşurken duymuştu. Renkli bir karaktere sahip olan matematikçi John Horton Conway ve meslektaşları ayrık simetrilerin tüm temel yapı

17. Goddard'la söyleşi, 14 Temmuz 2016
18. Cappelli vd. (ed.), (2012: 248)
19. Goddard'la söyleşi, 22 Mart 2016

taşlarını sınıflandırmaya çalışıyordu; bir başka deyişle, simetrik bir matematiksel objeye, objeyi değişmeden bırakan bir şekilde ayrık değişimler uygulamanın tüm yollarını bulmaya çalışıyorlardı. Conway, yirmi dört boyutlu bir uzayda özel bir objenin simetrilerinin, bu yapı taşlarından biri olduğu tahminini yaptı ve simetrilerin toplam sayısının sekiz milyarın milyar katı olduğunu gösterdi.

Birkaç yıl sonra Alman Berndt Fischer ve Amerikalı Robert Greiss, daha bile fazla simetriye sahip daha bile büyük yapıtaşları olduğu iddiasını ortaya attı: tam olarak 808.017.424.794.512.875.886.459.904.961.710.757.005.754.368.000.000.000. Dahası, bu yapıtaşı, 196.883 boyutu olan bir uzayda var oluyordu –veya daha doğrusu işlerlik gösteriyordu–. Bu durum, Conway'in verdiği isimle "Canavar Grup" olarak adlandırıldı; Griess de bunun için bir isim önermişti, ama o tercih edilmedi: "Dost Canlısı Dev" (Bu ifade, Kanada televizyonunda popüler bir çocuk programının adıydı ve İngilizce orijinal ismi olan Friendly Giant ifadesinin baş harfleri Fischer ve Greiss'ın baş harflerine karşılık gelmiş oluyordu).[20] Canavar Grubun özelliklerinin son derece tuhaf olduğunun görülmesiyle birlikte Conway bunları "heyula gibi ay ışığı" olarak tanımlamaya başladı.

1981 yılı yazında Canavar Grup, kesin olarak kanıtlanmış matematik kaideleri arasına girdi.[21] Freeman Dyson haberi aldığında o kadar heyecanlandı ki, çılgınca bir kehanette bulunmaktan kendini alamadı: "Yirmi birinci yüzyılın bir yerlerinde fizikçiler kuşku götürmez bir şekilde evrenin yapısına dahil olmuş canavar gruba rastlayacaklar."[22] On yıl kadar sonra Dyson'ın kehaneti o kadar da çılgın görünmez oldu. Britanyalı matematikçi Richard Borcherds, matematik yeteneğini konuşturduğu bir çalışmasında, matematikçilerden ziyade ikili model uzmanlarının daha aşina olduğu metotlar kullanarak "ay ışığı varsayımlarını" kanıtladı. "Heyula gibi ay ışığı" özelliklerini kanıtlarken ikili modellerin matematiğini son derece yoğun olarak kullandı, bu modellerin arasında Goddard ve Thorn'un hayaletsizlik teoremi de vardı.

---

20. Goddard'dan gelen e-mail, 29 Temmuz 2018
21. Roberts (2015: 225-228, 234-238, 325-333)
22. Dyson (1983: 53). Dyson'ın konuşması, 24-26 Ağustos 1981'de bir kolokyum esnasında gerçekleşti, bilgi: IAS *Yearbook*, 1982.

Hayaletsizlik teoreminin, matematik ve fizik arasındaki ilişki açısından önemi net değildir. Teorem, ikili modellerin yalnızca matematiksel bir yan ürününden ibaret olabilir; bu yan ürün de sub-nükleer dünyanın tam bir tanımı olamaz. Peki ya bu durum bir yüzyıl önce düğüm teorisinin yükselişine benzetilebilir mi; ki düğüm teorisi de daha sonraları hayali olduğu kanıtlanmış olan eter modellerinden çıkmıştır veya hayaletsizlik teoreminin başarısı Leibniz'in 275 yıl öncesinde tanımlamış olduğu şekilde matematikle fizik arasındaki "önceden beri varolan uyumun" bir başka örneği midir?

*

İkili modellerin bir başka ürünü de süpersimetriydi; bunu kimse daha önceden tasavvur edememişti fakat daha sonrasında birçok fizikçi, süpersimetrinin doğanın tüm temel denklemleri için geçerli olduğunu düşünmeye başladı. Eğer bu simetri gerçekten gerçek dünya için geçerli idiyse, Einstein'ın izafiyet teorisinden beri uzaya ve zamana dair anlayışımızdaki en devrimci değişim olacaktı.

Süpersimetrinin izi 1920'li yıllara kadar sürülebilmektedir. O dönemde kuantumun öncüleri sürpriz bir keşifte bulunarak her bir atomik parçacığın davranışının kritik ölçüde spinine bağlı olduğunu bulmuşlardı. Örneğin foton grupları (her biri 1 spine sahip olan fotonlar), elektron gruplarından (her biri 1/2 spine sahip olan elektronlar) oldukça farklı davranıyordu, deney araştırmacıları da bunu tekrar tekrar doğrulamıştı. Atom parçacıklarının iki kategoriden birine girdiği ortaya çıktı: bir grupta 0 veya 1 veya 2 veya 3 spini olan paritküller vardı...., bunlara *boson*'lar deniyordu ve diğer kategoride de 1/2, 3/2, 5/2 spini (dönüşü) olan parçacıklar vardı, bunlara da *fermion*'lar deniyordu. Bosonlar ve fermionlar farklı kurallara göre hareket ederek şu soruyu doğuruyorlardı: bu iki parçacık ailesi tek bir simetri kullanılarak tanımlanabilir miydi?

Veneziano'nunki de dahil olmak üzere ilk ikili modeller sınırlıydı, çünkü yalnızca bosonlar için geçerliydiler. Fermionları da kapsayacak şekilde nasıl genişletilebilirlerdi? Teorisyenler bu soruya cevap ararken süpersimetriyi buldular. Bu yeni simetri, boson ve fermionları tek bir çerçeve dahilinde tanımlamalarına

imkân veriyordu. Bilimdeki birçok büyük fikir gibi süpersimetri de tek bir kişi tarafından bir ilham anında ortaya atılmış değildi.[23] Hikâyenin bir tarafı 1970 yılı Noel'inden kısa süre önce Chicago yakınlarındaki Fermilab hızlandırıcı laboratuvarında başladı. Laboratuvarın teori departmanında Fransa doğumlu genç teorisyen Pierre Ramond –doktorasını yeni tamamlamıştı–, ikili modelleri fermionlara da uygulayabilecek şekilde bir yöntem bulmuş olmanın heyecanını yaşıyordu. Bana daha sonraları anlattığına göre, bu fikri Dirac'ın elektron denklemini kullanırken bulmuştu; amacı, "yerleşik ikili modeller arasında bir analoji kurarak hem fermionlar hem de bosonlar için geçerli olabilecek modellere doğru adım atabilmekti".[24] Ramond, Dirac denkleminin yeni bir simetrinin tohumlarını içerdiğini gösterdi ve denklemin bir partikül tanımından ibaret kalmaktan çıkarılıp süpersimetrisi olan denklemlerle tanımlanan bir sicimin tanımına doğru genellenebileceğini ortaya koydu. Teorisyenler Andre Neveu ve John Schwarz da hemen hemen aynı dönemde, onun bu çalışmasından bağımsız olarak oldukça yakın fikirler ürettiler.

Süpersimetrinin gerçek dünya için geçerli olabileceği düşüncesi, CERN'den Bruno Zumino ve Karlsruhe Üniversitesi'nden Julius Wess'in bu düşünceyi alışıldık dört boyutlu uzay-zamana uygulamasıyla 1973 yılı sonbaharında uçuşa geçti.[25] Eğer gerçek dünyada bu simetri vardıysa, parçacık fiziği Standart Modeli genişletilmek zorundaydı. Bir başka kaçınılmaz sonuç da şuydu ki, süpersimetriye göre doğada daha önce düşünülenden çok daha fazla parçacık var oluyordu çünkü Standart Model'de her bir parçacığın süper-eş olarak bilinen bir de muadili vardı. Süpersimetrik Standart Modele göre lepton ve quark ailelerinin her bir üyesi –hepsi de fermionlardır– muadil bir boson süper-eşe sahiptir: benzer şekilde her bir ölçüm parçacığı da –hepsi bosonlardı– muadil bir fermion süper-eşe sahiptir. Örneğin ½ spinli

23. Schwarz, J. H., 'The Early History of String Theory and Supersymmetry' (2012): https://arxiv.org/abs/1201.0981

24. Ramond'la söyleşi, 19 Eylül 2017.

25. Rus teorisyenler Gol'fand ve Likhtman, Volkov ve Akulov da 1971 yılından başlayarak süpersimetriyi formüle ettiler, gerçi Demir Perde bu keşifleriyle ilgili haberlerin Batı'ya ulaşmasını geciktirdi. Neveu ve Schwarz'ın kritik katkıları, süpersimetrisi olan ilk saçılma genliğini yazmış olmalarıydı.

elektronun ve quarkların spin 0'lı muadilleri vardır, sırasıyla selektron ve squark olarak bilinirler. Aynı şekilde 1 spinli foton ve gluonların da ½ spinli muadilleri vardır, bunlar da sırasıyla fotino ve gluino olarak bilinirler. Süpersimetri terminolojisinin biraz "uydurma" olduğu açık.[26]

Var olduğu düşünülen bu süper-eş parçacıkları araştırmak kolay olmayacaktı. Fizikçiler için problem, parçacıkların kütlesi hakkında simetrinin neredeyse hiçbir şey söylemiyor oluşuydu, dolayısıyla deney araştırmacıları da bunları nerede aramaları gerektiği konusunda belirsizlik içindeydi. Bu da demek oluyordu ki, fizikçiler benzeri görülmemiş yüksek enerjilerdeki etkileşimleri denemek için yeni bir parçacık hızlandırıcı kurduklarında, bu eşlerden herhangi birinin ortaya çıkıp çıkmayacağını kimse net şekilde söyleyemezdi.

Fizikçiler arasında süpersimetrinin popüler hale gelmesinin başlıca nedenlerinden biri de –test edilmeye hazır olup olmamasından ayrı olarak– sıradan bir eski kurgu matematiksel simetriden ibaret olmamasıydı: süpersimetri eşsizdi.[27] Süpersimetri, uzay ve zaman arasındaki simetriyi (Einstein'ın özel izafiyet teorisinde tanımlandığı şekliyle) uzay-zamanın kuantum mekaniğine uygun olacağını garanti eden şekilde genişletmenin tek muhtemel yoludur. Bu revize uzay-zamanda "uzayın" her bir yönündeki "uzunluklar" ölçüm cihazlarıyla okunabilen alışıldık sayılarla değil, kuantum işlemciler olarak bilinen soyut matematiksel objeler tarafından belirtilebilir. Yani süpersimetri tarafından tanımlanan kuantum-mekanik uzay-zaman, uzunlukların ve zamanın uzunluk ölçerlerle ve saatlerle ölçüldüğü genel deneyimlere dayanan uzay-zamandan farklıdır. Bu durum, teorisyenlerin, atom altı dünyayı yeni bir yolla düşünerek (matematiğin yardımıyla) gerçekliğe dair zaman zaman yeni bir bakış açısına ulaşmalarına ilişkin bir başka örnek konumundadır.

Süpersimetri bir başka yönden de eşsizdir. Doğa, yalnızca süpersimetriyi kullanarak temel parçacıklarına muhtemel spinlerin tamamını verebilir: Eğer süpersimetri yalnızca teorisyenlerin

26. Gell-Mann, M., 'From Renormalizability to Calculability?', yer aldığı çalışma, Jackiw vd. (ed.), (1985: 13)
27. Arkani-Hamed (2012: 61-62)

ortak icadı olmaktan ibaretse, bu durumda doğa, özel izafiyet teorisi ve kuantum mekaniğinin 0 ve 2 arasında imkân verdiği tüm muhtemel değerlerde spine sahip en az bir temel parçacığa sahip olma imkânını es geçmiş demektir.[28]

Daha dünyevi şekilde ifade etmek gerekirse, simetri adeta bir sihir gibi işlerlik göstermiş ve fizikçilere Standart Modeli kullanarak zorlu hesaplamaları yapma imkânı vermiştir (örneğin Higgs parçacığının kütlesine dair yaklaşık tahminlerde bulunabilmek gibi). Destekçilerinin gözünde süpersimetri, yanlış olamayacak kadar güzel görünen teorik spekülasyonlardan biriydi –bundan faydalanmamak doğa adına utanç olurdu–.

Ancak süpersimetrinin varlığı o âna kadar herhangi bir deneyle ispatlanmış değildi ve aralarında ABD'deki önde gelen bazı isimler de olmak üzere bazı teorisyenler, süpersimetrinin doğanın planına dahil olduğuna ikna olmamışlardı. Örneğin Sheldon Lee Glasgow'un daha sonraları bana söylediğine göre, "süpersimetri Avrupa'da bir din gibi görülüyordu".[29] Eğer bu doğruyduysa, bazı önde gelen isimler dininden dönmüştü diyebiliriz; bunların en dikkat çekenlerinden biri de Gerard 't Hooft'du, bana şöyle söylemişti: "Fizikte süpersimetri için doğal bir konum göremiyordum, ben de bu yüzden süpersimetriden uzak durdum."[30]

Süpersimetri yalnızca teorik fizikçiler için değil, saf matematikçiler için de bir nimetti. Tahmin edilebileceği gibi, doğaya dair ortaya atılan bu yeni simetrinin gücünü çağdaş matematiğe dahil bir kavram olarak gösteren ilk kişi, fizikçi Edward Witten'dı. Witten, bu düşünceye 1981 yılında oldukça ani ulaştı, Aspen Colorado'da bir yüzme havuzundaydı.[31] O dönem itibarıyla Witten, teorik fizikçiler arasında özel bir yetenek olarak iyi tanınıyordu. Genellikle çok konuşkan biri olmasa da, bazı teknik konular hakkında güçlü hislere sahip olduğunda büyük hızla ve tereddütsüz, sapmadan ve kendini tekrar etmeden konuşurdu, sanki önceden yazılmış paragrafları okur gibiydi. Yeteneklerinden açıkça haz duyuyordu: Verdiği derslerden birinin sonunda,

28. Arkani-Hamed, N., 'Quantum Mechanics and Space-Time in the 21st Century': https://www.youtube.com/watch?v=U47kyV4TMnE, saat 19:30 (2014)
29. Glashow'la söyleşi, 28 Mart 2016
30. 't Hooft'la söyleşi, 20 Mayıs 2014
31. Witten (2014)

bacak arasından yaptığı vuruşla sayı almış Roger Federer gibi bir yüz ifadesiyle gülümsediğini hatırlıyorum.

Witten, yüzme havuzundaki vahiy anında, süpersimetrinin, Morse teorisinin matematiksel içeriğiyle ilişkili olabileceğini sezdi. Bu matematiksel içerik, matematik fonksiyonları ile bu fonksiyonların tanımladığı uzayların şekilleri arasındaki ilişkiyi ele alır. Teori, Amerikalı matematikçi Marston Morse'un adıyla anılıyordu; Morse, elli yıldan daha uzun bir süre öncesinde teorinin başlıca fikirlerinin birçoğunu ortaya koyan kişiydi. James Clark Maxwell, daha da uzun zaman öncesinde bu konunun unsurlarının birçoğunu keşfetmişti. Maxwell, ilk kez 1870 yılında, Britanya Bilim İlerleme Birliği'nin Liverpool Crown Court'taki yıllık toplantısında bundan bahsetti. Bir cumartesi sabahı, pek de fazla kişinin katılmadığı toplantıda Maxwell, matematiksel mantığın, kırsal bölgelerin bazı topografik özelliklerine yeni bir ışık tutmasına nasıl yardımcı olduğunu açıkladı.[32] Belirtildiğine göre, dinleyici kitlesi içindeki birçok kişi, Maxwell'in masum görünen bir konuyu birçoklarının çok ağır bulduğu bir matematiksel dille açıklayabilmesini şaşkınlıkla karşılamıştı.[33]

Bununla beraber, seminere gitmiş olan az sayıdaki uzman, bir doğa felsefecisinin, daha sonraları Morse teorisi olarak bilinecek olan matematiğin yeni bir branşına öncülük edişine tanık oldular. Bir yüzyıl sonra bu teori, matematikçiler arasında en sıcak konu oldu. Witten bu konuyu ilk kez Korsika'daki bir yaz okulunda duymuştu. Virtüöz matematikçi Raoul Bott, yaz okulundayken, en sevdiği konu olan bu teoriyi anlatacağını söyleyerek derslerine başlamış, bir gün onlara faydalı olabileceğini eklemişti.[34] Yüzme havuzundaki aydınlanma anına kadar Witten, teorinin gerçek dünyayla bir ilişkisi olduğuna ikna olmamıştı. Birkaç gün sonrasında ise Morse teorisi ile süpersimetri arasında bütünüyle beklenmedik bir bağlantı oluşturdu.

Topolojistler şaşkındı. Çoğu matematikçinin hakkında hiçbir şey bilmediği veya çok az şey bildiği, kanıtlanmamış bir fizik

32. Griffiths (1981: 82-86)

33. Maxwell, konuşmasını 17 Eylül'de yaptı; yani 'On the Relations of Mathematics and Physics' konuşmasından iki gün sonra.

34. Atiyah, M., *Biographical Memoir of Raoul Bott* (2013): http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/bott-raoul.pdf; bkz. Witten'ın katkısı s. 11

teorisinin, çok boyutlu soyut uzayların şekilleri konusunda parlak bir ışık tutabileceğine pek inanamıyorlardı.[35] Nihayetinde bu konunun gerçek dünyayla hiçbir ilişkisi yokmuş gibi görünüyordu. Witten'ın analizlerinden birine göre, kuantum mekaniği denklemleri süpersimetriyi de içerecek şekilde modifiye edilmelerinin ardından, elli yıl kadar önce geometrici William Hodge (Michael Atiyah'ın araştırma hocası) tarafından bulunmuş olan denklemlerle aynı olacaktı. Bununla beraber, fizikçiler bir kez daha matematikçilerin onlarca yıl öncesinde yapmış oldukları yollardan yürüyorlardı. 1939 yılı Scott Semineri'nde Dirac'ın sarf etmiş olduğu şu sözler artık her zamankinden daha net yankılanıyordu: "Matematikçilerin ilgi çekici bulduğu kurallar, Tabiatın seçtikleriyle aynı."

Witten, kariyerinin başlarında fizik ve matematik arasındaki ilişkiden çok fazla şey çıkarmak konusunda temkinliydi. Daha sonraları hatırladığına göre, matematikçilerden öğrendiği şeylerin semeresini "ancak aşama aşama" aldı. 1970'lerin ortalarında kuantum alan teorisi ile modern matematik arasındaki örtüşmeyle karşılaştığında bunun bir "istisnadan", farklılıktan fazlası olmadığını düşünmüştü.[36] Ama 1980'lerin başlarında, matematiğin ön saflarının fiziğin ön saflarını istikrarlı şekilde güçlendireceğine (ve fiziğin de matematiği güçlendireceğine) ikna olur hale geldi.

1980'lerin ortalarında gördüğüm tabloda ise matematik zekâsına sahip birçok teorisyene göre süpersimetrinin matematik alanında gösterdiği başarı, simetrinin tabiatın altında yatan bir özellik olduğuna dair ikinci dereceden kanıt teşkil ediyordu. Teorisyenler konferanslarda kendilerini dinleyenlere süpersimetrinin varlığının keşfedilmesinin mesele olmadığını, ne zaman keşfedileceğinin asıl mesele olduğunu sık sık söyler olmuştu: varlığı tahmin edilen "yeni" parçacıkların er ya da geç ortaya çıkacağından emindiler.

Ama böylesi bir özgüven çoğu deney araştırmacısına sökmüyordu, bunların arasında açık sözlü İtalyan Carlo Rubbia da vardı. 1986 yılında teorisyenlerin ve deney araştırmacılarının da katıldığı bir konferansta içini döktü: "Bu teorik cümbüşün

35. Atiyah (1990: 33-34)
36. Witten (2014)

içinde kendimi nesli tükenme tehlikesinde olan bir tür gibi hissediyorum. Gerçekten şaşkınım. Teorisyenler parçacık ardına parçacık icat ediyor ve şimdi de elimizdeki her bir parçacık için bir de elimizde olmayan parçacık var ve elbette bizim de bunları bulmamız gerekiyor. Bu durum, duvarların ve zeminin yarısının olmadığı bir evde yaşamak gibi. ... Fiziğin teorisyen camiasında algılanışıyla, bir boy aşağıda yani deney araştırmacılarının zemininde gerçekten ne olduğu arasında büyük bir uçurum var."[37]

Nihayetinde süpersimetrinin gerçek dünya için geçerli olup olmadığı konusunda emin olmanın tek yolunun, evrenin ne söylediğini deney sonuçları aracılığıyla dinlemek olduğu noktasında tüm fizikçiler hemfikirdi. Her zaman olduğu gibi, yeni bir teorinin ne kadar ilerleyebileceğini bildiklerini söyleyerek cesaret gösterisi yapan fizikçiler, tabiat tarafından küçük düşürülme riskini göze almış oluyordu.

*

1974 yılında, yani Gabriele Veneziano'nun ikili modelle ilk karşılaşmasından altı yıl sonra, fizikçiler modelleri doğru şekilde yorumlamadıklarını anlamaya başladılar: ikili modeller yalnızca büyük güçler için değil, yerçekimi de dahil olmak üzere doğanın tüm güçleri için geçerli oluyordu. Bir başka deyişle, sicim teorisi yalnızca atom çekirdeği içinde gerçekleşenlerle değil, aynı zamanda maddesel gerçekliğin bütünüyle ilgiliydi.[38]

Sicim teorisinin tüm temel güçler için geçerli olduğu düşüncesi, basılı olarak ilk kez Amerikalı John Schwarz ve Fransız Joël Scherk'in bir makalesinde yer aldı; bu iki teorisyen, önde gelen ikili model uzmanları arasındaydı. Duydukları heyecanı az bir miktar ele veren dikkatli bir dille yaptıkları açıklamada, eski sicim teorisinin süpersimetriyi de dahil eder şekilde yeniden yorumlanışının, doğanın en küçük düzeyine dair bütünüyle birleşik bir tanımı olabileceğini anlattılar –yüzyıldan uzun bir süredir teorik fizikçilerin yapmayı istediği bir şeydi bu–.

37. Zichichi (ed.), (1986: 231-246)

38. Bunu ilk fark eden fizikçiler arasında, metinde belirttiğim gibi Joel Scherk ve John Schwarz da var; ama onların yanı sıra David Olive ve Tamiaki Yoneya da yer alıyor.

Sicim teorisinin kalbinde doğanın en derin seviyesine dair yeni ve devrim niteliğinde bir tablo vardı. Bu da şu anlama geliyordu ki, elektronlar, quarklar, foton ve deney araştırmacılarının saptamış olduğu tüm diğer temel olduğu düşünülen parçacıklar aslında temel değildi. Eğer sicim teorisi doğruysa, bu durumda yalnızca tek bir temel gerçek varlık vardır, o da sicimdir: paçacıklar sicimin yalnızca sinyalleridir, bir keman telini çekince oluşan müzik notalarına benzerler. Maddesel evren de özünde keman telinin müziği gibidir.

Bu yaklaşım, hassas matematikle çerçeve içine alınarak işlerlik gösteren bir sihirdi sanki. En etkileyici nokta olarak da bu formalizm, atom altı güçlere dair daha önceki alan teorilerinin kapsamı dışında olan yerçekimi kuvvetini doğal olarak işin içine katıyordu. Sicim teorisi, diğer temel güçlere ilave olarak yerçekiminin de var olması halinde anlam kazanıyordu. Bir başka deyişle, sicim teorisi yerçekimin var olduğu anlamına geliyordu. Teorinin bir başka getirisi de, Einstein'ın yerçekimi teorisi kuantum mekaniğiyle kombine edildiğinde ortaya çıkan sonsuzluk değerlerini içermiyor oluşuydu. Sonsuzluk değerleri, görünüşe göre sicim teorisinde mucizevi şekilde ortadan kayboluyordu, dolayısıyla birçok uzmanı şaşırtacak şekilde matematiksel açıdan mantıklıydı.

Ama yeni sicim teorisinin endişe verici olumsuzlukları da vardı. En belirgin teknik defolarından biri şuydu ki, matematiksel yapısı sol-sağ simetrisinin bozulmasıyla uyumsuz görünüyordu; halbuki deney araştırmacıları, Lee ve Yang'ın tahminini takiben bu bozulmayı ilk olarak 1950'lerin ortalarında onaylamıştı.[39] Teorisyenlerin bu problemi düzeltememesi halinde teori yok olup gitmeye mahkûmdu.

Bir diğer ciddi zayıf noktası da teorinin test edilebilir görünmüyor oluşuydu, en azından öngörülebilir bir gelecekte bu mümkün görünmüyordu. Newton'ın fizik bilimini icra etme metodu norm haline geldiğinden beri geçen yaklaşık çeyrek milenyumluk sürede, yeni bir bilimsel teori üreten her insandan, deney araştırmacılarının kontrol edebileceği tahminler yürütmesi beklenirdi. Ama sicim teorisinde böylesi testler uygulanabilir değildi, çünkü yalnızca Big Bang'in en erken anlarındaki

39. Witten (2005)

(sonrasında zamanın kendisinin başladığı anlar) parçacıkların ultra yüksek enerji seviyelerindeki etkileşimlere uygulandıklarında düzgün sonuç veriyorlardı. Planck enerjisi olarak bilinen bu enerji seviyelerinde fizikçilerin gündelik dünyayı açıklamak için kullandığı nicelikler (örneğin uzunluk, zaman ve kütle gibi) alışıldık anlamlarını yitirmeye başlıyor ve fiziğin yasaları güvenilmez hal alıyordu.[40]

Bu enerji seviyesine kadar kuantum teorisinin ve özel izafiyet teorisinin belki de sicim teorisinin oluşturduğu çerçeve aracılığıyla doğanın güçlerini açıklaması beklenir. Ama problem şuydu ki, modern parçacık hızlandırıcılarda erişilebilen görece zayıf enerjilerde detaylı tahminler yürütebilmek adına teorinin nasıl kullanılacağını hiç kimse bilmiyordu. Deney araştırmacıları sicim teorisyenlerinin tahminlerini kontrol ederek onların ayaklarını yere bastırmadıkça, teorisyenlerin, bir yandan ileri matematikle güzelce tanımlanırken diğer yandan gerçek dünyayla ilişkisi olmayan saf düşünceden ibaret bir dünyaya dalmaları tehlikesi vardı.

*

1974 yılı baharında Schwarz ve Scherk, sicim teorisinin, birleşik alan teorisinin kutsal kitabı olabilme ihtimaliyle heyecana kapıldılar.[41] Tüm dünyada fizik bölümlerinde ve konferanslarda fizik seminerleri verdiler ve dinleyicileri de onları nazikçe dinledi, ama etkilenmiş değillerdi. O dönemde çoğu parçacık fizikçisi, yerçekimine dikkat kesilmeyi iş tanımlarının bir parçası saymıyordu ve yerçekimi uzmanlarının çoğu da atom altı fizik hakkında pek az şey biliyordu.[42]

Sicim teorisinin, doğanın tüm güçlerine uygulanabileceği şeklindeki Scherk ve Schwarz'ın önerisi, Ekim 1974'te, Kasım Devrimi'nden üç hafta önce basılı bir yayın haline geldi. Hırslı parçacık fizikçileri içinse ölçüm teorileri, üzerinde çalışmaya

40. "Kırılma değerleri" ilk olarak Mx Planck tarafından enerji, uzunluk, zaman ve kütleye dair temel birimler için (bu birimler tüm kültürler, tüm gözlemciler, hatta insan-olmayan gözlemciler için aynıdır) yazılmış olan formüller kullanılarak hesaplanabilir: Planck (1900)
41. Cappelli vd. (ed.), (2012: 48-49); Schwarz'la söyleşi, 9 Aralık 2014
42. Goddard'la söyleşi, 22 Mart 2016

değer yegâne şeydi –ne kadar gelecek vaat ediyor olursa olsun, spekülatif teoriler üzerine odaklanmanın zamanı değildi–. Yeni deneysel sonuçlarla yönünü bulan Standart Modeli geliştirmek, yapılacak en iyi şey gibi görünüyordu.

Sicim teorisi camiası her zaman küçük olmuştu ve devrimden sonra daha da küçüldü. Fizikçiler fırsat buldukça ölçüm teorileri ve deneysel veri arasında bağlantılar oluşturmaya ve daha önce gördüğümüz gibi teorilerin altında yatan matematiği geliştirmeye çalıştılar. Sicim teorisine inancını sürdüren az sayıda fizikçi arasında Schwarz ve Scherk de vardı; ancak Scherk, 1980 yılında, yalnızca otuz altı yaşındayken hayatını kaybetti. Schwarz, California Teknoloji Enstitüsü'nde genel olarak Michael Green ile işbirliği içinde teori üzerinde çalışmaya devam etti. Bu iki adam, CERN kafeteryasında bir öğle yemeği sonrası tesadüfen karşılaşmışlar ve ilk olarak on yıl öncesinde Princeton'da başlatmış oldukları dostça ilişkilerini hemen yeniden alevlendirmişlerdi.[43] Green, Londra Üniversitesi'nde öğretim üyesi olarak daimi bir kadroya sahipken, Schwarz moda olmayan alanlarda araştırma yapmanın bedelini ödüyordu: California Teknoloji Enstitüsü'nde en üst seviye teorisyenlerden biri olmasına rağmen kadrolu değildi.

Jeff Harvey'in hatıralarına göre, "o günlerde Green ve Schwarz gerçekten ıssız topraklarda dolanıyordu."[44] Ana akımdan uzak şekilde süpersimetriyi de işin içine katan sicim teorileri (süper-sicim olarak da bilinir) üzerinde çalışıyorlardı; temel teorinin bu versiyonu, teori tarafından tanımlanan uzay-zaman boyutlarının sayısını yirmi altıdan ona indirmek gibi olumlu bir etkiye de sahipti. Schwarz'ın bu şekilde 10'a indirilmiş boyutla çalışma isteği bile California Teknoloji Enstitüsü'ndeki meslektaşlarının çoğu arasında popüler değildi. Bu kişiler arasında şüpheci Richard Feynman da vardı, bir keresinde koridorda şöyle seslendiği duyulmuştu: "Hey Schwarz, bugün kaç boyuttasın bakalım?"[45]

Schwarz ve meslektaşları sicim teorisinde ilerleme kaydediyorlardı belki ama diğer teorisyenlerin birçoğunu kendilerine

43. Green'le söyleşi, 11 Mayıs 2018; Schwarz'dan gelen e-mail, 19 Haziran 2018
44. Harvey'le söyleşi, 13 Mayıs 2018
45. Schwarz'la söyleşi, 9 Aralık 2014. Büyük teorik fizikçi Murray Gell-Mann, bu zor yıllarda Schwarz'ın güçlü bir destekçisiydi; Mlodinow (2011: 296); Schwarz'dan gelen e-mail, 19 Haziran 2018

katılmaya ikna edemiyorlardı, matematiksel zekâya en fazla sahip olanları bile. Daha sonraları şöyle ifade edecekti o günleri: "hâlâ hiçbir tepki yoktu".[46] Witten bazı katkılar yaptı ama teorinin engin derinliğinden endişe duyuyordu ve dolayısıyla da bütün kalbiyle işin içine dalmaktan sakınıyordu. Sicim teorisinin fazlasıyla uzun soluklu bir mücadele olmasından korkuyordu. Ancak 1984 yılı sonbaharında fiziğin ve belli ölçüde de matematiğin gidişatını değiştiren bir makale okumasının ardından yaklaşımı aniden değişti.

46. Rickles (2014: 150)

9
sicimle bağlandılar

"Sicim teorisi 1980'lerde uçuşa geçtiğinde, modern matematikle modern fizik arasındaki ilişkiyi tuhaflıktan ibaret görmeyi bıraktım. Bu ilişki, tuhaflıktan ibaret olamayacak kadar ısrarcı ve sık rastlanır haldeydi."

Edward Witten, 2014

1984 yılı Eylül ayı ortalarında Michael Green ve John Schwarz tarafından kaleme alınmış kısa bir makaleyi içeren bir kargo, Edward Witten'ın Princeton Üniversitesi'ndeki posta kutusuna ulaştı. Witten bu kargoyu bekliyordu, bu iki adamın göründüğü kadarıyla önemli bir atılım yapmış olduğunu birkaç gün öncesinde duymuştu. Ve elbette Witten; Green ve Schwarz'ın hem bilimsel perspektifleri hem de kariyer yönelimlerini temelden değiştirebilecek ölçüde derin bir analizle çıkageldiklerini görmüştü. Makaleyi okuduktan sonra tedbirli olma eğilimini bir kenara bıraktı ve bu gelişmeyi "heyecan verici" ve "baş döndürücü bir gelişme" olarak tanımladı.[1]

Sicim teorisi yalnızca haftalar içinde uçuşa geçti. Kuantum mekaniğiyle özel izafiyet teorisinin potansiyel vaat eden en yeni kombinasyonuydu ve matematiksel gelişime açık bir olgunluğa erişmiş durumdaydı. Bu bölümde teorik fizikçiler ve saf mate-

1. Witten, "heyecan verici gelişme" ifadesini, Green ve Schwarz'ın makalesini okuduktan kısa bir süre sonra yazdığı makalede kullanır.

matikçiler arasındaki disiplinler arası en çarpıcı başarılardan birkaçını anlatacağım ve bu başarılar yalnızca sicim teorisiyle ilişkili değil. Hiç kimsenin tam olarak anlayamadığı nedenlerden dolayı fizikçiler bazen matematikçilerin planlarını geliştirebiliyordu, matematikçiler de aynı şeyi fizikçiler için yapıyordu. Farklı disiplinlerdeki uzmanlar birbirlerinin topraklarına ayak bastıklarında kültür çatışmaları kaçınılmazdır –ve daha sonra göreceğimiz gibi, bazı fizikçilerin kutsal matematik topraklarına göçü bir istisna olmamıştır–.

Green ve Schwarz'ın hikâyesiyle başlayalım. Zaferlerine 1984'ün başlarından beri yaklaşmaktaydılar, ama Green'in bana söylediğine göre o sırada üstesinden gelmeye çalıştıkları problem hakkında kendilerinden pek emin değillerdi. Birçok meslektaşları, inandıkları şeyin neredeyse kesin denebilecek şekilde teorinin ölümcül zayıflığı olduğunun altını çiziyordu: Lee ve Yang'ın neredeyse otuz yıl öncesinde başarıyla tahmin etmiş oldukları şekilde, bazı radyoaktif bozunmalarda sol-sağ simetrisinin ortadan kalkmasının nedenini teori açıklayamıyordu. Hayal peşinde koştukları söylense de Green ve Schwarz ısrarcıydı ve aşama aşama bir noktaya varmak üzere olduklarına inanmaya başladılar. Green'in Schwarz'la yaptıkları işbirliğine dair anıları hâlâ canlı: "İkimiz de bekârdık, saatlerce çılgın gibi çalışıyorduk ve kimse sicimlerle ilgilenmediği için neredeyse hiç rakibimiz yoktu. Diğerlerinin neredeyse hepsi [bizim fizik alanında] süper yerçekimi üzerinde çalışıyordu [Einstein'ın yerçekimi teorisi alanındaki süper simetrik gelişmeler]." Yazdıkları makale çoğu fizikçi açısından son derece matematiksel görünmüş olsa da, Green, fiziği ön plana ve merkeze koyduklarını hatırlıyor: "Matematiksel açıdan son derece sadelik içindeydik. Amacımız teorinin işleyebilen bir versiyonunu üretmenin bir yolunu bulmaktı."[2]

Temmuz-Ağustos ayları esnasında Green ve Schwarz, Colorado Aspen Fizik Merkezi'ndeki yaz programına katıldılar. Bu program yılda bir düzenlenen, yaklaşık yirmi otuz fizikçiyi birkaç hafta boyunca araştırmalar yapmak üzere bir araya getiren bir etkinlikti, aralara da konserler ve yakındaki tepelerde yürüyüşler serpiştiriliyordu. Diğer katılımcılar gibi Green ve

2. Green'le söyleşiler, 19 Ekim 2016, 11 Mayıs 2018

Schwarz da zaman zaman kendilerine vakit ayırıyorlardı, ama yine de eziyetli çalışma takvimlerini de sürdürüyorlar ve yavaş da olsa devamlı gelişme kaydediyorlardı; uygulanabilir bir sicim teorisi keşfetmenin eşiğinde olduklarına iyiden iyiye inanmaya başlamışlardı. Gerçi *işte budur* dedikleri bir an olmadı. Bu iki teorisyen; daha ziyade aşama aşama, sicim teorisine ilave bir simetri katmaları halinde tüm problemli matematiksel terimlerin birbirini götürdüğünü fark ettiler. Bunun sonucunda ellerinde kalan da mucizevi şekilde anlamlı görünen bir teori oldu; başkalarının her zaman kapsam dışında kalacağını düşündüğü sol-sağ asimetrisine rahatlıkla yer verilebiliyordu.

Schwarz, Aspen Center'da, kentin Main Street denilen bölgesinde, gösterişli bir otelde gerçekleştirilen yaz sonu kutlamalarında yaptıkları atılımdan duyduğu hazzı paylaştı. Sahneye fırladı ve gözü dönmüş bir fanatik gibi şunu ilan etti: "Bu, yerçekimine dair sonlu bir kuantum teorisi! Tüm güçleri açıklayabiliyor! Ve tamamıyla tutarlı!" Şenliğe katılanların büyük bölümü, bunun organize gösterinin bir parçası olduğunu düşündü: Schwarz, beyazlar giymiş yaverler tarafından sahne dışına alınırken gülerek onu alkışlıyorlardı.[3]

Schwarz'ın sözleri göründüğü kadar büyük bir mübalağa değildi. Green'le birlikte yapmış oldukları keşif sayesinde birçok fizikçi, sicim konseptinin, yerçekimi de dahil olmak üzere tüm temel güçleri tanımlayan, matematiksel açıdan tutarlı bir çerçevenin temeli olabileceğine inanmaya başladı. Doğrudan kuantum mekaniğine ve özel izafiyet teorisine dayanan Green ve Schwarz'ın çerçevesi süpersimetriyi de içeriyordu; uzay-zaman boyutlarının 10'a indirilmiş olması da hesaplamaları kolaylaştırmak açısından son derece kullanışlı olduğunu ispatlamıştı. Teorinin sahipleri bu "süper-sicimlere" yeni bir perspektif getirmişti.

Aspen şenliklerinden birkaç gün sonra Green ve Schwarz, çalışmalarını yazıya dökmek üzere California Teknoloji Enstitüsü'nde bir araya geldiler. Fizik geleneğini takip ederek makalelerinin basım öncesi kopyalarını fizik laboratuvarlarına ve ilgi duyabilecek meslektaşlarına gönderdiler. Alıcılar arasında, daha sonraları bana bu makalenin sicim teorisine yaklaşımını değiş-

3. John Schwarz'la söyleşi, 9 Aralık 2014; 'String Theory, at 20, Explains It All (or Not)', *New York Times*, 7 Aralık 2004

tirdiğini söyleyecek olan Edward Witten da vardı. Bu fikir değişikliği yalnızca makalenin meziyetlerinden kaynaklanmıyordu, aynı zamanda sicim teorisinin felaket doğurabilecek zayıflıkları da birbiri ardına ortadan kalkmaktaydı ve makale de bu trendin bir parçası konumundaydı: "Diğer tüm mucizelerin ötesinde, bu olay, teorinin bütünlüğünü sağlayan bir başka mucizeydi. ... Bu çalışmada gerçekten bir şeyler vardı."[4] Witten, diğer projelerini hemen bir kenara itti ve yeni sicim dünyasını keşfe çıktı; biraz da abartılı bir tabirle ilk sicim teorisi devrimi olarak bilinen harekete katılan yüzlerce teorik fizikçiden biri oldu.

Green ve Schwarz'ın bu analizinden sonra bile bir sicim teorisinden ziyade bir sicim taslağından bahsetmek daha doğruydu, ancak dikkatsiz kullanılan kelime bir gelenek haline dönüştü (dolayısıyla ben de kelimeyi bazen böyle kullandığım için umarım affedilirim). Örneğin Maxwell'in elektromanyetizma açıklamasının ve Einstein'ın yerçekimi teorisinin aksine, sicimlerin yeni tanımı bütünüyle net kavramlar bağlamında çerçevelenmiş değildi ve kolayca test edilebilen tahminler getirmiyordu. Karizmatik teorisyen Sergio Fubini'nin daha sonraları zekice yorumladığı üzere, sicim taslak çalışması zamanının önündeydi, "kazara bu yüzyıla düşmüş bir yirmi birinci yüzyıl fiziği eseriydi".[5] Bu fikir grubunu tam olarak anlayabilmek adına teorisyenlerin bir sonraki yüzyılın matematiğini kullanmak zorunda kalacak olmaları da bir o kadar doğruydu.

*

Green ve Schwarz'ın makalesinin bir kopyasının eline geçmesinden sonraki bir hafta içinde, Edward Witten buna bir yanıt oluşturdu. Yazdığı kısa makalede Green ve Schwarz'ın sicim taslağının yeni versiyonunun bazı özelliklerini değerlendirdi ve kompaktifikasyon olarak bilinen prosedürü göz önünde bulundurdu: çerçevedeki on uzay-zaman boyutunun, içinde yaşadığımız dört boyuta nasıl indirgenebileceğini ele aldı. Witten'ın kullandığı metot, çoğu teorisyenin hakkında çok az şey bildiği ya da bilmediği ama kısa sürede öğrendiği modern

4. Witten'la söyleşi, 15 Ağustos 2013
5. Veneziano, G., 'Fifty Years of Research at CERN, from Past to Future: Theory' (2006): http://cds.cern.ch/record/1058083/files/p27.pdf; bkz. s. 31

topolojik teknikleri içeriyordu. Durum ortadaydı: eğer fizikçiler sicim çerçevesini anlamak istiyorduysa, önemli miktarda yüksek matematik öğrenmekten başka seçenekleri yoktu. Standart Model'in öncülerinden olup 1984 sonbaharında sicim teorisine geçen David Gross, bana daha sonraları şöyle söyleyecekti: "Hayatımda ilk kez ağır matematik idmanı yapmaktan başka çarem kalmamıştı."[6]

Sicim taslak çalışmasının potansiyeli hakkındaki iyimserlik büyümeye devam ediyordu. David Gross ve Princeton'dan meslektaşları Jeffrey Harvey, Emil Martinec ve Ryan Rohm hem atom altı parçacıkların hem de yerçekiminin gerçekçi açıklamalarının temelini oluşturur görünen yeni sicim teorisinin tuhaf görünümlü bir versiyonunu yarattılar.[7] Bu olay sicim camiasında daha da fazla heyecan yarattı. Harvey o günleri şöyle hatırlamaktadır: "Kendimizi bir süre dünyanın zirvesinde gibi hissetmiştik." "David Gross bana bu ânın tadını çıkarmamı tavsiye etmişti, çünkü çoğu teorisyen için böylesi hazlar pek ender yaşanır."[8]

Hareketli günlerdi. Gabriele Veneziano'nun sicim taslak çalışmasının embriyosunu –ilk ikili modeli– oluşturmasından yalnızca on altı yıl sonra model, parçacık fizikçileri ve gökbilimciler tarafından o güne kadar yapılmış tüm gözlemleri açıklayabilecek bir taslak çalışmaya doğru olgunlaşmıştı. Tüm bunlar saf düşünceyle başarılmıştı, buna yeni deney sonuçlarının da bir miktar tetikleyici gücü eklenmişti. Gross bana daha sonraları şöyle söyleyecekti: "Tabiatın tüm parçacıklarını ve güçlerini açıklayacak bir taslak çalışmanın ufukta belirmesi gerçekten mümkün görünüyordu. Sicim teorisyenleri birkaç ay boyunca tepenin sonunda o pırıltılı şehri bulacaklarına gerçekten inanmıştı."[9]

Bu heyecan, izafiyet ve kuantum mekaniği teorileri arasındaki en son heyecan verici birliğe şahit olacak kadar uzun yaşayamayan Paul Dirac tarafından paylaşılamadı. Aylarca süren hastalığının ardından 20 Ekim 1984'te, Green ve Schwarz teorik fiziğin ana konusu olduktan birkaç hafta sonra Florida Tallahassee'deki evinde öldü. Dirac, elli yılını, kuantum mekaniği ve izafiyet

6. Gross'la söyleşi, 16 Nisan 2015
7. Bu, 'heterotik sicim teorisi' denen şeydi.
8. Harvey'le söyleşi, 12 Mayıs 2018; Harvey'den gelen e-mail, 26 Mayıs 2018
9. Gross'la söyleşi, 16 Nisan 2015; Gross'tan gelen e-mail, 9 Temmuz 2018

teorileriyle uyumlu alan teorilerindeki sonsuzluk değerlerinin varlığına hayıflanarak geçirmişti. Yeni sicim taslak çalışması neticesinde artık fizikçilerin elinde, beklenen sonsuzluk değerlerinden hiçbirini içermeyen bir yerçekimi kuantum teorisi vardı.

Dirac'ın temel fizikle bunun ardından gelen sicim taslak çalışması arasındaki etkileşimin boyutunu görecek kadar yaşamamış olması da üzüntü vericiydi. Yaptığı kamuya açık konuşmaların çoğunda teorik fizikçilere yeni teoriler oluştururken, her şeyden önce "sağlam bir matematiksel temel" oluşturmaları gerektiğini ve geçmişten gelen felsefe ve fizik fikirlerine daha az kulak asmalarını öğütlüyordu.[10] 1977 yılında New Orleans'taki bir dinleyici kitlesine seslenirken şöyle söylemişti: "İnsan, kafasındaki fizik ve felsefe fikirlerini matematiğe uyacak şekilde evirip çevirme eğiliminde olabilir, ama matematik evrilip çevrilemez. Matematik bütünüyle katı kurallara tabidir ve sert bir mantıkla sıkı sıkıya kontrol altına alınmıştır." Daha öncesinde bu yaklaşımını evindeki çalışma masasında tuttuğu bir parça kâğıt üstünde özetlemişti, belli ki gelecek nesiller için bir öğüt niteliğindeydi: "Eğer anlayışlı ve mütevazı olursan ... matematik seni elinden tutup yeni mecraların beklenmedik yollarına götürecektir; bu mecralarda kişi, gelecek gelişimini planlayabileceği yeni bir operasyon üssü oluşturabilir."[11]

Dirac'ın gözünde, teorisyenler, güzel matematiği temel alan teoriler geliştirmeye konsantre olmalıydı. 1970'lerin sonlarında ve 80'lerin başlarında, genç fizikçilerin; onu sıklıkla, ümitsiz derecede belirsiz buldukları bir program peşinde koşup "sert takılmamakla" suçladıklarını duyuyordum, muhtemelen bunun ana nedeni fizikteki güzellik kavramının bu kadar yetersiz tanımlanıyor oluşuydu.[12] O ise eleştirmenlerine asla taviz vermedi. Sanattaki güzellik kavramının büyük oranda izleyicinin kültürüne ve yetiştirilişine bağlı olduğunu kabul ediyorduysa da, onun gözünde matematiksel güzellik "bütünüyle başka türde" bir şeydi: matematiksel güzellik "bu kişisel faktörleri aşmakta-

10. Dirac, P. A. M., 'The Mathematical Foundations of Quantum Theory', New Orleans'ta verilen seminerin metni, 2 Haziran 1977, DARCHIVE, Kutu 58, Dosya 10

11. Dirac'ın ek yazısı notu, tarih 27 Kasım 1975, DARCHIVE, Kutu 50, Dosya 17

12. Maalesef, 1974 yılı sonbaharında lisansüstü çalışmalarıma başladığımdan beri sık sık böyle küçümseyici saptamalar duyuyorum.

dır. Tüm ülkelerde ve zamanın her döneminde aynıdır."[13] Bir keresinde bu tarz düşüncelerini o kadar ileri götürmüştü ki, eğer bir teorik fizikçi matematiksel güzelliğin önemini idrak edemiyorsa, teorisyen olarak "çalışmayı bırakıp" başka bir şeyler yapması gerektiğini söylemişti.[14]

*

Dirac ebedi istirahatine doğru uğurlanırken, halefleri heyecan içinde yeni yerçekimi kuantum teorisinin gelişiminde bir sonraki aşamaya geçmeyi planlıyordu. Yeni taslak çalışmanın karşısındaki en önemli güçlüklerden biri uzay-zaman boyutlarını dörde indirmek konusundaydı. 1984 yılının sonlarında Witten, Philip Candelas, Gary Horowitz ve Andy Strominger, Einstein'ın uzay-zamanın bükülmesini açıklamak için kullanmış olduğu modern diferansiyel geometriden ödünç alınan bir konsept kullanarak bu kompaktifikasyon (sıkıştırma) işlemini gerçekleştirmenin bir yolunu buldular. Ana fikir, varlığı İtalyan Eugenio Calabi tarafından 1957 yılında tasavvur edilmiş olan (neredeyse yirmi yıl sonrasında Çinli matematikçi Shing-Tung Yau tarafından kanıtlanan) özel bir yüksek boyutlu uzayın içine sicimleri yerleştirmekti. Calabi, böylesi uzayların bütünüyle soyut olduğunu düşünmüştü: konunun "fizikle hiçbir ilgisi olmadığını düşünüyordu", çünkü "kesinlikle geometriydi". Yau aynı fikirde değildi.[15] Uzayın özelliklerine bakarak doğada bir rollerinin olabileceği sonucuna varılabileceğine dair bir inancı vardı, daha sonraları kullandığı ifadelerde şöyle diyecekti: "matematiğin en derin düşüncelerinin ... neredeyse şaşmaz şekilde fiziği ilgilendiren sonuçlar doğurduğuna ve kendilerini Doğa'da gösterdiklerine inanıyorum." Bu olayda Yau haklı görünüyordu: bu gizemli uzaylar, sicim taslak çalışmasının boyut sayısını dörde indirmeye uygundu.

Çoğu matematik uzmanı, yalnızca bir avuç Calabi-Yau uzayının var olduğunu düşünüyordu ve teorik fizikçiler de bu uzaylardan birinin gerçek dünyaya uygulanabilir olduğunu

13. Dirac, P. A. M., 'Basic Beliefs in Theoretical Physics', Miami, 22 Ocak 1973, DARCHIVE S2, B49, F28
14. Guillen (1981: 394)
15. Yau ve Nadis (2010: 78)

umuyordu. Matematikçiler ve fizikçiler omuz omuza çalışmaya başladılar, sicim teorisinin kompaktifikasyon problemini çözerek bu uzayların üzerine hangi disiplinin en fazla ışığı tutacağı konusunda da içten içe bir yarışa girdiler. David Morrison, kendilerini fizikçilere danışmanlık yaparken bulan matematikçilerden biriydi; sıklıkla sinir bozucu bulduğu bir deneyimdi. Daha sonraları bana şöyle söyleyecekti: "fizikçiler bizden ne istedikleri konusunda sürekli farklı fikirlerle geliyorlardı ve çözmemizi istedikleri problemleri de değiştirip duruyorlardı."[16] Alışıldığı üzere matematikçiler yavaş yavaş ve dikkatli çalışmayı tercih ediyordu, ilerlemeden önce tüm detayların doğruluğunu teyit etmeye çalışıyorlardı; fizikçilerse sürekli yeni sonuçlar istiyordu, gerekirse hızlı ve kirli yöntemlere hayır demiyorlardı.

Birkaç ay içinde Calabi-Yau hikâyesinin beklenenden daha karmaşık olduğu net şekilde ortaya çıktı. Matematikçilerin ilk aşamada düşündükleri şekilde, bu uzaylar yalnızca birkaç tane değildi, binlercesi vardı.[17] Fizikçilerin hesaplamalarının gösterdiğine göre de, sicim teorisinin "yaşadığı" Calabi-Yau uzayı, teorinin doğal olarak tahmin ettiği temel parçacık ailesi sayısını belirliyordu. Ne yazık ki bu sayı deney araştırmacılarının gözlemleriyle bağdaşmıyordu ve yeni teknikler de boyut sayısını dörde indiremiyordu. Bu uzayların detaylı özellikleri net bir zafer getirmiş olmasa da, göz ardı edilemeyecek kadar büyük bir potansiyel taşıyordu. Fizikçiler ve matematikçiler, uzayları hızla incelemeye koyuldular; boşa kürek çekmediklerini umuyorlardı.

Sicimlere gösterilen bu yeni ilgi, fizikçiler arasında soyut yüzey teorilerine yönelik olarak da bir ilginin doğmasına neden oldu. Bir sicim hareket ettiğinde, uzay-zamanda; tıpkı düz (tek boyutlu) bir kalemin düz bir masaya sürtüldüğünde iki boyutlu bir dikdörtgen şekli çizmesi gibi iki boyutlu bir yüzey oluşturur. Sicim teorisyenleri, buna benzer yüzeyleri açıklamak için, bir yüzyıldan daha uzun bir süre öncesinde Göttingen'de yaşayan matematikçi Bernhard Riemann tarafından bulunmuş olan fikir ve tekniklere ihtiyaç duyuyordu. Riemann yüzeyleri olarak adlandırılan bu konu üzerindeki çalışmalar, fizikçiler ve matematikçiler tarafından işgal edilen bir başka alan haline

16. Morrison'la söyleşi, 23 Nisan 2016
17. Galison (2004: 38)

geldi; bilim tarihçisi Peter Galison tarafından "ticaret alanı" olarak adlandırılıyordu.[18] Daha güncel tarihte İranlı matematikçi Maryam Mirzakhani, Riemann yüzeyleri alanında gelişim sağlama açısından önde gelen bir isim oldu ve yenilikçi fikirlerinin birçoğu fizikçiler için önemli değer kazandı.[19]

1985 yılının başları itibarıyla Ronald Reagan'ın tekrar başkanlığa seçilmesinden birkaç ay sonra yeniden hareketlenen sicim teorisi camiası, her zamankinden daha büyük iyimserlikle filizleniyordu. Taslak çalışmanın oluşturduğu bütünlükten cesaret almak için birçok sebep vardı. Can sıkıcı noktası ise özelliklerinden hiçbirinin deneysel olarak kontrol edilemiyor oluşuydu: tam teşekküllü bir teori haline gelebilmesi için çok fazla çalışma yapılması gerekiyordu. Teorik fizikçiler daha önce de benzer bir durum yaşamıştı. Örneğin 1927 yılında teorisyen Arthur Eddington şöyle belirtmişti: "yeni kuantum teorisinin kapısına şu notu asmak muhtemelen akıllıca olacaktır: 'yapım aşamasında - konu dışında kimse kabul edilmemektedir' ve kapıcının, meraklı filozofları uzak tutması da yerinde olur."[20] Neredeyse altmış yıl sonra bazı sicim teorisyenleri de hemen hemen aynı şeyleri hissediyordu; ama deney sonuçlarının ilerlemelerine yol göstermesi ihtimalinin daha da düşük olacağını düşünüyor olmalıydılar. Sicim taslak çalışmasının büyük talihsizliği, Thomas Huxley'nin bir yüzyıldan biraz uzun bir süre öncesinde ifade ettiği şekliyle, "muhteşem bir hipotezin çirkin bir gerçekle doğranması" durumunu kapsamıyordu. Talihsizlik, daha ziyade taslak çalışmayı doğrayacak veya ilgilendirecek herhangi bir deneyin var olmayışıydı.[21]

Sicim taslak çalışması karşısında ortak bir itiraz vardı: göründüğü kadarıyla çok güzel olan matematiği, en doğal şekilde ultra-yüksek sıcaklıklarda geçerli oluyordu ve birisi bütün gezegenden daha büyük bir parçacık hızlandırıcı yapmadığı sürece teoriyi çürütmek neredeyse imkânsız görünüyordu. Bu itirazlar Mayıs 1986'da Sheldon Glashow ve Harvard'lı meslektaşı

18. Galison (2004: 25)
19. McMullen, T. C., 'The Work of Maryam Mizakhani': http://www.math.harvard.edu/~ctm/papers/home/text/papers/icm14/icm14.pdf
20. Eddington (1930: 211)
21. Huxley, T., presidential address to the B.A.A.S, 1870: http://aleph0.clarku.edu/huxley/CE8/B-Ab.html

Paul Ginsparg tarafından yazıya döküldü; *Physics Today*(dergi Amerikalı fizikçiler tarafından yayımlanıyordu, tüm dünyada da okunuyordu) adlı dergide "Desperately Seeking Superstrings [Çaresiz Süpersicim Arayışı]" başlığıyla yayımlanan, güçlü argümanlar içeren bir makale yazmışlardı.[22] Makale, sicim teorisine karşı doğrudan bir saldırı olarak görünüyordu veya en azından teoriye güven duyulmadığını anlatan güçlü bir argümandı. "En iyi ve en parlak fizikçiler tarafından yıllarca gösterilen yoğun çabalar bile ispatlanabilir bir tahmin getirmedi" diye vurguluyordu. Ginsparg ve Glashow, sicim teorisinin hiçbir yere ulaşamayacağı endişesini taşıyorlardı ve şu retorik soruyu sormuşlardı: "Matematik ve estetik, deneylerin yerine konabilir ve deneylerden iyi olabilir miydi?"

Önde gelen birçok başka fizikçinin de teoriyle ilgili çekinceleri vardı, bunlar arasında Richard Feynman'ı da sayabiliriz. Ölümünden birkaç ay öncesinde bir röportajda şöyle söyledi: "Belki de tüm bu süpersicim olaylarının çılgınlık olduğunu ve yanlış yönde gittiğini söyleyerek gelecekteki tarihçileri eğlendirebilirim. ... Fikirlerini test etmemelerinden hoşlanmıyorum. Deneylerle bağdaşmayan herhangi bir şey olunca hemen bir açıklama bulup çıkarmalarından da hoşlanmıyorum: 'Pekâla doğru olabilir' diyebilmek için hemen bir şeyler kurguluyorlar."[23]

Yaklaşık olarak o dönemde birçok fizikçi, alanlarının karanlık bir matematik ormanına doğru gittiğini görmekten mutsuz olduklarını bana söylemişti. Parçacık fiziği öğrencileri modern topoloji konusunda baş döndürücü şekilde ustalaşsalar da, meslektaşlarım sık sık öğrencilerinin fiziğin temelde gerçek dünyayla ilgili olduğunu unutmuş görünmelerinden şikâyet ediyorlardı. Örneğin şöyle bir olay yaşanmıştı: Doktora öğrencilerini değerlendiren bir öğretim görevlisi, bir öğrencinin temel deneysel bilgilerini ölçmek için bir elektronun kütlesinin ne olabileceğine dair kabataslak bir tahminde bulunmasını istedi. Öğrenci, "evet hocam, size kesinlikle söyleyebilirim" dedi ve bir parça tebeşir alıp kara tahtaya şöyle yazdı:m_e.[24]

22. Ginsparg ve Glashow (1986: 7, 9)
23. Davies ve Brown (1988: 194)
24. Bu anekdotu ilk olarak yaklaşık 1980'de fizikçi Tom Weiler'dan duydum.

Sicim teorsiyenlerinin büyük bölümü bu trendden rahatsız görünmüyordu: eğer fizikçiler tabiata dair anlayışlarını ilerletmek için daha fazla matematiği ihtiyaç duyuyorduysa, bunda bir sakınca yoktu. Onlara göre böylesine potansiyeli olan bir teoriden vazgeçmek için henüz çok erkendi: ayrıca bütünüyle yanlış olamayacak kadar büyük bir matematiksel güzelliği vardı.

Matematik ve fizik, 1980'lerde birbirlerini birçok yönden zenginleştirdi –elbette bunların hepsi doğrudan sicim teorisiyle ilişkili değildi–. Belki de en çarpıcı örnekler, bir sonraki aşamada ele alacağımız örnekler: Edward Witten'ın alışıldık uzay-zaman arasındaki beklenmedik bağlantıları keşfi, matematikçilerin düğüm teorisi ve fizikçilerin kuantum alanları teorisi.

Daha önce görmüş olduğumuz gibi, matematikçi Simon Donaldson, dört boyutlu uzaya bakmanın yeni bir yolunu bulmak için ölçüm teorilerini kullanarak bir devrim başlatmıştı. Michael Atiyah tarafından da teşvik edilen Witten, Donaldson'ın teorisini yakından incelemeye başladı ve teorisinin süpersimetrinin bir versiyonu olarak yorumlanabileceğini fark etti; Donaldson'ın matematiksel yeniliklerini teorik fiziğin ön saflarına taşıdı.[25] Daha da spesifik olarak Witten, Donaldson'ın teorisinin, kuantum alan teorisinin özel bir tipine –topolojik alan teorisi olarak bilinen tipine– karşılık geldiğini gösterdi; bu tipin özellikleri bütünüyle alanların şekillerine dayanıyordu. Donaldson'ın uzay teorisi ile süpersimetri arasında Witten'ın kurduğu bağlantı ilk anda tuhaf görünüyordu: matematiksel bir uzay teorisi niçin elektronlarla, quark ve gluonlarla alakalı bir teoriyle bağlantılı olmalıydı? Ama bu ilişkinin, topoloji ile kuantum alan teorisi arasındaki birçok derin bağlantının yalnızca başlangıcı konumunda olduğu ortaya çıkacaktı.

Yeni Zelanda'lı Vaughan Jones'un düğümler hakkında yeni bir düşünce şekli geliştirmesiyle beraber, konu modern matematikte önemli bir noktaya geldi. Jones, 1984 yılında çoğu düğümün, daha sonraları Jones polinomu olarak tanınacak olan bir formülle hesaplanabilen bir matematiksel fonksiyon vasıtasıyla sınıflandırılabileceğini gösterdi. Bu sistem her zaman işliyordu, ama kimse neden işlediğini anlayamadı: ilk sezgisel açıklamayı getirmek Witten'a düştü, matematikçilerin en hafif deyimiyle tu-

25. Witten'dan gelen e-mail, 17 Eylül 2018

haf varsaydığı bir metot kullanmıştı. Witten, düğümleri ayakkabı bağı uzunluğu olarak değil, uzay-zamanda kuantum parçacıklarının izlediği yollar olarak tasavvur etti. Richard Feynman, herhangi bir kuantum parçacığının herhangi bir noktadan bir diğerine hareket etme olasılığını hesaplama tekniğini bulduğunda bu yolları göz önünde bulundurmuştu. Bu hesaplama, parçacığın gidebileceği muhtemel her yolun katkısının toplamını kapsıyordu; bu yollar zikzaklar ve düğümler şeklindeydi. Normalde bu çapraşık yollar nihai sonuca çok küçük bir katkı sağlar, ancak Witten'ın göstermiş olduğu üzere, varlıkları düğümlerin doğası hakkında derin bir şeyler söylemektedir. Witten, bir kuantum mekanik niceliğinin (amplitüd olarak bilinir) ortalama değeri ile izlenen yolun karakteristik sayısını hesaplamak için Jones'un kullandığı formül arasında bir bağlantı keşfetti: tam olarak eşit değerdeydiler. Göründüğü kadarıyla çoğu düğümün sınıflandırılma şekli –gündelik dünyadaki düğümlerinkiler bile– nihayetinde atom altı mecradaki hareket teorisiyle ilişkiliydi: yani kuantum mekaniğiyle.

Matematikçiler Witten'ın mantığının başarısı karşısında şaşkındı, özellikle de Feynman'ın matematiksel açıdan çok titiz olmayan "izlenen yollardaki toplamlar" tekniğini kullandığı için şaşkınlık daha da büyüktü. Ama Witten'ın fikirlerinin işlediğine de şüphe yoktu. Witten'ın metodu, Jones'un düğüm sınıflandırmasının neden işlediğini ilk kez açıklamış oluyordu ve bir o kadar önemli olarak da düğümler konusunda yeni araştırma yolları açıyordu.

Bu dönem itibarıyla Witten, gösterilen ilgi kendisini açıkça utandırıyor olsa da kült olarak tanımlanabilecek bir durumun odak noktası olmuştu.[26] Fizikçiler kendi aralarında konuşurken onun öğle yemeğinde yaptığı dikkatli saptamaları analiz ediyor, bu saptamaların kaçırılmaması gereken bir bilgelik içerdiğini düşünüyor ve ondan superman gibi bahsediyorlardı. Onun standartları, alanında belirleyici hale gelmişti: bir keresinde fizikçiler kendi aralarında şakalaşırken, bir teorik fizikçinin kalitesini ifade eden uygun birimin "miliwitten" olması gerektiğini söylediklerini duymuştum (bir terim olarak miliwitten, Witten hakkında çok şey söylemiş oluyordu ama diğer yandan

26. Conlon (2016: 150-151)

birçok fizikçinin aldatıcı nicelikler konusundaki zayıflığını da ortaya koyuyordu diyebiliriz). Witten'ın yeteneğinden hiçbir ciddi fizikçi şüphe etmiyorduysa da, bazıları fizik alanını talihsiz bir yöne götürdüğünü söyleyerek ondan şikâyet ediyordu: çoğu fizikçinin görüş açısının ötesinde gereksiz karmaşıklıkta bir matematiksel alana sürüklediğini düşünüyorlardı. Böylesi suçlamalar bana göre adil değildi. Witten; fiziğe, fiziğin bazı teorilerinin matematiksel gelişim için yeterli olgunluğa geldiği bir dönemde giriş yapmıştı ve o da kendi ana yeteneği olarak gördüğü şeyden, yani "tuhaf matematiği fiziğe uygulamaktan" en fazla faydayı sağlamaya karar vermişti.[27] Ve sonuç olarak da bu anlamda herkesten daha fazla katkı sağladı. O dönemde teorik fizikçiler için ilerlemenin daha iyi bir yolu olsaydı, diğer teorisyenlerin kolektif yetenekleri bu yolu muhakkak bulmuş olurdu.

*

Witten, matematiğe katkı yapan yegâne fizikçi değildi kesinlikle. Daha fazla sayıda teorisyen matematikçilerle daha yakın çalışmaya başladıkça böylesi katkılara gitgide daha sık rastlanır hale geldi; iki alanın uzmanları da sık sık aynı konu üzerinde çalıştıkları hissine kapılıyordu. En çarpıcı örneklerden biri, 1980'lerin sonlarında sicim teorisyenleri camiası ve Calabi-Yau uzaylarını anlamaya çalışan, doğanın bir parçası olup olmadıklarını araştıran matematikçiler arasında ortaya çıktı.

Kaba hatlarıyla ifade etmek gerekirse, Calabi-Yau uzaylarının biçimleri karmaşık ama simetrik bir heykele benzer –heykeltıraş Henry Moore'un tasarlayabileceği tipte bir form olabilir–, pürüzsüz yüzeylerinin üzerinde farklı şekil ve boyutlarda delikler bulunur.[28] Ancak bu uzaylar, dokunabildiğimiz objelerden oldukça farklıdır; çünkü sanat eserlerini algıladığımız boyuttan çok daha fazla sayıda boyutta var olurlar. Matematikçiler uzayların soyut özellikleri karşısında büyülenmişti, fizikçilerse çoğu zaman olduğu gibi matematiksel objelerin gerçeklikle herhangi bir ilişkisi olup olmadığını belirlemeye odaklanmıştı. İlk zamanlar bu alanda matematikçiler ve fizikçiler arasındaki işbirliği daha

27. Witten'ın odaklanma kararıyla ilgili olarak: Witten (2014); alıntı, Cole, K. C., 'A Theory of Everything', *New York Times Magazine*, 18 Ekim 1987
28. Conlon (2016: 146-150)

ziyade tek taraflıydı: matematikçiler, fizikçilere bu yeni geometri alanında hızlandırılmış kurs veriyordu: inceliklerini açıklıyor, yanlış anlaşılmaları gideriyor, hatta zaman zaman fizikçilerin ihtiyaç duyduğu yeni matematiksel fikirler geliştiriyorlardı. Bununla beraber, az sonra göreceğimiz gibi matematikçiler, Calabi-Yau uzayları hakkındaki en incelikli hesaplamaları fizikçiler tarafından sicim teorisi kullanılarak düzeltilince şoka uğradılar.

Hikâye; 1988'de Amerikalı fizikçi Lance Dixon, bütünüyle farklı iki Calabi-Yau uzayının, sicim teorisi içine yerleştirildiklerinde gerçek dünyaya dair aynı tahminleri doğuracaklarını öne sürdüğünde başladı. Bir başka deyişle, teori iki eşdeğer versiyon halinde sunulabiliyordu, biri diğerinin çifti olarak nitelenmekteydi.

Diğer teorisyenler bu fikri geliştirdi, gerçi matematikçiler bunu etkileyici bulmamıştı: bu uzayların çiftler halinde geliyor oluşu onlar için bir anlam ifade etmiyordu. Fizikçiler yollarından sapmadılar, nihayetinde de bu çiftlerin rastlantı olmadığını, sicim teorisinin temel bir özelliği olduğunu fark ettiler. Bu keşif Harvard'da Brian Greene ve Ronen Plesser tarafından yapılmıştı ve onlardan bağımsız olarak dört diğer teorisyen de (Philip Candelas, Xenia de la Ossa, Paul Green ve Linda Parkes) aynı çıkarıma ulaşmıştı.[29] 1990 yılında yaşanan bir sürprizle, Candelas, bu çiftler sayesinde Calabi-Yau uzaylarının onlarca yıldır matematikçilerin ilgi odağı olan bir özelliğinin hesaplanabileceğini fark etti: uzayların her birinde ayrı olarak "çizilebilecek" eğrilerin sayısının hesaplanması söz konusuydu; parti balonlarının biçimlerinin, yüzeyleri etrafına lastik bantların kaç farklı şekilde sarılabileceğine bakılarak belirlenmesi gibi bir yol izleniyordu. Matematikçiler bu "eğri-sayımını" geometrik metotlar kullanarak yapıyordu, fizikçilerse sicim teorisi hakkındaki sezgilerine dayanan oldukça farklı teknikler öneriyordu. Tarihçi Peter Galison'ın ifade ettiği gibi: "Candelas ve çalışma arkadaşları ... geometricilerin bahçesine dalmanın bir yolunu bulmuştu."[30]

Candelas ve çalışma arkadaşları tarafından hesaplanan sayılar çoğu durumda matematikçilerin sonuçlarıyla örtüşüyordu, ama

29. Greene (1999: 255-262)
30. Galison (2004: 43)

hepsinde örtüşmüyordu. Özellikle karmaşık olan durumların birinde aradaki fark çok büyüktü: Candelas ve çalışma arkadaşlarına göre uzaydaki eğrilerin sayısı 317.206.375'ti; ancak bu sayı, Norveçli iki matematik uzmanı olan Geir Ellingsrud ve Stein Arild Strømme tarafından bir bilgisayar programı kullanılarak elde edilen değerin sekizde birinden daha azdı. Matematikçi Dave Morrison ve meslektaşlarına göre bu durum sürpriz değildi. Morrison bana daha sonraları şöyle söyleyecekti: "Fizikçilerin metodu bize zaten çok saçma görünüyordu."[31] Ama fizikçiler doğru sonucu bulduklarına inanıyorlardı. Onların mantığına göre, sicim teorisi tabiata dair tutarlı bir açıklama getirebildiğine göre ve ayna simetrisi taslak çalışmanın kapsamında olduğuna göre, buldukları sonuçlar doğru olmalıydı. Eğer eğri sayımları yanlışsa, bu durumda ya sicim taslak çalışması tutarsızdı ya da ayna simetrisini kapsamıyor olmalıydı.[32]

1991 yılı Mayıs ayı başlarında bu anlaşmazlığın içindeki birçok fizikçi ve matematikçi, Calabi-Yau uzaylarıyla ilişkili çeşitli konuları görüşmek üzere California Berkeley'deki Matematiksel Bilim Araştırma Enstitüsü'nde buluştu. Yau, fizikçilerin ve matematikçilerin birbirlerini anlayabilmek için mücadele ettiklerini hatırlıyordu: her bir grup, "diğerinin bakış açısını ve kavramsal taslak çerçevesini algılamaya çalışıyordu". Her gün seminer programının ardından bazen sabahlara kadar süren uzun sohbetler oluyordu, iki grup ortak bir dil yaratmayı deniyordu. Ama toplantı sonlandığında eğri sayımları arasındaki anlaşmazlık çözüme ulaşmış değildi. Norveçli matematikçilerle Candelas ve çalışma arkadaşları iletişimi koparmıyordu, kendi sonuçlarını tekrar tekrar kontrol ediyorlardı, ama faydası yoktu. Birçok matematikçi hatanın fizikçilerin hesaplamasında olduğundan eminken, fizikçiler de kendi doğruluklarına bir o kadar inanıyordu.

Konu 31 Temmuz'da çözüldü. Norveçli matematikçiler kendi bilgisayar kodlamalarında bir hata tespit etmelerinin ardından bunu hemen düzelttiler, ardından da fizikçilerin aylar önce hesaplamış olduğu sayının tam olarak aynısını buldular. Ellingsrud ve Strømme havlu attılar, "Fizik kazandı!" başlıklı bir e-mail'de

31. Morrison'la söyleşi, 23 Nisan 2015
32. Candelas'tan gelen e-mail, 5 Ağustos 2018

durumu kabullenmişlerdi (sevinçten havalara uçan Candelas da hemen bir meslektaşına "Allahu ekber!" başlıklı bir e-mail gönderdi)[33]. Fizikçiler kısa süre içinde metotlarının bu başarısından büyük fayda sağladılar ve Calabi-Yau uzaylarını araştırmak üzere birkaç aylığına bir program oluşturmayı başardılar. "Sicim teorisyenlerinin voodoo matematiğinin bu kadar iyi işlemiş olması [biz] matematikçiler için bir utanç kaynağı ve biraz da şoke olmuştu" diyecekti bana Dave Morrison daha sonraları. Şunu da ekliyordu: "Bize anlamsız gelse de onların fizik temelli sezgilerinin işlediğini inkâr edemezdik." Michael Atiyah da daha sonraları bu olaydan bahsederken fizikçilerin darbesi olduğunu söylüyordu: "sanki bir balona binip geometricilerin topraklarına inmişler ve başkentini ele geçirmişler gibiydi."[34]

Bu olay, matematiğin soyutlamaları ile gerçek dünya hakkında olmaya yönelen teoriler arasındaki derinleşen ilişkiye dair daha geniş çaplı bir dersin parçası konumundaydı. Princeton'dan teorisyen Eugene Wigner (Dirac'ın üvey kardeşi) 1959 yılında New York Üniversitesi'nde "Teorik Fizik Alanında Matematik" başlığını vermeyi düşündüğü bir seminerde bu konudan bahsetmişti.[35] Gerçi organizatörler akıllıca bir hamleyle Wigner'ın önermiş olduğu alternatif başlığı seçmişlerdi: "Doğal Bilimler Alanında Matematiğin Mantık Dışı Etkinliği". Bu ifade, 1960'ların başlarından itibaren bilim alanında –özellikle de fizikte– basmakalıp sözlerden biri olagelmişti. Ancak 1980'lerin sonları itibarıyla fizik ve matematik arasındaki ilişki, Wigner'ın dikkat çekici seminer başlığının da ima ettiği gibi artık tek yönlü değildi.[36] Düğümleri anlamak için kuantum teorisinin ve Calabi-Yau uzaylarını incelemek için sicim teorisinin kullanılmış olması, Wigner'ın, hikâyenin yalnızca yarısını söylemiş olduğunu gösteren örneklerden ikisiydi: matematiğin fizikteki etkinliği fiziğin matematikteki etkinliğinden aşağı kalır değildi.

33. Galison (2004: 47); Dave Morrison'la söyleşi, 23 Nisan 2015; arkadaşı Herb Clemens'e gönderdiği "Allahu akbar!" e-mail'inin metnini benimle paylaştığı için Philip Candelas'a teşekkür ederim; Clemens de "Fizik kazandı!" e-mailini Candelas'a iletmişti.
34. Atiyah'la söyleşi, 16 Nisan 2016
35. Wigner'den Friedrichs'e, K. O., 31 Mart 1959, WARCHIVE, Kutu 53, Dosya 1
36. Wigner (1960)

*

Geometrinin ön saflarında kamp yapan her fizikçi bütünüyle hoş karşılanıyor değildi. Bazen eski toprak matematikçilerin şu tarz cümleler sarf ettiğini duyuyordum: "Kendi problemlerimizi çözebilmeliyiz", "Fizikçiler, matematiği profesyonellere bırakmalı", gerçi bu homurdananlardan hiçbiri sözlerinin kayda alınmasını istemiyordu. Grupçuluk bir yana bırakılırsa bu sürtüşmenin belki de ana sebebi, fizikçilerin ve matematikçilerin her birinin amaçlarına ulaşmak adına kendi yöntemlerinin olmasıydı. Herhangi bir matematiksel yenilik için asli standart çelik gibi bir ispattır. Diğer yandan teorik fizikçiler mutlak kesinliğe ulaşmakla ilgilenmez, evrenin kalbindeki düzene dair algılarını artırmak adına ne gerekiyorsa yaparlar. Einstein'ın söylediği gibi, bilgi teorisinin uzmanlarına göre her fizikçi, dışarıdan bakıldığında "ilkesiz bir fırsatçı" gibi görünüyor olmalıydı.[37]

Modern geometrinin koridorlarında neredeyse hiçbiri matematik araştırmaları alanında eğitim almamış bu kadar çok sayıda fizikçinin dolaşıyor olması bazı saf matematikçileri rahatsız ediyordu, ama bunu çoğunlukla dile getirmediler. Fakat 1993 yılı yazında matematiksel fizikçi Arthur Jaffe ve topolojist Frank Quinn, Amerikan Matematik Topluluğu bülteninde yayımlanan uzun makalelerinde bu memnuniyetsizliği açık ettiler. Kullandıkları ifadeler, özellikle disiplinler arası işbirliğini geliştirmek için elinden geleni yapan uzmanlar arasında büyük bir infial yarattı. Jaffe ve Quinn, fiziğin matematik araştırmalarını zenginleştirdiğini kabul etseler de, birçok fizikçinin matematikle ne yaptıklarını tam olarak bilmemelerinden rahatsız olduklarını söylüyorlardı. Makalenin yazarlarına göre ana problem, fizik-matematik hattında çalışan fizikçilerin fazlasıyla "spekülatif matematik" işine girmiş olmaları ve detayları tam olarak doğru hale getirmeye pek fazla dikkat etmiyor oluşlarıydı. Şöyle yazmışlardı: "Sıradan mantık yürütmeyle ispat arasında ayrım gözetilmemesi matematiksel açıdan etik değildir diyebiliriz."[38]

37. Schilpp (ed.), (1997: 684)

38. Jaffe ve Quinn (1993: 1-13). Yazarlar "teorik matematik" terimini kullanmıştır ama ben onların da makalelerinde özet kısmında kullanmış oldukları eşanlamlı "spekülatif matematik" terimini tercih ediyorum. Ayrıca bkz. Galison (2004: 53-57)

Jaffe ve Quinn, Witten'ı (aynı zamanda Jaffe'nin çalışma arkadaşıydı) kötülemek adına hiçbir şey yapmamış olsalar da en güçlü argümanlarından bazılarını sicim teorisyenlerine yöneltmişlerdi. Jaffe ve Quinn'in altını çizdiği noktaya göre sicim teorisyenleri, yeni deneysel gözlemlerin destek ve yol göstericiliğinin eksikliğini yaşıyordu. Bu yüzden de onlara göre sicim teorisyenleri "kendilerine yeni bir 'deneysel topluluk' bulmuşlardı", "şimdi de araştırdıkları yapılar hakkında onlara güvenilir yeni bilgiler sağlayanlar matematikçilerdi."[39] Jaffe ve Quinn'e göre sicim teorisyenleri yeni deneyler olmadan fizik yapıyorlardı: bilimin bu branşındaki gelişmeler, gerçek dünyadaki gözlemlerden ziyade yeni matematik tarafından besleniyordu.

Makale, tatları kaçırmıştı.[40] Daha sonraları Jaffe bana şunu söyledi: "Birçok kıdemli bize oldukça kızgındı, ama genç matematikçilerden birçok destek mesajı da aldık, bazıları o dönem yeni olan e-mail kullanmıştı." Jaffe ve Quinn'in oluşturduğu argümanlar, matematikçiler ve bazı teorik fizikçiler arasında en önemli konu oldu: duygular kabarıyordu. Amerikan Matematik Topluluğu bülteni editörleri bu hareketliliği fırsat olarak görmüşlerdi ve matematik ve fizik alanlarından önde gelen birçok ismi bu tartışmalı makaleye yanıt vermeye davet ediyorlardı.[41]

Yanıt verenler arasında belirgin bir fikir birliği yoktu; ama sanırım şunu söyleyebiliriz ki, çoğu kişiye göre Jaffe ve Quinn'in geçerli argümanları vardı; gerçi genel kanı durumu fazla abarttıkları yönündeydi. Witten bütünüyle Jaffe ve Quinn'in fizik hakkındaki yorumlarına odaklanmıştı, "sicim teorisi motivasyonlarının ... Jaffe ve Quinn'in aktardığından çok daha güçlü ve çok daha odaklanmış durumda" olduğunu söylüyordu. Michael Atiyah, "fazlasıyla otoriter görünen genel yaklaşımlarına ve tonlarına" karşı çıkıyordu.[42] Atiyah'ın düşüncesine göre titizlik belki önemliydi ama matematiksel dünyada daha başka şeyler de vardı; bu fikrini desteklemek için sezgiden ilham alarak doğan önemli sonuçların örneklerini listeledi. Şöyle düşünüyordu: "Şu anda geometri/fizik cephesinde tanık oldu-

39. Jaffe ve Quinn (1993: 3)
40. Jaffe ile söyleşi, 20 Eylül 2017
41. Atiyah vd. (1994: 178-179, 201-202); Atiyah'tan gelen e-mail, 25 Temmuz 2016
42. Atiyah vd. (1994: 178)

ğumuz şey, 20. yüzyıl matematiğinde en coşku verici olaylardan biri."[43] Matematikçi Karen Uhlenbeck, bilhassa düşünceli ve yatıştırıcıydı. Makaledeki birçok argümanla hemfikir olduğunu belirtirken, matematikçilerin, kendi kısıtlı uzmanlık alanlarının dışında daha geniş ilgi alanları geliştirmelerinin akıllıca olacağını söylüyordu: "Titizliğin muhalif kılıcıyla ölümcül yara alanlardansa, alan darlığında boğulan matematikçilerin sayısı daha fazla."[44]

Geçmişe dönüp bakınca Jaffe ve Quinn'in makalesi artık bir fincan suda kopan fırtınaya benziyor: çoğu fizikçinin ve matematikçinin işbirliği üzerinde bu makalenin çok az etkisi oldu veya hiçbir etkisi olmadı. Bu iki cephe arasındaki örtüşme o kadar verimliydi ki, hem fizikçiler hem de matematikçiler için kendi uzmanlık alanlarının dışındaki maceralara atılmak adına çok sayıda sebep vardı. Matematik araştırmalarında bile cehalet bir erdeme dönüşebilir, yeter ki öğrenme kararlılığıyla birleşmiş olsun.

*

Yirminci yüzyılın başlarında Minkowski, Einstein ve diğerleri uzay, zaman ve yerçekiminin en iyi şekilde geometrik olarak anlaşılabileceğini net bir şekilde fark ettiklerinde, fizik ve matematik arasındaki ilişki geometrik düşüncenin yükselişinin hâkimiyeti altına girdi. Bu durum, dünyada ne olup bittiğini anlamak için cebirsel soyutlamaları kullanmaktan ziyade görsel hayal güçlerini kullanmayı tercih eden fizikçiler için çok uygundu.

Son yirmi otuz yıllık dönemde bilhassa çarpıcı olan bir gelişme, topolojinin artan önemi oldu: topoloji, nesnelerin genel şekilleriyle ilgilenen geometri branşıdır. Daha önce gördüğümüz gibi, Roger Penrose ve Stephen Hawking gibi fizikçiler topolojiyi diğer amaçlarının yanı sıra kara delikler etrafında bükülen yerçekimsel alanların şekillerini araştırmak için kullandılar. Skalanın diğer uzak ucunda ise Gerard 't Hooft, Polyakov ve diğerleri atom çekirdeğinin derinliklerindeki bükülmüş ve zaman zaman da düğümlenmiş kuantum alanlarına odaklandılar.

43. Atiyah vd. (1994: 179)
44. Atiyah vd. (1994: 202)

Topoloji, fiziğin diğer branşlarında da faydalı olmaya başlamıştı. 1970'lerde sıradan katı maddeler üzerinde yapılan gözlemleri (yoğun madde fiziği olarak bilinen disiplin) açıklamak açısından topolojinin zaruri olduğu görüldü. Fiziğin bu branşındaki klasik bir örnek de 1980 yılında Münih Teknik Üniversitesi'nden Klaus von Klitzing ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirildi.[45] Büyük tutkulara sahip her deney araştırmacısının hayalini kurduğu bir şeyi gerçekleştirdiler: tabiata basit bir soru sordular ve Dünya'nın işleyişine dair yeni ve açıklayıcı bir kavrayışa ulaştılar.

Von Klitzing ve çalışma arkadaşları, bu keşfi tabiatın küçük bir köşesine bakarak yaptılar; bu küçük köşede madde genel deneyimlere hiç benzemeyen aşırı uç koşullara maruz kalıyordu. Özel bir katı madde tipini yaklaşık olarak mutlak sıfır sıcaklık derecesine soğutup, maddeyi içinden geçen elektrik akımına dik bir manyetik alana maruz bırakarak çok önemli bir keşfe imza attılar. Alanın gücünü yeteri kadar değiştirdiklerinde, elektrik akımı düz bir şekilde değil, adım adım yükseliyordu: elektronlar yalnızca belli özel değerlerde akabiliyordu, bu değerler de katının boyutuna veya biçimine kesinlikle bağlı değildi. Teorisyenlere göre bu durum bir gizemdi, ta ki Britanyalı fizikçi David Thouless ve çalışma arkadaşları bunu ve bununla ilişkili problemleri çözene kadar.[46] Thouless, elektronları tanımlayan alan şekil değiştirdiğinde bu adımların ortaya çıktığını gösterdi: en düşük adım, katı içinde düz bir elektron alanına karşılık geliyordu, sonraki adımda içinde tek bir delik olan bir alan vardı, sonraki adımda iki delikli bir alan ve böyle devam ediyordu. Von Klitzing ve meslektaşlarının gözlemlediği ani elektrik iletkenliği değişiklikleri, maddenin derinliklerindeki alanların genel şeklindeki –topolojisindeki– değişimleri yansıtıyordu. Böylesi egzotik maddelere dair modern anlayışın merkezinde Shiing-Shen Chern ve Jim Simons'ın topolojik taslak çalışması vardı; bu çalışma, Witten'ın topolojik alan teorisinin de temelini oluşturuyordu. Aynı topolojik fikir, katı maddelerle de, en az atom altı dünyayla olduğu kadar ilişkilidir.

45. Von Klitzing ve meslektaşları, deneyi Grenoble'da yaptılar: Schwarzschild (1985: 17).

46. Schwarzschild (1985: 17-20); 'Strange Phenomena in Matter's Flatlands', https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popularphysicsprize2016.pdf (2016)

Yoğun madde araştırmalarının doğaya dair temel kavrayışlar getireceği her zamankinden daha aşikârdı. Ama fizikçilerin yine de atom altı parçacıklar üzerinde muhtemel en yüksek enerji seviyelerinde kontrollü deneyler yapmaları gerekiyordu: tam da bu alanda parçacık etkileşimlerine hükmeden yasaların istisnai ölçüde basit olması bekleniyordu. Böylesi deneyler yalnızca parçacık hızlandırıcılar kullanılarak yapılabilirdi ve bu teknik, parçacık fiziği Standart Modelinin temelini oluşturan gözlemlerde başroldeydi. Yirminci yüzyılın son on yılının başında parçacık fizikçileri, gitgide daha güçlü hızlandırıcılar yaratma isteklerinin, İkinci Dünya Savaşı'ndan beri olduğu gibi finans kuruluşlarından aynı güçlü desteği bulacağını düşünüyorlardı. Ama göreceğimiz üzere, bir şok yaşayacaklardı.

10
milenyuma giden yol

"Bu bilgi benim ihtiyacım olandan biraz daha fazla Vince, ama hadi devam et."

Ucuz Roman, Quentin Tarantino'nun senaryo metninden, 1994

"Her yeni teorinin hem kuantum mekaniğiyle hem de özel izafiyetle tutarlı olmasında ısrar edersen, çok şaşırtıcı noktalara varırsın."

Juan Maldacena, 2017

1990'ların başlarında Amerikalı fizikçiler, özgüveni yüksek bir ruh hali içindeydi. Avrupa'daki CERN laboratuvarında deney araştırmacıları tarafından gerçekleştirilen bir dizi etkileyici keşfin ardından, Amerikan Başkanı Reagan'ın bilim danışmanı, Amerikalı parçacık fizikçilerini "cesur ve aç" olmaya, parçacık fiziğinde "liderliği yeniden ele geçirmeye" teşvik ediyordu.[1] Fizikçiler, Süper-çarpıştırıcı olarak bilinen, o güne dek tasarlanmış en güçlü parçacık hızlandırıcı için hemen gayri resmi olarak planlar üretip işe koyuldular. Kongre, on yıllık bir süreçte 5.9 milyar doları projenin finansmanı için aktarmayı 1989 yılında çoğunluğun kararıyla kabul etti.[2] Fizikçiler, bu devasa makinenin, Standart Modelin eksik parçasını –Higgs parçacı-

1. Llewellyn Smith (2007: 281); 'Europe 3, US Not-Even Z-Zero', *New York Times*, 6 Haziran 1983, s. A16; Appell (2013)
2. Kevles (1995: 17-21)

ğını– araştırarak teorisyenlerle deney araştırmacıları arasındaki diyaloğu devam ettireceğini ve belki de süpersimetri adına ilk kanıtı bulacağını umuyordu. Ancak üç yıl içinde proje çöktü.

Süper-çarpıştırıcının çöküş sebepleri arasında, projenin iyi yönetilemiyor oluşu ve uluslararası ortaklarla çalışılmayışı da vardı. 1991 yılında Sovyetler Birliği'nin yıkılmasının ardından, yasa yapıcılar, bu araştırma kolunun ulusal güvenlik açısından artık önemli olmadığını ve Sam Amca'nın bunu finanse etmeyi sürdürmesinin gereksiz olduğunu düşünüyorlardı.[3] Yasa yapıcılar, Capitol Hill'deki oturumlarda dinledikleri birçok önemli yoğun madde uzmanından, Süper-çarpıştırıcıyı finanse etmenin, fiziğin diğer alanlarını parasız bırakacağını duymuşlardı. Belki de hepsinden daha da endişe verici olarak, projenin maliyeti hızla yükseliyordu ve böylesi devasa bir mühendislik projesine girişerek, fizikçilerin boylarından büyük bir işe kalkışmış olmalarından korkuluyordu. Hızlandırıcı, 1992 yılı Haziran ayı başlarında Teksas'ta inşa edilirken, Temsilciler Meclisi finansmanı kesmek yönünde oy kullandı; bütün girişim tehlikedeydi. Yedi ay sonrasında, finansman tartışması Washington'da hararetlenirken, teorisyen Steven Weiberg *Dreams of a Final Theory* adlı kitabını yayımladı. Kitabı yayımlamaktaki amaçlarından biri de, parçacık fizikçilerinin "fena halde ihtiyaç duyduğunu" düşündüğü yeni makinenin davasına destek vermekti.[4] Ona göre Süper-çarpıştırıcıdan gelecek bulgular, ufukta olduğunu düşündüğü temel doğa teorisini fizikçilerin keşfetmesine yardımcı olacaktı.

Weinberg ve diğer birçok fizikçinin yakarışları çok sayıda yasa yapıcının konuya sempatiyle yaklaşmayan sağır kulaklarında eriyip gitti: Kongre, 19 Ekim 1993'te büyük bir oy farkıyla projeyi iptal kararı aldı. Projenin senatodaki en etkili savunucusu olan Bennett Johnston, Süper-çarpıştırıcının "linç edildiğini" ve "şimdi cesedi gömmemiz gerektiğini" söylüyordu.[5] ABD hükümeti, neredeyse yarım yüzyıl boyunca atom altı dünyadaki deneysel araştırmaları cömertçe finanse etmişti; ama yasa yapıcılar, alanın amiral gemisi projesinde fişi çekmeye karar

3. Appell (2013)
4. Weinberg (1993: x); Weinberg'den gelen e-mail, 3 Nisan 2018
5. 'Congress Pulls the Plug on Super Collider', *LA Times*, 22 October 1993

veriyordu. Öfkeli teorisyen Murray Gell-Mann'a göre bu durum, "insan medeniyeti adına belirgin bir gerilemeydi", gerçi parçacık fiziği camiasının dışındaki bazı başka fizikçiler farklı bir görüşteydi: malzeme bilimi alanında çalışan Rustum Roy, bir New York Times muhabirine şunu söylüyordu: "yüksek enerji fiziği, bu durumu çok önceden hak etmişti."[6]

CERN'de yapım halindeki devasa parçacık hızlandırıcısı, Higgs parçacığının tespit edilmesine veya doğadaki süpersimetrinin keşfine (veya bu iki olaya birden) imkân vermiş olmasaydı, parçacık fizikçileri en azından bir on yıl boyunca doğaya dair ellerinde hiçbir yeni ipucu olmadan çalışmak zorunda olurlardı.[7] Önceki milenyumun geri kalanı boyunca –ve yeni bin yılın başından beri on yıldan uzun süredir– parçacık teorisyenleri, gerçek deneyler yerine düşünce deneyleriyle idare etmek zorunda olurdu. Bu bölümde bu döneme dikkat kesilirken, özellikle de kuantum alan teorilerinin ve sicim teorilerinin tuhaf ama yaygın bir özelliği olan ikilik özelliğine odaklanacağım. Fizikçiler, her biri kuantum mekaniği ile özel izafiyete dayanan bu teorilerin birçok örneğinin, matematiksel açıdan oldukça farklı olan ancak gerçek dünyaya dair aynı tanımları veren iki yolla yazılabileceğini keşfetmişlerdir. Bu durum tuhaf görünür, çünkü doğal beklenti, gerçekten tatmin edici olabilecek herhangi bir teorinin eşsiz ve tek bir yolla yazılabilmesinin mümkün olması yönündedir.

Teorilerin matematiksel ikiliklerine dair gerçekten tuhaf olan bu durumu bir benzetmeyle anlatabiliriz. Örneğin, karmaşık bir dava üzerinde çalışan bir dedektif, binlerce kanıt unsurunun tamamının oldukça farklı iki yolla kusursuz şekilde açıklanabileceğini söylese, gerçekçi bir yargıcın buna ne tepki vereceğini düşünelim. Yargıç, makul bir şekilde dedektifin daha fazla çalışma yapması gerektiğine karar verebilir: suç için muhakkak yalnızca tek bir açıklama olmalıdır. Hukukta olduğu gibi fizikte de, bir şeye dair eğer iki farklı ama eşdeğer teori varsa, açıklamanın "gereğinden fazla bilgi" içerdiğinden şüphelenmek akıllıca olur: 1990'larda *Ucuz Roman* filminde Uma Thurman'ın canlandırdığı

6. Kevles (1995: 23, 24)
7. 'Yeni hızlandırıcı' LEP idi – Büyük Elektron Proton çarpıştırıcı (Large Electron-Proton collider).

karakterin ağzından benzer sözler döküldüğünde popüler olmuş bir ifadeydi bu: "gereğinden fazla bilgi".[8]

*

İkilik, kesinlikle yeni bir keşif değil. On dokuzuncu yüzyılda Michael Faraday, William Thomson ve James Clerk Maxwell, ikiliği elektrik ve manyetizma bağlamında göz ucuyla yakalamışlardı. 1890'larda Oliver Heaviside, ikiliğin varlığını alan denklemlerinde gösteren ilk kişiydi.[9] Yaklaşık kırk yıl sonrasında ikilik, Dirac'ın öncü nitelikteki manyetik monopol kuantum teorisi denklemlerinde de yer alıyordu.[10]

1977 yılında, CERN'de çalışmakta olan Claus Montonen ve David Olive, ikiliğin aynı zamanda ölçüm teorisi denklemlerinin bir özelliği olabileceğini öne sürdü. İki teorisyen, bu teorilerin ikisiyle açıklanan monopollerin matematiksel olarak iki eşdeğer yolla tanımlanabileceğini söyledi. Teorinin bir versiyonunda monopoller nokta gibiydi; diğerinde ise oldukça farklıydılar: her biri, deneysel olarak test edilebilen bir iç yapıya sahip muhtelif parçacıklar halindeydi. Bu örnek, ikiliğin, bir matematiksel özellik olmanın ötesinde bir şey olduğunu gösterir: fizikçileri, denklemlerin tanımladığı teorilerin anlamları üzerinde düşünmeye zorlar. Burada açıkça şu soruyu sormak gerekir: iki eşdeğer denklemden hangisi doğru? Aslında ikisi de diğerinden daha temel pozisyonda görünmüyor; ikisinin de "ortaya çıktığı" söylenir, çünkü daha temel bir şeyden ortaya çıktıkları varsayılmaktadır. Ne olup bittiğine dair kesinlikle tek bir temel açıklama bulunuyor olmalıdır. Montonen ve Olive'in bu konudaki önerileri birçok teorisyenin ilgisini çekse de çok azı tarafından ciddiye alınmıştı.

Bununla beraber 1994 yılının başlarında Hint fizikçi Ashoke Sen, süpersimetriyi kullanarak, ikiliğin hem ölçüm teorilerinin hem de sicim teorilerinin bir özelliği olduğuna birçok teoris-

8. https://kellydanek.wordpress.com/2012/06/22/day-16-tmi/
9. Bu noktanın altını çizdiği için tarihçi Bruce Hunt'a teşekkür ederim. İkiliğe dair ilk kıvılcımların analizi için bkz. Wise (1979)
10. Castellani (2017: 101-102). Dirac, 1931'deki teorisini 1948'de yazmış olduğu bir makalede geliştirmiştir.

yeni neredeyse bir günde ikna etti.[11] Bu bölümde göreceğimiz gibi, sonraki iki yıl içinde bu özellik sıcak bir gündem maddesi haline geldi, hem fizik hem de matematik açısından şaşırtıcı yeni kavrayışlar yarattı. Bu gelişmede, modern teorik fizikle saf matematiğin birbirine göbek bağıyla bağlı olduğuna dair daha fazla kanıt da vardı.

Başlangıç olarak, quarkların nükleer parçacıklar içinde niçin daimi olarak sıkışmış göründükleri konusuna yeni bir ışık tutan ölçüm teorileri arasındaki ikilikten bahsedeceğim. Birkaç ay içerisinde bu ikilik, saf matematik alanında öylesine büyük bir çalkantı yarattı ki, konunun uzmanlarından bazıları kendilerine neyin çarptığına inanamıyordu bile. Sonraki aşamada da, sicim teorilerinin farklı versiyonları arasında yeni ikiliklere ev sahipliği yapma noktasına gelen radikal bir gelişmeyi anlatacağım. Son olarak ve en şaşırtıcısı da, yirminci yüzyıl fiziğinin en büyük şoklarından birini ele alacağım: yerçekimi, uzay ve zamana dair yeni bir anlayışa ulaşmamızı sağlayan bir ikiliğin keşfi.

*

1990'larda genç nesil teorisyenlerin en yeteneklilerinden biri, İsrail asıllı Amerikalı fizikçi Nati Seiberg'di. Seiberg şöyle hatırlamaktadır: "Benim neslim, Standart Model'i büyük oranda işi bitmiş, tarih olmuş bir model olarak görürdü. Deneyler bize daha fazla ipucu getirene kadar potansiyeli en yüksek teoriler üzerinde çalışmak ve bunları daha iyi anlamaktan başka seçeneğimiz yoktu."[12]

Seiberg, lisansüstü çalışmalarına 1978 yılında başladı; o esnada aynı zamanda beş yıllık askerlik görevini yerine getiriyordu, geceleri İsrail ordusunda meteorolog olarak çalışmaktaydı. Lisansüstü araştırma görevlisi olarak çalıştığı yıllarda deneysel gözlemleri yakından takip etti ve bir miktar meyve de veren bir proje üzerinde çalıştı. 1982 yılı itibarıyla doktora sonrası ilk görevini İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde aldığında süpersimetri içeren ve gerçek dünya için geçerli olması ihtimali olan teoriler üzerinde sistematik bir araştırma yapmayı seçti.[13] Ender

11. Seiberg (2016: 21)
12. Seiberg'le söyleşi, 13 Ağustos 2013
13. Seiberg'le söyleşi, 23 Ağustos 2017

rastlanan bir yetenekti: keskin zekâlı bir düşünürdü, matematik becerisi yüksekti ve yeterince olgunlaşmamış ya da daha da kötü fikirlere karşı tahammülsüz bir eleştirmendi. Zaman zaman bir sihirbaz olarak tanımlanan biri olarak, meslektaşlarının birçoğunun ancak sayfalarca matematiksel hesaplama yaptıktan sonra kavrayabileceği yeni teorik sonuçlar ortaya çıkarabilmek gibi olağandışı bir yeteneği vardı.

İlk etapta Seiberg, quarklar, gluonlar (protonlar içine sıkışmış parçacıklar), nötronlar ve bunlarla ilişkili parçacıklara dair artık yerleşik hale gelmiş olan teorilere benzer süpersimetrik teoriler geliştirerek adını duyurdu. Bu teorilerin birçok değişkenleri –hareketli parçaları– vardır; bunlar arasında teorinin kapsamındaki uzay-zamanın boyut sayısı, tanımladığı quark tiplerinin sayısı ve bunların etkileşimlerinin güçleri de yer almaktadır. Seiberg, kafasında belli bir amaç olmadan –genellikle çalışma arkadaşlarıyla birlikte–, sırasıyla bu değişkenlerin her birinin etkilerini araştırdı. Şimdi o günleri şöyle hatırlıyor: "Onlarca ayarlanabilir düğmesi olan bir makineyle oynayan bir çocuk gibiydim biraz, o veya bu düğmeyi çevirince ne olduğuna bakıyordum."[14] Seiberg bu metodik stratejiyi kullanarak, "aylar geçtikçe daha da büyüyen" bir yığın yeni sonuç elde etti. Elde ettiği bulgular, süpersimetri içeren teorilerin belirsizliğe mahal vermeyen sayısal tahminler getirdiğini gösterdi.

Seiberg, teorik fizik alanındaki kariyerini şu anda "hedefi belli olmayan oportünist bir yürüyüş" olarak tanımlıyor; gerçi meyve verebilecek yeni araştırma konularını bulmak konusunda "iyi koku aldığını" da kabul ediyor.[15] Seiberg, on yıl boyunca alan teorisi ve sicim teorisi alanında çılgınca dolanmıştı ve o dönem itibarıyla süpersimetriyi düşünmekten yorulmuş durumdaydı. Ama bereketli bir araştırma alanına yönelmek adına koku alma gücü onu ısrarcı olmaya itti ve en başarılı projelerinden birini başlattı. Bu proje, quarklarla dört boyutlu uzayın matematiği arasındaki güçleri anlamak yönünde yeni bir yaklaşım doğurdu.[16]

14. Seiberg'le söyleşi, 23 Ağustos 2017
15. Seiberg'le söyleşi, 23 Ağustos 2017
16. Süpersimetri alanında Seiberg'in gözüne takılan gelişmeler, Michael Dine ve Ann Nelson tarafından gerçekleştirilmişti. Seiberg'le söyleşi, 20 Ağustos 2015

Büyük atılım, 1994 baharında, Seiberg'in bir yıllık izinle İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne dönmesinden sonra gerçekleşti. Daha öncesinde, yakınlardaki Rutgers Üniversitesi'nde Seiberg ve çalışma arkadaşları, quarklara ve gluonlara dair mümkün olan en basit süpersimetrik teorileri araştırmışlardı. Böylesi teoriler yalnızca yaklaşık olarak çözümlenebiliyordu, ama Seiberg ve meslektaşları bunları birçok farklı koşul altında tam olarak çözmenin yollarını buldular. Enstitü fakültesine o dönemde yeni katılmış olan Edward Witten, Seiberg'in çalışmasını yakından takip ediyordu ve süpersimetri ile dört boyutlu uzay arasındaki bağlantıları uzun zamandır heyecan verici buluyordu.[17] Daha önce görmüş olduğumuz gibi, matematikçi Simon Donaldson dört boyutlu uzayı anlamak için ölçüm teorilerini kullanmıştı ve Witten'ın kendisi de süpersimetrik kuantum teorisinin, bir uzay teorisini ele almanın bir yolu olduğunu göstermişti. Seiberg en basit süpersimetrik teorileri inceleme işini bitirdikten sonra; o ve Witten, bir derece daha yüksek karmaşıklığa sahip teoriler üzerinde enine boyuna bir çalışma yapmak üzere işbirliği yapmaya karar verdiler.

İki fizikçi, projeyi iyimserlikle başlattılar, ama aslında neyi keşfetmek üzere olduklarına dair en ufak bir fikirleri yoktu. Haftanın çoğu günü ofislerinde buluşup, çözülmesi gereken bulmacaları belirlemek için notlarını ve hesaplamalarını karşılaştırıyorlardı. Witten şu an o günleri şöyle hatırlıyor: "Nispeten erken bir aşamada bir tür ikilik saptamasının önemli olacağını tahmin etmiştik, ama bunun bize ne söyleyeceğini anlayamadık. Ne tip bir çerçeve içinde çalışmamız gerektiğini anlamamız zaman aldı. Bir kere o aşamaya geldiğimizdeyse, hızlı gelişim göstermek mümkün olabildi."[18] Seiberg de şöyle hatırlıyor: "Sonuçlar şaşırtıcı bir hızla adeta akmaya başlamıştı. Daha önce hiç böyle bir şey görmemiştim."[19] İki teorisyen, büyük güce tam ölçekte maruz kalan quarklara ve gluonlara dair süpersimetrik teorilerin, çevreleriyle görece daha zayıf etkileşim içindeki farklı parçacıkları –monopolleri– tanımlayan bir

17. Seiberg ve Witten, süpersimetrinin N = 2 versiyonu olarak bilinen şeyi inceliyordu; bu versiyonun, Seiberg'in kısa süre önce detaylı incelemiş olduğu N = 1 versiyonuna göre daha fazla simetrisi vardı.
18. Wittendan gelen e-mail, 17 Eylül 2018
19. Seiberg'le söyleşi, 23 Ağustos 2017

alan teorisiyle tam olarak aynı tahminleri yaptığını gösterdiler. Bu ikilik, fizik alanındaki çözülememiş en zor problemlerden birine, quark sıkışmasına dair yeni ipuçları doğurdu. Fizikçiler büyük güce dair ilk ölçüm teorisini keşfettikten neredeyse yirmi yıl sonra bile tüm quarkların neden nükleer parçacıklar içine sıkışmış göründüğüne dair kimsenin niceliksel bir fikri yoktu. Seiberg-Witten teorisi, quark sıkışmasını araştırmak adına teorisyenlere güçlü bir yeni yol göstermiş oldu: sıkışma, teorik olarak yalnızca sürekli gluon alışverişiyle değil, aynı zamanda eşdeğer şekilde, monopollerin hareketleriyle açıklanabiliyordu. (Böylesi bir eşdeğerlik, daha önceleri Gerard 't Hooft tarafından ve ondan bağımsız olarak da Güney Afrika doğumlu Amerikalı Stanley Mandelstam tarafından tasavvur edilmişti.)

Seiberg ve Witten, 1994 yılı Temmuz ayında projelerini tamamladıktan sonra, bu teoriyi farklı şekillerde geliştirdiler: Seiberg fizik alanında, Witten da matematikte geliştirdi. Witten, instantonların (uzay-zamandaki "olaylar") matematiksel tanımlarını kullanarak süpersimetri ile en gelişmiş saf matematik arasında bir başka bağlantı daha keşfetti. Seiberg-Witten teorisini, yani kendi teorilerini temel alarak dört boyutlu uzayları birbirinden ayıran ve dört boyutlu uzayların matematiği hakkında yeni kavrayışlar doğuran bir dizi denklem oluşturmayı başardı. Seiberg, daha sonraları bana şöyle söyleyecekti: "Teorimizin bu şekilde kullanılabileceği bizim için sezgisel olarak çok açıktı, ama matematikçi dostlarımız için büyük sürpriz olmuştu."

Simon Donaldson, Seiberg-Witten makalelerinin matematikçiler üzerinde yarattığı etkiyi şöyle hatırlıyor: "Yaklaşımları bize büyücülük gibi gelmişti. Harika bir Noel hediyesi gibiydi, dört boyutlu uzayların topolojisine ilişkin olarak daha önceleri çok zorlu görünen onlarca problemi çözme olanağı sağlıyordu. Yüzlerce sayfa sürecek ispatlar, yirmi otuz satırda yapılabiliyordu."[20] Seiberg ve Witten'ın subnükleer güçler teorisi, matematikçileri kolay toplanabilir meyve bahçesine götürmüştü.

Matematikçilerin inanmakta zorlanmalarının sebeplerinden biri de şuydu ki, Witten, Richard Feynman'ın kuantum mekaniğine dair matematiksel açıdan şüpheli görünen "izlenen yolların toplamı (sum over paths)" versiyonunu kullanmıştı.

20. Simon Donaldson'la söyleşi, 4 Ağustos 2016

Fizikçiler kuantum alan teorisinde hesaplama yapmak için bu metodu rutin olarak kullanıyor olsalar da, matematikçiler bunu saçmalık olarak görüyordu. Matematikçilere göre Seiberg-Witten teorisinin matematikteki başarısı inkâr edilemez olduğu kadar anlaşılamaz durumdaydı.

Kafası karışık matematikçiler arasında Belçikalı Pierre Deligne de vardı, enstitüde Witten'ın meslektaşlarından biriydi.[21] Büyük Fransız matematikçi ve Bourbaki üyesi Alexander Grothendieck'in eski bir öğrencisi olan Deligne, her daim yılmaz bir saf matematikçi olmuştu ve 2015 yılında bana söylediği üzere: "her zaman da öyle olacaktı". Doğaya düşkün biri olarak pratik yeteneği de vardı, kışın kulübeler yapıp bunların içinde yaşardı. Nazik ve yumuşak konuşan tarzına rağmen, "doğru düzgün tanımlamadıkları nicelikleri hesaplamaya çalışan" fizikçilerden konu açılınca sert eleştiriler yapmaktan geri durmazdı.[22] Ona göre bu gevşeklik, saf matematikçilerle teorik fizikçiler arasındaki iletişim karmaşasının büyük bölümünde başroldeydi.[23]

Fizikçiler teorilerinin başarılarını abarttıklarında bundan hoşlanmayan Deligne şöyle söylemektedir: "örneğin 'sicim teorisi' ifadesinde fizikçilerin 'teori' kelimesiyle ne kastettiklerini anlayamıyorum." Temel parçacık konseptini de anlayamadığını söylüyordu: "Ne anlama geldiğine dair hiçbir fikrim yok."[24]

Deligne, birçok fizikçinin dikkatsiz oluşu noktası üzerinde daha fazla durarak Rusya doğumlu matematikçi Yuri Manin'in yaptığı bir gözlemden çok etkilendiğini söylüyordu: "Matematikçiler kalelerini zemin üzerine kurarlar. Fizikçilerse havaya kurar." Manin'e bu nüktesi hakkında yorum yapmak isteyip istemediğini sorduğumda bana şöyle yanıt verdi: "Bütün iyi benzetmelerde olduğu gibi, aksi yöndeki saptama da doğrudur: matematikçilerin kaleleri fikirler dünyasında kuruludur, fizikçilerin kaleleri ise gözleme, ölçüme, deneylere ve insanlığın kültürel anlayışına bağlıdır."[25]

---

21. Pierre Deligne ve çalışması üzerine, Simons Foundation: https://www.simonsfoundation.org/2012/06/19/pierre-deligne/
22. Deligne'yle söyleşi, 23 Temmuz 2015
23. Deligne'den gelen e-mail, 30 Temmuz 2018
24. Deligne'yle söyleşi, 23 Temmuz 2015
25. Manin'in bana daha sonra söylediğine göre, muhtemelen Feynman'ın "geçmişlerin toplamı" şeklindeki kuantum mekaniği versiyonunu düşünmüş olmalıydı. Manin'den gelen e-mail, 21 Temmuz 2017

Deligne, fizikçilerin "matematiksel açıdan tuhaf fikirleri, ilgi çekici ve beklenmedik matematik varsayımları" üretmek için kullanabilmelerinden çok etkilendiğini söyler. Şöyle eklemektedir: "Böylesi varsayımları kendim de yapabilecek kadar durumu anlıyor olmayı isterdim. Witten'dan bağımsız olmayı umuyordum, ama kendimi ondan bağımsız kılamıyordum."[26]

Deligne ve Witten, matematikçiler ve fizikçiler arasında daha yakın iletişim oluşturabilmek amacıyla 1994 yılında bir etkinlik programı oluşturdular. Witten dört-boyutlu uzay üzerine makalesini hazırladığı esnada, Deligne ile birlikte, ABD Ulusal Bilim Kuruluşuna (NSF) program için finansman talep eden bir başvuru mektubu yazıyorlardı.[27] Bunu yapmaktaki amaçlarından biri de "iki alanda da kendini eşit ölçüde konforlu hisseden" daha fazla sayıda genç bilim insanını eğitmekti. Bu öneri kurumda kabul görmedi; kurum adına başvuruyu değerlendirenler, teorisyenleri matematikçilerden ziyade deney araştırmacılarına yaklaştıracak projelere yatırım yapmanın daha iyi olacağını beyan ettiler. Hakemlerden biri, programın ilerlemesi halinde genç fizikçilerin eğitimini "yolundan saptırma eğiliminde olabileceğini" belirtti.

Deligne ve Witten ısrarcıydı. 1995 yılı sonbaharında revize bir başvuru sundular, matematik-fizik hattındaki son gelişmelerin başarısını vurguladılar ve projenin bir hevesten ibaret olmadığını ısrarla belirttiler. Şöyle yazdılar: "Bizim zamanımızdaki fiziğin geleceğini büyük ihtimalle yeni temel teorilere dair anlayışımız şekillendirecek." Ulusal Bilim Kuruluşu bu revize öneriyi finanse etmeyi kabul etti, yeni oluşmakta olan World Wide Web'de de bu gelişme genç teorik fizikçilere ve saf matematikçilere tanıtıldı.[28] Programa katılmak üzere başvurular gelmeye başladığında, proje akıllıca bir yatırım olarak görünüyordu; çünkü matematik zekâsına sahip fizikçiler bir başka devrimin içine girmiş bulunuyordu.

---

26. Deligne'yle söyleşi, 23 Temmuz 2015
27. Witten, E. ve Deligne, P., Draft NSF proposal NSF-DMS 9505939, 16 Eylül 1994; değiştirilen teklifin sunumu Kasım 1994: IASARCHIVE Director's Office: Associate Director for Development and Public Affairs Rachel Gray files: 2005 Transfer (yeniden kutulama): Kutu 9: NSF-multidisciplinary. Bkz. Galison (2004: 50-53)
28. IAS'deki Kuantum Alan Teorisi Programı hakkındaki ilk gönderiler, Princeton: http://www.math.ias.edu/QFT/fall/

İlk sicim teorisi devriminin onuncu yılı esnasında, 1994 yılı sonbaharında, Seiberg-Witten atılımının ardından bile kutlamaların içinde biraz da kötümserlik havası vardı. Teorisyenler sicim taslak çalışmasını onlarca farklı üretken yolla incelemiş olsa da, taslağın en zorlu problemleri çözülemeden kalmaya devam ediyordu ve sicim teorisi kullanılarak deney araştırmacılarının makul bir yakın gelecekte kontrol edebileceği tahminler üretilmesi adına hâlâ görünürde fazla bir şey yoktu. Konuyu ileri taşıyabilmek için teorisyenlerin acil yeni ve iyi fikirlere ihtiyacı vardı.

Temel güçlere dair teorileri birleştirmeye çalışan teorisyenler için sicim teorisinin yegâne seçenek olmadığını hatırlamak yerinde olacaktır. Bu teorisyenlerin birçoğu süper-yerçekiminin (Einstein'ın yerçekimi teorisinin süpersimetriyi dahil eden versiyonlarıyla ilgilenen alan) birbiriyle rekabet halindeki taslak çalışmaları üzerinde çalışıyordu. Bu teoriler arasındaki ilişki hiç net değildi: bir süper-yerçekimi teorisinin yanı sıra en az beş sicim teorisi, en temel düzeyde doğaya dair geçerli birleşik tanımlar getirmek adına eşit derecede iddia sahibiydi. Uzun süreli bir tartışmaya göre süper yerçekimi teorisi, "membran" veya kısaca "bran" olarak bilinen objeler şeklinde tarif edilen egzotik objelerin var olduğu anlamını doğuruyordu. Membranlar hem nokta gibi parçacıklardan hem de tek boyutlu sicimlerden farklıydı. Bu varsayımsal subnükleer objeler, sicim matematiği çerçevesinde de tanımlanmıştı; ama birçok sicim teorisyeni (aralarında Witten da vardı) branların gerçek olduğundan şüpheliydi. Süper-yerçekimi uzmanı Michael Duff, daha sonraları "Süpermembranlar: Abartılı Bir Yolculuk" gibi başlıkları olan makaleler okuduğunu hatırlıyordu; bir sicim teorisyeni de kendini şöyle ifade etmişti: " 'Membran' kelimesini her duyduğumda kulaklarımı tıkayasım geliyor."[29]

Sicim teorisyenlerinin bir sonraki yıllık toplantısının, yani Sicim 1995'in planlamacıları, sicim taslak çalışmasının böylesi bir motivasyon kaybı içinde olduğu bu esnada konferans programını

29. Duff (2016: 83)

oluşturmak üzere ilk kez bir araya geldi. Los Angeles baharının ilk güneşli günlerinde gerçekleşmesi planlanan toplantıda, yaklaşık 180 araştırmacı, "Gelecek Perspektifi" olarak seçilen temayı incelemeyi bekliyordu.[30] İyimser bir hava yaratmayı isteyen organizatörler, konuşma yapacak olan elli kişiden "büyük düşünmelerini" istedi; ayrıca incelikli düşünerek, kadrosu olmayan araştırmacıların iş piyasasındaki hayal kırıklıklarını seslendirebilecekleri ve birbirlerinin sıkıntısını paylaşabilecekleri bir oturum da düzenlediler.[31]

Konferansın ikinci gününde, 14 Mart'ta, fizikçiler; Witten tarafından sabah 9'da yapılacak olan konuşma için yerlerini ayırmadan önce kahvelerini ve simitlerini alıp salona gelmeye başladı. Witten, sunumuna "Sicim Dinamikleri Hakkında Bazı Yorumlar" olarak başlık atmıştı: görünüş itibarıyla en heyecan verici başlık değildi.[32] Organizatörlerin konuşmacıları büyük düşünmeye davet etmiş olduğunu göz önünde bulunduran Witten, sicimlerin çok güçlü etkileşimde oldukları tüm boyutlardaki tüm sicim teorileri hakkında konuşarak organizatörleri memnun etmeye çalışacağını belirtti. Sonraki bir saat boyunca Witten, yaklaşık altmış slaytlık bir konuşma yaptı ve bu sunum, sicim taslak çalışmasının gelişim yolundaki bir başka keskin viraj haline geldi, genellikle sicim teorisinin ikinci devrimi olarak tanımlandı.

Witten ilk olarak, son birkaç ayda sicim teorisine ve süper yerçekimine birçok cesaret verici katkı olduğuna işaret etti. Daha sonraları, "Doğa yasalarının süper-birleşimi" olarak tanımladığı yaklaşımı ortaya koyarak bu katkılar üzerinden ilerlemek istiyordu, özellikle de çalışmalarını yakından izlediği Britanyalı teorisyenler Chris Hull ve Paul Townsend'ın güncel çalışmalarından faydalanacaktı. Sunumu esnasında beş farklı sicim teorisinin ve süper-yerçekiminin her birinin geçerli olduğunu gösterdi, ama kendi ayrı alanlarında geçerliydiler: aslında tek bir kapsayıcı yapının unsurlarıydılar. Buna geçici olarak "M-teorisi" adını verdi, M'nin neye karşılık geldiği konusunda da bir şey söylemeyerek kafalarda soru işareti oluşturmayı tercih

30. Sicim '95 toplantı programı: http://physics.usc.edu/Strings95/
31. Polchinski (2017: 91)
32. Rickles (2014: 215)

etti: gizem (mystery), büyü (magic), membran veya benzerleri olabilirdi (buna basitçe "sicim teorisi" diyerek genel uygulamayı benimsemeye devam edeceğim).[33] Dinleyici kitlesi hayranlıkla izliyor, bütün bir konuya yeni bir ışık tutmuş gibi bakıyorlardı. Kilit analizler arasında sicim teorisinin ikiliklerle dolu oluşu da vardı: Teori dahilinde birçok unsur, iki farklı matematiksel yolla anlatılabiliyordu. Witten, meslektaşlarının halihazırda saptamış ve daha birçoğunun varlığını göstermiş olduğu ikiliklerin rolünü açıklığa kavuşturdu.Sicim teorisi taslağı bir daha asla eskisi gibi olmayacaktı.

Written konuşmasını bitirip seyirciler arasındaki yerine döndükten sonra, Nati Seiberg sırıtarak sahneye çıktı, hafiften sarsılmış gibiydi. Düşüncesini "İçimden kamyon şoförü olmak geliyor" diyerek açıkladığında, salon kahkahalarla çınladı. Bir saat sonra konuşma sırası John Schwarz'ındı. Sahneye vardığında, espriye, "Nati kamyon sürecekse, benim de üçteker kullanmam gerekir" diye devam etmişti.

Witten'ın bu sentezi, sicim teorisyenlerinin iyimserliğini tazeledi ve bu yeni coşku iki gün sonraki konferans ziyafetinde kendini açıkça belli ediyordu. Jeff Harvey'in hatıralarına göre, sicim teorisyeni Lenny Susskind, akşam yemeğinden sonra yaptığı konuşmada sicim teorisyenlerinin, yeni deneylerden gelecek destek olmadan da kendi alanlarında gelişme kaydetmeye muktedir olduklarını öne sürecek kadar iddialıydı.[34] Salı sabahı sicim teorisinin yeni haliyle ortaya çıkışının ardından, Susskind'in bu konuşması, yemeğe katılanların bazıları için geleceğin şerefine kaldırılmış bir kadeh anlamını taşıyordu. Bununla beraber Harvey ve diğer teorisyenler, sicim teorisini Newton'ın öğretisinin aksi bir yaklaşımla yalnızca saf düşünceyle geliştirmek konusunda endişeliydi. Bu şüphecilerden biri de California Üniversitesi Santa Barbara Teorik Fizik Enstitüsü'nde sicim teorisi alanında bir duayen olan Joe Polchinski'ydi. Eski problemleri yeni yöntemlerle ele

33. Witten (2014): "Bazı meslektaşlarımız, teorinin bir "membran teorisi" olarak anlaşılması gerektiğini düşündü. Ama ben bundan şüpheliydim, bu yüzden de "membranı" temsil edecek şekilde "m" harfini kullanıp "M-teorisi" demeyi tercih ettim; zamanla M'nin 'büyü' ('magic'), 'gizem' ('mystery') veya 'membran' için kullanıldığını söyleyebiliriz.
34. Ayrıca bkz. Polchinski (2017: 91)

alıp yorumlamak konusunda ustaydı ve teorilere getirdiği pragmatik yaklaşımların yanı sıra "ayağını yere basar halde tutup süslü matematiğin cazibesine kapılmamakla" gurur duyardı.[35] Sicim 95'e katılan birçok teorisyen gibi Polchinski de evine büyük coşkuyla döndü. Kendine, çözmesi gerektiğini bildiği on dört ev ödevi verdi; bunları çözdükten sonra Witten'ın konuşmasını anladığını söyleyebilir duruma gelecekti.[36] Bu yeni fikirleri, kendisinin ve iki genç çalışma arkadaşının yedi yıl önce tasarlamış oldukları bir kavramı öne çıkarmak amacıyla kullanmak istiyordu. Bu kavram, Polchinski'nin D-membran olarak adlandırdığı (teknik sebeplerden dolayı) özel bir tip membrandı; temel sicim teorisini kullanarak yaptığı basit bir hesaplamanın sonucu olarak bu membranla karşılaşmıştı. Uzay zamanın birçok farklı boyutunda salınmakta olan bu membranların, sicimlerin sınırlandırdığı fiziksel objeler oldukları düşünülmektedir.[37] Tıpkı bir sıvı içindeki atomların, kendilerine etki eden kuvvetler dolayısıyla sıvı yüzeyinde hapsolmaları gibi, sicimler de, uç kısımları membranları sınırlandırdığı için hapsolabilir. O ilk günlerde Polchinski ve çalışma arkadaşları, yaptıkları buluşun anlamını bütünüyle idrak edememişlerdi ve bu fikirleri genel olarak ilginç bir yaklaşım olarak kabul edilmekle kalmıştı. Ancak Polchinski,1995 yılı sonbaharında D-membran kavramını netleştirince ve bu varsayımsal objelerin davranışlarının nispeten kolayca nasıl hesaplanabileceğini gösterince bu durum bütünüyle değişti.

Kısa süre sonra membranlar, tıpkı yıllarca süper-yerçekiminde oldukları gibi sicim teorisinin her yerinde bulunmaya başladılar.[38] Witten'ın M-teorisi vizyonunun matematiği yalnızca D-membranları tarif etmekle kalmıyordu, aynı zamanda her biri uzay-zamanın birçok boyutunda salınan çok sayıda egzotik objeyi de tanımlıyordu. Bu olaylar fazla coşkulu bir hikâye

35. Polchinski'yle söyleşi, 8 Nisan 2015
36. Polchinski (2017: 93)
37. Strassler, M., 'In Memory of Joe Polchinski, the Brane Master', Of Particular Significance: Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler:https://profmattstrassler.com/2018/02/05/a-brilliant-light-disappears-over-the-horizon-inmemory-of-joe-polchinski/ (2018)
38. Duff (2016: 83-85); Duff'la söyleşi, 29 Temmuz 2017; membranların ilk dönemlerdeki kullanımına dair bir örnek: Duff ve Sutton (1988: 67-71)

yazarının kurgularıymış gibi gelebilir kulağa ama var olduğu öne sürülen bu yeni objeler sebepsiz ortaya konmuş değildi: varlıkları, hem kuantum mekaniğiyle hem de özel izafiyet teorisiyle tutarlı olmalarının (ki bu kolay bir şey değildi) bir sonucuydu. D-membranların ve yeni sentezlenen sicim teorisindeki diğer objelerin destekçileri için tüm bu objeler Dirac'ın anti-elektron tahmininden daha aşağı kalır değildi. D-membranlar, sicim taslak çalışmasının ön saflarında ve merkezinde bulundukları üç aylık dönem içinde faydalı olduklarını, ilk kez deneysel testlere tabi tutulabilecek hesaplamalarda kanıtladılar. Teorisyenler Andrew Strominger ve Cumrun Vafa, D-membranı, kara deliklerin entropi olarak bilinen özelliği için bir formül türetmek üzere kullandılar: kaba hatlarıyla söylemek gerekirse, kara deliğin iç yapısı hakkındaki bilgiye dair bir ölçüm, bu alanın dışındaki birileri tarafından bulunmuş oluyordu. Çoğu fizikçi, herhangi bir hesaplamanın yapılabilmiş olmasına bile şaşırmıştı. Dahası, Strominger ve Vafa'nın ulaştığı sonucun, Stephen Hawking ve Jacob Berkenstein tarafından neredeyse çeyrek yüzyıl önce farklı metotlar kullanılarak ulaşılmış sonuçlarla aynı olmasına da şaşırmışlardı. Bu olay, gerçek dünyadaki bir şeylere benzeyen bir objeyi tanımlamak konusunda M-teorisinin ulaştığı ilk başarıydı. Hesaplamaya ilişkin haberler kısa sürede Princeton'a ulaştı; elit bir matematiksel fizikçi grubunu kuantum alan teorisi konusunda eğitmek yönünde Deligne ve Witten'ın programının başlamasının üzerinden pek fazla zaman geçmemişti. Bu iki kültürün birbirini geliştirmesini sağlamak hiçbir zaman acısız bir süreç olmayacaktı; matematikçi David Morrison da şöyle hatırlamaktadır: "Birbirleriyle farklı dillerde konuşmaya çalışan iki grubun saatlerce süren hüsran dolu sohbetleriydi bunlar." Morrison, kuantum alan teorisi karşısında zorlanan bir grup tecrübeli matematikçinin Witten'ı nasıl hayal kırıklığına uğrattığını da hatırlıyordu. Witten hayretler içinde haykırmıştı: "Bunu üniversitedeki fizik öğrencilerine öğretip de size niye öğretemediğimizi anlayamıyorum."[39]

Witten, yirmi yıl kadar sonra, ileri kuantum teorisi öğrenmeye çalışan saf matematikçilerin karşılaştığı güçlüklere daha

39. Morrison'la söyleşi, 23 Nisan 2015

fazla hoşgörüyle yaklaşabilir hale geldi. Çoğu fizikçi uzun yıllarını temel kuantum mekaniğini ve alan teorisinin gerçek dünyadaki uygulamalarını öğrenmek için geçirmiş olarak bu konuya gelir, diye belirtmektedir. "Tüm bu çalışmalar, istenen titizlik ve hassasiyet derecesinin an itibarıyla mümkün olmadığı gerçeğini en azından kısmen telafi edecek düzeyde bir sezgiyi fizikçilerin geliştirmesine yardımcı oluyordu. Matematikçilerse tüm bunları atlayıp yalnızca kuantum alan teorisini soyut bir konu olarak öğrenmeye çalışıyorlardı."[40]

Sonrasında, Deligne ve Witten'ın umduğu üzere saf matematikle kuantum alan teorisi arasındaki ara yüzey gitgide daha popüler bir araştırma konusu haline geldi. Bu filizlenme yalnızca teorik fizik ve saf matematik saflarında değil, aynı zamanda nispeten yeni oluşumlarda da gerçekleşti. Bu oluşumların birçoğu son yirmi otuz yıl içinde, genellikle hayırsever kimselerin cömert kişisel bağışlarıyla kurulmuştur. 1990'ların sonlarında BlackBerry'nin öncü isimlerinden hayırsever Mike Lazaridis, Kanada'da kurulan Perimeter Teorik Fizik Enstitüsü'nün başlıca bağışçısı durumundaydı. Enstitü, dünyanın önde gelen araştırma merkezlerinden biri haline geldi ve kuantum alan teorisi konusunda en önemli uzmanlardan bazılarının akademik yuvası oldu. Yirmi yıl sonra ABD Long Island'daki Stony Brook Üniversitesi'nde Simons Geometri ve Fizik Merkezi açıldı ve bu merkez de araştırmaların en önemli noktalarından biri haline geldi. Merkezin kurulumunda, 1994 yılında Jim Simons (modern topolojinin, ölçüm teorisyenleriyle tanıştırılmasına yardımcı olmuş matematikçi) tarafından kurulmuş bir yardım derneğinin de payı vardı. Simons, 1980'lerin başlarında akademiden ayrıldıktan sonra, kendisini ABD'deki en varlıklı insanlardan biri haline getiren bir koruma fonu kurdu.

*

1997 yılının başları itibarıyla teorik fizikçiler, önlerindeki en az on yıl boyunca ikiliğin en önemli konulardan biri olacağını biliyordu. Teorisyenler, kuantum alan teorisi çiftleri arasında ve

40. Witten'dan gelen e-mail, 17 Eylül 2018

sicim teorisi çiftleri arasında birçok eşdeğerlik keşfetmişlerdi. Bu iki teori alanında da ikilikler, göründüğü kadarıyla özel izafiyet teorisi ile kuantum mekaniğini kombine ettikten sonra ortaya çıkıyordu: bir kez daha bu iki efsane teorinin bir araya getirilişi önemli sonuçlar doğurmuştu. Nati Seiberg, ikiliğin oldukça gizemli olduğunu ve bu fenomenin niçin sürekli ortaya çıktığını anlamanın mümkün olması gerektiğini düşünüyordu.

O senenin sonunda, yirminci yüzyıl biliminin en büyük analizlerinden birinin ortaya çıkışından sonra gizem daha da derinleşti. Bu analiz, o zamanlar yirmi dokuz yaşında olan Arjantinli teorisyen Juan Maldacena'nın fikriydi. Arjantin'de doğup büyümüş olan Maldacena, 1990'ların başında doktora yapmak üzere Princeton'a gelmiş, burada sicim taslak çalışmasına ilgi duymaya başlamıştı. Maldecena yumuşak huylu ve çekingen biri olsa da düşünceleri genellikle şaşırtıcı ölçüde cüretkâr, orijinal ve maceraperestti. Büyük bir yetenek olduğu daha ilk baştan belliydi. 1997 sonbaharında Harvard'a doçent olarak girmesinden yalnızca birkaç hafta sonra üniversitenin çok sağlam bir eleman almış olduğu açıkça görülmüştü. Daha önce hiç duyulmamış bir tür ikiliği ortaya koymayı başardı: alan teorilerinin veya sicim teorilerinin kendi arasında değil, bir alan teorisiyle bir sicim teorisi arasında bir ikilikti bu.

Maldacena'nın şu anda söylediğine göre, proton ve nötronlar gibi güçlü etkileşim halinde bulunan parçacıkların quark içerdiklerine dair 1970'lerde deney araştırmacıları tarafından ortaya konan bulgular, onun motivasyonunun önemli bir parçasını oluşturmuştu. Kuvvet hatlarının güçlü bir at nalı mıknatısın kuzey ve güney kutupları arasında bağlantı oluşturmasında olduğu gibi, benzeri kuvvet hatları, bir quark ve yakınlardaki bir antiquark arasında bağlantı kuruyor ve aralarındaki büyük gücü açıklamış oluyordu. Bu kuvvet hatları, sicim teorisi açısından temel teşkil eden sicimlere yakından benzemektedir, dolayısıyla bazı fizikçilere göre sicim yaklaşımı tarafından quarklar arasındaki güce getirilen açıklamayla, büyük güce dair ölçüm teorisi tarafından getirilen daha geleneksel açıklama arasında bir ikilik olabilirdi. Bu fikirle ilgili problemlerden biri şudur ki, sicim teorisi bizim aşina olduğumuz dört boyutlu uzay-zamanda

anlamsız kalır. Bununla beraber Rus teorisyen Sasha Polyakov, sicim teorisinin beş boyutta ortaya konması halinde, dört boyutlu ölçüm teorisiyle arasındaki ikiliğin nihayetinde işleyebileceğini fark etmiştir. Maldacena, Harvard'daki ilk haftalarında membran kavramını kullanarak kara delikleri anlama girişiminin bir parçası olarak bu fikri geliştirmeye çalıştı.[41] Yenilikçi bir fikirle ortaya çıkışı da bu esnada oldu. Daha sonra bana anlattığına göre durum şöyleydi: "Polyakov'da halihazırda bulunan beş boyuta beş boyut da benim eklemem halinde, sicim teorisyenlerinin yıllardır araştırdıkları standart on boyutlu süpersimetri teorisi bağlamında düşünebilirdik."[42]

1997 yılı Kasım ayının başlarında Maldacena'yı, ebediyen kendi adıyla anılacak olan yeni bir tür ikiliğe yönelten de kısmen bu düşünce oldu. Bu yaklaşım bir yandan, dört boyutta hareket eden quarkları ve gluonları tanımlayan yerleşik teoriye benzer şekilde modern ölçüm teorisinin bir türünü içeriyordu. Maldacena'nın göz önünde bulundurduğu ölçüm teorisi birçok matematiksel simetriye sahipti: yalnızca süpersimetri değil, aynı zamanda konformal simetri de içeriyordu; yani teori, geçerli olduğu uzaklık skalasına bağlı kalmaksızın aynı sonuçları veriyordu. Diğer yandan bu ikilik, aynı zamanda sipersimetriyi de işin içine katan özel bir sicim teorisi de içermekteydi. Maldacena bu teoriyi beş boyutta ortaya koydu, öyle ki, teori yerçekimini özel bir bükülmüş uzay-zamanda tanımlar hale geliyordu.[43]

Teoriler matematiksel ve fiziksel olarak oldukça farklı görünüyor olsa da Maldacena tam olarak eşdeğer olduklarını öne

41. Maldacena bunu yaparak Shiing-Shen Chern'in topolojik matematiğinden ve özellikle de Sasha Polyakov'un fikirlerinden etkilenen bir yaklaşım kullanmış oluyordu. Maldacena, "bir başka öncülün de Tom Banks, Willy Fischler, Stephen Schenker ve Lenny Susskind tarafından önerilmiş olan Matriks teorisi olduğunu" ekler. "Bu teoriye göre düz uzayda on bir boyutlu bir yerçekimi teorisi, bir kuantum mekaniği modeli çerçevesinde açıklanabilmektedir. Ayrıca bir kuantum alan teorisinin kuantum yerçekimiyle ilişkili olduğu anlayışını da taşır." Maldacena'dan gelen e-mail, 24 Temmuz 2017

42. Maldacena'dan gelen e-mail, 22 Ağustos 2018

43. Maldacena'nın sicim teorisinin uzay-zamanı gerçek dünyanın uzay zamanı olmasa da, daha büyük ölçüde bakıldığında gerçek-dünya uzayına oldukça yaklaşır ve Einstein'ın Hollandalı dostu Willem de Sitter'in adıyla anılarak "anti-de Sitter uzayı" olarak ifade edilir. Genişlemekte olan bizim evrenimizin aksine "anti-de Sitter uzayı" ne genişlemektedir ne de büzülmketedir –daima aynı kalır–.

sürüyordu: mantık dışı görülebilecek bir yaklaşımdı bu. Göz önünde bulundurduğu teoriler açısından aralarındaki ilişki, sembolik olarak şu şekilde ifade edilebilirdi:

beş bükülmüş uzay-zaman boyutunda yerçekimi sicim teorisi
= *dört uzay-zaman boyutunda* ölçüm teorisi

Maldacena, bu ikiliğe dair ilk açıklamasını ne zaman tanımlamış olduğunu çok net hatırlamaktadır: 27 Kasım Perşembe günü, Amerika Birleşik Devletleri'nde Şükran Günü'nde. Amerika'daki çoğu insan fırından çıkmış hindiye ve elmalı keke yumulurken; o, Massachusetts Cambridge'deki bekâr evinde fikrini kaleme almakla meşguldü.[44] Akşam saat 8'den kısa bir süre önce, üniversitedeki ofisine giden birkaç blokluk yolu yürüdükten sonra masaüstü bilgisayarını açtı, internete bağlandı ve arxiv.org'a on yedi sayfalık makalesini gönderdi; site, teorik fizikçilerin en son araştırma makalelerini yayımlayabilmeleri için altı yıl önce kurulmuştu.[45]

Maldacena, fikrinin fizikçiler tarafından "şüpheciliğe çalan bir coşkuyla" karşılandığını hatırlamaktadır. İlk etapta çok net bir sıçrama yapmamıştı, muhtemelen bunun nedenlerinden biri fazla mütevazı olmasıydı.[46] Makalesi fazlasıyla baskı hatası içeriyordu ve konuyla ilgili bazı görüşlere referans yapmayı atlamıştı: Daha sonraları bana şöyle söyledi: "Bunlardan haberdar değildim, ben de sonrasında bu referans işini hemen düzelttim." Dünyadaki teorik fizikçilerin, Maldacena'nın altın yumurtlamış olduğunu fark etmesi daha aylar sürecekti.[47]

İkiliğin birçok anlamı vardı. Kavramsal seviyede Maldacena'nın önermesi, yerçekimi teorisini temel unsur olarak algılamanın anlamsız olduğu anlamına geliyordu, çünkü yerçekimi teorisinin tahminleri quark teorisi kullanılarak da yapılabiliyordu. Bu durum, yerçekiminin doğada temel bir fenomen olmadığına işaret

44. Maldacena'nın adresi 3 Sumner Road, Cambridge, MA.
45. Maldacena'yla söyleşi, 18 Temmuz 2007; Maldacena, 'The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity': https://arxiv.org/pdf/hep-th/9711200.pdf
46. Maldacena'dan gelen e-mail, 14 Mayıs 2018
47. Maldacena (2005)

etmektedir –teorik anlamda bu gücün daha temel bir şeyden doğması anlamını taşır–. Benzer şekilde, göründüğü kadarıyla fizikçiler hesaplamalarını hem dört hem de beş uzay-zaman boyutunda yapabildiği için, uzay-zamanın kendisi de temel bir fenomen olamaz, daha temel bir şeyden doğar.

Maldacena'nın makalesinin ortaya çıkışından birkaç ay sonra, Princeton'lı dört teorisyen –Witten, Polyakov, Steve Gubser ve Igor Klebenoz– bu fikri matematiksel açıdan daha hassas ve kullanım açısından daha kolay hale getirdiler. Maldacena'nın ikiliği teorik fizikçiler için bir mucizeydi; çünkü iyi anladıkları bir ölçüm teorisini (quarkları tanımlayan bir ölçüm teorisini) nispeten daha zor olan bir teoriyle eşitliyordu: bir yerçekimi sicim teorisiyle. İkilik, tek bir hamleyle daha önce ele alınamayan hesaplamaların kolayca yapılmasına imkân veriyordu. Sonuç olarak, nükleer partiküller içindeki quarkların güçlü etkileşimlerine dair standart (birçok testten geçmiş) teoriye çok benzeyen bir teoriyle ilgili hesaplamalar, imkânsız olmaktan çıkıp bir lisans öğrencisinin bir yerçekimi teorisi kullanarak bir kâğıdın iki tarafında yapabileceği bir şey haline gelmişti. Sihir gibi bir şeydi.

*

Maldacena, makalesinin yayımlamasından yedi ay sonra sicim teorisi camiasının Santa Barbara'da düzenlediği yıllık buluşmada şerefine kadeh kaldırılan kişi oldu. Katılımcıların birçoğu, bu yeni ikiliği aylardır büyük başarıyla etüt ediyordu ve artık parti yapmaya hazırdılar; sicim teorisyeni Jeff Harvey o günleri şöyle hatırlamaktadır: "Herkes Maldacena'nın başarısından bahsediyordu, onun dışında pek bir konu yoktu."[48] Aklına gelen parlak bir fikirle, bütün konferans salonunu; o dönem tüm dünyada hit olan "Macarena" şarkısını duruma uyarladığı sözlerle söylemeye ikna etti. Konferans yemeğinden sonra yeri göğü inleten üç yüz teorisyen –birçoğu tişört, şort ve flipflop terlikleydi–, Macarena dansının on dört adımlık versiyonuyla karanlık gecede tüm maharetlerini sergilediler.Teorisyen Clifford Johnson

48. Harvey'le söyleşi, 13 Mayıs 2018

trompetiyle ezgiyi verirken, dansçılar Harvey'nin güftesiyle şov yaptı; şarkının sözleri membranlar, Yang-Mills teorisi ve kara delikler konularındaki en güncel içgörülere esprili atıflarda bulunuyordu. Eğlenceye katılanlar arasında Maldacena'nın ta kendisi de vardı; şüphesiz ki, yaptığı büyük keşfi toplu dansla kutlayan çok az teorisyenden biri olmuştu.[49]

Eğlence âlemi haricinde, fizikçi Steve Giddings, meslektaşlarının hislerini özetliyordu; hepsi de son devrimin hemen ardından gelen bu yeni ikilik keşfini coşkuyla karşılamıştı: "Biz sicim teorisyenleri tevazuyla hareket etmiyoruz. Her şeyin temelini hemen anlamak peşindeyiz."[50] Gerçi tüm teorik fizikçilerin aynı fikirde olduğu izlenimini yaratmak yanlış olur. Bazıları, sicim taslak çalışmasının övüldüğü kadar olmadığını düşünüyordu: belki de gerçek dünyayla hiçbir alakası olmayan veya çok az olan akıllıca kurgulanmış bir yapıydı sadece. Birkaç ay sonra sicim teorisi şüphecilerinden Gerard 't Hooft şu yorumu yaptı: "Bu gelişmeler hakkında alaycı olmak cazip geliyor; çünkü gözlemlenebilir hiçbir fiziksel fenomen bunlarla açıklanabilmiş değil."[51]

Maldacena ikiliğinin hikâyesine dair ilginç de bir dipnot vardır. Maldacena, fikrini yayımlamasından birkaç ay sonra çok şaşırdığı bir şey öğrendi: 1930'larda ve 1960'larda Dirac, nihayetinde fizikle ilişkili olabileceğini düşündüğü matematiksel fikirleri keşfetmeye çalışırken bu sularda çok dolanmıştı.[52] Neredeyse hiç kimse bu araştırmaları dikkate almamıştı, muhtemelen matematikle oynanan oyunlar gibi görünmüştü. Maldacena'nın çalışmasının detayları arasında yeniden su yüzüne çıktıklarındaysa çoğu teorisyen –aralarında Maldacena da vardı– bunlarla ilgili hiçbir şey bilmiyordu.

---

49. Maldacena'yla söyleşi, 26 Ağustos 2016
50. Hellwarth, B., 'International Physicists at UCSB', *Santa Barbara News-Press*, 28 June 1998: http://web.physics.ucsb.edu/~giddings/newspress.html
51. Johnson, G., 'Almost in Awe, Physicists Ponder "Ultimate" Theory', *New York Times*, Science section, 22 Eylül 1998
52. Maldacena'dan gelen e-mail, 4 Ağustos 2014. Maldacena'nın, belli ölçüde ikiliğin habercisi olduğunu söylediği Dirac'ın iki makalesi şunlardır: Dirac (1936b: 429-442) ve Dirac (1963a: 901) –İkinci makaledeki denklem 4, Maldacena'nın çığır açan makalesindeki denklem 7'yle uyumludur–.

Deney araştırmacıları, doğanın rehberliğinin vazgeçilmez olduğunu vurgularcasına, teorisyenlerin Standart Model'e ayar çekmeleri gerektiğini göstermişlerdi: nötrino olarak bilinen parçacıklar, uzun zamandır düşünülenin aksine kütlesiz değildi.[53] Çok daha dikkat çekici şekilde, Santa Barbara buluşmasından birkaç hafta önce astronomlar neredeyse hiç kimsenin öngörememiş olduğu bir keşfi ilan ettiler. İki gözlemci ekibi, teleskoplarını uzak yıldızlardaki dev patlamalara çevirerek, evrenin genişlemesinin yavaşlamadığına dair (neredeyse tüm uzmanlar yavaşladığını düşünüyordu) ilk kanıtları ortaya çıkarmışlardı; aksine evrenin genişlemesi hızlanıyordu.

Bilinen en güçlü teoriler bile bu olayı basitçe açıklayamıyordu; sicim taslak çalışması veya herhangi başka bir gelişmiş fikir de yeni verilerin sebebini ortaya koyamıyordu. Evrenin gitgide daha hızlı şekilde genişlemesi boş uzayın enerjisinden ("karanlık enerji" olarak da bilinir) kaynaklanıyor gibi görünüyordu; bu enerjinin niceliği teorisyenler tarafından Standart Model kullanılarak on yıllardır hesaplanabiliyordu.[54] Boş uzayın enerjisine dair üstünkörü bir hesaplama cesaret verici değildir: elde edilen sonuç, astronomların ölçümlerini 10^{120} gibi bir çarpanla aşmaktadır (bir trilyon trilyontrilyon trilyon trilyon trilyon trilyon trilyon trilyon).[55] Bu rakam, modern bilim tarihinde yerleşik hale gelmiş teoriler kullanılarak yapılmış en hatalı tahmindir belki de ve uzay-zamana dair bilgimizde bir şeylerin ters gittiğini kanıtlar.

Fizikçiler, temel güçlere ve parçacıklara dair Standart Model'in geçerli olduğunu kanıtlamak adına, eksik olan yegâne parçayı derhal bulmak zorundaydı: Higgs parçacığını bulmaları gerekiyordu. Bu durum CERN yetkilileri için yüksek öncelik taşıyordu. CERN'in planları arasında protonları son derece yüksek enerjilerde çarpıştıracak devasa bir hızlandırıcı inşa etmek vardı, böylece zamanın başlangıcından sonra saniyenin milyarda birlik anında evrende geçerli olmuş koşulları bir

53. Close (2015: 253-274)
54. Straumann, N., The History of the Cosmological Constant Problem' (2002): https://arxiv.org/abs/grqc/0208027
55. Arkani-Hamed (2012: 60)

anlığına da olsa yeniden oluşturma imkânı doğacaktı. Aralık 1994'te tüm dünyadaki parçacık fizikçilerini müthiş rahatlatan haber geldi; CERN konseyi, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) olarak bilinen hızlandırıcının yapımına başlama kararı aldı. Laboratuvarın yöneticisi Britanyalı teorisyen Chris Llewellyn Smith sevinçten uçuyordu: "Nihayet Standart Model'in tek eksik parçasının gerçekten var olup olmadığını görebilecektik" diyordu daha sonraları, "ve hatta süpersimetriye dair de ilk kanıtları bulabiliriz. Bir o kadar önemli olarak, astronom arkadaşlarımızın evrende teleskoplarıyla göremedikleri büyük miktardaki maddeyi, uzun süredir aranan 'karanlık maddeyi' anlamalarına yardımcı olabiliriz."[56] Çarpıştırıcının yapımına başlama kararının ardından, proje için Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'dan gelen kritik mali destek programın hızlandırılmasına yardımcı oldu.

Teorisyenler, birkaç yıl sonra dilek listelerini adım adım genişletmeye başladılar. Bu listede membran teorisinin akıllıca kullanılarak uzayın daha önce gözlemlenmemiş boyutlarının Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) dedektörlerinde görülebilmesi ihtimali de vardı. Bu kavramın iki öncü ismi, bükülmüş bir uzay zamanda membran teorisini ortaya koymuş olan Lisa Randall ve Raman Sundrum'du. Sundrum, daha sonraları bana şöyle söylemiştir: "Heyecanlıydık çünkü bu yaklaşım olağanüstü bir deneysel işaret sunuyordu, buna göre LHC, 'graviton' adı verilen ve yerçekimsel gücü taşıyan parçacıkları mikroskobik bir ekstra boyutta sıçrarlarken üretme ve saptama imkânı verecekti."[57] Randall, LHC tarafından denenen enerji seviyelerindeki çarpışmalara bu fikirlerin uygulanmasının "gerçekten mümkün" olduğunu düşündüklerini de belirtti.[58]

Milenyuma girilirken, parçacık fizikçileri; Büyük Hadron Çarpıştırıcısının planlanan açılış tarihi için kalan ayları sayıyordu. Çarpıştırıcının dedektörlerinin, o güne kadar hiç kimsenin gözlemlemediği parçacıklarla dolup taşacağını ümit ediyorlardı. Hazırlık aşamasında teorisyenler, dedektörlerde

56. Llewellyn Smith'le söyleşi, 24 Eylül 2014
57. Sundrum'dan gelen e-mail, 16 Ekim 2018
58. Randall'dan gelen e-mail, 15 Ekim 2018. Randall'la söyleşi, 17 Mayıs 2017. Ayrıca bkz. Randall (2005: Chapter 20)

gerçekleşmesi beklenen çarpışmalara yönelik olarak Standart Model'in getirdiği tahminlere her zamankinden daha yakından bakmaya başladılar ve bu durum yeni bir araştırma konusu halini aldı. Bir sonraki aşamada göreceğimiz gibi, bu teorisyenlerden bazıları –oldukça beklenmedik şekilde– kendi alanlarını saf matematiğin sınırlarına yaklaştırır halde buldular.

11
işlenmemiş cevher

> "Einstein'ın yerçekimi teorisini buluş şekli biz ölümlüler için bir ilham kaynağı olmalı: fizik alanında temel sorular sorup bunları deşmeye devam edersek, önünde sonunda istesek de istemesek de sivri uçlu bir matematikle karşılaşacağız."
>
> Nima Arkani-Hamed, 2013

Büyük Hadron Çarpıştırıcısında yeni parçacıklar keşfetmek kolay olmayacaktı. Fizikçiler, hızlandırıcıdaki iki proton ışını birbiriyle çarpıştığında her saniye yaklaşık bir milyar çarpışma olacağını biliyordu, bunların birçoğu iyi bilinen parçacıklar savuracaktı. Ama fizikçiler çarpışmalar neticesinde günlük bazda yalnızca bir avuç Higgs parçacığının oluşacağını öngörüyordu.[1] Deney araştırmacılarıyla yakından çalışan bir CERN teorisyeni olan John Ellis, LHC'de bir Higgs parçacığı aramanın "samanlıkta iğne aramak gibi olacağı" yorumunu yapmıştı.[2]

Ellis'in metaforundaki samanlık, fizikçilerin "arka plan" olarak tanımladıkları unsura karşılık gelir: protonların quarkları ve gluonları arasındaki çarpışmalar sonucu ortaya çıkan milyonlarca parçacık bu arka planı oluşturur. Prensipte, tüm bu "saçılma süreçlerinin" sonuçları, parçacık fiziği Standart Modeli kulla-

1. Gillies, J., 'Luminosity? Why Don't We Just Say Collision Rate?': https://home.cern/cern-people/opinion/2011/03/luminosity-whydont-we-just-say-collision-rate (2013)
2. Ellis'ten gelen e-mail, 23 Eylül 2017

nılarak hesaplanabilir; fakat hesaplamalar genellikle karmaşık cebir içeren yüzlerce sayfayı bulmaktadır. LHC'nin açılış günü yaklaştıkça, fizikçilerin bu hesaplamaları daha verimli şekillerde yapma ihtiyacı da aciliyet kazanıyordu. Başarısızlık felaket olurdu; çünkü başarısızlık halinde fizikçiler, örneğin o güne kadar bilinmeyen parçacıkları arka plandan ayırmayı başaramayacaktı ve bu da onları önemli keşifler yapmaktan alıkoyacaktı. Teorisyenlerin, 1980'lerin ortalarında, atom çekirdeği içindeki temel parçacıklar hakkındaki basit sorulara odaklanmaya başlamalarının nedeni de buydu; örneğin çarpıştıklarında ne olacağı sorusu gibi.

Fizikçiler, bu soruya matematiksel kesinliği olan bir yanıt vermenin bir yolunu biliyorlardı; ilk olarak 8. bölümde karşılaştığımız "saçılma genliği" olarak bilinen objeleri kullanarak bu yanıta ulaşabiliyorlardı. Her bir genlik, protonlar içindeki temel parçacıklar –quarklar ve gluonlar– arasındaki her türlü muhtemel çarpışmanın belli sonuca ulaşma olasılığını tahmin etmektedir. Hiçbir şekli veya boyutu olmayan parçacıkların saçılmasını kapsayan böylesi olaylar, hiçlikten doğan karmaşıklık açısından yalnızca bir adım niteliğindedir, dolayısıyla bunları açıklayan genliklerin de, doğaya dair anlayışımızın temel parçaları olmaları beklenebilir. Amerikalı saçılma genliği uzmanı Lance Dixon'ın kelimeleriyle: "her biri, kendilerine beklenmedik bir matematiksel güzellik kazandıran kristal simetrisine sahip çok yönlü cevherler bunlar."[3] Ona göre genlikler, "bilinen evrendeki en kusursuz mikroskobik yapılardır".[4]

Bu bölümde göreceğimiz gibi, teorisyenler, saçılma genlikleri üzerinde düşünerek atom altı dünyaya başka bir kapı açabildiler. Zorlu hesaplamaları yapmanın daha iyi yollarını bulmuş olmak, deney araştırmacılarına verilerle baş etme imkânı verdi ve quarklarla gluonlar teorisi açısından yeni yaklaşımların keşfedilmesini sağladı. Bir kez daha, düşünülebilecek en basit fiziksel proseslerden bazılarını anlama girişimleri, saf matematiğin birçok branşının sınırlarıyla onlarca bağlantı kurulmasına yol açtı.

3. Dixon'dan gelen e-mail, 7 Haziran 2018
4. Dixon, L., 'Scattering Amplitudes' (2011): https://arxiv.org/pdf/1105.0771.pdf

1980'lerin ortalarında, gelecekteki parçacık hızlandırıcıları düşünen bilim insanları için; inceleme makalesi "Supercollider Physics [Süper-çarpıştırıcı Fiziği]", okunması elzem bir kaynak niteliğindeydi.[5] Eserin yazarları –Estia Eichten, Ian Hinchliffe, Kenneth Lane ve Chris Quigg–, parçacıklar ultra yüksek enerjilerde çarpıştıklarında teorisyenlerin ortaya çıkacağından emin oldukları saçılma süreçleri hakkındaki onlarca tahminin sonuçlarını sunuyorlardı. Yazarlar, makalenin bir noktasında yaptıkları yorumda o güne kadar hiç kimsenin, iki gluonun çarpışıp dört gluon oluşturacağı proses ihtimalini hesaplamamış olduğunu söylerken, bu hesaplamanın "belki de öngörülebilir bir gelecekte yapılamayacak kadar" karmaşık olduğunu ekliyorlardı. Bu ifade, iki genç teorisyenin, Yeni Zelanda'lı Stephen Parke'ın ve Polonya doğumlu Tomasz Taylor'ın dikkatini çekti, bu yorumu bir meydan okuma olarak gördüler. Güçlü etkileşimlere dair ölçüm teorisini ve Richard Feynman'ın tekniğini kullanarak hesaplama yapmanın güçlüklerinden haberdarlardı. Bu metoda göre herhangi bir saçılma genliği, bir dizi unsurun toplanmasıyla hesaplanabilmektedir; bu unsurların her biri de basit bir kural grubuna göre oluşturulan birer diyagramla temsil edilir. Problem şuydu ki, quarkları ve gluonları içeren basit hesaplamalar bile yakın zaman içinde pek mümkün görünmüyordu. Bu hesaplamaları daha verimli şekilde yapmanın bir yolunu bulmak elzemdi, aksi halde fizikçiler çığır açma potansiyeline sahip deneysel keşifleri kullanamayabilirdi.

Parke ve Taylor, ABD'deki en büyük parçacık hızlandırıcısı olan Fermilab (Chicago'nun batısına bir saat mesafededir) teori bölümünde çalışan araştırmacılardı. "Supercollider Physics" makalesindeki karamsar saptamanın fazlasıyla kötümser olduğunu kanıtlamayı uman Parke ve Taylor, iki gluon çarpıştığında ve aynı türden daha fazla parçacık oluşturduğunda ne olduğunu hesaplamaya çalışarak işe başladılar. Böylesi olaylar sonuca etki etmiyormuş gibi görünebilir ama her atom çekirdeği içinde sürekli gerçekleşirler; örneğin, insan vücudunu oluşturan trilyonlarca atomun çekirdeği de buna dahildir. Bu prosesler doğanın

5. Eichten vd. (1984: 617). Alıntılanan ifade, iki temel parçacığın çarpıştığı ve dört parçacık üretildiği proseslere karşılık gelir.

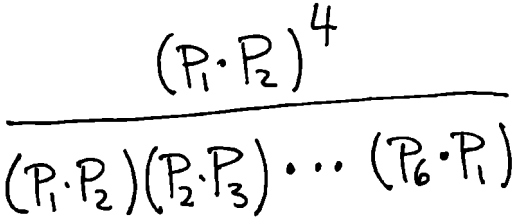
örgüsünün hayati bir parçasıdır, büyük ölçekli maddenin var olmasına ve hayatın filizlenmesine imkân verirler.

Parke ve Taylor, gluonlar arasında gerçekleşen –"gluonik olaylar"– ve iki ila dört gluon daha üreten çeşitli çarpışma tiplerinin olasılıklarını hesapladılar. Kolay bir işlem değildi: bu hesaplamaların her biri onlara haftalarca çalışmaya mal olmuştu. İki gluon, dört gluon daha oluşturmak için çarpıştığında saçılma genliğini hesaplama işlemi en az 220 Feynman diyagramı içeriyordu, bu da on binlerce matematiksel terimin hesaplanması anlamına geliyordu. Hatta bu hesaplamalar belki de imkânsızdı. Ancak 1986 yılının ilk haftalarında Parke ve Taylor büyük bir atılım yaptılar. Nispeten basit olan az sayıdaki hesaplamanın sonuçlarını kullanarak olasılık adına genel bir formüle dair destekli bir tahmin oluşturdular; bu olasılık da, özel bir haldeki iki gluonun birbiriyle çarpışıp yalnızca iki, üç, dört veya beş değil, *herhangi bir sayıda ve yine özel bir halde* gluon üretme olasılığıydı. Çoğu fizikçi böylesi bir formülün, ki eğer böylesi bir formül varsa bile, son derece karmaşık olmasını beklerdi; ama Parke ve Taylor bunun basit olduğuna inanıyordu. Parke'nin hatırladığına göre: "Başından beri haklı olduğumuzdan oldukça emindik, ama formülün neden işe yaradığına dair bir fikrimiz yoktu ve doğru olduğunu matematiksel olarak kanıtlayamıyorduk."[6]

Uzmanlara göre formülün sadeliği büyüleyici olduğu kadar anlamlıydı da. Fizikçiler ne zaman uzun ve karmaşık bir hesaplama yapsa, şaşırtıcı derecede sade bir sonuç, genellikle bunu daha zarif şekilde türetme şanslarının olduğuna işaret eden güçlü bir gösterge konumundadır. Belki de bu hesaplamanın altında yatan teori de daha iyi oluşturulabilir miydi sorusu çıkar ortaya. Veya belki de teorinin başka bir şekilde formüle edilmesi, hesaplamanın daha kolay yapılmasını sağlayacaktır. Tomasz Taylor'a göre: "Göründüğü kadarıyla bizim formülümüz, fizikçilere Geynman diyagramının bu hesaplamaları yapmak için en iyi yol olmadığını söylüyordu. Diyagram fazla karmaşıktı."[7] Parke bunu daha canlı şekilde ifade etmektedir: "Formül adeta bağırıyordu: 'Siz fizikçiler beni üreten formülü anlamıyorsunuz'".[8]

---

6. Parke'yle söyleşi, 16 Mart 2016
7. Taylor'la söyleşi, 18 Mart 2016
8. Parke'yle söyleşi, 24 Ekim 2014; Parke'den gelen e-mail, 25 Temmuz 2017



İki gluonun, dört gluon oluşturmak üzere saçılma olasılığını veren saçılma genliği için Parke-Taylor formülü. Bu şaşırtıcı derecede kompakt formül, 220 Feynman diyagramından gelen unsurları toplayarak kullanılan standart metodun net sonucunu verir, oysaki diyagram unsurlarını toplamak binlerce sayfa süren cebir kullanmayı gerektirir. Dörtten fazla gluonun üretildiği prosesler için kullanılan muadil formüller de bu kadar sadedir.

Parke ve Taylor bu buluşlarını iki sayfalık bir makalede yazdılar, makale şöyle son buluyordu: "[formülümüzün] doğru olduğunu daha büyük titizlikle göstermek adına sicim teorisyenlerine meydan okuyoruz." Sicim uzmanlarını düelloya davet etmişlerdi, onlarsa hâlâ ilk devrimlerinin sarhoşluğu içindeydi ve Standart Model'le bağlantılar bulmak peşindeydiler.

Elbette birçok sicim teorisyeni Parke-Taylor formülünün bir kısmının tanıdık göründüğünü fark etti. Formülün paydası, uzay zamanda yayılan sicimleri tanımlayan genliklerin matematiksel tanımına yakından benzemektedir. New York'taki Columbia Üniversitesi'nden üç fizikçi, sicim teorisini kullanarak Parke-Taylor formülünü türettiler, birkaç mantıklı yuvarlama da yapmışlardı. Ancak bu başarıları, fizikçilerden birini, Hindistanlı Parameswaran'ı tatmin etmedi. "Baştan çıkarıcı" olarak tanımladığı bu formülün kökenlerine inmeye kararlıydı. "Basit bir varlık sebebi olması gerektiğine dair zihnimi kurcalayan bir his vardı" diyecekti daha sonraları. "Parke ve Taylor'ın mükemmel sadelikteki formülü, standart ölçüm teorisinin tüm karmaşıklığının içinden çıkmıştı ve sebebini anlamak da mümkün olmalıydı."[9]

9. Nair'le söyleşi, 17 Mart 2016

Nair, aylarca muhtemel açıklamalar bulmaya çalıştıktan sonra en iyi yaklaşımın, saçılmaya, alışılmış dört boyutlu uzay-zamanda ortaya konan bir teori bağlamında bakmak olduğuna karar verdi. "Bunun için doğal çerçeve, Roger Penrose'un twistor'larını kullanan bir teorinin süpersimetrik bir versiyonuydu, bu konuda da çoğu meslektaşım neredeyse hiçbir şey bilmiyordu." Parke-Taylor formülü, Nair'i radikal ölçüde yeni bir yaklaşımın eşiğine getirmişti; ama o günlere dair hatıralarına göre, "projenin filizlenmesine imkân verecek matematik henüz bulunmamıştı"; bu yüzden o da istemeden de olsa fikri bir kenara bırakmak zorunda kaldı.

Birkaç yıl sonra Nair'in elde ettiği sonuçlar, 1990 yılında İleri Araştımalar Enstitisü'nde formül hakkında bir seminer vermek üzere Stephen Parke'yi davet etmiş olan Edward Witten'ın dikkatini çekti. Parke-Taylor formülünün ardında neyin yatıyor olabileceğini akşamüstü çayında konuşurlarken, Witten şöyle bir yorumda bulundu: "Burada ilginç bir şeyler var ama ne olduğu hakkında bir fikrim yok. Üzerinde düşüneceğim."[10]

*

Odak noktasını saçılma genliğine kaydıran fizikçiler arasında Lance Dixon da vardı, California'daki Stanford Linear Hızlandırıcı ünitesinde çalışan yetkin bir sicim teorisyeniydi. Sicim teorisinden niçin uzaklaştığını sorduğumda bana şöyle yanıt verdi: "Tek kelimeyle, veri."[11] 1990'ların başlarında sicim teorisinin, kendisinin yaşadığı süre içinde ve hatta daha sonrasında çürütülebilir olmayabileceğini düşünmeye başlamıştı. Bunun ana sebebi, çoğu sicim teorisyeninin hemfikir olduğu üzere sicim teorilerini on boyuttan dört boyuta indirmenin çok fazla farklı şekilde mümkün olmasıydı. Dolayısıyla teorinin muhtemel yollarından hangisinin gerçeklikle örtüştüğünü saptamanın bir yolu yokmuş gibi görünüyordu.[12] Bana anlattığına göre Dixon, saçılma genliklerine odaklanmaya karar verdi; çünkü "sonuçları direkt olarak deneylerle kıyaslanabilen bir alanda fizik yapmak istiyordu".[13]

10. Parke'yle söyleşi, 16 Mart 2016
11. Dixon'dan gelen e-mail, 29 Temmuz 2017
12. Conlon (2016: 96-99)
13. Dixon'dan gelen e-mail, 29 Temmuz 2017

Dixon uzman bir hesaplamacı ve derin bir düşünürdür ama bu özelliklerini alçakgönüllülükle taşır. Teorik fizik alanında etkili bir metodun keşfedilmesinin, alandaki herhangi bir tekil buluştan genellikle daha önemli olduğu inancına sahiptir; çünkü doğru yöntem, çoğu zaman yeni ve daha bile önemli keşiflere götürür.[14] Söylediğine göre "Feynman'ın diyagram metodu, zorlu hesaplamaları basitleştirmenin bir yolunu keşfetmenin, nasıl da büyük bir etki yapabileceğine dair klasik bir örnektir". "Metot, elektron ve foton teorisiyle ilgili hiçbir yenilik içermiyordu ama modern fiziğin ortak dilinin bir parçası haline geldi."[15]

Parke ve Taylor'ın gluonik çarpışmalarında bulduğuna çok benzer bir şekilde, Dixon ve meslektaşları Zvi Bern ve David Kosower de quarklar ve gluonlar arasındaki birçok saçılma prosesinin (binlerce Feynman diyagramıyla gösterilir), karmaşık matematiksel terimlerin çoğunun birbirini götürmesinin ardından genellikle basit bir sonuca indirgendiğini buldular. "Bu kesinlikle bir tür mucize değildi" demektedir Dixon. "Bir çiviyi çakmak için bir tüy kullanmak gibi biz de bu iş için yanlış araç gereç kullanıyorduk. Bize lazım olan şey çekiçti."

Dixon ve çalışma arkadaşları devrim niteliğinde yeni bir teori değil, devrim niteliğinde yeni bir metot arıyorlardı. Feynman diyagram tekniği dahilindeki potansiyel vaat eden iki unsura yöneldiler. İlk olarak, her bir saçılma, uzay-zamanda belli bir noktada bölgesel olarak gerçekleşiyordu; ikinci olarak, herhangi iki parçacık için muhtemel tüm saçılım sonuçlarının toplam olasılığının tam olarak yüzde yüz olması gerekiyordu.[16] Üniterlik olarak bilinen bu ikinci özellik, Dixon ve meslektaşlarının öncülüğünü yaptığı saçılma genliklerini hesaplamak adına geliştirilen yeni metodun merkez teması oldu.[17] "Üniterlik metodu" olarak adlandırdıkları bu yaklaşımı aşama aşama geliştirdiler.

14. Bu düşünce, "bir metot, bir buluştan daha önemlidir" ifadesine dayanır, bu ifade yaygın şekilde –ve anlaşılan o ki yanlış şekilde– Rus teorik fizikçi Lev Landau'ya atfedilir.

15. Dixon'la söyleşi, 9 Aralık 2014

16. Toplam olasılık yüzde yüzün altında olacak şekilde hesaplanırsa, hesaplamayı yapan, bazı muhtemel sonuçları eklemeyi unutmuş demektir; eğer yüzde yüzün üstünde olursa, bu durumda da bir veya daha fazla sonuca fazla ağırlık verilmiş demektir.

17. Bern, Dixon ve Kosover (2012, 36-41)

Metot, birçok saçılma prosesinin çıktılarını hesaplama süresini yıllar seviyesinden haftalara indirdi: duruma göre günler içinde, hatta bazen yalnızca birkaç saatte hesaplanabildiği bile oluyordu.

Bu hesaplamaların hiçbirinde süslü yeni matematik yoktu. Bunun yerine bu metot, hesaplamalara tutarlı, birleşik bir yaklaşım getiren onlarca yeni analizin sonucuydu. Metot, bir kerede tek bir karmaşık diyagrama konsantre olmak yerine, büyük gruplar halinde diyagramlardan verilerin toplamına odaklanıyordu, bu gruplar da hesaplamaları mümkün olduğunca kolay şekilde yapmak üzere seçiliyordu. Eğer bu hesaplamalardaki on binlerce Feynman diyagramının her biri bir kum tanesine karşılık gelir şekilde düşünülürse, Dixon ve meslektaşları bunları yalnızca cımbızla ele almak yerine kürekle toplamanın bir yolunu bulmuşlardı diyebiliriz.

Üniterlik metodunun başarısı açısından kritik nokta, sanal denen parçacıkların rolüne getirdiği yaklaşımdı. Boş uzay bunlarla dolup taşmaktadır –fotonlar, elektron ve anti-elektron çiftleri, quark ve anti-quark çiftleri– ve boşluktan "ödünç alınıp" herhangi bir gözlemci fark edemeden hemen önce "geri verilen" enerjiyle yaratıldıkları için yalnızca geçici olarak var olurlar. Böylesi parçacıklar doğanın tüm kurallarına uyar, tek bir nokta dışında: kütleleri esnektir ve gerçek muadillerinin kütlelerinden farklılık gösterir. Bugüne kadar hiçbir deney araştırmacısı bu sanal parçacıklardan birini doğrudan gözlemlememiştir, ancak varlıklarının sonuçları açıkça görülebilir: fizikçiler bunları uzun süre atomik enerji seviyelerinin değerini anlamak için kullanmıştır. "Tanrı parçacığı" terimi, bazen uygunsuz şekilde Higgs parçacığının eşanlamlısı olarak kullanılır ama sanal parçacıklar için söylenmesinin haklı olduğu bile söylenebilir; çünkü gerçek dünya üzerindeki etkileri vasıtasıyla kendilerini sürekli belli ederken bir yandan da daima gizli kalırlar.

Sanal parçacıklar on yıllardır kuantum mekaniğinin bir parçasıydı ve Feynman diyagramlarındaki karmaşıklıkların çoğunun sorumlusu da onlardı. Üniterlik metodu bu parçacıklardan akıllıca kaçınıyordu: Feynman tipi hesaplamaların başlangıcında bu sanal parçacıkları temsil eden semboller her yerdeydi, ama sonuç kısmında asla ortaya çıkmıyorlardı. Dixon bu durumu şöyle hatırlamaktadır: "Bu sanal parçacıkların hesaplama açı-

sından gereksiz olduğunu fark ettik ve bu da bize büyük bir matematiksel yükten kurtulma şansı verdi." Söylediğine göre bunu yaptıklarında da "hesaplamaların çoğu çocuk oyuncağı haline gelmişti".[18]

*

Lance Dixon'ın hatıralarına göre, yeni milenyumun hemen başlarında kendisinin ve diğer saçılma genliği uzmanlarının yapacak çok şeyleri vardı: "Zanaatkâr gibi çalışmak adına araç gerecimiz vardı ama ihtiyacımız olan şey endüstriyelleşmeydi." Büyük Hadron Çarpıştırıcısının birkaç yıl içinde açılacağı belirtilirken, teorisyenlerin çok fazla vakti kalmamıştı. Arka plandaki çarpışmalar içinde daha önce hiç kimsenin gözlemleyememiş olduğu parçacıkları (örneğin Higgs parçacığı gibi) saptamak adına, deney araştırmacılarının kullanabileceği teknikleri bir an önce geliştirmeleri gerekiyordu.

Bir sonraki aşamada olanları kimse beklemiyordu. 2003 yılı sonbaharında Edward Witten, saçılım genliği alanını harekete geçiren bir şey yaptı; Roger Penrose'un twistor'larını temel alan yeni bir yaklaşım geliştirmişti. Penrose, 1960'larda keşfetmiş olduğu bu matematiksel objelerin tabiata dair temel bir teorinin altyapısını oluşturmak adına en büyük umut olduğuna hâlâ inanıyordu. Ama henüz ana akım fiziğin bir parçası haline gelmiş değillerdi ve çoğu teorisyen bunları yalnızca ilginç birer matematiksel unsur olarak görüyordu.[19] Daha sonra göreceğimiz gibi, Witten'ın çalışması bu unsurları teorik fiziğin ana akım yaklaşımlarına doğru itti, yeni araştırma alanları yarattı ve atomaltı dünyadaki saçılmalara dair yeni düşünce şekillerine yol açtı.

Penrose, kendi fikrinin bu en yeni uygulanışına dair haberleri 2003 yılı Ekim ayının ortasında Princeton'da aldı. Bir dizi seminer vermek üzere Princeton'daydı. Seminerin başlığı, "Evrene Dair Yeni Fizik Kapsamında İnanç, Moda ve Fantezi" şeklindeydi; seminerin amacı, konuyu başka yönlere saptırdığını düşündüğü fikirlerden bazılarını çürütebilmekti.[20] Penrose,

18. Dixon'la söyleşi, 9 Aralık 2014
19. Penrose'la söyleşi, 29 Mayıs 2014
20. Penrose (2016); Kruglinski, S. ve Chanarin, O., 'Discover Interview: Roger

sicim taslak çalışmasına şüpheyle yaklaşıyordu, bu şüphesinin ana sebebi de teorinin yalnızca en az on boyutta işliyor oluşuydu; ona göre bu gereksinim ciddi problemlere yol açıyordu. Bu ilave boyutların varlığı, sicim teorisinin, sıradan dört boyutlu uzay-zamanda ortaya konan teorilere göre çok daha fazla matematiksel "özgürlük derecesine" sahip olduğunu göstermiş oluyordu ve Penrose bu durumun doğuracağı sonuçların deney sonuçlarıyla çelişki yaratacağını düşünüyordu.[21]

"Neredeyse kâfirlik olarak görülebilecek" bu düşüncelerini, karşı çıktığı fikirlerin birçoğunun öncüsünün yuvası olan bir kasabada sunmak konusunda endişeleri olan Penrose, Edward Witten kendisine İleri Araştırmalar Enstitisü'ndeki ofisinde buluşmayı teklif ettiğinde pek rahat değildi. Ama endişe etmesine gerek yoktu. Witten, onun son projesi hakkında konuşmak istiyordu: Penrose'un twistor'larını kullanarak yeni bir tip sicim teorisi oluşturmak. Bu twistor'ların her biri uzay-zamanda hareket eden kütlesiz bir parçacığın geçmişini tanımlamaktadır: Witten'ın uzun yıllardır uğraştığı ve zaman zaman makalelerinde kullandığı zorlu bir kavramdı. Penrose bunu duyunca şaşırmıştı; Witten, daha yüksek boyutlarda değil, sıradan dört boyutlu uzay zaman çerçevesinde geçerli olacak yeni bir sicim teorisi oluşturmak için twistor'ları kullanıyordu. Bu teorinin, varlığı kesinleşmiş parçacıklarla ilgileniyor olması da Penrose için bir o kadar sevindiriciydi: "Hiç sevmediğim o varsayımsal parçacıklardan eser yoktu" diye hatırlamaktadır. Witten, tüm bunlar için "kısa bir not" yazdığını belirtti ve vedalaşırlarken, "Bunu görmek ister miydin?" diye sordu.

Penrose, birkaç hafta sonra Oxford'daki evine dönmesinin ardından bu "kısa (!) notu" aldı, neredeyse yüz sayfaydı. Aralık ayının ortasında Batıdaki birçok insan Saddam Hüseyin'in yakalanması konusunu konuşurken, birçok teorisyen –ilk defa– twistor'lara odaklanmıştı. Penrose bu yeni teoriyi "bütünüyle

---

Penrose Says Physics Is Wrong, from String Theory to Quantum Mechanics', *Discover*, 6 Ekim 2009: http://discovermagazine.com/2009/sep/06-discover-interview-roger-penrosesays-physics-is-wrong-string-theory-quantum-mechanics

21. Musser, G., 'Twistor Theory Reignites the Latest Superstring Revolution', *Scientific American*, 1 June 2010: https://www.scientificamerican.com/article/simple-twist-of-fate/

kabul etmiş" olmasa da twistor'ların ana akım bilime sokulmuş olmasından memnundu. Witten'ın makalesini enine boyuna inceleyenler arasında Harvard'da çalışan teorisyen Nima Arkani-Hamed de vardi: "Twistor-sicim makalesi, alışkın olduğumuz birçok 'Edward tarzı' sunumdan daha çılgın ve daha çizgi dışıydı, diğer makalelerinde her şey mantık çerçevesinde ifade edilir ve kusursuz ölçüde anlaşılır olurdu."[22] Sanki Bach birdenbire bir bebop parçası yazmış gibiydi.

Bu metodun gücünü ilk kavrayan fizikçilerden biri Freddy Cachazo'ydu. İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde Witten'la aynı koridorda ofisi olan yetenekli ve genç bir alan teorisyeniydi, Venezüelalıydı. "Edward'ın bir şey yakalamış olduğunu hepimiz biliyorduk" diye hatırlar o günleri. "Tek başına gecenin geç vakitlerine kadar, hafta sonları bile çalışırdı, ama ne yaptığını hiçbirimiz bilmiyorduk." Bir öğleden sonra Witten, Cachazo'nun ofisine girip, "Matematik yazılım programının kullanılmasının gerektiği birkaç hesaplama için kendisine yardım edip edemeyeceğini" sorduğunda, Cachazo onun ne yaptığını öğrendi.[23] Bir hafta içinde Cachazo'nun sayı değirmeni bir yığın şaşırtıcı sonuç üretir hale geldi.

Twistor sicim teorisinin gluonların çarpışmalarına dair tanımında onlarca matematiksel terim –bazen yüzlercesi– birbirini götürerek sade bir sonuç vermiştir. Cachazo'ya göre twistor teori, hesaplamaları gerçekleştirmek açısından "mucizevi ölçüde zarif" bir metot sağlıyordu, Feynman-diyagram metodu kullanıldığında taşınması gereken yükü atmış oluyordu. "Kısa süre sonra saçılma genliklerini twistor uzayda tasavvur edebilir hale gelmiştik" diye anlatıyordu bana Cachazo. Daha sonraları söylediğine göre de, Witten'ın teorisinin habercisi olan Nair'in fikirlerini okuduktan sonra, "bunları daha erken okumayı dilemiştim. Bu fikirler zamanın onlarca yıl ilerisindeydi."[24]

Twistor sicim teorisi birkaç ay boyunca en sıcak konu oldu. Teorik fiziğin karanlık kanatlarının altında geçen onlarca yıldan sonra twistor'lar sahne ışığına kavuşmuştu. Enstitüde twistor yaklaşımına dönenler arasında, Cachazo'nun öğrencilik yılla-

22. Arkani-Hamed'le söyleşi, 20 Ağustos 2016
23. Cachazo'yla söyleşi, 4 Nisan 2016
24. Arkani-Hamed ve Cachazo'yla söyleşi, 5 Nisan 2016

rından beri tanıdığı iki genç araştırmacı olan Ruth Britto ve Bo Feng de vardı. Witten'ın oluşturduğu altyapı üzerinden ilerleyen bu üç teorisyen, kısa süre içinde teorideki saçılma genlikleri arasında bir dizi yeni matematiksel ilişki geliştirdi. Bu bağlantılar Parke-Taylor formülüne yeni bir ışık tuttu: formül alışıldık teknikler kullanılarak çeşitli şekillerde kanıtlanmış olsa da, üç teorisyenin geliştirdiği metot formülün her zamankinden daha kolay anlaşılmasını sağladı: yalnızca birkaç satır cebirle anlaşılabiliyordu.[25] Britto, o günleri şöyle hatırlamaktadır: "Atomaltı saçılma olaylarına da uygulanabilecek şekilde Parke-Taylor formülünün sadeliğini ortaya koyan başka bir yöntem daha bulmuş olmanın heyecanı içindeydik." Roger Penrose'un en sevdiği matematiksel objeler, ne kadar değerli olduklarını şüphesiz ispatlamışlardı: "Twistor'lar genlikleri anlamak adına bize yeni bir yol göstermişti."[26]

Bu yaklaşımdan çıkarılabilecek daha fazla ders olduğunu hisseden Edward Witten, genç teorisyenlerden oluşan üçlüye katıldı. Birkaç hafta içinde çarpıcı bir başarı elde ettiler: karmaşık saçılma genliklerini hesaplamak adına şaşırtıcı ölçüde pürüzsüz bir yöntem bulmuşlardı; sonuçları, çok daha basit olanlar üzerine "kurarak" hesaplıyorlardı, bir dizi sade kural kullanmışlardı, böylece twistor'lar çoğu fizikçinin ilk aşamada düşündüğünden çok daha az şekilciliğe konu oluyordu. Metodun merkezinde, neredeyse iki yüzyıl önce Fransız matematikçi Augustin-Louis Cauchy tarafından kanıtlanmış olan klasik bir karmaşık fonksiyon teoreminin akıllıca bir uygulaması vardı. Witten ve meslektaşları; yalnızca quark ve gluonlara uygulanabilir olmakla kalmayıp, aynı zamanda şaşırtıcı şekilde Standart Model'deki tüm diğer atomaltı parçacıklar için de geçerli olan, hatta daha yüksek uzay-zaman boyutlarındaki hareketlerini de açıklayan bir dizi zarif formül geliştirmek üzere, Cauchy tarafından keşfedilmiş ünlü bir formül kullandılar. Saçılma genlikleri alanındaki uzmanlar, bu formülleri sansasyonel bir olay olarak gördüler.

---

25. Parke-Taylor formülünün ilk ispatı, 1989 yılında Berends ve Gile tarafından yayımlanmıştır; Witten birkaç yıl sonrasında twistor sicim teorisini kullanarak bir başka ispat daha sunmuştur.
26. Britto'dan gelen e-mail, 21 Mayıs 2018

Cachazo, Harvard'da verdiği, hareketli geçen bir seminerde, yeni bir araştırma projesi peşinde olan teorisyen Nima Arkani-Hamed'in ilgisini çekmişti. Arkani-Hamed, daha sonraları şöyle söyleyecekti: "Büyük şaşkınlığa uğramıştım. Saçılma genliklerinin, bize alan teorisi hakkında bu kadar çok şey öğrettiğini bilmezdim." Birkaç gün içinde "sil baştan bir lisans öğrencisi olmaya" karar verdi, konuyu bir öğrenci gibi Cachazo'dan öğrenecekti. Birkaç ay içinde bir işbirliği başlattılar ve neticesinde atomaltı parçacıklar arasındaki çarpışmalara dair yeni bilgilere erişmekle kalmadılar, aynı zamanda beklenmedik şekilde, daha önceleri fizikçiler için pek de ilgi çekici olmayan matematik alanlarına yönelik yaklaşımların oluşmasını da sağladılar. Bu bölümün geri kalanı, bu yolculukla beraber o güne kadar bilinmeyen bir geometrik objenin nasıl keşfedildiğini anlatacak. Nihayetinde bu obje sayesinde atomaltı parçacıkların saçılımlarının yeni bir yöntemle hesaplanması mümkün olabilecekti. Bu keşfe giden yol, Arkani-Hamed'in daha sonraları söyleyeceği üzere "son derece dolambaçlıydı". "Çoğu zaman ne olup bittiğini anlamaya çalışırken işin içinde kaybolup gidiyorduk. Ama geriye dönüp baktığımda, birbirini kusursuz şekilde tamamlayan iki düşünce şekli –matematik ve fizik– tarafından doğru yanıta doğru çekiliyorduk."[27]

*

Nima Arkani-Hamed, günümüzde teorik fizik alanında benzersiz bir figür konumundadır. Yorulmak bilmeden fikir üreten bir ideologdur, insana enerji veren anadilinden kalma bir aksanla konuşur, zaman zaman özündeki ciddiyetle çelişen bir neşe ve coşkuya sahiptir. Kuantum alan teorisinin incelikli noktalarından bahsederken de; Ön-Raphaelci resimlerini, Daniel Day Lewis'in performansını, Kazuo Ishiguro'nun romanlarını överken de hep aynı şekilde konuşur. 1972 yılında Houston'da İranlı fizikçi bir ailenin çocuğu olarak dünyaya gelmiştir; kendisi dokuz, kız kardeşi iki yaşındayken, doğduğu Amerika'ya ailesiyle birlikte iltica etmişlerdir. Amerikalı gibi konuşmakla beraber, "yüzde yüz Kanadalı" olduğunu söylemektedir. Büyük ihtimalle

27. Arkani-Hamed'le söyleşi, 14 Ağustos 2015

bu düşüncesinin sebebi, eğitim yıllarının önemli bir bölümünü Toronto'da geçirmiş olmasıdır; fizik ve matematik alanlarında lisans eğitimini bu şehirde almıştır. "Matematiği seviyorum" der, "ama kalbim her zaman fizikle olacak."[28]

Arkani-Hamed, 2008 yılının başlarında Princeton İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde fakülteye katıldığında, Freddy Cachazo ile işbirlikleri yoğun bir seviyeye ulaşmış durumdaydı. Yılın sonu itibarıyla Barack Obama'nın ABD başkanlığına seçilmesinden birkaç hafta sonra, saçılma genlikleri alanında pek bilinmeyen bir figür olan Oxford'lu teorisyen Andrew Hodges'un ortaya koyduğu saçılma teorisine yeni bir yaklaşım getirmeye çalışıyorlardı. Hodges, bilgisayar bilimi öncülerinden Alan Turing'in hayatını kaleme aldığı biyografi çalışmasıyla tanınıyordu; bu kitap daha sonraları *The Imitation Game* (Enigma) adlı filmin Oscar ödüllü senaryosunun doğmasını sağlamıştı. Hodges, bu kitabı 1977 yılında, doktorasını tamamladıktan iki yıl sonra yazmaya başlamıştı, doktora konusu ise twistor diyagramlardı, danışmanı da Roger Penrose'du. Kaba hatlarıyla ifade etmek gerekirse bu diyagramlar, geleneksel alan teorisindeki Feynman diyagramlarının twistor teorisindeki benzerleri niteliğindeydi ve Penrose'un getirdiği bir başka yenilik konumundaydı.[29]

Hodges'un diyagramlarını hiçbir partikül fizikçisi fazla dikkate almamıştı, bunun nedenlerinden biri de matematiksel güçlüklerle dolu olmalarıydı. Hodges, neredeyse yirmi yıl kadar sonra, twistor diyagramların, Witten ve üç genç çalışma arkadaşı tarafından yazılmış olan saçılma genlikleri arasındaki ilişkileri anlamak adına açık ara en iyi yöntem olduğunu öne sürdü. Hodges'u neredeyse hiç kimse ciddiye almadı: makalesi yaklaşık iki yıl boyunca Arkani-Hamed'in masasının üstünde okunmadan durdu; Hamed bu makalenin, "bir çatlağın mı yoksa bir dâhinin mi eseri olduğu konusunda kararsızdı".[30]

Arkani-Hamed, saçılma genlikleri üzerinde en yoğun şekilde çalışmaya başladığı dönemden yalnızca birkaç ay sonra,

28. Arkani-Hamed'le söyleşi, 9 Aralık 2014
29. Hodges'tan gelen e-mail, 21 Mayıs 2018
30. Arkani-Hamed'le söyleşiler, 14 Ağustos 2016, 8 Ağustos 2018

Hodges'un kesinlikle çatlak biri olmadığına karar verdi; daha sonraları şöyle söyleyecekti: "Freddy ve ben, düşünce şeklimizi onunkine uyacak hale getirdiğimizde, twistor'ların bu genlikleri anlamamıza nasıl yardımcı olabileceği konusunda oldukça büyük gelişme sağlamaya başladık." Nereye doğru yol aldıkları konusunda hâlâ herhangi bir fikirleri yoktu ama twistor teorisinin dünyadaki başkenti olan Oxford'daki birçok teorik fizikçiyle benzer konular üzerinde çalıştıklarını biliyorlardı. Oxford'daki önde gelen saçılma genliği uzmanları arasında yine Hodges'un twistor diyagramlarının değerini idrak eden David Skinner ve Lionel Mason da vardı. İki grup sık sık e-mail alışverişinde bulundu, birbirlerini gelişmelerden haberdar ettiler ve sonrasında da birbirlerinin enstitülerini ziyaret etmek üzere randevu ayarladılar. Arkani-Hamed ve Cachazo, twistor teorisi alanında uzman değildi; bu yüzden de geçici olarak CERN'de görev alan Edward Witten'dan yardım istediler. Arkani-Hamed bir keresinde twistor teorisi konusunda Witten'ın dersine katılmaya o kadar istekliydi ki, yalnızca bir günlüğüne ABD'den Cenevre'ye uçtu, yanına sadece bir dizi matematik sorusu ve bir tenis raketi almıştı, Witten'ı bir maç yapmaya ikna etmek niyetindeydi.

Princeton ve Oxford grupları rekabet içinde olmasalar da birbirlerinin çalışmasını yakından takip ediyorlardı. 30 Nisan 2009 sabahı, Arkani-Hamed, daha sonraları "büyük sürpriz" olarak tanımladığı şeyi aldı.[31] Bu sürpriz, David Skinner'dan gelen bir e-mail'di; Hamed'e, kendisi ve meslektaşları tarafından yapılmış çeşitli atılımlar hakkında bilgi veriyordu; bilhassa Andrew Hodges'un bir başarısı söz konusuydu, gluonlar için saçılma genliklerini hesaplamanın yeni bir yöntemini önermişti. Hodges, her biri bir Feynman diyagramı tarafından oluşturulan bir dizi unsuru toplamak yerine, bazı durumlarda genliğin bir tür soyut objenin hacmi olarak yorumlanabileceğini öne sürmüştü. Bu obje politop olarak bilinir, daha yüksek boyutlu uzayda bir hacim oluşturmak üzere birbirine eklenen soyut "üçgenlerin" bir birleşimidir. Alışıldık üç boyutlu uzayda bu objeler çok uçlu yıldız şeklindeki popüler Noel süslerine benzer.[32] Arkani-Ha-

31. Arkani-Hamed'le söyleşi, 8 Ağustos 2018; Skinner'dan Arkani-Hamed'e giden e-mail, 30 Nisan 2009, 7:25 a.m.
32. https://www.youtube.com/watch?v=Vs-xpWB_VCE

med çok etkilenmiş ve şaşkına dönmüştü. Skinner'ın e-mailini alışından iki buçuk saat sonra, öğrencileri olan Clifford Cheung ve Jared Kaplan'a e-mail gönderdi: "Görünen o ki Oxford'lu dostlarımız müthiş bir gelişme kaydetmiş."[33]

Arkani-Hamed ve Cachazo nasıl ilerleyeceklerini tam olarak bilemezken, yeni bir matematiksel perspektife ihtiyaç duyduklarına dair bir önsezi içindeydiler. 2009 yılı bahar mevsiminin sonlarında konuyla ilişkili olabileceğini düşündükleri birkaç kitaba başvurdular; bunlar arasında *The Principles of Algebraic Geometry* [Cebirsel Geometrinin İlkeleri]de vardı; bu eser, otuz yıl öncesinde matematikçiler Phillip Griffiths ve Joe Harris tarafından yazılmış büyük bir ciltti.[34] Cachazo, 10 Haziran sabahı büyük bir atılım gerçekleştirdi. Griffiths ve Harris'in kitabının –sahip olduğu iki matematik kitabından biriydi– ilk bölümünü okurken basit bir matris (matematiksel değişkenler dizisi) gördü, bunlar tam da kendisinin ve Arkani-Hamed'in üzerinde çalıştığı matrise benziyordu. Cachazo'nun okuduğuna göre bu obje, matematikçilerin Grassmannian olarak tanımladıkları unsurun bir ifadesiydi; bu konu, çok az teorik fizikçinin aşina olduğu ancak saf matematikçiler arasında hayli iyi bilinen bir konuydu. Bu matematiksel yapı, ilk kez 1844 yılında, okul öğretmeni ve bir din adamı olan Hermann Grassmann tarafından *Ausdehnungslehre* adlı kitabında oluşturulmuştu; o dönemde büyük oranda göz ardı edilmişti ama sonraki dönem matematikçi nesilleri bu çalışmayı vizyoner bir başyapıt olarak kabul edecekti.

Cachazo daha sonraları bu ânı şöyle hatırlar: "O kadar heyecanlıydım ki herkese söylemek istiyordum."[35] Ama heyecanını birkaç saatliğine kendine sakladı, Griffiths ve Harris'in kitabını inceledi ve Arkani-Hamed'le birlikte ihtiyaç duydukları matematiğin tam da bu olduğuna ikna oldu. "Nima'nın da benim yaşadığım heyecanı hissetmesini istiyordum, böylece o öğleden sonra ona şifreli bir e-mail göndermeye karar verdim": "Griffiths ve Harris'in 193. sayfasına bak!" Üç saat sonra Arkani-Hamed'in

33. Arkani-Hamed'den Clifford Cheung ve Jared Kaplan'a giden e-mail, 30 Nisan 2009, 9:50 a.m.
34. Griffiths ve Harris (1978)
35. Cachazo'dan gelen e-mail, 24 Ağustos 2018

yanıtı geldi: "Evet! Bu harika. ..."[36] Gluonlar birbirlerinden saçıldıklarında ne olduğunu anlatmak adına Grassmanian yaklaşımı kusursuz görünüyordu.[37] İki gluonun beş gluon ürettiği durumlarda, tüm parçacıkların hareketi bir sayılar dizisi –bir matris– kullanılarak açıklanabiliyordu; bu matris dört sıra (her bir gluon için bir sıra) ve dört sütundan oluşmaktaydı (uzay-zamanın her boyutu için bir sütun). Grassmann'ın matematiği sayesinde fizikçiler matristeki tüm niceliklerle kolaylıkla başa çıkabiliyordu. Daha da iyisi, metot genele uygulanabiliyordu: gluonların belli bir sayıda olması gerekmiyordu, her sayı için uygulanabiliyordu. Arkani-Hamed'in söylediği üzere: "Bu 160 yıllık matematik orada rafta duruyordu, sanki bundan 125 yıl önce daha hiç kimse gluonların varlığından haberdar değilken, Grassmann gluonik saçılmayı mümkün olan en genelgeçer yolla açıklamamız için bize yardımcı olmayı istemiş gibiydi."[38]

Arkani-Hamed, Cachazo ve meslektaşları memnundu. Birkaç gün içinde Grassmannian yaklaşımı, gluonik saçılmayı tanımlayan bir saçılma genliğine dahil olan ana unsurlardan her birini matematiksel olarak açıklama imkânı vermişti. Bu matematiksel çerçeve, gluonik saçılmayı açıklamak adına birleşik bir metodu mümkün kılıyordu: birleştiği yöntemler arasında twistor sicim teorisi, Andrew Hodges'un son keşifleri ve hatta Witten ile üç genç çalışma arkadaşı tarafından bulunmuş olan formül de vardı.

Arkani-Hamed, Cachazo'nun mesajını almasından birkaç saat önce, gelişmelerle ilgili olarak, Witten'a, grubun sıklıkla attığı bilgi maillerinden birini atmıştı; Witten'ın yorumlarını ve matematiksel yardımını bekliyordu. O gece Cachazo, bu bilgilendirme mailini Grassmannian yaklaşımını da ilave ederek güncelledi, gerçi ne olup bittiğini anlamaya yakın olduklarından emindi: Arkani-Hamed'e bir mail attı: "Hadi Ed'den önce halledelim şu işi ;-)"[39] Birkaç saat sonra, bu kez Witten, Arkani-Hamed'e bir mail atarak aşina olmadığı bu matematiği keşfetmek

36. Cachazo'dan Arkani-Hamed'e e-mail 10 Haziran, 16:10; Arkani-Hamed, 18:50'de yanıtlamıştır.
37. Bunun sebebi şudur ki, saçılmada yer alan her bir gluonun hareketi diğer gluonların hareketine hayati ölçüde bağlıdır: tüm gluonların toplam enerjisi ve momentumu her zaman aynıdır, çünkü iki nicelik de korunur.
38. Cachazo'yla söyleşi, 7 Nisan 2016
39. Cachazo'dan Arkani-Hamed'e giden e-mail, 10 Haziran 2009, 21:20

için sabırsızlandığını belirtti: bu matematiğin, kuantum alan teorisyenleri ve sicim uzmanları tarafından pek bilinmediğinin ilk işaretiydi bu e-mail.[40]

Cachazo'yla birlikte bu atılımı gerçekleştirmelerinden üç hafta sonra Arkani-Hamed'le yaptığımız konuşmayı hatırlıyorum: O güne kadar bir olaydan bu kadar heyecan duyan birini hiç görmemiştim. Enstitüde ortak kullanılan odada bir koltuğa oturmuş, neredeyse on dakika boyunca saçılma genliklerinin hikâyesini ballandıra ballandıra anlattı, "Parke ve Taylor'ın heyecan verici keşfinden" tutun da "Bern, Dixon ve Kosower'in üniterlik modeli üzerindeki muhteşem çalışmalarına", "Hodges'un fanstastik sezgisine" kadar her şey vardı bu hikâyede. Arkani-Hamed işin tadını çıkarıyordu; kendisini, ulaşmak için sabırsızlandığı bilinmeyen bir istikamete doğru götüren bir şey yakalamak üzereydi. "İzafiyet kuramı ve kuantum mekaniği bizi heyecan verici bir matematiğe doğru götürüyor" diyordu. "Bizi neyin hangi noktaya ulaştıracağını Tanrı bilir."[41] İki gün sonra Arkani-Hamed, Cachazo ve çalışma arkadaşları, Grassmannian matematiğinin, Hodges'un twistor diyagramlarına dair nasıl birleştirici bir kavrayış sağladığını ortaya koyan bir makaleyi online olarak yayımladılar. Skinner, daha sonra bana o güne dair şöyle söyleyecekti: "Oxford'daki herkes o makaleyle şaşkına dönmüştü."[42]

Arkani-Hamed, kendisinin ve meslektaşlarının, henüz yalnızca konunun dış kapağını kaldırmak üzere olduklarını biliyordu. Grassmannian metoduyla ilgili ciddi bir problem, çok fazla bilgi doğuruyor olmasıydı: gluonik saçılma genliklerini açıklamak için gerekli matematiksel unsurların hepsini içeriyordu ama bunların ayrı genlikler halinde nasıl kombine edileceğine dair herhangi bir kural oluşturmuyordu. Öyle bir durum söz konusuydu ki, sanki fizikçilerin elinde bir yapbozun tüm parçaları vardı ama yapbozun nihai şeklinin ne olması gerektiğini bilmiyorlardı.

Arkani-Hamed ve meslektaşları işin içinden çıkamayınca, bir

40. Witten'dan Arkani-Hamed'e giden e-mail, 11 Haziran 2009, 02.30
41. Arkani-Hamed'le söyleşi, 29 Temmuz 2009
42. Skinner'dan gelen e-mail, 21 Ağustos 2018. Makale, Arkani-Hamed, N., Cachazo, F., Cheung, C. ve Kaplan, J., 'A Duality for the S Matrix', https://arxiv.org/abs/0907.5418

kez daha yaklaşım değiştirdiler. En basit uygulanabilir tanım aracılığıyla, yani zaman zaman Süper yapıştırıcı modeli olarak da adlandırılan modeli kullanarak gluonların davranışlarını anlamaya çalışma kararı aldılar.[43] Bu matematiksel yapı, gerçek dünyadaki gluonları yüksek bir doğrulukla tanımlamaya çalışmıyordu ama son derece yüksek düzeyde simetri içeren bir matematik kullanarak davranışlarının en önemli özelliklerini inceleme yolu sunuyordu; bu da hesaplamaları nispeten daha kolay hale getiriyordu. Ultra-yüksek enerjilerdeki saçılmalar için bu modelin sunduğu tahminler, deney destekli ölçüm teorisi tarafından güçlü etkileşimlere dair verilen sonuçlarla aynı gelmekteydi; dolayısıyla da model, gerçek dünyayla güvenilir bir bağlantı oluşturuyordu.

Arkani-Hamed ve çalışma arkadaşları, Grassmannian matematiğini Süper-yapıştırıcı Modeline uygulayarak bir keşfe ulaşmayı umuyorlardı. Ama hiçbir yere varamadılar ve kendilerine erişilmez ölçüde karmaşık görünen matematiğin altından kalkabilmek için yardım isteme zamanının geldiğine karar verdiler. Hamed ve meslektaşları bir dizi toplantı gerçekleştirerek, karşılamış oldukları güçlükleri enstitünün bazı matematikçileriyle (aralarında Pierre Deligne ve Bob MacPherson da vardı) ve Yale Üniversitesi cebirsel geometri uzmanı Sasha Goncharov ile birlikte ele aldılar. Görüşmenin ilerleyebilmesi için ilk toplantıya Edward Witten da katıldı; saçılım genliği fiziği ve konuyla ilişkili olabilecek matematiksel kavramlar arasında tercümanlık yapmak, Witten'ın toplantıda bulunmasının sebeplerinden biriydi. Sonrasında da matematikçiler ve teorisyenler düzenli olarak buluştular; bu buluşmalar süresince Pierre Deligne, Arkani-Hamed'in posta kutusuna sürekli açıklayıcı matematiksel notlar gönderiyordu.

2011 yılı yaz aylarının başında sis perdesi ortadan kalktı. Teorisyenler, gluonlar birbirlerinden saçıldıklarında ne olduğunu anlamak adına Grassmannian objesinin tamamını kullanmak zorunda değildi; pozitif Grassmannian adı verilen kısmını kullanacaklardı.[44] Goncharov grupta bundan bahseden ilk kişi oldu,

43. Fizikçiler bu modelden N=4 super Yang–Mills modeli olarak bahseder.
44. Objenin bu kısmında objeyi karakterize eden tüm sayılar –determinantlar– pozitiftir.

başlangıçta biraz tereddütü de vardı; ama sonrasında bu yaklaşım kilit bir analize dönüştü. "Pozitif Grassmannian" yerleşik hale gelmiş, iyi bilinen bir araştırma alanıydı. Önceki birkaç yılda, matematikçiler pozitif Grassmannian teorisini çeşitli gerçek dünya fenomenlerine uygulamışlardı, bunlar arasında elektrik devrelerinin tasarımı ve bir sahile vuran sığ suların hareketi de vardı.[45]

Arkani-Hamed ve çalışma arkadaşları aylar boyunca, saçılma genliklerinin "hacimler" olarak hesaplanabileceği şeklindeki Hodges yaklaşımını pozitif-Grassmannian çerçeveye uydurmaya çalıştılar. İlerleme kaydetmekte zorlandılar. Arkani-Hamed'in öğrencilerinden biri olan Jacob Bourjaily, grubun çalışma süreçlerinin yorucu olduğu kadar keyifli de olduğunu hatırlamaktadır: "Nima, duble espresso, diyet kola ve nacho içerikli 'sabahlamalardan' zevk alıyordu. ... Çalışma geceleri sıklıkla şafak vakti bir kafede kahvaltıya oturmamızla sonlanırdı, gerçi hâlâ hiç durmadan fizik konuşuyor olurduk."[46]

Arkani-Hamed, Boujaily ve meslektaşları, işin temelinde yatan matematiği daha da iyi anlamaları gerektiğini düşünerek Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden birinci sınıf bir Grassmannian uzmanı olan Alexander Postnikov'la bir toplantı gerçekleştirdiler.[47] Bu toplantı bir keşfe dönüştü. Postnikov'un kaotik ofis ortamındaki derin sohbetler esnasında ve sonrasında yakınlardaki kantindeki öğle yemeği boyunca aşama aşama ortaya çıktığı üzere aynı şey üzerinde çalıştıklarını anladılar. Sohbetin bir noktasında Postnikov, daha önce bahsetmediği tipte bazı diyagramlar çıkardı; büyük şaşkınlığa uğrayan Arkani-Hamed ve meslektaşlarına gösterdiği bu diyagramlar, onların aylardır kullanmakta olduğu diyagramların eşdeğeriydi.

Postnikov'un matematiği tam da Arkani-Hamed ve meslektaşlarının ihtiyaç duyduğu şeydi ve Postnikov da teorik fizikçilerin yaklaşımlarının kendi araştırmasına katkı sağlayabileceğini görüyordu. Bir başka fizik-matematik işbirliği daha filizleniyordu. Arkani-Hamed durumdan memnundu ama matematiğin elit sınıfının arasında kendini zaman zaman yanlış yerdeymiş gibi

45. Williams'tan gelen e-mail, 18 Eylül 2017
46. Bourjaily ile söyleşi, 4 Haziran 2015
47. Toplantı 11 Ekim 2011'de gerçekleşti.

hissediyordu: "Kendimi Oklahoma'dan çıkıp New York'a gelmiş ve New York'lulara metroyu nasıl kullanacaklarını anlatma sevdasına kapılmış küçük bir çocuk gibi hissediyordum."[48]

Teorisyenler, matematikçi Goncharov ve Postnikov'dan çok şey öğreniyordu. Ama saçılma genliklerinin, Hodges'un öne sürdüğü üzere hacimli matematiksel objeler olarak yorumlanıp yorumlanamayacağı sorusunun cevabına yaklaşmış görünmüyorlardı. Ocak 2012 itibarıyla Arkani-Hamed ve yüksek lisans öğrencisi Jaroslav Trnka bu fikri aylarca araştırmış durumdaydılar, ama ilerleme katedemiyorlardı. "Bizi eleştirenler böylesi objelerin var olmadığından oldukça emindi ve bir yere varamayacağımızı söylemekten sakınmıyorlardı" diye hatırlamaktadır Arkani-Hamed, "biz de onların haklı olduğunu düşünmeye başlamıştık, ama yine de devam ediyorduk." Gerçi 4 Temmuz'da projeye kısa bir mola verdiler. Princeton'da, şafak sökmeden yaklaşık bir saat kadar önce, diğer onlarca fizikçiyle birlikte enstitüdeki bir ders salonunda toplandılar ve uzun zamandır beklenen bir keşfin ilanı için CERN'den yapılan küresel yayını izlemeye koyuldular. LHC'deki deney araştırmacıları yeni bir parçacık gözlemlemişti; bu parçacık, Higgs parçacığından beklenen özelliklerin çoğunu gösteriyordu. Sunumun ardından enstitüde toplanmış olan fizikçiler yıllanmış şarap içip, kek ve çilek yediler; tüm bunları Arkani-Hamed, LHC'de Higgs parçacığının keşfedileceğinden şüphe duyan bir arkadaşıyla girdiği iddianın neticesinde almıştı.[49] Bu keşif; CERN mühendisleri, bilim insanları ve saçılma genlikleri uzmanları için bir zafer niteliğindeydi. Daha sonraları LHC deney araştırmacısı Karl Jakobs'un bana söylediğine göre, saçılma genliği devriminin sonuçları, "Higgs parçacığını yüksek hassasiyetle saptayabilmemiz açısından esas teşkil etmişti".[50]

Arkani-Hamed ve Trnka, daha sonrasında projelerine geri döndüler, proje nihayet meyve vermeye başlayacak gibi görünüyordu. Yaklaşık bir yılın ardından, gluonların saçılma genliği parçalarının "pozitif uzay" olarak tanımladıkları şeyi ihtiva ettiğinden emin hale geldiler. Sonraki yaz, nihayet şunu anladılar

48. Arkani-Hamed'le söyleşi, 8 Ağustos 2013
49. Farmelo, G., 'Pre-dawn Higgs Celebration at IAS', *IAS Newsletter*, sonbahar 2012: https://www.ias.edu/ideas/2012/higgs-celebration
50. Jakobs'la söyleşi, 24 Mayıs 2017; Jakobs'tan gelen e-mail, 31 Temmuz 2017

ki, aslında pozitif Grassmannian parçalarından oluşan soyut bir objeye bakıyorlardı ve bu parçalar tıpkı fayanslar gibi birbirlerine kusursuz biçimde oturarak çok kenarlı bir geometrik obje oluşturuyordu: bir politop. Trnka'nın bilgisayar hesaplamalarının gösterdiği gibi, bu objenin hacmi, geleneksel Feynman diyagramları kullanılarak hesaplanan saçılma genlikleriyle aynıdır: iki metot aynı sonuçları vermektedir. Andrew Hodges yine haklı çıkmış görünüyordu. Arkani-Hamed, daha sonraları objeye giden yola doğru dönüp baktığında şunları söyleyecekti: "Yaptığımız tüm o hataları, attığımız tüm o yanlış adımları görmek utanç vericiydi diyebilirim." Ona göre buradaki en büyük ders, "kuantum mekaniğinin ve izafiyet kuramının onları doğru yolda tutmuş olmasıydı".[51]

2013 yılı yaz aylarında, bir cumartesi günü öğleden sonrasında Arkani-Hamed ve Trnka, aralarındaki mesaj trafiği neticesinde obje için yeni bir isim üzerinde karar kıldılar: amplituhedron.[52] Birçok fizikçinin hemfikir olduğu üzere, kelime biraz fazla çetrefilliydi. Önerilen diğer seçenekler arasında, roman yazarı Ian McEwan tarafından önerilen "aleph" de vardı; MacEwan, bu kelimeyi Jorge Luis Borges'in yazdığı kısa bir hikâyede görmüştü.[53] Ama orijinal kelime objeye yapıştı; özellikle de Arkani-Hamed ve Trnka bu kelimeyi Aralık 2013'te objenin adının ilk kez geçtiği makalelerinin başlığı olarak kullandıklarında kelime yerleşik hale geldi.[54]

İki gluon çarpıştığında ne olacağını tahmin etmeye yönelik "amplituhedron tablosu", devrim niteliğinde olma potansiyeli taşımaktadır. Feynman'ın metodunda, gluonlar arasındaki

51. Arkani-Hamed'le söyleşi, 9 Ağustos 2017

52. Bu mesaj trafiği 27 Temmuz 2013'te gerçekleşti, bu esnada Arkani-Hamed şöyle yazdı: "Büyük genel objemiz için matematikçiler isim vermediğine göre ben büyük bir isim buldum: amplitudohedron." Birkaç dakika sonra Trnka, kalıcı hale gelen ismi önerdi: 'amplituhedron'. Trnka'nın e-mail'inden gelen bilgi, 15 Ekim 2016

53. McEwan'dan gelen e-mail, 16 Haziran 2014. McEwan, Arkani-Hamed'e bu ismi ilk buluşmalarında, Londra'daki Science Museum'da önerdi, 12 Kasım 2013. McEwan, Arkani-Hamed'e Jorge Luis Borges'in (bir kısa hikâyede) 'aleph' kelimesini kullanışından bahsetti, uzayda diğer tüm noktaları içeren bir noktaya karşılık geliyordu. Arkani-Hamed kibarca bu öneriyi reddetti çünkü biraz fazla şaşalıydı.

54. Arkani-Hamed, N. ve Trnka, J., 'The Amplituhedron' (2013): https://arxiv.org/abs/1312.2007

etkileşimler yalnızca uzay zamandaki noktalarda (bölgesellik denen durum) gerçekleşir ve başlangıçta, iki gluon arasındaki bir çarpışmanın tüm sonuçlarının toplam olasılığının tam olarak yüzde yüz olması gerektiği (üniterlik) varsayılır. Ancak Arkani-Hamed ve Trnka'nın amplituhedron metodunda saçılma bütünüyle farklı bir şekilde tanımlanır: bölgesellik ve üniterlik, hesaplamanın son basamağındaki matematiksel formüllerden doğmaktadır. Arkani-Hamed ve Trnka, "uzay ve zamanın" ve kuantum mekaniğinin temel olmadığı bir yapının ilk örneğini keşfetmişlerdi. Arkani-Hamed, bana daha sonra şöyle söyleyecekti: "Bu durum, normalde uzay-zaman ve kuantum mekaniğiyle ilişkilendirdiğimiz fiziğin daha temel bir şeyden doğduğu bir yöntemin somut bir örneği."[55]

Amplituhedron –zaman zaman kuantum cevheri olarak da adlandırılır–, teorik fizikçiler arasında büyük bir çalkantı yarattı.[56] Ancak bazı eleştirmenler; amplituhedronun, Süper-yapıştırıcı Modelinin bir eseri olabileceğini, gerçekliğe uygun hale getirmek için bir tahminden ibaret kalabileceğini ve belki de gerçek parçacıkların saçılımıyla hiçbir alakasının olmadığını düşünerek temkinli yaklaşıyorlardı. Cevabı bize zaman gösterecek.

Arkani-Hamed, amplituhedronun öneminin henüz tam anlaşılamadığını düşünüyor. Bunun bir işareti de şu ki, saçılma genlikleri teorisinde objenin keşfinden beri amplituhedron, fiziğin üç başka alanında daha ortaya çıkmıştır: kozmoloji, yerçekimi kuantum teorileri ve alan teorisinin en genel sınıfları.[57] Kimse bunun sebebini anlamıyor, diyor Arkani-Hamed. Kendisinin ve meslektaşlarının kullandığı matematiğin (bu matematiğin büyük bölümü daha önce temel fizik alanında ya hiç kullanılmamış ya da çok az kullanılmıştır) doğayı tanımlamak açısından temel önemde olacağını düşünüyor. "Örneğin bu matematik, sicim teorisinde gayet iyi işleyen pürüzsüz yüzey matematiği değil" diyor. "Tam sayılarla çok daha yakından ilişkili bir matematik bu."[58]

55. Arkani-Hamed'le söyleşi, 10 Ağustos 2018
56. Wolchover, N., 'A Jewel at the Heat of Quantum Physics', *Quanta Magazine*, 17 Eylül 2013: https://www.quantamagazine.org/physicists-discover-geometry-underlying-particle-physics-20130917/
57. Arkani-Hamed'le söyleşi, 7 Haziran 2018
58. Arkani-Hamed'le söyleşi, 10 Ağustos 2018

Saf matematikçilere göre bir nimetti. Onlar için bu kadar büyüleyici olmasının sebeplerinden biri, amplituhedronu çok daha önceleri, Grassmann'ın fikri üzerinden mantıksal olarak ilerleyerek ve gerçek dünyaya referans yapmadan keşfetmiş olabileceklerini düşünmeleriydi. Ama objeyi ortaya çıkarmak fizikçilere düşmüştü; gluonik saçılımı anlama hevesiyle hareket etmiş ve kuantum mekaniği ile özel izafiyet teorisinden oluşan ikiz kısıtı kullanmışlardı. Sonrasında onlarca önde gelen matematikçi, amplituhedronu gözlemlemeye başladı; önemini ve yeni araştırma sahalarına götürüp götürmeyeceğini merak ediyorlardı. Bu matematikçiler arasında pozitif Grassmannian konusunda uzman matematikçi Lauren Williams da vardı; kariyerini "saf ve uygulamalı matematiğin kesiştiği yollar" üzerine kurmuştu, "bilim alanında, ilgi çekici bir matematiğe götüren problemlere odaklanıyordu".[59]

Amplituhedronun keşfinden iki yıl sonra Wiiliams bana şöyle söyledi: "O kadar güzel bir obje ki, üzerinde çalışmaya değer."[60] İçgüdüsü sağlamdı: o günden beri Lauren Williams, objenin geometrisiyle ilişkili matematiksel konulara güçlü katkılar yaptı. 2017 yılında İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde geçici görevdeyken iki ayrı bölüme bakıyordu, ofislerinden biri matematik fakültesindeydi, diğeri de doğa bilimleri binasında Arkani-Hamed'in yan odasında, Freeman Dyson'ın ofisinin bulunduğu koridordaydı. Williams'ın bana anlattıklarına göre, teorik fizikçiler arasında matematikçi meslektaşlarıyla olduğu kadar rahat ediyordu. "Fizikçilerle çalışmak genellikle zordur; çok farklı alışkanlıkları ve uygulamaları vardır, titizlik standartları da çok farklıdır" diyordu; şunu da ekledi: "ama buna değer." Ve duyulmasın diye neredeyse alçak sesle şu yorumu yaptı: "Teorik fizikçilerin ilgi çekici bulduğu şeylerin genellikle matematikçiler için de ilgi çekici hale gelmesi gerçekten tuhaf."

Williams farkında olmadan Dirac'ın 1939 yılında Scott seminerinde yaptığı yorumları yankılandırıyordu.[61] Benzer şekilde, Arkani-Hamed de saçılma genliği alanında tam sayı matematiğinin Dirac'ın seminerde yaptığı gözlemle paralel olduğunu

59. Williams'la söyleşi, 28 Haziran 2017
60. Williams'la söyleşi, 25 Eylül 2014
61. Williams'tan gelen e-mail, 21 Mayıs 2018; Dirac (1938-1939: 124)

söylemektedir; buna göre modern matematik çağdaş fizikçileri, antik Yunan'ın rüyasını gerçekleştirmeye götürebilir: "tüm tabiatı tam sayıların özellikleriyle ilişkilendirmek".[62] Arkani-Hamed bana şunu söylemişti: "Dirac'ın sayı teorisi hakkındaki vizyonu matematiksel kozmolojide yer bulursa şaşırmam. Fizikçiler ve matematikçiler o semineri gerçek olması için uzun süre işleyecekler."[63]

Dyson'ın bana söylediğine göre enstitünün matematikçileriyle teorik fizikçileri arasındaki ilişki son altmış yıl içinde bütünüyle değişti.[64] Onun gözlemlerine göre 1950'lerde bu iki grup farklı dünyalarda yaşıyordu; ama şu anda düzenli olarak birbirleriyle konuştuklarını, fikir alışverişinde bulunduklarını ve zaman zaman aynı problemler üzerinde çalıştıklarını görmekten memnun olduğunu söylüyor. "Saf matematikçiler ve teorik fizikçiler şu anda büyük oranda aynı dünyada yaşıyor ama durumun gerçek dünyayla ilişkisi net değil."

62. Dirac (1938-1939: 129)
63. Arkani-Hamed'le söyleşi, 9 Ağustos 2017
64. Dyson'dan gelen e-mail, 12 Ocak 2018

son bölüm
olabilecek en iyi zamanlar

"Sicim/M-teorisi, yerleşik fizik teorilerine dair yeni yaklaşımlar yaratarak ve böylelikle de yeni matematiksel fikirler üreterek bu konudaki değerini tekrar tekrar kanıtladı. Elbette tüm bunlar ancak ve ancak teorinin doğru yolda olması halinde anlam kazanacaktır."

Edward Witten,
"Adventures in Physics and Math", 2014

Einstein ve Dirac tarafından teorik fizik için oluşturulmuş matematiksel manifestoların ilk etapta büyük oranda göz ardı edilmiş ve hatta alaya alınmış olması şaşırtıcı değildir: onların bu fikirleri fazlasıyla tuhaf görünüyordu. Bu iki büyük bilim insanı, teorik fizikçileri çalışma şekillerini gözden geçirmeye yöneltiyordu: ileriye giden yolu aydınlatmak adına matematiğin meşalesini kullanmaya teşvik ediyorlardı. Daha önce gördüğümüz gibi, Einstein, doğanın o zaman geçerli olan yasalarının altında yatan matematiksel modellere "doğal" ilaveler yapmak arayışında olmalarını önerirken; Dirac, bu ilavelerin, matematikçiler tarafından değerlendirilecek şekilde bir güzelliğe sahip olması gerektiğinde ısrarcıydı. Bu tarz fikirler o dönemde biraz çılgınlık gibi görünmüş olsa da, bunların ileri görüşlü yaklaşımlar olduğunu düşünmüşümdür. Einstein ve Dirac'ın ortaya koyduğu anlayışı taşıyan matematiksel yaklaşımlar 1970'lerin ortalarından beri halefleri arasında etkili olmuştur. Bunun da

ötesinde, bu şekilde fizik yapmanın daha popüler hale geleceğini ve –uzun vadede– deneysel olarak da haklılığının kanıtlanacağını düşünüyorum.

Einstein ve Dirac'ın tavsiyelerini diğer teorisyenlerin ilk etapta ciddiye almamalarının ana sebebi, geleneksel, veri temelli teorik fizik yapma şeklinin neredeyse 250 yıl boyunca son derece iyi işlemiş olmasıydı. Yalnızca en büyük yeteneklere sahip teorisyenler, gelecekte teorilerin altında yatacak olan matematiği tahmin etme şansına sahipti: kaç teorisyen, Einstein ve Dirac'ın sezgisine sahip olabilir? Yine de, daha önce gördüğümüz gibi, 1970'lerin ortalarında matematiksel yol ön plana çıkmaya başladı. Gerçi bunlar da saf düşünce anlamında sınırlanmamış egzersizler değildi: teorisyenler tüm yeni fikirlerin kuantum mekaniği ve özel izafiyet teorisi ile uyumlu olması gerektiğini biliyordu; bu teorilerin ikisi de bir kez bile deneylerle çelişmemişti. Bu gereksinimin karşılanması son derece güçtür: yeni bir fikirle bu iki temel teori arasında herhangi bir uyuşmazlık olması, yeni teorinin gerçekten temel özellik taşıyamayacağına dair kesin bir işarettir. Teorisyenler, kuantum-izafiyet kelepçelerini takarak bile olağanüstü ölçüde yaratıcı olmayı başarmış, mantıksal açıdan anlamlı olabilecek şekilde fiziğin sağlam ampirik temelleri üzerinden ilerlemişlerdir.

Bu metodun ilk net işareti, 1927 yılının sonlarında, Dirac muhteşem denklemini bulduğunda geldi. Bu denklem, elektronlara yönelik bir kuantum teorisini ilk kez temel izafiyet teorisiyle tutarlı olacak şekilde bir kapsama alıyordu. Denklem, elektronun spin ve manyetizmasını açıklıyordu ve anti-maddenin varlığını herhangi bir deneyde gözlemlenmeden önce tahmin etmeyi sağlıyordu. Daha sonraları, izafiyetle ve kuantum mekaniğiyle tutarlı, aynı zamanda ölçüm simetrilerini de dahil eden bir alan teorisi, atomaltı parçacıklar üzerine etki eden tüm ana kuvvetleri açıkladı. Ama aralarında yerçekiminin de olduğu tüm temel güçleri açıklayan, izafiyet ve kuantum mekaniğine dayanan birleşik bir teori henüz keşfedilemedi. Bu eksiklik, bu kitabın son bölümlerinde ele aldığım projelerin büyük bölümüne yön veren meydan okuma olmuştur.

Birleşik bir teori için açık ara en popüler aday, sicim teorisidir. Edward Witten bana şöyle söylemişti: "sicim teorisi, kuantum

alan teorisinin standart çerçevesinin ötesine geçen yegâne ilgi çekici fikir konumunda ve yerçekiminin neden var olması gerektiğini açıklıyor olması da" inandırıcılığı açısından eşsiz olmasını sağlıyor.[1] Daha önce gördüğümüz gibi, sicim teorisyenleri için problem şu ki, oluşturdukları çerçeve en doğal şekliyle aşırı yüksek enerjilerde geçerli oluyor ve mevcut ulaşılabilir enerjilerde tahmin yapmak için kullanılması henüz mümkün değil. Çerçeve çalışmasının şu âna kadar deneylerle doğrudan bağlantı kurmamış olması hayal kırıklığı olsa da, bu durum teoriyi geçersiz kılmıyor; ve yine teorisyenler de teorinin bizi ulaştırabileceği noktaları keşfe çıkmaktan ve ulaşılabilir enerji seviyelerinde test edilebileceği yöntemleri aramaktan vazgeçmemeliler. Bana göre, bu teorinin peşinden gitmeye değer olduğunu düşünen dünyanın önde gelen teorik fizikçilerinin büyük çoğunluğunun yargısına güvenmek hem akıllıca hem de sağduyulu olacaktır.

Eğer tarihi yol gösterici kabul edersek, fizikçiler doğaya dair algılarında devrim niteliğinde bir atılım olması ihtimalini hiçbir zaman defterden silmemelidir. Deney araştırmacılarının önümüzdeki yüzyılda ve sonrasında başarabileceği ilerlemeyi de hafife almamaları gerekir. Örneğin 1920'lerin başlarında bazı fizikçiler, atomların yapılarını açıklayabilen bir teori geliştirmenin asla mümkün olmayacağı şüphesini taşıyordu. 1930'ların başlarında büyük deney araştırmacısı Ernest Rutherford'un, günümüz CERN ortamından çıkıp gelen Dr. Who tarzı bir ziyaretçiyle karşılaştığını bir düşünelim; Rutherford'a kendisinin ve meslektaşlarının ulaşabildiği maksimum enerjinin on milyon katıyla atom çekirdeğini test edebildiğimiz söylense, muhtemelen çok büyük şaşkınlık yaşardı. Deney araştırmacısı Ron Drever'ın 1970'lerin ortalarında öne sürdüğü ve yirmi otuz yıl içinde ileri teknoloji sayesinde yerçekimsel dalgaların saptanabileceğine yönelik iddia, astronomların birçoğu tarafından alaya alınmıştı. Hayatın başka birçok alanında olduğu gibi fizikte de asla asla dememek gerek.

Temel teorik fizik alanında en çok alkışlanan ilerlemelerin birçoğu, deney araştırmacılarının yakın gelecekte test edebileceği tahminler doğurmadı. Ama bu durum ümitsizliğe neden olmamalı. Kilit nokta şu ki, teorisyenler bir gün eksiksiz de-

1. Witten'la söyleşi, 15 Ağustos 2013

neysel testlere tabi olacağına inandıkları fikirler ve kavramlar kullanarak doğaya dair aşama aşama daha derin bir anlayış sağlıyorlar. Bilimin geleceğine dair kesin bir tahmin yürütmek fazla cüretkârlık olur: bizi neyin beklediğini kimse bilmiyor. Kuantum mekaniğinin keşfi ile tetiklenen devrim kadar büyük bir devrim ufukta olabilir ve tabiat hakkında yeni düşünce şekilleri yaratabilir. Ama sanırım teorisyenlerin genel olarak doğru yolda olduğunu ve son kırk yıllarını yarı-bilimsel masallar yazarak geçirmediklerini söylemek makul olacaktır. Son yirmi otuz yıllık dönemde ortaya çıkan fikirlerin, kavramların ve tahminlerin birçoğunun uzak geleceğin temel teorileri olarak kalacağına inanıyorum; tıpkı Maxwell'in denklemlerinin izlerinin Standart Model denklemlerinde görüldüğü gibi. Aşağıda zamanın testinden geçebileceğini düşündüğüm altı farklı fikir var:

Uzay ve zaman temel kavramlar değildir: bir şeylerin niceliğinden doğarlar. Eğer bu doğruysa, kuantum mekaniğinin izafiyete oranla çok daha zayıf temelli bir teori olduğu yönündeki Einstein'ın düşüncesini çürütecektir.

Süpersimetri, er ya da geç deneysel olarak doğa kanunlarının temel özelliklerinden biri olarak gösterilecektir. Böylesi bir keşif, güzel matematiğin faydalı bir rehber görevi gördüğü şeklindeki birçok teorisyenin inancını haklı çıkarmaya yardımcı olacaktır.

Manyetik monopoller, membranlar ve diğer atomaltı egzotik unsurlar, sıradan maddeyi oluşturan elektronlardan ve quarklardan daha az gerçek değildir.

Modern fizikteki ikiliklerin kökenleri -yani, matematiksel açıdan farklı görünen ancak dünyaya dair aynı tanımları oluşturan teori çiftleri- anlaşılacaktır.

Maldacena ikiliğinin -bir yerçekimi sicim teorisinin, buna karşılık gelen bir ölçüm teorisinin tam olarak dengi olabileceği- gerçek dünyayla ilişkili olduğu ortaya çıkacaktır.

Atomaltı parçacıkların davranışlarını açıklayan kuantum alan teorisi çok daha basit şekilde ortaya konulacaktır. Bunun bir neticesi olarak da teoriyi kullanarak yapılan hesaplamalar büyük oranda basitleşecektir.

Son üç iddia biraz sahtecilik olarak değerlendirilebilir; çünkü teorilerin, gerçek dünya hakkında yaptıkları çürütülebilir tah-

minleri ele almaktan ziyade, spesifik olarak teoriler hakkındalar. Ama bu noktalardan herhangi birinin doğru olduğu ortaya çıkarsa, bu başarı doğayı anlamak açısından ilerleme kaydedildiğinin göstergesi olacaktır.

Nihayetinde, teorisyenlerin çalışmalarını değerlendirme ve sınıflandırma yetkisi yalnızca tabiata aittir. Uygun deneyler yapıldığında, 1980'lerden beri teorisyenlerin elde ettiği kolektif başarılara gelecek nesillerin iyimser bakacaklarına inanıyorum. Doğanın temel teorilerini anlamak açısından fizikçilerin saf düşünceye yakın yaklaşımlar kullanarak gerçekleştirdikleri ilerlemenin gelecek nesilleri hayran bırakacağını düşünüyorum. Einstein'ın 1933 yılı Spencer Seminerinde ifade ettiği bakış açısı –yani "saf düşüncenin gerçekliği kavrayabileceği" anlayışı– bana göre en azından kısmen de olsa doğru çıkacaktır; gerçi bu düşüncelerin izafiyet ve kuantum mekaniğiyle uyumlu olması gerekir.[2]

Ama önde gelen tüm teorisyenlerin bu bakış açısıyla hemfikir olduğunu söylemek güç. Bazı inkâr edilemez birinci sınıf düşünürler –aralarında Gerard 't Hooft, Sheldon Glashow ve Roger Penrose da var–, kendi farklı perspektiflerinden bakarak, teorik fiziğin, birçoğu gerçeklikten uzaklaşmış steril, ultra-matematiksel yaklaşımlara doğru yanlış bir yönelimde olduğunu düşünüyorlar.

Birçok eleştirmen; sicim teorisyenlerini, örneğin Einstein'ın yaptığı hataların bazılarını tekrarlamakla suçlamaktadır. Onlara göre Einstein da bir birleşik alan teorisi kurmaya çalışırken bu ödev için fazlasıyla ilkel fikirler ve kavramlar kullanmıştı. Einstein'ın çoğu dönem arkadaşı, amacının buna değer olduğunu düşünüyorduysa da matematiğe çok fazla dikkat kesildiği ve deneysel gözlemleri göz ardı ettiği kanısında birleşiyorlardı. Einstein'ın birleşik bir teori keşfetme projesi hakkında ne düşündüğü Enrico Fermi'ye sorulduğunda, İtalyan duayen şöyle yanıtlamıştı: "Doğru araba, yanlış anahtar."[3] Benzer şekilde, sicim taslak çalışmasının birçok karşıtı da bunu iyi-amaçlı bir

2. Einstein'ın 'On the Method of Theoretical Physics' başlıklı seminerinden, 10 Haziran 1933: Einstein (1954: 274)

3. Bu anekdot için matematikçi Elias Stern'e teşekkür ederim. 1950 yılında Fermi'ye soruyu soran öğrencilerden biriydi ve alıntılanan yanıtı almıştı, Niels Bohr'un da içinde olduğu daha eski bir olaydan bahsediliyordu.

başarısızlık görmektedir, hatta istenmeyen şekilde metafiziğe dönüş olarak algılarlar. Bununla beraber, günümüzün önde gelen teorik fizikçilerinin büyük çoğunluğu, kullanırken yaşadıkları problemlere rağmen doğru araçta yol aldıklarına inanıyorlar.

Sicim taslak çalışmasının faziletleri hakkındaki tartışma, özellikle basılı ve online olarak kamuya açık şekilde yıllardır sürüp gitmektedir. Bu eleştirilerden bazıları, sicim programına atfedilen abartılı beklentiyi ve bazı sicim teorisyenlerinin kibirli beyanlarını (gerçi tecrübelerime göre böylesi beyanlar genelde en iyi teorisyenlerden gelmez) doğru seviyeye çeken faydalı yaklaşımlar niteliğindeydi. Sicim taslak çalışması alanındaki uzmanlar katettikleri ilerlemeden gurur duymakta çok haklıydı, ama teorinin geçerliliği deneylerle kanıtlanana kadar ukalalık yersiz olur. Bununla beraber, bazı eleştirel yorumcuların olayı hafife almalarından da sıklıkla rahatsızlık duyuyorum, özellikle de saldırdıkları konuda yeterli bilgi sahibi olmadıklarını maskelemeye çalışan bir özgüvenle bir şeyler yazdıklarında rahatsızlığım daha da artıyor. Önde gelen birçok teorisyenin benimsediği görüşe karşı çıkmak, belki tutuculuğa karşı sağlıklı bir saygısızlık olarak yorumlanabilir. Ama bununla beraber bu tarz yaklaşımlar, teknik bilgileri ne seviyede olursa olsun herkesin her konuda geçerli bir fikre sahip olabileceği şeklindeki endişe verici genelgeçer anlayışın bir parçası da olabilir. Bu trend, bilhassa bilimsel konularda acınası sonuçlar doğurabilir.

*

Sicim taslak çalışmalarının ve çağdaş kuantum alan teorisinin gerçek dünyayı açıklayabilme yetileri hangi düzeyde olursa olsun, başardıkları şeylerden biri inkâr edilemez durumdadır: ikisi de modern matematik üzerinde büyük bir etki yaratmıştır. Bu durum Dirac için sürpriz olmazdı: sıklıkla vurguladığı üzere, önde gelen matematikçileri ilgilendiren matematik, tabiatın temel yasalarını araştıran fizikçiler için de genellikle ilgi çekici olmuştur. Dirac, teorisyenlerin saf matematiğin sınırlarında devriye gezmesi ve fizikle ilişkili olabilecek fikirleri araması gerektiğini düşünüyordu. Aynı sebeple, saf matematikçilere; doğal dünyaya dair fizikçilerin en iyi tanımlamalarına yakından bakmalarını salık veriyordu.

Dirac'ın vizyonunun ileri görüşlülük olduğu ortaya çıkmıştır. Daha önce gördüğümüz gibi, saf matematikle modern teorik fizik arasındaki örtüşme, iki alan arasında yeni ve heyecan verici bağlantılar yarattı. Bu alan o kadar zengin ve aktif bir hale geldi ki, son dönemde bir isim de verildi: "fiziksel matematik"; bu terim, 1890'larda fizikçi Oliver Heaviside tarafından farklı bir anlamda kullanılan bir terimdi.[4] Yakın zamanda, kuantum alan teorisi ve sicim teorisi matematiği alanında üretken bir yenilikçi olan Rutgers teorisyeni Greg Moore, matematikçilerin ve fizikçilerin ortak ilgi alanlarının önemli bölümünü temsil eden kullanışlı bir ifade olarak "fiziksel matematik" terimini popüler hale getirmiştir. Moore, bu terimi, "yeni matematiğe, Doğanın temel kanunlarına ve bunlar arasındaki ilişkiye ışık tutma amacını taşıyan teorik fiziğin ve matematiğin bir birleşimi" olarak tanımlamaktadır.[5] Daha az resmi bir tanımlamayla, fiziksel matematik, genel olarak kuantum mekaniği ile izafiyeti gerçek dünyayla ilişkili olabilecek şekillerde bir araya getirdikten sonra ortaya çıkan matematik hakkındadır.

Moore'a göre, fiziksel matematikçilerin ana soruları fiziğin teşvikiyle doğar. Moore şöyle söylemektedir: "her yerde çok fazla saf matematik var" ve altını çizer, "fiziksel matematikle ilişkili kısımlar, fizikle ilişkileri çerçevesinde ele alınmalıdır".[6]

"Fiziksel matematik" teriminin popülaritesi, araştırma matematikçileri ve fizikçiler arasında 2014 yılı yazında büyüdü. O dönem, temel fizik alanında iyimser bir dönemdi; Higgs parçacığına dair ilk gözlemlerin üzerinden iki yıl geçmişti. Bu keşif, 1890'ların sonlarında elektronun keşfiyle başlamış olan ve uzun geçen yirminci yüzyıl parçacık fiziğinin son noktasını işaretliyordu. 2014 yılı itibarıyla birçok fizikçi, Büyük Hadron Çarpıştırıcısından gelecek olan yeni keşiflerle ziyafet çekeceklerinden emin bir şekilde beklemedeydi. Moore'un Princeton Üniversitesi'nde küresel sicim teorisi topluluğunun yıllık toplantısının son buluşmasında yaptığı "vizyon konuşması"

4. Heaviside "fiziksel matematik" terimini, fizikte bir sihir gibi iş gören, bazen pek titiz olmayan matematiğe atıfta bulunmak için kullanır. Hunt (1991: 76)
5. Moore'dan gelen e-mail, 20 Eylül 2016
6. Moore'dan gelen e-mail, 3 Temmuz 2018

böylesi olumlu bir atmosferde gerçekleşti.[7] Kampüs merkezinin yanındaki Roma tarzı Alexander Hall binasının dokuz yüz kişilik konferans salonunda, "Fiziksel Matematik ve Gelecek" başlıklı, zihinlere kazınan eğlenceli sunumunu yaptı. Salon daha iyi seçilmiş bir yer olamazdı: yetmiş yıl önce Einstein ve Dirac'ın birbirleriyle yan yana odalarda çalıştıkları koridordan beş dakika uzaklıkta bir salondu; o zamanlar onlar da fizik alanına taşıdıkları tartışmalı matematiksel yaklaşımlarının peşinden gidiyorlardı.

Moore, sahneyi adımlayarak yaptığı konuşmasında, bu yeni disiplinin, fizik ve matematiğin çocuğu olduğunu ve bu çocuğun da "ayrı bir karakteri, amaçları ve değerleri olduğunu" söylüyordu. Birçok başarı sağlanmış olsa da, önlerinde hâlâ çok büyük güçlükler olduğunu, bu güçlüklerin birçoğunun oldukça temel nitelikte olduğunu ifade etti: "Kuantum alan teorisini ve sicim teorisini hâlâ anlayamıyoruz." Bu konuların, yeni matematik fikirlerinden oluşan okyanuslar doğurduğunu belirtti; bu alanların bütünüyle keşfedilmesinin on yıllar hatta yüzyıllar alabileceğini öne sürüyordu. Fiziksel matematiğin, başarılarına rağmen, ebeveynlerinin korumacı yaklaşımları nedeniyle sıklıkla rahat ilerleyemediğini de söyledi: bu çocuk, "zor bir birlikteliğin" çocuğuydu ve benimsediği değerler de birçok bilim insanı için "lanetli şeylerdi".[8] Bir uzmanın kendini fizikçi veya matematikçi olarak görmesine bağlı olarak gerçek dünyaya veya Platonik dünyaya ait bilgiyi geliştirmesi beklenir. Birçok otorite, (bunu açıkça ifade etmeseler de) iki dünyanın önceliğinin eşit olduğu düşüncesini ihanet olarak görür. Moore haklıydı: eski ittifaklar zor ölür. Deneysel fizikçilerin alçak sesle de olsa şikâyet ettiğini, en iyi teorisyenlerden bazılarının fizik yapmayı büyük oranda bırakarak zaman zaman "matematiksel mastürbasyon" olarak tanımlanan yaklaşıma düştüğünü söylediklerini duymuşumdur.[9]

Fizikçiler ve felsefi selefleri, son birkaç yüzyılda, tabiata dair birleşik bir teori ihtimali üzerinde düşünmüşlerdir. Buna kar-

7. Sicim '14 toplantı programı: https://physics.princeton.edu/strings2014/Scientific_Program.shtml
8. Moore'la söyleşi, 22 Haziran 2015
9. Arkani-Hamed, kendisiyle 16 Ağustos 2015 tarihinde yaptığım söyleşide bundan da bahsetmiştir.

şın matematikçiler, benzeri bir cüretkâr tahminde (kapsayıcı bir perspektifin, alanlarının tüm parçalarını birbirine bağlayacağı düşüncesi) bulunmak konusunda karakteristik olarak daha temkinlidir. Bununla beraber, Ocak 1967'de, vizyoner Kanadalı-Amerikalı matematikçi Robert Langlands, Princeton Üniversitesi'nde çalıştığı dönemde bu yöndebir adım atmıştır. Langlands, eski Bourbaki üyesi Andre Weil'e yazdığı on yedi sayfalık el yazısı mektubunda, aralarında sayı teorisi, geometri ve cebir de olmak üzere matematiğin birçok branşını birbirine bağlamanın bir yolunu bulmak üzere bir dizi hipotez öneriyordu.[10] Kısa süre içinde yaratıcı bir vizyon olarak kabul edilen Langlands programı, yeni fikirler adına verimli bir kaynak oldu ve belki de bir gün matematik alanında birleşik bir yaklaşım oluşmasını sağlayacak. Devamında da, tabiata dair birleşik bir temel teorinin temelini oluşturabilir.

Bazı teorik fizikçiler, Langlands'ın programının bazı parçalarını gerçek dünyaya ilişkin teorilere bağlamaya çalışmıştır.[11] Bu iş zor ve spekülasyona açık bir alandır, ama alanın uzmanları değerli aşamalar kaydettiler, bunu da kısmen teorik fizikteki bazı ikiliklerin kökenine ışık tutarak yaptılar. Konuya iyimser bakanlar, Dirac'ın Scott seminerinde çekinerek öne sürdüğü üzere, saf matematiğin ve teorik fiziğin "nihayetinde birleşeceğine" inanıyor.[12]

*

Modern temel fizik alanındaki bir başka trend de, sicim teorisinin ve kuantum alan teorisinin kendi orijinal atomaltı dünyaları dışında da değerli araçlar olduklarını sık sık kanıtlayan uygulamalardır: bu farklı alanlar arasında düşük ısılardaki bazı katı maddeler, kara deliklere yakın yerlerde maddenin ve radyasyonun davranışı, evrenin ilk aşamalarındaki kozmoloji ve diğer uygulamalar sayılabilir. Son dönemde, bilgi akışına yön veren yerleşik matematiksel yasalar, temel fizik alanında öne çıkar hale geldi; bu yasaların, özellikle de kara deliklerin

10. Langlands'tan Weil'e yazılan mektup, Ocak 1967: https://publications.ias.edu/rpl/paper/43
11. Frenkel (2013: 91-93, 95-97)
12. Dirac (1938-1939: 124)

özellikleri ve evrenin ilk aşamaları konularındaki araştırmalarda öncelik kazandığını söyleyebiliriz. Burada çok derin bir şeyler söz konusu olmalı: aynı kavramlar, fikirler ve aynı matematik, fizikte de ortaya çıkıyor.

Nima Arkani-Hamed'in bu konuda güçlü yaklaşımları var, elbette amplituhedron deneyimi bu yaklaşımlarına yön veriyor. Arkani-Hamed, "Doğanın tüm temel yasalarını kapsayan devasa bir soyut matematik yapısının var olduğuna" inanıyor. Ona göre fizikçiler ve matematikçiler, bu yapıyı yavaş yavaş kendi yöntemlerince ortaya çıkarıyorlar: fizikçiler doğa üzerinde yaptıkları gözlemlerden gelen bilgiyi kullanırken, matematikçiler yalnızca saf mantık kullanıyorlar. Arkani-Hamed'e göre bu yapı, saf matematiğin ve temel fiziğin niçin kol kola girdiğini anlamamıza yardımcı oluyor:

> "Bu devasa yapı, her biri hakikati kendilerine özgü yöntemlerle arayan fizikçi ve matematikçilere bir şeyler fısıldıyor. Bu yapı, onları, kendi başlarına ulaşabileceklerini hayal ettiklerinden çok daha yüksek noktalara çekiyor, bir yandan da insan yapımı önyargıları ve suni ayrımları silip atıyor. Bu olay, tüm zamanların en büyük bilim hikâyelerinden biri.

Ona göre, bu yapı hakkında gelecekte ortaya konacak açıklamaların vaat ettiği şey, teorik fizikçiler için "bu günlerin en güzel zamanlar olduğu" anlamına geliyor.[13]

Gerçi Arkani-Hamed'in meslektaşlarından bazıları da, bu dönemin, kendi alanları açısından oldukça yavaş bir dönem olduğunu düşünüyorlar; bunun ana sebebi de üzerinde çalışabilecekleri şaşırtıcı deneysel sonuçların azlığı olarak ifade edilebilir. 1970'lerin ortalarından beri gerçekleştirdikleri tüm ilerlemelere rağmen, teorik fizikçilerin çoğu şu anda yaptıkları bu çalışmalara tabiatın bir değerlendirme getirmesini büyük bir hevesle bekler haldeler; hatta "çaresizce" bunu bekledikleri de söylenebilir. Uzun zamandır birçok fizikçi; LHC'deki deney araştırmacılarının, her biri süpersimetrinin bir sonucu olan daha önce gözlenmemiş bir sürü parçacık bularak olay yaratmalarını umuyor, hatta bu beklentiyle yaşıyor. LHC'nin kendilerine cömertçe yardımda

13. Arkani-Hamed'le söyleşi, 26 Ocak 2018

bulunacağını, daha önce kimsenin tasavvur dahi etmediği bir iki yeni bulgu da getireceğini ümit ediyorlardı. Ama bu olmadı ya da en azından benim bu kitabı tamamladığım 2018 yılının sonu itibarıyla olmadı. Teorisyenleri hayrete düşürecek şekilde, LHC deneylerinin şu âna kadar başlıca neticesi, Standart Model'e altın bir yıldız takılması oldu.

Süpersimetri, belki gelecekte de bazı biçimlerde karşımıza çıkacak; ama LHC'de görünmeyişi birçok parçacık fizikçisi için hayal kırıklığı yaratmış durumda. Bu hayal kırıklığını yaşayan fizikçiler arasında atomaltı parçacık Standart Modelinin mimarlarından biri ve fizik camiasında oldukça saygı gören bir figür olan Steven Weinberg de var. 2017 yılı yaz ayında LHC'deki heyecan verici deneysel sonuç eksikliğinin "korkunç hayal kırıklığı" olduğunu söylemişti bana, şundan çekindiğini de ekliyordu: "tabiat, teorisyenlere ihtiyaç duydukları ipuçlarını verinceye kadar belki de yıllar geçecek".[14]

Weinberg, deney sonuçlarının açlığı içerisinde olan genç teorisyenlerin durumunun kötülüğünün farkında. "Günümüzde, yaptıkları tahminleri deneysel bir gözlemle kıyaslama deneyimini hiç yaşamamış birinci sınıf teorik fizikçiler var." Teorik fizikçi Jacob Bourjaily'nin, bana "yeni matematiğin yeni veri" olduğuna dair garanti verdiğini Weinberg'e söylediğimde, kısa bir süre için keyfi kaçtı.[15] Bir iki saniye duraksayıp, "Biliyorum" diye iç çekti. "Daha iyisi olmadığı için; kötünün iyisi" dedi.

Weinberg, teorisyenlerin matematiğe odaklanarak büyük gelişme kaydedebileceğinden şüphe duyuyor olsa da, bu tip araştırmalar yapan teorisyenlerin "tadını kaçırmak istemediğini" söylüyor. "Hata yaptıklarını düşünmüyorum. Deneylerden bu kadar az ipucu gelirken çok fazla seçenekleri yok." En önemli nokta da, heveslerini kaybetmemiş ve vazgeçmemiş olmaları diyor: "Winston Churchill'in tavsiyesini izliyorlar: 'denemeye devam.'"[16] Weinberg şöyle ekliyor: "En iyi genç teorisyenlerin birçoğu matematiksel yönden derinleşiyorlar ve eğer deneyler bu matematiğin doğayla ilişkili olduğunu gösterirse iyi bir

14. Weinberg'le söyleşi, 30 Haziran 2017
15. Jacob Bourjaily ile söyleşi, 5 Haziran 2018
16. Winston Churchill'den H. G. Wells'e, 24 Haziran 1941 tarihinde günlüğe kaydedilmiştir, yer aldığı çalışma Young (ed.), (1980: 107)

pozisyonda olacaklar. O zaman bizim gibi eski tüfekler onları kıskanmaktan başka bir şey yapamayacak."

Gerçi önde gelen fizikçiler arasında LHC'de yeni fiziğin eksik oluşundan bu kadar rahatsız olmayanlar da var. CERN'in genel direktörü, en üst seviye deney araştırmacısı Fabiola Gianotti de moral bozmamak gerektiğini düşünenler arasında. LHC'deki deney araştırmacıları, tabiatın dolaplarından birini açmak için yıllarca hazırlandıktan sonra içinde yeni parçacıkların olmadığını gördüklerinde bile, Gianotti hem umutlu hem de sağduyulu olmayı başarıyor. 2018 yaz aylarında bana şöyle söyledi: "Hâlâ sürprizler için zaman var: önümüzdeki birkaç yılda karşımıza ne çıkacağını kimse kesin olarak bilmiyor." O ve meslektaşları şimdiden geleceğe bakıyorlar: "En büyük önceliklerimizden biri, yeni nesil parçacık hızlandırıcıların ve dedektörlerin tasarım araştırmalarına yatırım yapmak." Gianotti'nin altını çizdiği bir başka noktaya göre, temel araştırmalar (astronomi ve masa üstü deneyler de buna dahil) yapmanın birçok değerli yolu olsa da "maddenin en küçük bileşenlerini test eden yüksek-enerji hızlandırıcılara her zaman ihtiyaç olacak." Şöyle tamamlıyor: "Tabiat bu nesle sürpriz hediyeler sunmasa da, hevesimizi kaybetmememiz gerekiyor. Tutkularımıza odaklanmaya devam etmemiz gerekiyor: doğanın en temel yasalarını keşfetme tutkusu bu."[17]

Mantığım Gianotti, yüreğim Weinberg diyor. Onlarca yıl süren hazırlıklardan sonra şaşırtıcı deneysel keşiflerin elde edilememesinden doğan hayal kırıklığı gayet insani bir durum. Bununla beraber, tabiatın da her bir fizikçi nesline en tatlı sırlarını sunmak gibi bir mecburiyeti yok; ardından gelen onay sürecini söylemiyorum bile.

Gianotti'nin ima ettiği üzere, bu dönemde fizikçilerin yapacağı en iyi şeylerden biri, sabır melekelerini geliştirmek olabilir. Bilimin her branşı gibi fizik de, tabiatı her daim daha derinden anlamak –hakikate yaklaşmak– adına bitmeyen bir arayıştır. İnsanlık tarihi açısından bakarsak, matematiksel teori ile deneylerin bir karışımı olarak tanımlayabileceğimiz modern fizik yaklaşımı, nispeten yeni bir etkinliktir ve metotları da ilk olarak Newton'ın 1687 yılında yayımladığı *Principia*'da ortaya

17. Gianotti ile söyleşi, 17 Temmuz 2017; alıntılar 18 Haziran 2018 tarihli bir e-mail ile onaylanmıştır.

konmuştur. O günden bu yana doğa felsefecileri ve bilim insanları, evrendeki temel güçleri ve parçacıkları matematiksel dili kullanarak tanımlayan yasalar bulmak konusunda önemli bir gelişim göstermiştir. Newton, yirminci yüzyıldaki haleflerinin neler başardığını görebilmiş olsaydı, tahminimce yerçekimine dair geliştirdiğimiz yeni anlayıştan ve doğanın diğer üç temel gücüne (ikisini Newton hiç duymamıştı) ilişkin teoriden büyük heyecan duyardı.

Temel yasaları anlamak konusundaki bu ilerleme, teorisyenleri doğru yolda tutan istikrarlı bir deney ve gözlem akışı içinde mümkün olmuştur. Ancak ilerlemenin bu hızda devam edeceğinin garantisi verilemez. Aksine, kozmoloji ve parçacık fiziği alanlarındaki deneysel ve gözlemsel programlar teknolojik açıdan bu kadar zor ve pahalı hale geldiği için, yeni programların daha ender başlatılması muhtemeldir. Bunun bir sonucu olarak böylesi araştırmalardan sağlanan ve teorisyenleri besleyen veri akışı, yalnızca kesintili olarak gerçekleştirilebilecektir. Bu veriler, büyük bir projenin başlamasıyla muhtemelen ani yükselişler yapacak ve sonrasında uzun periyotlar halinde fikir üretme dönemleri olacaktır. Verilerin bütünüyle tüketilmesinin ardından da teorisyenler, birçok teorisyenin son kırk beş yıldır yaptığı şeyi yapacaktır: matematikle desteklenen saf düşünceyi kullanarak ilerleme kaydetmeye çalışacaklardır.

Eğer bu vizyon doğru çıkarsa, temel fiziğin temposunun yavaşlamasına alışmamız gerekir. Özellikle de parçacık fizikçilerinin, çalışma hayatları boyunca kendi alanlarının en büyük hedeflerine doğru hızlı bir ilerleme görmelerinin pek mümkün olmadığını düşünüyorum. Aksine, fizik alanındaki ilerlemelerin zaman skalasının, on yıllardan yüzyıllara doğru uzayacağını tahmin ediyorum; matematikte durum uzun zamandır böyle. En üst seviye matematikçilerin bile çok azı kariyerleri boyunca çığır açıcı bir keşif yapabildiler: daha ziyade birkaç zor problem üzerinde veya bazen yalnızca bir tanesi üzerinde ilerleme kaydederek uluslararası şöhret elde ediyorlar. Öyle zannediyorum ki, gelecek teorik fizikçi nesilleri de, alanlarının en zorlu problemlerini bütünüyle çözmek yerine yalnızca belli oranda katkı yapmaktan memnun olmak zorunda kalacaklar. Bu anlamda, sicim taslak çalışmasının düşük hızlı gelişimi, temel fizik ala-

nında önümüzdeki yüzyıllar boyunca sürecek daha ağırbaşlı adımların habercisi olabilir.

Fiziksel matematiğin bin yıllık dönem boyunca geçerliliğini sürdüreceğini, zaman zaman şaşırtıcı yeni deneysel keşiflerle tazeleneceğini düşünüyorum. Dolayısıyla benim sezgilerim, fiziksel matematiğin parlak bir geleceği olduğunu söylüyor. Gerçi böyle bir trendin çeşitli dezavantajları olabilir. Örneğin, teorik fizikçiler saf matematiğin hazzına kapılıp fiziğin ana amacından uzaklaşabilirler: evrenin işleyişinin altında yatan düzeni anlamak yönündeki odaklarını kaybedebilirler.[18] Bana göre fizikçiler, teorilerini -güzel olsun ya da olmasın- doğanın yargısına sunmak adına her daim her şeyi yapmalılar ve teorileri gerçekler karşısında yerle bir olsa bile yollarına devam etmeye hazır olmalılar. Fizik teorileri ya da herhangi başka bir bilim dalındaki teoriler, başarıları sadece insanlar tarafından değerlendirilen sosyal kurgulardan ibaret kalırsa, bu durumda o disiplin, karanlık saf metafizik çağlarına geri dönmeye mahkûm olur.

Uzun vadede, insan fizikçilerin ve matematikçilerin günleri sayılı olabilir. Fizik ve matematik alanlarındaki araştırmaların -insanlığın yaşamındaki çoğu unsur gibi- nihayetinde yapay zekânın alanlarından biri haline geleceğini düşünüyorum. Günümüzde ultra-zeki makineler birçok alanda yaratıcılık sergiliyor; yeni teorilerin üretilmesi ve bunları test etmek üzere yeni deneylerin tasarlanması da muhtemelen bir gün bu alanlar arasına girecek. Eğer bu doğru çıkarsa, matematik ve fizik alanlarında entelektüel açıdan öne çıkmak adına insanlarla yapay zekâ arasındaki etkileşimi izlemek heyecan verici olacaktır. Belki de bir sonraki Atiyah, Rutherford ve Einstein, Hal 9000'in selefleri olacak.

Doğanın temel yasalarını kim (veya ne) arıyor olursa olsun, arayış muhtemelen asla son bulmayacaktır. Teorisyenler devrim gibi görünen en yeni ilerlemelere bakarak, bir dizi nihai temel doğa yasası keşfetmenin eşiğinde oldukları düşüncesine kapılmamalıdır. Bunun yerine, fizik yasalarını daima duruma bağlı yasalar olarak görüp, insanlığın deneyim ve bilgisi arttıkça değişikliğe uğramalarının ihtimal dahilinde olduğunu göz önünde bulundurmaları gerekir. Daha önce gördüğümüz gibi, nispeten

18. Einstein'dan Solovine'ye, 30 Mart 1952: Solovine (ed.), (1986: 131)

daha yakın geçmişte her zamankinden daha net anlaşıldı ki, fizikçiler, doğanın nasıl işlerlik gösterdiğine dair temel bilgilerini artırmak yönünde bir değil iki farklı yola sahip durumdalar: deneylerden veri toplayarak ve evrenin işleyişinin altında yatan düzeni en iyi şekilde açıklayan matematiği keşfederek. Evren bize sırlarını fısıldıyor, hem de hoparlörle.

kaynakça

Anderson, P. W. 'More Is Different', *Science*, Cilt. 177, No. 4047, s. 393–396 (1972)

Appell, D. 'The Supercollider That Never Was', *Scientific American* (2013): https://www.scientificamerican.com/article/the-supercollider-that-never-was/

Arieti, J. A., ve Wilson, P. A. *The Scientific and the Divine*, Rowman and Littlefield, Oxford (2003)

Arkani-Hamed, N. 'The Future of Fundamental Physics', *Daedalus*, Cilt. 141 (3), s. 53–66 (2012)

Atiyah, M. 'How Research Is Carried Out', *Bulletin, I.A.M.* Cilt. 10, s. 232–234 (1974)

Atiyah, M. 'An Interview with Michael Atiyah', *The Mathematical Intelligencer*, Cilt. 6 (1), s. 9–19 (1984)

Atiyah, M. 'On the Work of Simon Donaldson', *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, Berkeley, CA (1986)

Atiyah, M. *Collected Works*, Cilt 1, Clarendon Press, Oxford (1988a)

Atiyah, M. *Collected Works*, Cilt 5, Clarendon Press, Oxford (1988b)

Atiyah, M. 'On the Work of Edward Witten', *Proceedings of the International Conference of Mathematicians*, Kyoto, Japan, s. 31–35 (1990)

Atiyah, M. 'Mathematics in the 20th Century', *The American Mathematical Monthly*, Cilt 108, No. 7, s. 654–666 (Ağustos-Eylül, 2001)

Atiyah, M. *Biographical Memoir of Hermann Weyl*, National Academy of Sciences, Cilt 82, s. 3–17 (2002)

Atiyah, M. 'Pulling the Strings', *Nature*, Cilt 428, s. 1081–1082 (Aralık, 2005)

Atiyah, M., Etingof, P., Retakh, V., ve Singer, I. M. (ed.) 'The Interaction Between Geometry and Physics', yer aldığı çalışma *The Unity of Mathematics*, Birkhäuser, Boston, s. 1–15 (2006)

Atiyah, M. 'Bourbaki, a Secret Society of Mathematicians', değerlendirme yazısı *Notices of the American Mathematical Society*, s. 1150–1152 (Ekim, 2007).

Atiyah, M. On sekizinci doğum günü kutlamasındaki metin, *Trinity College Annual Record*, 2008–2009, s. 61–69 (2009) Atiyah, M., vd. 'Responses to "Theoretical Mathematics"', *Bulletin of the American Mathematical Society*, Cilt 30 (2), s. 178–207 (Nisan, 1994)
Barany, M. J. 'Making a Name in Mid-Century Mathematics', hazırlık aşamasında (2018)
Beaulieu, L. 'Bourbaki's Art of Memory', Osiris, Cilt 14, s. 219–251 (1999)
Bern, Z., Dixon, L., ve Kosover, D. 'Loops, Trees and the Search for New Physics', *Scientific American*, s. 36–41 (Mayıs, 2012) Bernstein, J. 'A Question of Parity', *New Yorker*, s. 49–104 (12 Mayıs, 1962)
Bertucci, P. 'Sparks in the Dark', *Endeavour*, Cilt 31, No. 3, s. 88–93 (2007)
Born, M. *Physics in My Generation*, Pergamon Press, London (1956)
Born, M. *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, London (2005)
Brewer, J. W., and Smith, M. K. (eds) *Emmy Noether*, Marcel Dekker, New York (1981)
Cahan, D. *An Institute for an Empire*, Cambridge University Press, Cambridge (1989)
Cahan, D. *Helmholtz: A Life in Science*, University of Chicago Press, Chicago (2018)
Cajori, F. (çev.) *Newton's 'Principia'*, University of California, Berkeley (1946)
Campbell, L., ve Garnett, W. *The Life of James Clerk Maxwell*, Macmillan, London (1882), online erişime açık
Cannon, S. F. 'The Invention of Physics', yer aldığı çalışma *Science in Culture: The Early Victorian Period*, Dawson and Science History Publications, New York, s. 111–136 (1978)
Cappelli, A., Castellani, E., Colomo, F., ve Di Vecchia, P. (ed.) *The Birth of String Theory*, Cambridge University Press, Cambridge (2012)
Castellani, E. 'Duality and Particle Democracy', History and Philosophy of Modern Physics, Cilt 59, s. 100–108 (2017)
Chandrasekhar, S. *The Mathematical Theory of Black Holes*, Oxford University Press, Oxford (1992)
Close, F. E. *The Infinity Puzzle*, Basic Books, New York (2013)
Close, F. E. *Half-Life*, Basic Books, New York (2015)
Cohen, I. Bernard, ve Whitman, A. (çev.) *Newton's* Principia, University of California Press, Berkeley (1999)
Conlon, J. *Why String Theory?* CRC Press, London (2016)
Crease, R. P., ve Mann, C. C. *The Second Creation*, Rutgers University Press, New Brunswick, NJ (1986)
Crosland, M. *The Society of Arcueil*, Harvard University Press, Cambridge, MA (1967)
Dalitz, R. H. (ed.) *The Collected Works of P. A. M. Dirac 1924–1948*, Cambridge University Press, Cambridge (1995)
Davies, P. C. W., ve Brown, J. *Superstrings*, Cambridge University Press, Cambridge (1988)
De Witt, C. M., ve Wheeler, J. A. (eds) *Battelle Rencontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, W. A. Benjamin, New York (1968)

Dear, P. (ed.) *The Literary Structure of Scientific Argument*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia (1991)
Dick, A. (çev. Blocher, H. H.) *Emmy Noether*, Birkhäuser, Basel (1981)
Dicke, R. H. 'New Research on Old Gravitation', *Science*, Cilt 129, No. 3349, s. 621–624 (1959)
Dirac, P. A. M. 'Quantised Singularities in the Electromagnetic Field,' *Proceedings of the Royal Society (London)* A, Cilt 133, s. 60–72 (1931)
Dirac, P. A. M. 'Does Conservation of Energy Hold in Atomic Processes?', *Nature*, Cilt 137, s. 298–299 (1936a)
Dirac, P. A. M. 'Wave Equations in Conformal Space', *The Annals of Mathematics*, Cilt 37, No. 2, s. 429–442 (1936b)
Dirac, P. A. M. 'The Relation Between Mathematics and Physics', *Proceedings of the Royal Society (Edinburgh)*, Cilt 59, Part 2, s. 122–129 (1938–1939). See http://www.damtp.cam.ac.uk/events/strings02/dirac/speach.html
Dirac, P. A. M. *Scientific Monthly*, Cilt 79, No. 4, s. 268–269 (1954)
Dirac, P. A. M. 'A Remarkable Representation of the 3+2 de Sitter Group', *Journal of Mathematical Physics*, Cilt 4, No. 7, s. 901–909 (1963a)
Dirac, P. A. M. 'The Evolution of the Physicist's Picture of Nature', *Scientific American*, Cilt 208, s. 45–53 (1963b)
Dirac, P. A. M. 'Recollections of an Exciting Era', yer aldığı çalışma *History of Twentieth Century Physics*, s. 109–146, Academic Press, New York (1977)
Dirac, P. A. M. 'Pretty Mathematics', *International Journal of Theoretical Physics*, Cilt 21, Nos. 8/9, s. 603–606 (1982)
Duff, M. J. 'M-Theory Without the M', *Contemporary Physics*, Cilt 57, No. 1, s. 83–85 (2016)
Duff, M., ve Sutton, C. 'The Membrane at the End of the Universe', *New Scientist*, s. 67–71, 30 Haziran 1988
Dyson, F. J. 'Missed Opportunities', *Bulletin of the American Mathematical Society*, Cilt 78, No. 5, s. 635–652 (Eylül, 1972)
Dyson, F. J. *Disturbing the Universe*, Basic Books, New York (1979)
Dyson, F. J. 'Unfashionable Pursuits', *The Mathematical Intelligencer*, Cilt 5, No. 3, s. 47–54 (1983)
Dyson, F. J. *Birds and Frogs*, World Scientific Press, Singapore (2015)
Dyson, F. J. *Maker of Patterns*, Liveright, New York (2018)
Dyson, G. *Turing's Cathedral*, Allen Lane, London (2012)
Earman, J., ve Glymour, C. 'Lost in the Tensors', *Studies in the History and Philosophy of Science*, Cilt 9, No. 4, s. 251–278 (1978)
Earman, J., ve Glymour, C. 'Relativity and Eclipses', *Historical Studies in the Physical Sciences*, Cilt 11, No. 1, s. 49–85 (1980)
Earman, J., Janssen, M., ve Norton, J. (ed.) 'The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity', *Einstein Studies*, Cilt 5, Birkhäuser, Boston (1993)
Eddington, A. S. *The Nature of the Physical World*, Cambridge University Press, Cambridge (1930)

Eichten, E., Hinchliffe, I., Lane, K., ve Quigg, C. 'Supercollider Physics', *Reviews of Modern Physics*, Cilt 56, No. 4, s. 579–707 (1984)
Einstein, A. 'On the Method of Theoretical Physics', *Philosophy of Science*, Cilt 1, No. 2, s. 163–169 (1934)
Einstein, A. *Ideas and Opinions*, Three Rivers Press, New York (1954)
Enz, C. P. *No Time to Be Brief*, Oxford University Press, Oxford (2002)
Farmelo, G. (ed.) *It Must Be Beautiful*, Granta, London (2002)
Farmelo, G. *The Strangest Man*, Faber, London (2009)
Feingold, M. *The Newtonian Moment*, Oxford University Press, Oxford (2004)
Feynman, R. P. *QED*, Penguin Books, London (1985)
Feynman, R. P., Leighton, R. B., ve Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics*, Cilt 2 (1964)
Feynman, M. (ed.) *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Track*, Basic Books, New York (2005)
Fine, D., ve Fine, A. 'Gauge Theory, Anomalies and Global Symmetry', *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, Cilt 28, No. 3, s. 307–323 (1997)
Flood, R., McCartney, M., ve Whitaker, A., *Kelvin: Life, Labours and Legacy*, Oxford University Press, Oxford (2008)
Frenkel, E. *Love and Math*, Basic Books, New York (2013)
Fox, R. 'The Rise and Fall of Laplacian Physics', *Historical Studies in the Physical Sciences*, Cilt 4, s. 89–136 (1974)
Gal, O., ve Chen-Morris, R. *Baroque Science*, University of Chicago Press, Chicago (2014)
Galison, P. L. 'Minkowski's Space-Time', *Historical Studies in the Physical Sciences*, Cilt 10, s. 45–121 (1979)
Galison, P. L. ve Wise, M. N. (ed.) 'Mirror Symmetry: Persons, Values and Objects', yer aldığı çalışma *Growing Explanations: Historical Perspectives on Recent Science*, Duke University Press, Durham, NC, s. 23–63 (2004)
Garber, D. ve Watkins, E. (ed.) 'God, Laws and the Order of Nature', yer aldığı çalışma *The Divine Order, the Human Order, and the Order of Nature*, Oxford University Press, Oxford s. 45–66 (2013)
Gasperini, M., ve Maharana, J. (ed.) *String Theory and Fundamental Interactions*, Springer, Heidelberg (2008)
Gillispie, C. G. *Pierre-Simon Laplace*, Princeton University Press, Princeton, NJ (1997)
Gingras, Y. 'What Did Mathematics Do to Physics?', *History of Science*, Cilt 39, No. 4, s. 383–416 (2001)
Ginsparg, P., ve Glashow, S. 'Desperately Seeking Superstrings?', *Physics Today*, Cilt 39, No. 5, s. 7, 9 (May, 1986)
Gleick, J. *Chaos*, Heinemann, London (1988)
Goddard, P. 'Algebras, Groups and Strings', 20th Anniversary of the Erwin Schrödinger International Institute for Mathematical Physics, Vienna, s. 12–15 (2013)
Goddard, P. 'The Emergence of String Theory from the Dual Resonance Model', hazırlık aşamasında (2018)

Goudsmit, S. A. 'It Might as Well Be Spin', *Physics Today*, Cilt 29, No. 6, s. 40–43, (June, 1976)
Gowers, T. (ed.) *The Princeton Companion to Mathematics*, Princeton University Press, Princeton, NJ (2008)
Gowers, T. 'Is Mathematics Invented or Discovered?' yer aldığı çalışma Polkinghorne, J. (ed.) *Meaning in Mathematics*, Oxford University Press, Oxford, s. 3–12 (2011)
Gray, J. *Plato's Ghost*, Princeton University Press, Princeton, NJ (2008)
Greene, B. *The Elegant Universe*, Jonathan Cape, London (1999)
Griffiths, H. B. *Surfaces*, Cambridge University Press, Cambridge (1981)
Griffiths, P., ve Harris, J. *Principles of Algebraic Geometry*, John Wiley & Sons, New York (1978)
Gross, D. J. 'Physics and Mathematics at the Frontier', Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Cilt 85, s. 8371–8375 (1988)
Guicciardini, N. *The Development of Newtonian Calculus in Britain, 1700–1800*, Cambridge University Press, Cambridge (1989)
Guicciardini, N. *Isaac Newton and Natural Philosophy*, Reaktion Books, London (2018)
Guillen, M. A. 'P. A. M. Dirac: An Eye for Beauty', *Science News*, Cilt 119, No. 25, s. 394–395 (1981)
Gutfreund, H., ve Renn, J. *The Road to Relativity*, Princeton University Press, Princeton, NJ (2015)
Hahn, R. *Pierre Simon Laplace*, Harvard University Press, Cambridge, MA (2005)
Hardy, G. H. *A Mathematician's Apology*, yeniden basım Cambridge University Press, Cambridge (1992)
Harman, P. (ed.) *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, Cilt 1, Cambridge University Press, Cambridge (1990)
Harman, P. (ed.) *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, Cilt 2, Cambridge University Press, Cambridge (1995)
Harman, P. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, Cambridge (1998)
Harman, P. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, Cilt 3, Kısım 2, Cambridge University Press, Cambridge (2002)
Hawking, S. W. *Is the End in Sight for Theoretical Physics?*, Cambridge University Press, Cambridge (1980)
Heilbron, J. L. *Elements of Early Modern Physics*, University of California Press, Berkeley (1982)
Heilbron, J. L., Frängsmyr, T., J. L. Heilbron, ve R. E. Rider (ed.) Introduction to *The Quantifying Spirit of the 18th Century*, University of California Press, Berkeley (1990)
Heilbron, J. L. *The Dilemmas of an Upright Man*, Harvard University Press, Cambridge, MA (1996)
Heilbron, J. L. 'Two Previous Standard Models', s. 45–54, yer aldığı çalışma Hoddeson vd. (ed.) (1997)
Heilbron, J. L. *Galileo*, Oxford University Press, Oxford (2010)

Heilbron, J. L., Buchwald, J. Z., ve Fox, R. (ed.) 'Was There a Scientific Revolution?' yer aldığı çalışma *The Oxford Handbook of The History of Physics*, Oxford University Press, Oxford, s. 7–24 (2013)
Heilbron, J. L. *Physics – a Short History*, Oxford University Press, Oxford (2015)
Hentschel, K. 'Einstein's Attitude Towards Experiments', *Studies in the History and Philosophy of Science*, Cilt 23, No. 4, s. 593–624 (1992)
Hermann, A. *The Genesis of Quantum Theory (1899–1913)*, MIT Press, Cambridge, MA (1971)
Hoddeson, L., Brown, L., Riordan, M., ve Dresden, M. (ed.) *The Rise of the Standard Model*, Cambridge University Press, Cambridge (1997)
Holton, G. 'Einstein's Third Paradise', *Daedalus*, Fall edition, s. 26–34 (2003)
Hooke, R. *Micrographia* (1655): https://archive.org/details/mobot31753000817897
Howard, D., ve Norton, J. D. 'Out of the Labyrinth?' s. 30–62, yer aldığı çalışma Earman, Janssen ve Norton (ed.) (1993)
Howard, D., ve Stachel, J. (ed.) *Einstein: The Formative Years*, Birkhäuser, Boston (2000)
Hunt, B. J. 'Rigorous Discipline: Oliver Heaviside Versus the Mathematicians', yer aldığı çalışma Dear (ed.) (1991)
Hunt, B. J. *The Maxwellians*, Cornell University Press, Ithaca, NY (1999)
Hunt, B. J. 'Lord Cable', *Europhysics News*, Cilt 35, s. 186–188 (Kasım/Aralık, 2004)
Hunt, B. J. 'Oliver Heaviside', *Physics Today*, Cilt 65, No. 11, s. 48–54 (Kasım, 2012)
Iliffe, R. *Newton – a Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford (2007)
Iliffe, R. *Priest of Nature*, Oxford University Press, Oxford (2017)
Iliffe, R. 'Saint Isaac', s. 93–131 yer aldığı çalışma Beretta, M., Conforti, M., ve Mazzarello, P. (ed.) *Savant Relics: Brains and Remains of Scientists*, Science History Publications, Sagamore Beach, MA (2016)
Isaacson, W. *Einstein – His Life and Universe*, Simon and Schuster, New York (2007)
Jackiw, R. 'My Encounters – as a Physicist – with Mathematics', *Physics Today*, Cilt 49, No. 2, s. 28–31 (Şubat, 1996)
Jackiw, R., Khuri, N. N., Weinberg, S., ve Witten, E. *Shelter Island II: Proceedings of the 1983 Shelter Island Conference on Quantum Field Theory and the Fundamental Problems of Physics*, MIT Press, Cambridge, MA (1985)
Jackson, J. D., ve Okun, L. B. 'Historical Roots of Gauge Invariance', *Reviews of Modern Physics*, Cilt 73, s. 663 (2001): https://arxiv.org/vc/hep-ph/papers/0012/0012061v1.pdf
Jaffe, A., ve Quinn, F. '"Theoretical Mathematics": Toward a Cultural Synthesis of Mathematics and Theoretical Physics', *Bulletin of the American Mathematical Society*, Cilt 29, No. 1, s. 1–13 (Temmuz, 1993)
Janssen, M., ve Renn, J. 'Einstein Was No Lone Genius', *Nature*, Cilt 527, s. 298–300 (2015)
Jungnickel, C., ve McCormmach, R. *The Second Physicist*, Springer, Berlin (2017)
Kevles, D. J. 'Goodbye to the SSC', *Engineering & Science*, Winter edition, s. 17–25 (1995)

Klein, O. 'The Atomicity of Electricity as a Quantum Theory Law', *Nature*, Cilt 118, No. 2971, s. 516 (1926)
Kragh, H. 'Mathematics and Physics: The Idea of a Pre-established Harmony', *Science and Education*, Cilt 24, s. 515–527 (2015)
Kragh, H., ve Smith, R. W. 'Who Discovered the Expanding Universe?', *History of Science*, Cilt 4 (2), 41, s. 141–162 (2003)
Laplace, P. '*Essai philosophique sur les probabilités*' – the Introduction to His '*Théorie analytique des probabilités*', Paris (1820), V. Courcier. Repr. Truscott, F. W., ve Emory, F. L. (trans.), *A Philosophical Essay on Probabilities*, Dover, New York (1951)
Llewellyn Smith, C. H. 'How the LHC Came to Be', *Nature*, Cilt 448, s. 281–284 (2007)
Maddy, P. 'How Applied Mathematics Became Pure', *The Review of Symbolic Logic*, Cilt 1, No. 1, s. 16–41 (Haziran, 2008)
Maldacena, J. 'The Illusion of Gravity', *Scientific American*, Kasım baskısı, s. 57–63 (2005)
Mashaal, M. *Bourbaki – a Secret Society of Mathematicians*, American Mathematical Society (2000)
Maxwell, J. C. *Nature*, s. 419–422, (22 Eylül, 1870)
Maxwell, J. C. *A Treatise on Electromagnetism*, Macmillan, London (1873a)
Maxwell, J. C. 'Scientific Worthies', *Nature*, Cilt 8, s. 397–399 (1873b)
McCormmach, R. Editor's Foreword to *Historical Studies in the Physical Sciences*, Cilt 7, s. xi–xxxv (1976)
McMullin, E. 'The Origins of the Field Concept in Physics', *Physics in Perspective*, Cilt 4, s. 13–39 (2002)
Mehra, J. (ed.) *The Physicist's Conception of Nature*, D. Reidel, Boston (1973)
Mlodinow, L. 'Physics: Fundamental Feynman', *Nature*, Cilt 471, s. 296–297 (2011)
Niven, D. (ed.) *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, Cambridge (2010)
Norton, J. D. '"Nature Is the Realisation of the Simplest Conceivable Mathematical Laws"', *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, Cilt 31, No. 2, s. 135–170 (2000)
Norton, J. D., Beisbart, C., Sauer, T., ve Wüthrich, C. (ed.) 'Einstein's Conflicting Heuristics: The Discovery of General Relativity', yer aldığı çalışma *Thinking About Space and Time: 100 Years of Applying and Interpreting General Relativity*, Springer (Einstein Studies).
O'Raifeartaigh, L. *The Dawning of Gauge Theory*, Princeton University Press, Princeton, NJ (1997)
Ono, Y. (çev.) Einstein seminerinin metni 'How I Created the Theory of Relativity', seminer tarihi Kyoto, 14 December 1922, *Physics Today*, Cilt 35, No. 8, s. 45–47 (Ağustos, 1982).
Pais, A. *Subtle Is the Lord*, Oxford University Press, Oxford (1982)
Pais, A. *The Genius of Science*, Oxford University Press, Oxford (2000)
Penrose, R. *Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe*, Princeton University Press, Princeton, NJ (2016)

Pitcher, E. A *History of the Second Fifty Years: American Mathematical Society, 1939–1988*, American Mathematical Society (1988)
Planck, M. 'Ueber irreversible Strahlungsvorgänge,' *Annalen der Physik*, Cilt 4, No. 1, s. 69–122 (1900)
Planck, M. *Eight Lectures on Theoretical Physics*, Columbia University Press, New York (1915)
Planck, M. *Scientific Autobiography*, Philosophical Library, New York (1949)
Poincaré, H. 'Relations Between Experimental Physics and Mathematical Physics', *The Monist*, Cilt 12, No. 4, s. 516–543 (1902)
Polchinski, J. 'Memories of a Theoretical Physicist': https://arxiv.org/pdf/1708.09093.pdf (2017)
Pyenson, L. 'Einstein's Education: Mathematics and the Laws of Nature', *Isis*, Cilt 71, No. 3, s. 399–425 (1980)
Randall, L. *Warped Passages*, Allen Lane, London (2005)
Raussen, M., and Skau, C. 'Interview with Michael Atiyah and Isadore Singer', *Notices of the AMS*, s. 223–231, Şubat (2005)
Reiser, A. *Albert Einstein: A Biographical Portrait*, A. & C. Boni, New York (1930)
Rickles, D. *A Brief History of String Theory*, Springer, Heidelberg (2014)
Roberts, S. *Genius at Play*, Bloomsbury, London (2015)
Ross, S. 'Scientist: The Story of a Word', *Annals of Science*, Cilt 18, No. 2, s. 65–85 (1962)
Rowe, D. E., ve Schulman, R. (ed.) *Einstein on Politics*, Princeton University Press, Princeton, NJ (2007)
Salaman, E. 'A Talk With Einstein', *The Listener*, s. 14–15 (8 Eylül, 1955)
Schaffer, S. 'Flowery Regions of Algebra', *London Review of Books*, Cilt 28, No. 24, s. 35–36 (2006)
Schaffer, S. 'The Laird of Physics', *Nature*, Cilt 471, s. 289–291 (2011)
Schilpp, P. A. (ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle, IL (1997)
Schwarzschild, B. 'Von Klitzing Wins Nobel Physics Prize for Quantum Hall Effect', Cilt 38, No. 12, *Physics Today*, s. 17–20 (1985)
Schweber, S. *Einstein and Oppenheimer*, Harvard University Press, Cambridge, MA (2008)
Schweber, S. *Nuclear Forces*, Harvard University Press, Cambridge, MA (2012)
Secord, J. A. *Visions of Science*, Oxford University Press, Oxford (2014)
Seiberg, N. 'Conversation with Nathan Seiberg', *Kavli IPMU News*, No. 34, s. 14–25 (Haziran, 2016)
Shapin, S. *The Scientific Revolution*, University of Chicago Press, Chicago, IL (1998)
Shaw, P. *Reading Dante*, Liveright, New York (2014)
Silver, D. S. 'Knot Theory's Odd Origins', *American Scientist*, Cilt 94, s. 158–165 (2006)
Silver, D. S. 'The Last Poem of James Clerk Maxwell', *Notices of the American Mathematical Society*, Cilt 55, No. 10, s. 1266–1270 (2008)
Sime, R. L. *Lise Meitner*, University of California Press, Berkeley (1996)
Singer, I. M. 'Some Problems in the Quantization of Gauge Theories and String

Theories', *Proceedings of Symposia in Pure Mathematics*, Volume 48, s. 199–216 (1988)
Smith, A. Kimball, and Weiner, C. (ed.) *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections*, Stanford University Press, Stanford, CA (1980)
Smith, C., ve Wise, M. N. 'Energy and Empire', Cambridge University Press, Cambridge (1989)
Smith, J.F. 'The First World War and the Public Sphere in Germany', yer aldığı çalışma *World War I and the Cultures of Modernity*, Mackaman, D., ve Mays, M., (ed.), University of Mississippi Press, Jackson (2000)
Solovine, M. (ed.) *Albert Einstein: Letters to Solovine*, Philosophical Library, New York (1986)
Sponsel, A. 'Constructing a "Revolution in Science"', *British Journal for the History of Science*, Cilt 35, No. 4, s. 439–467 (2002)
Stachel, J. (ed.) *Einstein's Miraculous Year*, Princeton University Press, Princeton, NJ (1998)
Sternberg, S. *Group Theory and Physics*, Cambridge University Press, Cambridge (1994)
't Hooft, G. 'Renormalizable Lagrangians for Massive Yang-Mills Fields', *Nuclear Physics*, B35, s. 167–188 (1971)
't Hooft, G. *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press, Cambridge (1997)
't Hooft, G. (ed.) *50 Years of Yang-Mills Theory*, World Scientific, Singapore (2005)
Thompson, D. W. *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge (1917)
Updike, J. *Self-Consciousness*, Alfred A. Knopf, New York (1989) van Dongen, J. *Einstein's Unification*, Cambridge University Press, Cambridge (2010)
Viereck, G. S. 'What Life Means to Einstein', *The Saturday Evening Post*, s. 17, 110, 113 (26 Ekim, 1929)
Warwick, A. *Masters of Theory*, University of Chicago Press, Chicago (2003)
Weinberg, S. *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, London (1972)
Weinberg, S. *The First Three Minutes*, Flamingo, London (1983)
Weinberg, S. *Dreams of a Final Theory*, Hutchinson Radius, London (1993)
Weyl, H. *Mind and Nature* (ed. Pesic, P.), Princeton University Press, Princeton, NJ (2009)
Weyl, H. *Levels of Infinity* (ed. Pesic, P.), Princeton University Press, Princeton, NJ (2012)
Wheeler, J. A. 'The Young Feynman', *Physics Today*, Cilt 42, No. 2, s. 24–28 (Şubat, 1989)
Wheeler, J. A., ve Ford, K. Geons, *Black Holes and Quantum Foam*, W. W. Norton, London (1998)
Whitaker, A. *John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics*, Oxford University Press, Oxford (2016)
Whiteside, D.T. ve Hechler, Z. (ed.) 'Newton the Mathematician' in *Contemporary Newtonian Research*, , s. 109–127, Dordrecht, Boston (1982)

Wigner, E. 'The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences', *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Cilt 13, s. 1–14 (1960)
Wigner, E. *The Recollections of Eugene P. Wigner as Told to Andrew Szanton*, Plenum Press, New York (1992)
Wilczek, F. 'A Piece of Magic', yer aldığı çalışma Farmelo (2002: 132–160)
Wilczek, F. *A Beautiful Question*, Allen Lane, London (2015)
Wise, N. 'The Mutual Embrace of Electricity and Magnetism', *Science*, Cilt 203, s. 1310–1318 (1979)
Witten, E. 'Unravelling String Theory', *Nature*, Cilt 438, s. 1085 (2005)
Witten, E. 'Knots and Quantum Theory', *IAS Newsletter* (2011): https://www.ias.edu/ideas/2011/witten-knots-quantum-theory
Witten, E. 'Adventures in Physics and Math', Kyoto Prize Lecture: http://www.kyotoprize.org/wp/wp-content/uploads/2016/02/30kB_lct_EN.pdf (2014)
Woolf, H. (ed.) *Some Strangeness in Proportion*, Addison-Wesley, Reading, MA (1980)
Wootton, D. *The Invention of Science*, Penguin, London (2015)
Yang, C. N. ve Chandrasekharan, K. (ed.) *Hermann Weyl's Contributions to Physics*, yer aldığı çalışma 'Hermann Weyl, 1885–1955', Springer Verlag, Zurich, s. 7–21 (1986)
Yang, C. N. *Selected Papers (1945–1980)*, World Scientific, Singapore (2005)
Yang, C. N. *Selected Papers II*, World Scientific, Singapore (2013)
Yang, C. N. 'The Conceptual Origins of Maxwell's Equations and Gauge Theory', *Physics Today*, Cilt 67, s. 45–51 (2014)
Yau, S.-T., ve Nadis, S. *The Shape of Inner Space*, Basic Books, New York (2010)
Young, K. (ed.) *The Diaries of Sir Robert Bruce Lockhart*, Cilt 2, Macmillan, London (1980)
Zhang, D. Z. 'C. N. Yang and Contemporary Mathematics', *The Mathematical Intelligencer*, Cilt 15, No. 4, s. 13–21 (1993)
Zichichi, A. (ed.) *The Superworld I*, Plenum Press, New York (1986)

Arşiv

DARCHIVE: Dirac archive, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA
EARCHIVE: Albert Einstein Archive, Jerusalem, Israel. All Einstein quotes: © The Hebrew University of Jerusalem
IASARCHIVE: Shelby White and Leon Levy Archives Center, Institute for Advanced Study, Princeton, United States
LINDARCHIVE: Archive of Frederick Lindemann, Lord Cherwell, Nuffield College, University of Oxford, UK
WARCHIVE: Wigner Archive, Princeton University, Princeton, New Jersey, United States

dizin

A
Abraham, Max 77, 92
Akulov, Vladimir 191
alan teorisi 73, 74, 75, 79, 96, 117, 133, 146, 148, 172, 181, 195, 211, 227, 236, 237, 238, 258, 272, 274, 275, 277
amplituhedron 267, 268, 280
anti-elektron 107, 236, 253
anti-madde 107, 272
antiquark 153, 238
Arşimet 32
Aristo 30, 31, 34, 35, 51
Arkani-Hamed 13, 14, 25, 26, 192, 193, 243, 246, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 278, 280, 286
Atiyah, Michael 15, 22, 86, 105, 112, 113, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 178, 194, 195, 211, 216, 218, 219, 284, 286, 293
Atiyah-Singer 168, 174
atomaltı 254, 258, 272, 274, 279, 281
aydınlanma 75, 194

B
Baker, Henry 103, 177
Bardeen, John 124
Beatles 168
Berkenstein, Jacob 236
Berlin 67, 68, 81, 82, 85, 89, 90, 109, 291
Bern, Zvi 41, 70, 74, 252, 253, 263, 287
Big Bang 140, 157, 197
birleşik teori 96, 120
Borcherds, Richard 189
Borel, Armand 122
boson 183, 190, 191
Bott, Raoul 194
Bourbaki, Nicolas 121, 122, 129, 164, 165, 230, 279, 286, 287, 292
Bourjaily, Jacob 15, 265, 281
bölgesellik 268

Britto, Ruth 15, 257
Brookhaven Ulusal Laboratuvarı 133, 145
Brout, Robert 149
Brower, Richard 187, 188
bükülme 89
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 244

C-Ç

Cachazo, Freddy 15, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263
Calabi, Eugenio 207, 208, 213, 214, 215, 216
Calabi-Yau uzayları 214
Caltech 15
Candelas, Philip 15, 207, 214, 215, 216
Cantor, Georg 93
Cauchy, Augustin-Louis 47, 257, 258
cebir 88, 247, 250, 279
CERN 14, 182, 185, 187, 191, 199, 204, 222, 224, 225, 243, 244, 246, 260, 266, 273, 282
Chandrasekhar, Subrahmanyan 140, 141, 287
Chern, Shiing-Shen 172, 173, 178, 220, 239
Cheung, Clifford 261, 263
Coleman, Sidney 170
Conduitt, John 39
Conway, John Horton 188, 189
Cooper, Leon 14, 124
Copernicus, Nicolaus 297
Cotes, Roger 38
çok boyutlu uzay 186, 195

D

d'Alembert, Jean 41, 43
Dante 114, 293
D-mebran 235, 236
Dedekind, Richard 93
Deligne, Pierre 13, 230, 231, 236, 237, 264
delta 105
Democritus 97
Descartes, Rene 34, 35, 36, 38, 42, 63
determinizm 100
Dicke, Robert 138, 288
Diderot, Denis 43
diferansiyel denklemler 41, 55, 79
diferansiyel geometri 85
Dirac, Paul 13, 16, 22, 92, 97, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 124, 127, 128, 130, 131, 133, 137, 143, 151, 152, 153, 156, 158, 160, 163, 169, 172, 177, 187, 191, 195, 205, 206, 207, 216, 225, 236, 242, 269, 270, 271, 272, 276, 277, 278, 279, 287, 288, 290, 295
Dixon, Lance 14, 214, 247, 251, 252, 253, 254, 263, 287
Donaldson, Simon 15, 175, 176, 177, 211, 228, 229, 286
Duff, Michael 15, 232, 235, 288
düğüm teorisi 60, 61, 62, 190, 211
Dyson, Freeman 13, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 128, 129, 130, 131, 134, 135, 136, 137, 142, 143, 144, 147, 151, 156, 160, 166, 167, 177, 178, 189, 269, 270, 288

E

Eddington, Arthur 91, 209, 288
Eichten, Estia 248, 288
Einstein, Albert 16, 17, 18, 19, 20, 23, 25, 27, 32, 33, 50, 69, 70,

71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 101, 102, 112, 114, 116, 117, 119, 120, 123, 131, 133, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 151, 156, 157, 160, 171, 177, 186, 190, 192, 197, 202, 204, 207, 217, 219, 232, 239, 246, 271, 272, 274, 275, 278, 284, 287, 288, 289, 291, 292, 293, 294, 295
elektromanyetik alan 50, 63, 64, 68, 71, 84, 111, 125, 128, 130, 136, 148, 150
elektron 99, 101, 105, 107, 129, 169, 190, 191, 220, 236, 252, 253
elektromanyetizma 50, 55, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 84, 86, 90, 97 111, 133, 143, 177, 204
Ellingsrud, Geir 215
Ellis, John 15, 246
enerji düzeyleri 100
Englert, François 149
entropi 236
eter 54, 60, 63, 71, 72, 190

F

Faraday, 52, 225
Feng, Bo 257
Fermi, Enrico 131, 132, 275
fermion 190, 191
Feynman diyagramları 267
Feynman, Richard 23, 57, 110, 111, 126, 127, 128, 129, 130, 137, 138, 150, 151, 199, 210, 212, 229, 230, 248, 249, 250, 252, 253, 254, 256, 259, 260, 267, 268, 289, 292, 294
Fischer, Berndt 189
foton 190, 192, 197, 252
Fourier, Joseph 47
Fransız İhtilali 43
Fubini, Sergio 182, 183, 204

G

Galileo Galilei 33, 34, 35, 290
Galison, Peter 76, 208, 209, 214, 216, 217, 231, 289
Gauss, Carl Friedrich 60, 78, 82, 98, 119
Gell-Mann, Murray 125, 144, 192, 199, 224
genel izafiyet teorisi 79, 102, 141
Gianotti, Fabiola 14, 282
Giddings, Steve 14, 242
Ginsparg, Paul 210, 289
Glashow, Sheldon 15, 148, 170, 193, 209, 210, 275, 289
gluon 147, 229, 248, 249, 250, 262, 267, 268
Goddard, Peter 13, 14, 179, 184, 185, 187, 188, 189, 198, 289
Goldstone, Jeffrey 168
Gol'fand, Yuri 191
Goncharov, Sasha 15, 264, 265, 266
Goudsmit, Samuel 98, 289
Gödel, Kurt 121, 123
Grassmann, Hermann 261, 262, 269
Greene, Brian 214, 290
Green, Michael 15, 199, 201
Green, Paul 214
Greiss, Robert 189
Griffiths, Phillip 194, 261, 262, 290
Gross, David 14, 145, 147, 148, 151, 205, 290
Grossmann, Marcel 77, 78, 79

Grothendieck, Alexander 122, 165, 230
grup teorisi 58, 143, 178, 188
Gubser, Steve 241

H
hadron 144
Halley, Edmond 27, 35, 36
Hamilton, William Rowan 59, 78, 104
Hardy, G. H. 94, 290
hareket yasaları 97
Harris, Joe 261, 262, 290
Harvard 127, 170, 171, 175, 209, 214, 238, 239, 256, 258, 287, 290, 293
Harvey, Jeff 15, 199, 205, 234, 241, 242
Hawking, Stephen 139, 140, 146, 157, 158, 159, 178, 219, 236, 290
hayaletler 185, 187, 189
Heaney, Seamus 41
Heaviside, Oliver 51, 64, 105, 225, 277, 291
Heilbron, John 15, 30, 32, 33, 34, 38, 43, 44, 45, 46, 63, 68, 146, 290, 291
Heisenberg, Werner 99, 100, 104, 105, 106, 107
Helmholtz, Hermann von 61, 66, 67, 287
Hertz, Heinrich 64, 81
Higgs parçacığı 150, 246, 254
Higgs, Peter 15, 149, 150, 153, 193, 222, 224, 243, 246, 253, 254, 266, 277
Hilbert, David 81, 82, 83, 86, 87, 88, 91, 120, 122
Hinchliffe, Ian 248, 288
Hodges, Andrew 15, 259, 260, 262, 263, 265, 266, 267
Hodge, William 195
Hooke, Robert 34, 35, 291
Hopf, Heinz 109
Horowitz, Gary 207
Hull, Chris 233
Hulse 156
Hulse, Russell 156
Hume, David 40
Huxley, Thomas Henry 61, 62, 209

I-İ
ışığın polarizasyonu 45
ikili model 181, 183, 185, 189, 196
instanton 154, 155, 174, 176

J
Jackiw, Roman 15, 152, 167, 168, 169, 173, 174, 175, 192, 291
Jaffe, Arthur 15, 217, 218, 219, 291
Jakobs, Karl 266
Johann 41, 60
Johnson, Clifford 15, 105, 125, 242
Johnston, Bennett 223
Jones, Vaughan 211, 212
Jost, Res 142
J/ψ 145, 150

K
kalkülüs 37, 41, 168
Kaluza, Theodor 186
kaos teorisi 165
Kaplan, Jared 15, 261, 263
kara delik 139
karanlık enerji 243
karanlık madde 244
karmaşık sayılar 100, 104

Kasım Devrimi 146, 147, 148, 150, 152, 198
kelebek etkisi 165
Kelvin, Lord 56, 289
Kepler, Johannes 33, 34, 35, 38
Kirchhoff, Gustav Robert 67
Klebenoz, Igor 241
Klein, Felix 81, 106
Klein, Oskar 186
Klitzing, Klaus von 220, 293
Kosower, David 252, 263
kovaryant 79, 83
kozmik ışınlar 125
kozmoloji 139, 140, 268, 279, 283
kuantum alan teorisi 195, 211, 236, 237, 238, 274, 277
kuantum anomali 167, 168, 169
kuantum fiziği 143
kuantum mekaniği 23, 24, 25, 69, 91, 96, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 110, 113, 124, 127, 128, 146, 152, 153, 157, 158, 159, 163, 167, 172, 181, 184, 195, 205, 224, 230, 239, 263, 269, 272, 277
kurbağa 166
kuş 151, 166

L
Lagrange, Joseph-Louis 41, 110, 127
Landau, Lev 124, 252
Lane, Kenneth 16, 248, 288, 293, 295
Langlands, Robert 13, 279
Laplace, Pierre-Simon 15, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 70, 72, 100, 101, 139, 289, 290, 292
Larkimn, Philip 168
Lazaridis, Mike 237
Lee, Tsung-Dao 15, 135, 136, 148, 149, 193, 197, 202
Leibniz, Gottfried 37, 41, 78, 160, 190
le Rond 41, 43
Lindemann, Frederick 92, 295
Listing, Johann Benedict 60
Llewellyn Smith, Chris 222, 244, 292
Lorentz, Hendrik 72, 80, 91
Lovelace, Claud 185, 186, 187
Löwenthal, Elsa 80

M
MacPherson, Bob 264
Maldacena ikiliği 242, 274
Maldacena, Juan 13, 222, 238, 239, 240, 241, 242, 274, 292
Malus, Êtienne-Louis 45
Mandelstam, Stanley 229
Manhattan Projesi 126, 122, 131
Manin, Yuri 230
manyetik tek kutuplular 108, 109
Martinec, Emil 205
Mason, Lionel 15, 141, 260
Matriks 2369
Maxwell, James Clerk 15, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 70, 71, 72, 75, 84, 85, 86, 88, 90, 95, 97, 98, 104, 109, 111, 133, 143, 146, 149, 155, 172, 177, 181, 194, 204, 225, 274, 287, 290, 292, 293, 295
membran 232, 234, 235, 239, 244
metafizik 51, 284
Michael, Chris 14, 15, 22, 52, 59, 90, 112, 156, 161, 162, 172, 178, 195, 199, 201, 211, 216, 218, 225, 227, 232, 286, 293
Michel, John 95

Mills, Robert 133, 134, 135, 136, 146, 147, 148, 149, 152, 153, 177, 242, 264, 294
Minkowski, Hermann 70, 76, 219, 289
Mirzakhani, Maryam 209
Montonen, Claus 225
Moore, Greg 14, 213, 277, 278
Morrison, David 14, 175, 208, 215, 216, 236
Morse, Marston 194
Morse teorisi 194
M teori 37

N

Nair, Parameswaran 15, 251, 256
Nambu, Yoichiro 184
Neumann, John von 123
Neveu, André 191
Newton, Isaac 15, 23, 25, 27, 28, 29, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 63, 72, 73, 74, 75, 78, 79, 83, 84, 89, 90, 94, 97, 98, 104, 113, 114, 118, 119, 137, 158, 159, 197, 234, 282, 283, 287, 290, 291, 294
Newton yasası 75, 98
Nielsen, Holger 184
Nima 13, 14, 25, 246, 256, 258, 261, 265, 280
Noether, Emily 87, 88, 287, 288
Novikov, Sergei 98, 126, 132, 147, 148, 155, 173, 190, 226, 229, 241
nötron 24, 44, 147, 181, 227, ,38
nükleer 98, 126, 132, 147, 148, 173, 190, 226, 229, 241

O-Ö

Ohm, Georg 50
olasılık 43, 70, 165, 249, 252
Olive, David 183, 185, 196, 225
Oppenheimer, Robert 17, 18, 104, 131, 134, 139, 293
optik 33, 49
Orsted, Hans Christian 46, 50
Ossa, Xenia de la 214
Öklid 31, 32, 36, 70, 81, 122
özel izafiyet teorisi 71, 72, 74, 76, 143, 146, 158, 181, 184, 193, 238, 272

P

parçacık fiziği 156, 159, 183, 191, 221, 224, 247, 283
parçacık hızlandırıcı 192, 209, 222
Parkes, Linda 214
Parke, Stephen 15, 248, 249, 250, 251, 252, 257, 263
Parke-Taylor formülü 250, 251
Pauli, Wolfgang 20, 128, 134, 143
Penrose, Roger 15, 139, 140, 141, 142, 146, 173, 178, 219, 251, 254, 255, 256, 257, 259, 275, 292
Phillips, Roger 156
Planck, Max 67, 68, 69, 71, 80, 96, 198, 292, 293
Platon 18, 31, 35, 42, 95, 114, 161
Plesser, Ronen 214
Poincaré, Henri 173, 293
polarizasyon 45
Polchinski, Joe 14, 233, 234, 235, 293
politop 261, 267
Politzer, David 147
Polyakov, Sasha 15, 151, 152, 153, 154, 155, 174, 219, 239, 241

Polyakov ve 't Hooft 152, 153
Postnikov, Alexander 265, 266
Principia 27, 28, 29, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 48, 282, 287
proton 125, 148, 181, 238, 246

Q
quark 144, 147, 148, 153, 191, 211, 227, 229, 238, 241, 253, 257
Quigg, Chris 248, 288
Quinn, Frank 217, 218, 219, 291

R
Ramond, Pierre 15, 191
Randall, Lisa 15, 244, 293
Richter, Burton 22, 145
Riemann, Bernhard 66, 78, 82, 98, 102, 185, 208, 209
Riemann yüzeyleri 208, 209
Rohm, Ryan 205
Roy, Rustum 224
Rubbia, Carlo 195
Rutherford, Ernest 83, 273, 284

S-Ş
saçılma genliği 181, 247, 248, 250, 254, 260, 266, 270
Salam, Abdus 148, 149, 150, 181
Salaman, Esther 18, 90, 293
Scherk, Joël 196, 198, 199
Schrieffer, John 124
Schrödinger, Erwin 99, 100, 105, 106, 127, 289
Schwarz, John 15, 191, 196, 198, 199, 201, 202, 203, 204, 205, 234
Schwinger, Julian 128, 130, 187
Seiberg, Nati 13, 226, 227, 228, 229, 230, 232, 234, 238, 293
Seiberg-Witten teorisi 229
Sen, Ashoke 225
sicim teorisi 21, 24, 180, 196, 197, 203, 204, 205, 209, 214, 215, 218, 227, 230, 232, 234, 238, 239, 240, 241, 242, 255, 257, 262, 272, 277
simetri 58, 148, 149, 180, 185, 188, 190, 191, 193, 203, 239, 264
Simons, Jim 131, 171, 172, 220, 230, 237
Singer, Isadore 168, 169, 173, 174, 286, 293
Skinner, David 15, 260, 261, 263
spin 154, 192, 272
Standart Model 149, 150, 151, 157, 166, 180, 191, 205, 226, 243, 244, 245, 250, 257, 274, 281
Stanford Lineer Hızlandırıcısı 14, 145, 148
statik elektrik 85
Steenrod, Norman 171
Strominger, Andrew 207, 236
Strømme, Stein Arild 215
Sundrum, Raman 15, 244
Susskind, Lenny 184, 234, 239
süper-akışkan 124
süper-çarpıştırıcı 223, 224
süper-iletkenlik 124
süper-yapıştırıcı modeli 264, 268

T
Tait, Peter 60
Tanrı parçacığı 253
Tarantino, Quentin 222
Taylor, Joseph 15, 156, 248, 249, 250, 251, 252, 257, 263
Taylor, Tomasz 15, 248, 249
tekillikler 140

tensör 78, 79, 83
teoremi 136, 140, 188, 189
teorik fizik 22, 67, 68, 69, 75, 91, 92, 96, 102, 107, 113, 116, 117, 119, 124, 130, 131, 136, 142, 144, 145, 160, 163, 166, 169, 170, 174, 188, 227, 237, 258, 271, 272, 273, 277
termodinamik 52, 67
Thompson, D'Arcy Wentworth 7, 14, 15, 112, 113, 294
Thomson, William 52, 56, 60, 62, 225
't Hooft, Gerard 109, 150, 151, 153, 154, 155, 174, 193, 219, 229, 242, 275
Thorn, Charles 187, 188, 189
Thouless, David 220
Ting, Samuel 145
Tong, David 15, 136
topoloji 60, 62, 109, 155, 168, 169, 171, 173, 210, 211, 219
Townsend, Paul 233
Trnka, Jaroslav 15, 266, 267, 268
twistor 141, 142, 173, 251, 254, 255, 256, 257, 259, 260, 262, 263

U

Uhlenbeck, Karen 13, 165, 166, 219
uzay 18, 23, 76, 77, 78, 83, 84, 85, 86, 98, 102, 103, 114, 133, 139, 140, 141, 153, 154, 155, 176, 177, 184, 185, 186, 187, 191, 192, 199, 203, 204, 207, 208, 211, 212, 219, 226, 227, 228, 229, 231, 235, 239, 240, 241, 243, 244, 250, 251, 252, 253, 255, 258, 262, 267, 268
uzay-zaman 76, 77, 84, 139, 140, 177, 192, 199, 203, 204, 207, 211, 240, 241, 258, 268

V

Vafa, Cumrun 236
Veblen, Oswald 92, 124
Veneziano formülü 182
Veneziano, Gabriele 15, 181, 182, 183, 190, 196, 204, 205
Vigani, Francis 29
Virasoro, Miguel 185
Voigt, Woldemar 78
Volkov, Dmitri 191

W

Weil, Andre 172, 279
Weinberg-Salam teorisi 148, 149
Weinberg, Steven 15, 17, 148, 149, 150, 157, 158, 170, 178, 223, 281, 282, 291, 294
Wess, Julius 191
Weyl, Hermann 86, 87, 88, 91, 99, 108, 123, 133, 135, 143, 164, 286, 294, 295
Wheeler, John 127, 138, 139, 287, 294
Wien, Wilhelm 75
Wigner, Eugene 90, 98, 102, 143, 216, 294, 295
Wilczek, Frank 114, 147, 148, 294, 295
Williams, Lauren 13, 265, 269
Witt, Cecile de 138, 139, 287
Witten, Edward 13, 14, 169, 170, 173, 175, 176, 193, 194, 195, 197, 200, 201, 204, 207, 211, 212, 213, 218, 220, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 241, 251, 254, 255, 256, 257, 259, 260, 262, 263,

264, 271, 272, 273, 286, 291, 295
Wu, Chien-Shiung 136
Wu, Tai Tsun 171
Wu-Yang sözlüğü 171

Y

Yang, Chen-Ning 131
Yang-Mills Model 133, 147, 148, 149, 152, 153, 177, 242, 294
Yau, Shing-Tung 176, 207, 208, 213, 214, 215, 216, 295
yerçekimi 19, 25, 37, 38, 40, 44, 45, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 95, 96, 116, 125, 133, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 146, 147, 151, 156, 157, 170, 171, 173, 196, 197, 198, 202, 203, 204, 206, 207, 226, 232, 239, 240, 241, 246, 268, 274
yerçekimi dalgaları 84
yoğun madde fiziği 115, 152, 220
Yoneya, Tamiaki 196
Young, Thomas 42, 70, 146, 281, 294, 295

Z

zar 101
Zumino, Bruno 191
Zweig, George 144

"Einstein tam bir kaçık." Genç ve ukala Robert Oppenheimer, 1935 yılının başlarında Princeton'da Einstein'ı ziyaret etmesinin ardından, dünyanın en ünlü bilim insanını bu şekilde tanımlamıştı. Einstein o dönemde yaklaşık on yıldır yeni ve cüretkâr bir teori geliştirmeye çalışıyordu ve bu teori, Oppenheimer ve diğerlerinin gözünde Princeton'daki bilge adamın yoldan çıkmış olduğunu çeşitli şekillerde gösteriyordu. Görüldüğü kadarıyla Einstein, maddeyi en küçük ölçekte anlamak adına kuantum teorisi aracılığıyla atılan adımları görmezden gelmekteydi. Cüretkâr bir yeni teori arayışındaydı; amacı şaşırtıcı deneysel keşiflere karşılık vermek değil, entelektüel bir düşünce alıştırması gerçekleştirmekti; yalnızca hayal gücünü kullanıyordu, desteği de matematikti. Bu yaklaşım o dönemin bilim insanları arasında popüler olmasa da, en seçkin haleflerinden bazılarının günümüzde araştırma dünyasının ön saflarında başarıyla kullandığı bir metoda öncülük etmiş oluyordu.

* * *

"Kitabın dili güzel, okuması keyifli ve çok derin bilgilere dayanıyor. Günümüzde evrenin işleyişini anlatan en popüler ve en şık teorilerin test edilmesi giderek daha zor bir hal alıyor, hatta imkânsızlaşıyor, ama Farmelo üstalıkla yazdığı bu kitabında, bu teorilerin bizi gerçekliğin kalbinde yatan derin matematiğe götürdüğünü söylüyor."

Roger Highfield, Londra Bilim Müzesi Dış İlişkiler Direktörü

"Farmelo, matematikle teorik fizik arasındaki hareketli dansın geçmişini büyük ustalıkla anlatırken, bizi Newton'dan alıp Einstein'a, sicim teorisine ve daha da ötesine götürüyor. Bu kitap, bu iki disiplinin geçmişiyle veya bugünüyle ilgilenen herkesin okuması gereken bir eser konumunda."

Jacob Boutjaily (Fizik Bölümü),

Uluslararası Niels Bohr Akademisi, Kopenhag Üniversitesi

AYRINTI • BİLİM
ISBN: 978-605-314-516-5
9 786053 145165
KDV'den muaftır. 40 ₺