

# Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

## RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

### Yedek ve Duyuru Kanallarımız

Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

- Telegram: <https://t.me/birkitapbir>
- WhatsApp Kanalımız : <https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4lvMoc0Y>

James Owen Weatherall

# BOŞ LUK

**HİÇLİĞİN  
TUHAFFİZİĞİ**





Yayın Numarası: 1710

1. Baskı: Aralık 2017

ISBN 978-605-82132-3-4

Genel Yayın Yönetmeni  
Fatih ÖZDEMİR

Çevirmen  
Özlem TEZER

Editör  
Doç. Dr. Vedat ÇELİK  
Fatih GÜDÜK

Son Okuma  
A. Okan ŞEKER

Kapak Uygulama  
Veysel TOPRAK

Baskı  
Ankamat Matbaacılık  
13256

Sertifika Numarası: 30821

Buzdağı Yayınevi  
Altay Mahallesi 2668. Cadde  
Fırat Life Style Rezidans 1F/61  
Eryaman/ANKARA

t: +90 0 312 219 77 98  
f: +90 0 312 219 55 43  
info@buzdagiyayinevi.com  
www.buzdagiyayinevi.com

Copyright © 2016 by James Owen  
Weatherall

Originally published by  
Yale University Press

©Türkçe yayın hakları Buzdağı  
Yayınevi'ne aittir.

# BOŞ LUK

**HİÇLİĞİN  
TUHAF FİZİĞİ**

**James Owen Weatherall**

**buzdağı**



## BİLİME AİT TEMEL SORULAR

En derin seviyelerine inildiğinde, bilimin neredeyse felsefeden ayrılamaz olduğu görülür. Bilime ait en temel sorular, dünyanın nihai gerçekliğine ilişkindir. Bilime Ait Temel Sorular, Templeton Yayınları ve Yale Üniversitesi Yayınları ortaklığında basılmıştır. Bu yayın, seçkin bilim insanlarını bu soruları sormaya, bu cevaplara ilişkin eldeki en iyi yaklaşımlarımızı tanımlamaya ve bu cevapların bizi nereye götüreceğini anlatmaya davet etmektedir. Bunlar, cevapların işaret ettiği yeni gerçeklikler ve bizi sorgulamaya zorlayan yeni sorulardır. Bu kitap kısa bölümlerle öğrencilere, genç bilim insanlarına ve konuya ilgi duyan okurlara, bilimin dünyamızın sırlarına nasıl yaklaştığını göstermek ve onlara bilimin en temel noktalarından en doruktaki seviyelere kadar keşfetmek için bir fırsat sunmaktadır.



**Cailin'e**



# İçindekiler

Giriş: İncir Çekirdeğini Doldurmayacak Tartışma | 13

1. Bölüm: Doluluk ve Boşluk | 23

2. Bölüm: Uzayın Kendi Dalgaları | 59

3. Bölüm: Hiç Hiçlikler | 105

Son Söz: Hiçlik Neden Gerçekten Önemlidir?

Kuantum Yer Çekimi ve Ötesi | 147

Teşekkür | 163

Notlar | 165

Kaynakça | 201



# GİRİŞ

## İNCİR ÇEKİRDEĞİNİ DOLDURMAYACAK TARTIŞMA

İçinde mobilya olmayan bir ev düşünün. Boş mudur? Sanırım, bu soruyu cevaplamak için size yeterli bilgiyi vermedim. Evde başka şeyler olabilir: İnsanlar, kıyafetler, yiyecekler ve evcil hayvanlar gibi. Bunların da olmadığını düşünün. Büyük küçük ne varsa çıkarıp atın. Yerlere paspas çekin, banyoyu pırıl pırıl yapın, pencerelerin tozunu alın. Şimdi ev boş mudur?

Bu kitap emlakçılık hakkında olsaydı, cevabınız muhtemelen “evet” olurdu. En azından ev yeni kiracısı için hazır denilebilirdi. Peki, gerçekten *boş* mudur? Her ne kadar mantığımız bize odalar boştur dese de evin içinde hâlâ bir şeyler vardır. Duvarlar, yerler, elektrik kabloları, tuvaletler, küvetler ve mutfak tezgahları gibi. Bunları da çıkarın. Evi soyup soğana çevirin. Evi yıkmayacağız ama sanki evi yıkmaya hazırlandığınızı düşünün. Evin sadece kaba iskeleti kaldı. Peki şimdi boş mudur?

Elbette değildir. İçerde hâlâ hava var. Tek var olan da o değil üstelik. Ev nüfusu büyük bir yerdeyse, büyük olasılıkla verici kuleleri de vardır ve bunların sinyalleri eve ulaşıyordur. Komşuların kablosuz internet ağları da aynı etkiye sa-

hiptir. Evin pencereleri varsa, gündüzleri gün ışığıyla doluyordur. Radyo dalgaları ve ışınlar da elektromanyetik radyasyon çeşitlerinden olduğu için evde radyasyon vardır denilebilir. Diyelim ki biri evin içinde elma düşürdü. Bu ev yer-yüzünde bulunduğundan elma dünyanın yer çekimi etkisiyle evin zeminine düşecektir. Klasik fiziğe göre evin içinde *yer çekimi alanı* olduğu için ev yine boş değil denilebilir.

Çok güzel, düşünmeye başladık. Bu iş giderek ince bir hâl almaya başladı. Ama biz bunun üstesinden gelebiliriz. Bu evi alıp uzaya yerleştirin, yıldızlardan veya diğer büyük kütlelerden uzakta bir yere. Havayı da boşaltın, evi her türlü radyasyondan koruyacak bir kalkan koyun. Elbette artık *şimdi* ev boştur. İçinde hiçbir şey yoktur. Değil mi?

\*\*\*\*\*

Cevap vermek zor olduğu için, meşhur ve eski bir soruya dönelim. Neden hiçbir şey yok ya da neden bir şeyler var?<sup>1</sup> Bu soruyu zor yapan şey, kısmen verilecek olan cevabın nasıl ve ne şekilde tatmin edici sayılabileceğinin net olmasıdır. Yapılacak açıklamalar bir yerden başlamalı fakat bu soru bizden *var olan* hiçbir şeye başvurmadan, tek seferde her şeyi açıklamamızı beklemektedir.<sup>2</sup> Bilim odaklı birçok felsefeci (ve bilim insanları) bu sebepten dolayı soruyu tamamen göz ardı etmişlerdir. Bu yaptıkları aslında anlamlıdır. Bu filozoflar; *ne* vardır, nasıl davranmaktadır, evren önceki hâlinden mevcut hâline nasıl gelmiştir sorularını soracaklardır. *Neden* sorusunu değil.

Bu ikinci tarzdaki sorular için (en azından temel seviyedekiler hakkında konuşursak) fiziğe bakmaya alıştık. Ger-

çekten de fizik etkileyici cevaplara ulaşmıştır. Artık madde âleminin kuark, elektron, foton ve gluonlar gibi şeylerden oluştuğunu biliyoruz. Eşyanın (*şeylerin*) fiziği, ayak basılmadık yeri kalmamış bir alandır. Peki, birinci tarzdaki sorular için hangi alana bakmamız gerekir? Fizik yaklaşımı, tüm vurguyu sorunun yarısında arar; ne vardır, nasıl davranır gibi yaklaşımlarla *bir şey* üzerine inşa eder ve diğer yarısı olan hiçbir şey kısmını göz ardı eder. En iyi fiziksel teorilerimize göre hiç nedir? Elektron, kuark veya fotonlar olmasaydı dünya nasıl olurdu?

Bu kitabın odağı işte bu son soru olacaktır. Amacım, eğer *eşyayı* (*şeyleri*) anlamak istiyorsak ve dünyada ne olduğunu anlamak için fizik çalışacaksak, bunların hiçbirinin olmadığı bir dünyanın nasıl olacağını da hesaba katmamız gerekeceğini göstermektir. Buna hiçliğin fiziği<sup>3</sup> diyorum.

Bu soru başta aptalca gelebilir. Nihayetinde hiçlik, eğer ortada bir şeyler olmasaydı elde edeceğimiz durum olurdu. Bir anlamda, ortada ne tür bir eşya var olursa olsun, hiçliğin varlığı hâlinde her yer aynı olurdu: Sade, basit, boş uzay. Bu hâl, on yedinci yüzyılın muhteşem fizikçisi Isaac Newton'ın şeyler hakkındaki düşünme biçimiydi. Uzayı, içindeki uzayın yapısını etkilemeksizin<sup>4</sup>, içine eşya konulabilecek veya çıkarılabilecek sonsuz bir konteyner olarak ele almıştı. Fizik kanunlarının işlediği bir tür sahneydi. Bu resme göre hiçliğin fiziği basittir.

Gerçekten de bu fikir, fazla fark edilmeden geçilebilecek derecede açık ve basit görünebilir. Evrenin içinden tüm eşyayı aldığımızda, geriye boş uzay kalması anlamlı bir fiziksel varsayım gibi görünmüyor. Hatta böyle bir varsayım yanlış

da olabilir. Fakat bu, fizikte herhangi bir şeyin yanlış olabileceği kadar yanlış olur.

\*\*\*\*\*

Yirminci yüzyıl, fizik açısından çalkantılı bir dönem olmuştur. İlk olarak 1905-1912 yılları arasında Einstein'ın özel ve genel izafiyet (görelilik) kuramlarını keşfetmesiyle, ardından 1920'lerin ortalarında, bu kavramların kuantum teorisiyle geliştirilmesiyle ve yine 1940'larda bu iki yeni teorinin birleşerek kuantum alan teorisine<sup>5</sup> evrilmesiyle, asırlık teoriler yıkılmıştır. Bu devrimlerle, hiçliğin fiziği dâhil olmak üzere yara almayan pek bir şey kalmamıştır.

Gerçekten de genel izafiyet kuramının doğmasıyla birlikte hiçliğin fiziğinin nasıl değişime uğradığını, bu teorilerin dünya hakkında bize söyledikleri şeylerle klasik teorilerden nasıl farklı olduklarını anlamak için kuantum alan teorisi temel alınmaktadır.

Bu kitap değişiklikleri izlemektedir. İlk bölüm, on yedinci yüzyıl süresince, matematikçi ve fizikçi Isaac Newton'un eserleriyle modern fiziğin başlangıcını ele almaktadır. Bu esnada, fiziksel nesnelerin hareket teorisi ile Newton'un fiziğe yaptığı en bilinen katkılara yani, kendi adını taşıyan hareket kanunlarına özet olarak değinilmektedir. Bu hareket kanunları, üç yüzyıl geçmesine rağmen hâlen modern fizik eğitiminin temelini teşkil etmektedir. Bu noktada; Newton'un bu hareket kanunlarını bulurken, uzay ve zaman kavramlarına ilişkin temelleri yeniden tanımlamaya ihtiyaç duyması yeterince dikkat çekmeyen bir konu olarak kalmıştır. Bu durum, dünyanın nasıl bir yer olduğu ve en başından

beri dünyada hiçbir eşya olmasaydı ne olurdu konularında yeni ve radikal bir resmin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Newton'un o zamanki fikirlerinin ne kadar tartışmalı olduğu konusu, vurgu yaptığım başlıklardan biridir. Newton'un, Avrupa bilimini bin yıldır düşünceleriyle etkileyen Yunan filozofu ve bilim insanı Aristo gibi; on yedinci yüzyılın ilk döneminde kıta bilimini güçlü şekilde etkileyen Fransız fizikçi, filozof ve matematikçi René Descartes gibi eski fizikçilerden farklılaşması ele alınmaktadır. Bölümün büyük bir kısmı, Newton ve çağının en öne çıkan ismi, Alman bilgisi ve Hannover'da saray kütüphanecisi Gottfried Willhelm Leibniz ile aralarında geçen, uzayın (ve zamanın) yapısı hakkındaki meşhur tartışmalara değinmektedir. İlerledikçe, ilk etapta teoloji ve metafizik olarak görünebilecek tartışmaların fiziksel bazı meselelere, spesifik olarak hareketten bahsedebilmek için öncelikle uzay ve zamanın fizik kanunlarıyla ele alınabilir kavramlar olduklarını varsaymak gerektiğine temas ettiği görülecektir.

İkinci bölümde, yirminci yüzyıl başlarındaki iki devrime değinmekteyim. Biri Albert Einstein'ın izafiyet teorisi. Einstein'ın teorisi, James Clerk Maxwell'in on dokuzuncu yüzyıldaki ışık, elektrik ve manyetizmaya ilişkin teorilerindeki başarılarının ışığında, Newton'un hareket kanunlarının yeniden ele alınması olarak anlaşılabilir. Maxwell'in teorisi ilk olarak Newton fiziği bağlamında formüle edilmiş ancak daha sonra bazı kavramsal sorunlara ve başarısız deneylere yol açmıştır. Einstein, Maxwell'in fiziğin radikal olarak yeniden yapılandırılması yolundaki ilk adımı zaten atmış olduğunu fark etmişti. Newton gibi, Einstein da yeni hareket kanunlarını

açıklayabilmek için uzay ve zaman gibi temel kavramları yeniden tanımlaması gerektiğini fark etmişti. Böylece (boş) uzayın yapısı hakkında yeni bir resim doğmasına sebep olmuştu.

Newton'un hareket kanunlarını revize ederek onları yeni bir uzay-zaman çerçevesinde Maxwell'in teorisine göre yeniden ayarlaması, bugün özel izafiyet olarak bildiğimiz sonucu doğurmuştur. Ama Newton başka bir şey daha yapmıştır. Bize yer çekimi kanununu vermiştir. Newton'un teorisi uzun ömürlü olmuş, birçok başarıyı beraberinde getirmiştir. Güneş sisteminde gözlenen (neredeyse) tüm hareketleri açıklayabilmiş ve gelgitler ve top atışları gibi bazı temel yer-yüzü konularına da açıklık getirebilmiştir. Ancak Einstein'ın yeni uzay ve zaman teorisi ile uyumsuz görünmüştür. Yeni ve buna uygun şekilde görelilik kuramına da yer veren bir yer çekimi teorisi arayışı için Einstein'ın bir on yıla daha ihtiyacı olacaktır. Nihai sonuç ise bugün bizim genel izafiyet teorisi olarak bildiğimiz şeydir.

Genel izafiyet birçok açıdan çarpıcıdır. Çok büyük kütleli nesnelerin diğer çok büyük kütleli nesneleri etkilediği bir teoridir. Bu açıdan, Newton'un yer çekimi teorisi gibidir. Ancak Newton'un teorisinde bu hareket, nesnelerin diğerleri üzerinde yer çekimi kuvveti uygulaması sonucu ortaya çıkar. Genel izafiyet teorisinde ise nesneler, uzay ve zamanın geometrik yapısını değiştirerek birbirlerini etkilemektedir. Bu teoriye göre uzay ve zaman, voleybol topu veya arabanın kaportasının büküldüğü gibi aynı tarzda *bükülebilmektedir*. Yağmur damlalarının eğimli yüzeylerde farklı şekilde akmaları gibi gezegenler de bükülen uzay ve zamanda farklı şe-

kilde hareket edeceklerdir.

Yıldızlar, kitaplar, mavi balinalar gibi şeylerin uzay ve zamanın geometrik şeklini değiştirebileceği fikri Newton'un teorisi ve ondan önce gelmiş olan her şeyden anlamlı ölçüde büyük bir kayış demektir. Ve Einstein'ın teorisi daha fazlasına izin veriyordu: Hiçbir şeyin hiçbir yerde ve zamanda olmadığı koşullarda bile uzay ve zamanın bükülebileceğini ortaya koyuyordu. Aslında, ışık ve radyo dalgaları gibi uzay ve zaman da çarpıcı biçimde elektromanyetik radyasyona benzerlik gösteriyordu. İlerde göreceğimiz üzere, bunun evrende "hiçbir şey" olabilmesi için ne anlam ifade ettiği çok ince bir nüans olarak karşımıza çıkıyor.

Üçüncü bölümde, özellikle de izafi bir uzay ve zaman anlayışıyla kuantum teorisine göz atıyoruz. İzafiyet teorisi gibi, kuantum teorisi de Newton'un hareket kanunlarının gözden geçirilmesi olarak anlaşılabilir. Ama bu farklı bir revizyondur ve kuantum teorisi ile izafiyet teorisini bir araya getirme programı tamamlanmış bir çalışma değildir. Örneğin, kuantum teorisinin genel izafiyetle uyumlulaştırılmasındaki derin zorluklar nedeniyle, hâlâ yeterli bir kuantum yer çekimi teorisine sahip değiliz. Fakat bunu ortaya koyarken şu noktaya değinmekte fayda vardır; kuantum teorisinin özel izafiyet (*kuantum alan teorisi* olarak bilinen bir teoridir) ile uyumlu bir varyasyonunu formüle etmek için tüm çabalarımızın, bilim tarihinde en kayda değer bazı başarılarla ulaşılmış olmasına rağmen teori, bazı yönlerden iyi anlaşılammakta ve bazı aşamalarda sorunlar ortaya çıkmaktadır.

Bütün bunlara rağmen, kuantum alan teorisi hakkında (düşüncemize göre) iyi anlaşılmış olan bir şey var ki hiçliğin

fiziği özel bir role sahiptir. Bu da dünyadaki maddenin olası düzenlenişlerinin, var olan parçacıkların sayısı cinsinden ya da bundan ziyade belli bir deney türündeki parçacık sayısını tespit edebilme olasılığımızla açıklanması nedeniyledir. Maddenin (*yokluk-boşluk durumu* olarak bilinen) bu olası dizilişlerinden bahsedebilmek için fizikçiler, dünyanın özel bir hâlini tanımlamaya başlamışlardır. Bu hâlden herhangi bir parçacığın olmadığı durum anlaşılmakta, farklı türlerdeki parçacıkların eklenmesi durumunda bu hâlin nasıl değişeceği konularına girilmektedir.

Dolayısıyla, kuantum yokluğu-boşluğu fikri temel teşkil etmektedir. Bu fikir, bir zamanlar “bir şey” ve “hiçbir şey” kavramları arasındaki belirgin farkı daha aşındıracak tarzda bazı şaşırtıcı özellikler barındırması açısından önemli hâle gelmiştir.

\*\*\*\*\*

Bahsetmiş olduğum tüm teoriler arasında, hiçliğin fiziği kayda değer şekilde zengindir. Bu zenginliği araştırmak, bu teorilerin tanımladığı dünyaların birbirinden ve çoğu durumda doğa hakkındaki temel sezgilerimizden ayrıldığı en temel yollardan bazılarını vurgulayarak, bu teorilerin temellerine yönelik bir içgörü sağlar. Hiçliğin fiziği, bu teorilerin kendi kavramsal yapılarının içine, kendi temel özlerine inmektedir.

Giriş bölümünde de arz ettiğim üzere, başka şeyleri de ortaya koymaktadır.

Daha önce içinde hiçbir şey olmayan bir uzay bölgesinin, Newton fiziğinin bize söylediklerinden farklı olabileceğini hayal etmenin zor olacağını önermiştim. Newton’dan bin-

lerce yıl önce çoğu meşhur filozof ve fizikçi için boş uzay, tartışmalı bir konuydu ve bu fikrin tutarsız olduğunu ileri sürüyorlardı. Newton'un teorisinin başarısından sonra uzay, zaman ve maddenin yapısı Newton'un ileri sürdüğü şekilde esas alınmaya başlanmıştır. Öyle ki başka bir şekilde dünyayı görmeye çalışmak zor bir hâl almıştır. Ancak yeni teoriler karşısında, bu kadar "net" olan boş uzay kavramı ortaya çıkmaya zorlanmıştır.

Elbette, fizik teorilerimiz değiştiği zaman doğa anlayışımızdaki *bir şeyler* de değişmelidir. Dünya hakkında yeni şeyler öğrendikçe, fiziğimizin temel ilkelerinin de gelişmesini beklemeliyiz. Ancak burada dikkat etmemiz gereken nokta, genel izafiyet ve kuantum alan teorisinden önce boş uzay alanlarının ne anlama gelebileceğiyle ilgili anlayışımızda etkili olan önemli fiziksel ilkelerin varlığını fark etmenin zorluğudur. Hiçliğin fiziği, biz aksini görene kadar önemsiz gibi görünüyordu.

Gerçekten de genel izafiyet ve kuantum alan teorilerine göre, Newton'un düşündüğü tarzdaki boş bir uzay fiziksel olarak *imkânsızdır*. Boş uzay, yalnızca eşya fiziğinin kendini gösterdiği bir sahne değildir. Her bir parçasının, maddenin yapısından daha ilginç ve kompleks olduğu, kendine özgü bir yapısı vardır. Yirminci yüzyıl fizikçilerinin çoğu kendilerini bu yapıyı anlamaya adanmışlardır.

Bu kitapta anlattığım hikâyenin ruhunda, bilimsel teori geliştirilmesi esasında temel kavramları ele almak ("hiçlik" gibi kavramlar) ve onları bilimsel sorgulamaları destekleyecek kadar kesin hâle getirmek vardır. Ancak bu sezgisel fikirlerimizin daha güçlü bilimsel taleplere adapte edilme

süreci, gerçeklik kavramımızda bazı radikal değişiklikler olması sonucunu doğurabilir. Çoğunlukla da yeni teoriler geliştirirken revize edilmesi gereken bu en temel kavramlar olmaktadır.

Yukarıda sorduğum sorular bağlamında, böylesi değişikliklerin sonuçları belki de en net hâlini almaktadır. Neden hiçbir şey olmaması gerekirken bir şeyler var? Modern fizik, her şeye rağmen buna bir cevap vermiş midir? Bir anlamda, cevaplar “evet” olarak görünse de ortaya koyduğum üzere modern fizik (özellikle de kuantum alan teorisi), bizim genelde zihinlerimizde olduğu hâliyle bunun imkânsız<sup>6</sup> olduğunu söylemektedir. Boş uzay, fizik kuralları açısından göz ardı edilmektedir.

Net olan başka bir şey daha vardır. Bu da bu soruyu nasıl anladığımız ve bu soruya verilebilecek bir cevap olarak sayılabilmesi için “bir şey” ve (belki de daha önemlisi) “hiçbir şey” kavramlarından ne anladığımızdır. Bu terimleri fiziksel teoriler veya dünya hakkındaki diğer inançlarımızdan bağımsız bir şekilde net olarak düşünebilirsiniz. Ama hiçliğin fiziği bize bunun doğru olmadığını gösteriyor. Hiçliğin anlayışımız oldukça değişebilir.

Bu değişim önemlidir. Hiçliği genel izafiyet ve kuantum alan teorilerinde nasıl anladığımız, doğrudan bu teorilerle gelen gerçeklik kavramına gitmektedir. Hiçlik gerçekten önemli bir meseledir. Bu kitap neden öyle olduğunu anlatmaktadır.

# 1.BÖLÜM

## DOLULUK VE BOŞLUK

1665 yazının sonlarında, hıyarcık vebası salgını Londra'yı silip süpürürken, Cambridge Üniversitesi kapatılır.<sup>7</sup> İki yıl kapalı kalacaktır. Bilim insanları ve öğrenciler, vebadan korunabilmeleri için kırsaldaki bir şehre tahliye edilirler. Yirmi iki yaşındaki Isaac Newton Trinity College'daki lisans eğitimini henüz tamamlamıştır. Çalışmalarına devam edemeyerek, Doğu İngiltere'deki küçük bir mezra olan Woolsthorpe Manor'daki annesinin evine döner.

Newton, Woolsthorpe Manor'da son kaldığında on yedi yaşındadır. Annesi onu, çiftlik işlerinde kendisine yardımcı olması için on iki yaşından beri dil eğitimi aldığı Kraliyet Okulu'ndan almıştır. On yedinci yüzyılda bir dil okulu sadece dil bilgisi, yani Latin dil bilgisi öğretmektedir. Newton hiç matematik, bilim, felsefe eğitimi almamıştır ve şimdi de çiftçilik işlerini öğrenmesi beklenmektedir. Yavaş bir öğrencidir ve işten de nefret etmektedir.

Birkaç ay sonra, Kraliyet Okulu'nun başöğretmeni Newton'un annesini hata yaptığı ve genç Isaac'ın derslerine dönmesinin daha iyi olacağı konusunda ikna eder. En azından, hayatını çiftçilik yaparak kazanmayacaktır. Kraliyet

Okulu'na döner, bitirir ve Cambridge Üniversitesi'ne devam eder. Burada, varlıklı öğrencilere yardımcı olmak suretiyle çalışıp kendi giderlerini karşılar. Bu durum onun zoruna gitmemektedir. Latince haricinde düşünsel ufkunu matematik, bilim ve felsefe alanında da açabilmek için bir fırsat yakalamıştır. Newton, veba senesinde Woolsthorpe'a döndüğünde farklı bir adam olmuştur.

Ama artık daha büyük bir değişikliğe gebe dir. Küçüklüğünü kırsalda bırakmıştır ve dünyanın önde gelen matematikçilerinden birine dönüşecektir. Bugün onsuz modern matematik biliminden bahsedemeyiz<sup>8</sup>. *Calculus* olarak adlandırdığımız matematiksel metot koleksiyonlarını, kendi tabiriyle akış metodunu tek başına geliştirmesi bu yıllara rastlamaktadır. Işık ve prizmalar konusunda ilk deneylerini yaparak, konuyu oldukça ilerleten teoriler geliştirmiştir.

Başlı başına bu teorilerle yaptığı katkılar dahi, tarihteki en önemli matematikçi ve fizikçiler arasına girmesi için yeterli olmuştur. Kendisiyle ilgili olarak en fazla bilinen ve önündeki yirmi yıl boyunca kendisini vakfettiği üçüncü bir mesele daha vardır. Veba yılında Woolsthorpe'da yaşarken, Newton hareket ve yer çekimi hakkında düşünmeye başlamıştır.

Newton'un hareket kanunları ve evrensel yer çekimi kanunu fizikte çığır açmıştır. Bu kanuna göre, evrendeki nesneler kütleleriyle artan ve aralarındaki mesafenin karesi ile azalan bir kuvvet ile birbirini çekmektedir. Üç buçuk yüzyıl sonra, lise ve üniversitelerde hâlâ Newton fiziği öğretilmektedir. Fiziği anlamının ön koşulu, Newton ve takipçilerinin çalışmaları konusunda uzmanlaşmaktır. Gerçekten de

Newton fiziğinin üzerine çeşitli teoriler geliştirmiş olsak da Newton yasaları hâlâ fiziksel dünyayı anlayışımızın temel sütununu teşkil etmektedir. Bu konudaki en güzel örneklerden biri şudur: Bizi Ay'a götüren Newton'un yasalarıydı, bizi Mars'a götürecektir olan da onun yasaları olacaktır.

Newton fiziğinin kalbinde uzay ve zaman gibi temel kavramların radikal biçimde yeniden ele alınması yatıyordu. Newton'dan önce uzay ve zaman anlayışımız, metafizik karanlıklara saplanmış durumdaydı. Newton'un bu kavramları yeniden tanımlaması, fiziksel nesnelerin hız ve ivme gibi hareket miktarlarının kesin olarak ortaya koyulabilmesini ve bu miktarları laboratuvarı veya gözlemesinde yapabileceğimiz ölçümlerle ilişkilendirebilmesini sağlamıştı.<sup>9</sup>

Elbette, Newton'un tüm bunlardaki amacı masa, sandalye gibi sıradan nesnelerin yanı sıra gezegen ve yıldızlar gibi eşyanın fiziğini geliştirmektir. Fakat bunu yapabilmesi için önce, hiçbir şey olmasaydı dünya nasıl olurdu sorusuna bir cevap vermeliydi. Boş uzayın geometrik yapısını tanımlaması gerekiyordu.

\*\*\*\*\*

20 yıllık bir birikim sonucunda ortaya çıkan, hareket ve yer çekimi konularını ele alan, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Doğal Felsefenin Matematiksel Prensipleri), kısaca *Principia*, Newton'un başyapıtı olmuştur. İlk olarak 1687'de, Newton kırk dört yaşındayken basılmıştır. Bilim insanlarının Newton'un daha 1660'ların sonu itibarıyla uzay ve zaman hakkında olgun bir anlayışa sahip olduğunu göstermek amacıyla atıfta bulundukları De Grav olarak bilinen

önemli belgenin de aralarında olduğu, hareket yasaları üzerindeki düşüncesinin gelişimini ortaya koyan, Newton'un yaşam aralığında yayınlanmamış olan çok sayıda belge olmasına rağmen Newton fiziğinin nihai sözünü söyleyen eser *Principia* olmuştur.<sup>10</sup>

*Principia* fiziğinde, herhangi bir *zamanda*, uzayda yer kaplayan cisimler bulunmaktadır.<sup>11</sup> Newton için cisimler, masa, sandalye ve gezegenler gibi genişletilmiş, nüfuz edilemez nesnelerdir. Kaba bir yaklaşımla uzay ise cisimlerin konumlandırılabilceği, sonsuz boş bir konteyner olarak düşünülür.<sup>12</sup> Yer ise sözlük anlamıyla, cisimler tarafından doldurulabilen uzay bölgeleri, cisimlerin olası konumlarıdır. Uzayı, belirli bir anda bir cisim tarafından işgal edilebilecek tüm yerler olarak düşünebiliriz. Cisimler arasında boş uzaydan başka bir şey yoktur.

Newton'un uzaydaki cisimlere bakış açısı, atomculuk dediğimiz kuramın varyasyonunu geliştiren Demokritus ve Epikuros başta olmak üzere, antik Yunan'a dayanır.<sup>13</sup> Atomculuk, maddenin temel bileşenlerinin “atom” olarak adlandırıldıkları küçük, bölünemez madde parçacıkları olduğunu savunmaktadır.

Yirmi birinci yüzyıl kimyası ve fiziğinde kendini gösterdiği hâliyle, çağdaş “atom” kavramımızın temel esası bu antik fikirde olduğu gibidir. Fakat önemli şekillerde farklılık göstermektedir. En büyük fark, Antik düşünürler için atomların bölünemez olduğuydu. Atomların da parçaları yoktu. Şimdi ki anlayışımıza göre onların da parçaları bulunmaktadır. Elektron, proton ve nötronlar, proton ve nötronlardan ve bunların yanı sıra kuark adı verilen daha temel varlıklardan

oluşurlar. Ve atomlar kesinlikle bölünebilir: Onları bölmek bugün nükleer silahlar ve nükleer santrallerde kullanılan nükleer fisyonun temelini oluşturuyor.<sup>14</sup> Bir başka fark da şudur: Antikler atomların hacim, şekil ve renk gibi özellikler açısından farklı olabileceklerine inanmış olsalar da atomları sistematik olarak sınıflandırmaya yönelik bilinen bir girişimde bulunmamışlardır. Yirmi birinci yüzyıl kimyası, 118 değişik atom türünü içeren bir periyodik tabloyu kabul eder. Burada atom türündeki farklılıkları belirleyen şey kendilerini oluşturan yapıdır. Modern anlayıştaki atomların, hacim konusunda bir nebze haklı olsalar da Antik dönemdeki insanların düşündükleri gibi renk veya şekillere sahip olduklarını düşünmek çok tuhaf olurdu.

Newton, cisimlerin daha fazla bölünebilmeleri mümkün olmayan küçük parçaları olduğuna, dolayısıyla Antik atomlara benzer bir şeye inanıyordu.<sup>15</sup> Fakat burada amaçladığımız doğrultuda atomlar, atomculuk görüşünün önemli bir parçası değildir. Antik atomcular için atomlar hiçbir şey tarafından işgal edilen sonsuz uzayda yani, boşlukta dolaşmaktadır. Onların inancına göre bütün fizik olayları, eşyanın olmadığı bölgelerde boşlukta dolaşan küçük parçacıkların yani, atomların uzaydaki hareketleriyle açıklanabilirdi.

Fiziksel şeylerin ayrı ayrı parçalar (bölünebilsin ya da bölünemez olsun) hâlinde olması ve maddenin parçacıkları arasında hiçbir şeyin olmadığı uzay (boşluk) bölgeleri bulunması fikri sezgisel olarak makul ve hatta bariz bir mesele olarak görünebilir. Sonuçta, aralarında boşluk olan şeyler düşünmeye alışkınız. Arkadaşınızla birlikte bir kafede oturduğunuzu hayal edin; siz ve arkadaşınız arasında hiçbir şe-

yin olmadığı bir uzay mesafesi olduğunu düşünmeniz çok doğaldır. Elbette, bu tam olarak doğru değildir. Arkadaşınızla aranızda hava bulunmaktadır. Fakat bize hep havanın karbondioksit ve iki oksijen atomu gibi moleküllerden oluştuğu öğretilmiştir. Bu moleküllerin aralarında hiçbir şey yoktur.

Bu fikir sezgisel olarak akla geliyorsa, bunun sebebi üç buçuk asır boyunca Newton fiziğiyle şekillendirilmiş bir dünyada yetişmiş olmamızdır. Lakin bin yıl önce bu fikir son derece tartışmalı bir konuydu.<sup>16</sup> Örneğin Newton'dan önceki en etkili fizikçi olan Aristo, Demokritos'un görüşlerinin yanlış ve tutarsız olduğunu ileri sürmüştü. Aristo'ya göre hareket yalnızca bir şeyin başka bir yere itilmesi veya çekilmesinden kaynaklanabilirdi. Duman yükselmesi veya kaya düşmesi gibi bu formda olmayan hareketler de vardır. Bunlar madde türleri arasında var olan doğal düzenin bozulması ve birbirine komşu parçacıkların bir diğerini iterek veya çekeerek doğal düzeni yeniden sağlamaya çalışmasıyla oluyordu. Dolayısıyla, havaya bırakılan bir kaya parçası yeryüzündeki diğer kayalara ulaşabilmek için hava tarafından aşağıya doğru çekilmekte ve kaya da etrafındaki havayı yukarı doğru itmektedir.

Bu düşünsel resimle ilgili önemli olan şey, bu olayda boşluktaki hareketin ihmal edilmesidir. Atomlar hiçbir şeyin olmadığı bir ortam tarafından çevrili olsaydı, üzerlerine hiçbir itme veya çekme kuvveti etki etmeyecekti. Tüm hareketler, komşu maddelerin itme veya çekme kuvvetlerinden doğuyorsa, komşu maddenin olmadığı durumlarda hareket imkânsız olacaktı. Neticede, hiçbir şeyin olmadığı boş bir

uzay fikrinin tutarsız olması gerekiyordu.

\*\*\*\*\*

Aristo fiziği yaklaşık iki bin yıldır Batı dünyasını domine etmiştir.<sup>17</sup> Newton doğduğunda ise Aristo'nun etkisi zayıflamaktaydı. On altıncı yüzyılın sonlarında ve on yedinci yüzyılın başlarında, Galileo Galilei ve Fransa'daki Rene Descartes gibi bilimsel devrimin öncülerince sorgulanmaya başlanmıştı. Fakat Aristoteles fiziğinin (en azından Kıta Avrupası'nda) izlerini takip ederek ortaya çıkan yeni görüşler, Aristo'nun düşündüğü gibi boş uzayda dolaşan cisimler fikrine artık sempatiyle bakmıyorlardı.

Descartes, on yedinci yüzyılın ilk yarısındaki en etkili doğa felsefecilerinden biriydi.<sup>18</sup> Aristo fiziğini reddetti ve kendi tam ve sistematik fiziğiyle değiştirmeyi denedi. Bu çalışmasının bir kısmı uzay ve zaman, Tanrı ve her çeşit meseleyi içeren eksiksiz bir metafizik geliştirmeyi amaçlıyordu. Yeterli bir doğa felsefesinin matematiğe dayanıyor olması gerektiği fikrinin erken savunucularından biri olmuştu. Bu yaklaşımı onu geometri ilkelerine dayanan bir uzay, zaman ve madde kuramı geliştirmeye yöneltmişti. Descartes'e göre, bir cismin sahip olduğu temel özellik genişliği yani uzaydaki şekliydi. Uzay ise cisimlerin şekilleri tarafından işgal edilen bir genişlikten başka bir şey değildi.

Eşya ve uzay arasındaki bu sıkı bağlantı (en azından Descartes'e göre, o kadar sertti ki neredeyse aralarında bir fark yoktu) onu boş uzayın mümkün olmadığı sonucuna götürdü.<sup>19</sup> Hiçbir maddenin olmadığı bir uzay bölgesinde, bir boşluk olduğunu varsayalım. Öyleyse bu bölgenin de bir

genişliği olmalı, sıfıra eşit olmayan bir hacmi olmalıdır ki öyle olmasaydı en baştan bir bölge olarak tanımlanamazdı. Fakat genişlik basit anlamda bir cisim olduğundan, bu bölgede bir çeşit cisim bulunmalıydı. Genişliğe sahip diye tanımlandıysa boş kalamazdı.

Bu doğrultuda Descartes tüm uzayın çok ince, gözlemlemeyen şeylerle dolu olması gerektiğini düşünüyordu. Bu maddeyi de doluluk (Plenum) olarak adlandırmıştı. Sıradan nesneler Plenum'dan geçebilir ve masa, sandalye ve gezenler gibi şeyler tarafından işgal edilmemiş yerler ise bu diğer tür maddeyle dolar.

Bu fikri tuhaf ya da döngüsel nesnellikten kaynaklanan bir safsata olarak bulduysanız, yalnız değilsiniz. Sonuç olarak Descartes da uzayı hiçbir zaman boş olamayacak şekilde tanımlamıştır. Descartes'ın uzay ve maddeye ilişkin görüşleri on yedinci yüzyılın ikinci yarısındaki önde gelen fizikçiler tarafından tamamen reddedilmiştir.<sup>20</sup> Ancak ilerledikçe göreceğimiz gibi, bu fikrin varyasyonları sonraki yüzyıllar boyunca yeniden ortaya çıkacaktır. Muhtemelen bugün bile en güncel fizik kuramlarımız bir şekilde Plenum önerisinde bulunmaktadır. En azından yirminci yüzyıl fiziğindeki gelişmeler, “uzay” ve uzayı Descartes'ın öngördüğünden farklı şekillerde de olsa işgal eden “eşya” arasındaki ayrımı önemli ölçüde bulanıklaştırmıştır.

\*\*\*\*\*

Newton, 5 Şubat 1676 tarihli bir mektubunda, en çok alıntılanan o sözlerini söylemiştir: “Uzakları görebildiysem devlerin omuzları üzerinde duruyor olmam sayesinde.”<sup>21</sup> Bu

benzetme, mektubun yazıldığı tarihten yaklaşık beş yüz yıllık geçmişe sahip olduğu için patenti Newton'a ait değildir. Devlerin yüksekliğinden faydalanan bir cüce benzetmesi kullanılmaktadır. Bu alıntı genel olarak bilimsel alçak gönüllülikle bağlantılanmış ise de kaleme alınan mektupta kısa ve kambur Robert Hooke'a hitap ediliyordu. Newton "devler" diyerek Hooke ve aslında çok da beğenmediği Descartes'a atıfta bulunuyordu. Gerçekten de yazıldığı zamanlarda Newton ve Hooke ışığın doğası üzerinde anlaşmazlığa düşmüş ciddi rakiplerdi. Newton, Hooke'un çalışması hakkındaki eleştirileri üzerine İngiltere'deki en önemli bilimsel organizasyon olan Londra Kraliyet Topluluğu'ndan (Royal Society of London) istifa etme tehdidinde bile bulunmuştu. Yıllar sonra küstahlığıyla meşhur Hooke, Newton'un kendi evrensel yer çekimi kuramını çaldığını iddia edecekti. Bu bağlamda, Newton'un devlere atıfta bulunmasının hicivli bir ifade olduğunu görmemek imkânsızdır.

Yine de Hooke'un dışında, Newton'un çağdaşı olan sayılı fizik, matematik ve doğa felsefecisinin yetenek ve katkılarının onunki kadar kendisine meydan okuyabildiği de not edilmesi gereken bir husustur. Bunlar arasında en etkili örneklerden biri Gottfried Wilhelm Leibniz'dir.<sup>22</sup> Newton'dan iki yaş daha genç olan Leibniz, 1646 yılında şu an Almanya sınırları içinde ama o zamanlar Kutsal Roma İmparatorluğu'nda yer alan Leipzig kentinde doğdu. Kariyerinin çoğunu, Brunswick-Luneberg Dükü'nün ikamet ettiği Hannover'de saray kütüphanecisi olarak geçirdi.

Daha sonra sistematik fizik kuramlarını geliştirmeye ve Newton'la aynı zamanda Calculus'u keşfetmeye devam et-

miş olsa da resmen bir matematik veya doğa bilimleri eğitimi almamıştır. Brunswick-Luneberg Dükü ve sonraki prenslere siyasi danışmanlık yapma düşüncesiyle almış olduğu tek diploma hukuk diplomasıydı. Aslında Leibniz'in araştırmaları 1692'de Düklüğü, Prensliğe yükseltmek için bir araçtı.<sup>23</sup> Leipzig'deki önde gelen bir hazırlık okuluna gitmiş ve daha sonra Leipzig ve Nuremberg'deki Altdorf Üniversitesi'ne (on dört yaşında) devam etmiş olsa da Leibniz, kendisini her zaman kendi kendini yetiştirmiş biri olarak tanımladı.<sup>24</sup>

Otobiyografik notlarda yazacağı gibi eğitiminin çoğu, sekiz yaşındaki Leibniz'in okul öğretmenlerine güçlü itirazları üzerine, orali bir asilzadenin ihtarlarıyla babasına ait büyük kütüphanede kilitli kaldığı dönemden geliyordu. (Leibniz'in babası, Leipzig Üniversitesi'nde ahlak felsefesi profesörüdür. Leibniz altı yaşındayken 1652 yılında vefat etmiştir.)

Leibniz'in keskin bir zekâsı vardı ve takdire şayan derecede açık görüşlüydü. Siyasetten tarihe, biyolojiden jeolojeye, matematikten fiziğe ve tabi ki felsefeye kadar her şeyi inceledi. Herhangi bir fikir konusunda çalışmaktan, eleştirmede bulunmaktan zevk alıyor; daha da önemlisi o fikirden değerli bir şeyler almayı deniyordu.<sup>25</sup> Örneğin, 1660'lı yılların sonlarında doktorasının bitimine doğru, Newton Woolsthorp'taki yuvasına çekildiğinde Leibniz simyaya ilgi duymaya başlamıştı. On yedinci yüzyılda, simya hâlâ çoğu çevre tarafından ön kimya veya mistik olarak saygın bir çalışma alanı olarak görülüyordu. Newton da yıllarca simya alanında çalışma yapmıştır. Gerçekten de bu işi Leibniz'den daha çok önemsemiş ve uzun zaman ayırmıştır. Simya işleriyle

uğraşanların söyledikleri gerçekten çarpıcıydı: Simyacıların dünyanın doğası hakkında derin gizli gerçekleri öğrendiklerini ve hünlerli kimselerin bazı sihirleri gerçekleştirebileceğini yazmışlardı.

Bu iddialar, Leibniz'in de dâhil olduğu dik kafalı Aydınlanmacı bilim insanları arasında şüpheyle karşılandı. Lakin aynı zamanda söylenenler gerçekse öğrenmeye değerdı ve her hâlükârda konuyu daha yakından tanımadan yargıda bulunmamalıydı.

Leibniz de simyanın büyüüne kapıldı ve konu hakkında bulabildiği her şeyi inceledi. Fakat o okumaya devam ettikçe konu daha da bulanık bir hâl alıyordu. Yavaş yavaş şaşkırtıcı bir hipoteze ulaşmıştı: Simya alanında yazan insanların da yazdıkları şeyler hakkında hiçbir fikirleri yoktu. Bunu test etmek için yaşadığı şehirdeki simyacı topluluğuna, okuduğu en anlaşılmaz metinleri karıştırarak bir mektup yazdı. Leibniz'in ifade ettiğine göre, kaleme aldığı metin tamamen anlaşılmazdı. Fakat yerel simyacılar tarafından büyük bir başvuru kaynağı olarak görülmüş ve Leibniz'in usta olduğunun kanıtı sayılmıştı. Topluluğa katılmaya davet edilmiş ve hatta simya araştırmalarının desteklenmesi için kendisine burs teklif edilmişti. Bu da simyanın sahte olduğunun sağlam bir deliliydi ve Leibniz kısa süre sonra bu alana ilgisini kaybetti.

Leibniz açık fikirlilik ve sağlıklı şüphecilik karışımını, takip ettiği diğer işlere de uygulamıştı. Bunlardan biri de fizikti. Yazarken, Descartes ve takipçilerinin geleneği olan Kartezyenizm (Dekartçılık) bilim ve felsefede yükselişteydi. Leibniz, özellikle fiziksel nesnelerin metafizikleri hakkında Des-

cartes'ı ciddi biçimde eleştiriyordu. Descartes kendi de dâhil olmak üzere, çağdaşlarının çoğu Aristoteles'i ve Batı Avrupa'daki Aristoculuk geleneğini eleştirmektedirken Leibniz, Aristoculuğu çoğu zaman çekici bularak Aristoculuk ve Kartezyen felsefenin özelliklerini bir araya getirmeye çalışmıştı.<sup>26</sup>

Savaşan entelektüel gelenekler arasında uzlaşma noktaları bulma arzusuna sahipti. Boş uzayın varlık olasılığı konusundaki görüşleri bu konuda karakteristik bir örnektir.<sup>27</sup> Bu noktada, görüşleri Newton'unukine benziyordu.

Newton'un aksine Leibniz, gerçek dünyada böyle boş alanlar olamayacağını savunuyordu. Leibniz Tanrı'nın muhtemel dünyalar arasından en iyisini yaratmış olduğuna inanıyordu. (Aksi takdirde Tanrı yeterince iyi olmayan bir dünya yaratmaya karar vermiş olmalıydı ki bu da onun sonsuz iyiliğine ters düşerdi.) Ona göre dünyada boş bir uzay bölgesi olsaydı, bu boşluk hiçbir şeyden daha iyi bir şeyle doldurulabilir, böylece Tanrı daha iyi bir dünya yaratmış olurdu. Yani Leibniz, Descartes'in de ulaşmış olduğu üzere kendisini Plenum'un varlığına inanmaya sevkeden tüm uzayın dolu olması gerektiği sonucuna ulaşmıştı. Bu açıdan Leibniz'in görüşleri, Descartes'a Newton'dan daha çok benziyordu.

\*\*\*\*\*

*Principia* yayınlandığında Newton, Trinity College'da yaklaşık yirmi yıldır Lucasian Matematik profesörlüğü yapıyordu. Bu, dünyanın önde gelen matematikçi ve fizikçilerine yakışır seçkin bir konumdu. (Bugün bu konumda olan Lucasian profesörleri arasında Stephen Hawking ve sicim -string-

kuramını bulanlardan biri olan Michael Green yer almaktadır. Newton bu konuma yüksek lisans diplomasını aldıktan sadece bir yıl sonra, 1669 yılında getirilmişti ve yirmi altı yaşındaydı.) *Principia*'nın yayınlanmasının ardından Newton uluslararası bir yıldız olmuş ve kısa sürede Leibniz de bunu fark etmişti.<sup>28</sup>

Yaşam aralıkları boyunca Newton ile Leibniz arasındaki en ciddi tartışmanın konusu uzayla veya fizikle alakalı değildi. Woolsthorpe'de veba döneminde Newton'un matematik alanında geliştirdiği Calculus ile ilgiliydi ve o olmadan *Principia*'nın ortaya çıkması mümkün olamazdı.<sup>29</sup> Mesele, Newton'un 1660'ların ortasında Calculusu ilk olarak geliştirmiş olmasına ve Cambridge'teki matematikçilere birkaç belge dağıtmış olmasına rağmen, çok çok daha sonralarına kadar bile bu başlık altında herhangi bir yayın yayınlamamış olmasından kaynaklanıyordu. *Principia* dahi, Calculustan bazı yöntemler kullanmış olsa da detaylı veya sistematik bir üslup taşımıyordu. Newton, ancak 1693'te bu konuda tam anlamıyla bir yayın yapmıştı.

Bu arada Leibniz de 1677 yılından itibaren Calculus hakkında farklı bir işaretleme kullanarak birkaç detaylı makale yayımlamıştı. Notları onun bu konu üzerinde 1675 yılında düşünmeye başladığını gösteriyor. Elbette bu, Newton'un benzer düşünceler geliştirdiği zamanlardan on yıl sonrasına denk geliyor ve görünüme göre kimse Newton'un ilk önce Calculus'a ulaştığını veya Leibniz'den bağımsız olarak yapıp yapmadığını da sorgulamıyor. Tartışma, Leibniz'in Newton'dan bağımsız olarak mı Calculus'u bulmuş olduğunu irdeliyor ya da Newton ve takipçilerinin daha sonraları

iddia ettikleri şekilde, Leibniz'in her nasılsa Newton'un erken, yayınlanmamış (ancak el altında dolaşan) el yazmalarını edinmiş ve fikirleri çalmış olması üzerineydi.

Bu tartışmanın tuhaf olan tarafı, onsekizinci yüzyılın başlarında yani Leibniz'in makalelerinin yayınlanmasından onlarca yıl sonra ortaya çıkmasıdır. Leibniz, 1670'lerde Calculus'u ilk yayınladığında İngiltere'de kimse itirazda bulunmadı. Newton'un nihayet çalışmasını yayınladığı 1690'larda bile o ve Leibniz birbirlerinin ve hatta Calculus (Leibniz tarzındaki) hakkında hem Newton'a hem de Leibniz'e atıfta bulunarak, 1696 yılında bir kitap yayınlayan, çağdaşları Fransız matematikçi Guillaume Francois Antoine de L'Hopital'in katkılarını kabul etmiş görünüyorlardı.<sup>30</sup>

Newton'un *Opticks* adlı çalışmasının bir ekiyle ilgili anonim bir eleştirinin 1705 yılında yayınlanmasıyla beraber işler çirkinleşmeye başlamıştı.<sup>31</sup> Bu ekte, kitapta bulunan fizikle alakalı Calculus'taki konular kapsamlı olarak ele alınıyordu. Leibniz'den başkası olmadığı anlaşılan eleştirmen, Newton'un katkılarıyla Leibniz'inkilerin karşılaştırılmasına birkaç sayfa yer vermişti. Üslubu bugün bile yeterince yumuşak görünse de o zamanlar bu eleştiri, Newton'un eserinin Leibniz'in kendi çalışmasından daha az önem taşıdığı, üstelik Newton'un Leibniz'in yayınladığı çalışmaları geliştirmeye yıllar harcadığı ve Newton'un ulaştığı nihai eserin ancak 1690'larda yayınlanabildiği ve 1700'lerin, Newton'un kabul ettiğinden çok daha fazla Leibniz'e borçlu olduğu imalarında bulunduğu şeklinde yorumlandı.

Leibniz'in eleştirisi ortaya çıktığında Newton, Londra'da yaşıyordu. 1690'ların başında, muhtemelen simya deneyleri

sırasında maruz kaldığı civa zehirlenmesinin sonucu sinirsel çöküntü yaşadı.<sup>32</sup> Sonra, 1696'da Londra'da Kraliyet Darphanesi müdürü oldu ve entelektüel desteğini sürdüreceğine söz vererek Cambridge'den ayrıldı. (Nihayet 1701 yılında profesörlük görevinden istifa etti.) 1703 yılında Kraliyet Topluluğu başkanlığına seçildi ve 1727 yılında vefat edene kadar her iki görevine de devam etti. Newton, Londra'dayken bazı bilimsel çalışmalar yapmaya devam etti. Bunlar arasında *Principia*'nın birkaç büyük revizyonunun yayınlanması da vardı. Ancak o zaman kendisiyle ilgili en iyi bilinen eser zaten ortaya konulmuştu ve artık dikkatinin çoğunu para basma ya da teoloji gibi başka konulara veriyordu.<sup>33</sup> Bu şekilde dahi Londra'daki görevleri Cambridge'deki konumundan daha yüksekti ve Newton'un siyasi ve bilimsel etkisi daha da artıyordu.

Böylece Leibniz'in eleştirisi, bir bilim insanına saldırmanın yanında önemli bir İngiliz şahsiyeti de hedef almış oluyordu. Kraliyet Topluluğu'nun başkanı olarak İngiliz bilimsel müessesesinin fiili lideriydi. Bu büyük bir hakaret ve kabalıktı. Newton'un takipçilerinden biri olan John Keill adlı bir İskoç matematikçi, bir süre sonra bir cevap yazarak Leibniz'in Newton'dan intihalde bulunduğu iddiasını ortaya attı. Bu da Leibniz'in resmi olarak Londra Kraliyet Topluluğu'na başvurarak konuya müdahale edilmesi ve sonuca bağlanmasını talep etmesine kadar süren bir dizi mektup ve cevabın gidip gelmesi sonucunu doğurdu.

Elbette Newton, Kraliyet Topluluğu'nun başkanıydı. Konuyu incelemekle görevlendirilen bilim insanları Leibniz'in suçlamalarıyla daha katı hâle gelmiş Newtonculardı.

1712’de ortaya koydukları belgede Newton’un, zaman çizelgesini özenle detaylandırarak Calculusun tamamını bağımsız bir şekilde, Leibniz’in önemli bir katkısı olmaksızın geliştirmiş olduğu sonucuna ulaşmışlardı. Bu belgenin ardından, Kıta Avrupalı ve İngiliz matematikçiler arasındaki iletişim bozulmuş, on sekizinci yüzyılın önemli bir kısmında ilişkiler gergin kalmıştı.

\*\*\*\*\*

Leibniz’in 1715’te Ansbachlı Caroline’ye yazmasının arka planında işte bu acı anlaşmazlık yer alıyordu.<sup>34</sup> 1701’de Parlamento, Katoliklerin İngiltere tahtına çıkamayacağını belirten Veraset Kanunu’nu kabul etmişti. Bu kanun, İngiltere’yi yaklaşık bir asır ve İskoçya’yı üç yüzyıldan fazla bir süre boyunca yöneten Stuart hanedanının kalan üyelerinin, yeni bir araya gelmiş olan Büyük Britanya’ya kral ya da kraliçe olmalarını engellemişti.

Böylece son Protestan Stuart olan Kraliçe Anne, 1714’te vefat ediyor ve taht en yakın Protestan olan kardeş torunu, Leibniz’in Brunswick-Luneberg Prensi olmasına yardımcı olduğu Hannoverli George’a geçiyordu. George, İngiltere Kralı I. George olduktan sonra Leibniz kral, kralın oğlu George Augustus ve 1704’ten beri hocalığını yaptığı eşi Caroline ile ilişkilerini sürdürdü.

Bu yüzden Caroline, Leibniz’in mektubunda değindiği Newton’un İngiltere teolojisine yaptığı olumsuz tesiri ilgiyle okumuştur. Telaş içerisinde, mektupları bir İngiliz felsefeci ve teolog olan Samuel Clarke’a iletti. Kraliçe Anne döneminde kraliyet evinde papaz olan Clarke, Saray’da tanınan

bir şahsiyetti. Üstelik Newton'un muhitinde kaldığı, Piccadily'deki St. James Kilisesi'nin papazı olarak daha önce Newton'un fikirlerinin açıkça savunuculuğunu yapmış olsa da onu şahsen tanıma fırsatı bulmuştu. Clarke, Leibniz'in Kasım 1716'da ölümüne kadar devam eden bir yazışma dizisini başlatarak Leibniz'e cevap vermiştir.<sup>35</sup>

Leibniz'in ölümünden sonra, kendisi sembolik olarak bunlara taraf olsa da yazışmaları kendi ismi altında yayınladı. Newton'un Clarke'ın taslaklarından haberdar olduğu ve gönderilmeden önce ona fikir verdiği kesinlik kazanmıştır.<sup>36</sup> (Bazı tarihçiler Newton'un bu mektupların gerçek yazarı olduğunu düşünüyorlardı.) Bu mektuplar, teoloji ve metafizik başta olmak üzere pek çok konuya değinmişti. Ancak en etkili metinler, baskın temalara sadece teğet olarak değinirdi. Leibniz, Clarke'a gönderdiği mektuplarda, Newton'un uzay ve zamanla ilgili görüşleri hakkındaki en önemli eleştirilerini yöneltmiş, Clarke da Newton'un rehberliğinde cevaplarını sunmuştu.

Leibniz'in Newton'un uzayla ilgili görüşlerine ilişkin eleştirilerini en iyi şekilde anlayabilmek için, üzerinde anlaşmaya vardıkları konuyla başlamakta yarar var. Newton ve Leibniz belli bir zamanda, yerler arasında hangi geometrik ilişkilerin var olduğu konusunda yani, uzayın geometrisi hakkında tamamen anlaşmaya varmışlardı. Bu geometri, biraz anakronistik olarak, aşağıdaki şekilde karakterize edilebilir. Birincisi hem Newton hem de Leibniz için uzay, Newton'un yer olarak adlandırdığı, cisimler için olası lokasyonların toplamından oluşur. Sonsuz sayıdaki küçük yere, sonsuz sayıdaki küçük cismin konumlandırılabilceği lokasyonlara uzay

noktaları diyeceğiz. O hâlde uzay, sonsuz sayıda nokta topluluğundan oluşmaktadır.<sup>37</sup>

Bu noktalar çeşitli şekillerde birbirleriyle ilişki kurarlar. Örneğin, herhangi iki noktadan bir doğru geçer. Bu doğruyu noktalardan birinden başlayıp diğerinde sona eren bir ok olarak düşünebiliriz. Bu düz çizgiye, çizgi ile bağlanan iki nokta arasındaki mesafeyi temsil eden bir uzunluk olarak düşündüğümüz bir sayı atayabiliriz. Daha genel anlamda, herhangi iki nokta arasında eğri çizgiler çizdiğimizi ve bu eğri çizginin uzunluğunu hesaplamak için bu eğri çizgiler boyunca bütün noktalar arasındaki mesafeleri kullandığımızı hayal edebiliriz. Bunu yaptığımızda, iki nokta arasındaki düz bir çizginin o noktalar arasındaki en kısa çizgi olduğu görülecektir. Aynı noktadan başlayan iki düz çizgi arasında başka bir ilişki daha vardır: Aralarında bir açı vardır.

Şimdi uzayda bir nokta seçtiğimi varsayalım. (Hangi nokta olduğunun hiçbir önemi yok. Söyleyeceğim şey herhangi bir nokta için geçerlidir.) Bu noktaya  $p$  diyelim. Şimdi  $p$  noktasından başlayan bir ok veya düz çizgi düşünün. Buna da  $v$  diyelim. Buraya kadar bazı şeyleri belirlediğimize göre, bu çizginin de bittiği bir yer olacaktır. Oraya da  $q$  diyelim.  $v$  oku ile yapabileceğim birkaç şey var. Yapabileceğim şeylerden biri onu uzatmak ya da kısaltmak olabilir. Yani, okun uzunluğunu uzatabilir ya da kısaltabilir, hatta yönünü ters çevirebilirim. Bunu yaparsam, ok yine  $p$ 'den başlayacak ancak artık  $q$ 'da bitmeyecek; belki  $q$ ' noktasında bitecektir. Bu durum bizim uzayın sonsuz olduğu fikrini yakalamamızı sağlıyor.  $p$  noktasından çıkan bir  $v$  okunu istediğim kadar uzatabilirim.  $v$  okunun her seferinde biteceği bir  $q$ ' noktası olacaktır. Baş-

ka bir deyişle, p noktasından canımın istediği kadar uzaklaşabileceğim noktalar vardır.<sup>38</sup>

v okuyla yapabileceğim ikinci bir şey de yine p'den başlayan başka bir ok eklemek olabilir. p'den başlayan ikinci bir u oku düşünelim. Şimdi bu okun başlangıç noktasını, uzunluk veya yönünü değiştirmeden v okunun bittiği q noktasına taşıyalım. Bu yeni u' oku, q'dan başlayacak ve bir noktada bitecektir. Bu noktaya da r adını verelim. p ve r noktaları uzayda sadece iki nokta olduğu için, p'den başlayan ve r ile biten bir ok oluşur. Bu ok, v'yi u'yu ekleyerek elde ettiğim bir sonuçtur.

Tüm bu uzatma, kısaltma ve ok ekleme işlemleri Leibniz ve Newton'un üzerinde mutabakata vardıkları başka bir şeyi tanımlamamızı sağladı. Bu da uzayın üç boyutlu olduğudur. Uzaydaki herhangi bir noktadan çıkan üç ok bulabilir ve bunları x, y, z olarak adlandırarak şu iki özelliği arayabilirim: (1) x okunun (veya sırasıyla y veya z'yi) uzatma, kısaltma veya ekleme (ve sırasıyla diğer çiftleri) gibi yollarla oluşturulma imkânı bulunmamaktadır; (2) p'den başlayan okların tümü uzatma, kısaltma ve/veya bu okların üçünün hepsinin eklenmesiyle oluşturulmuştur. x, y ve z noktalarını dördüncü bir noktanın işaret edebileceği başka bir nokta bulunmayan bir uzayda farklı ve bağımsız üç yönü işaret eden oklar olarak düşünebiliriz. Uzay üç boyutludur çünkü bu şekilde ne eksik ne fazla, sadece üç yön bulunmaktadır.

Dolayısıyla Newton ve Leibniz bu konuda şu şekilde mutabakata vardılar: Uzay sonsuz ve üç boyutludur, verilen iki noktadan bir doğru geçer ve bu noktalar arasında nesnel mesafeler ve doğrular arasında da açılar bulunmaktadır.

Fakat madem tüm bunlar üzerinde mutabakata varmışlardı, o hâlde Clarke'ın bahsettiği anlaşmazlık ne hakkında olabildi?

\*\*\*\*\*

Leibniz'in, Leibniz-Clarke yazışmalarındaki en meşhur argümanı, Newton'un *Principia*'dan çıkarsadığı uzay ve yer tanımlamalarıyla neyi kastettiğine ilişkin bazı önemli noktaları hedef alıyordu. Newton'a göre, bir cismin yerleşebileceği tüm yerler olan uzayda, verilen bir zamanda verilen bir cismin bir yer kapladığını hatırlayalım. Newton bu terimleri sunarken bir elde mutlak uzay ve yer, diğerinde görelî uzay ve zaman olmak üzere aralarında bir ayrım yaptı.

“Burası” veya “orası” gibi kelimeleri kullanırken izafi yerlere atıfta bulunuruz yani bir kişiye göre izafi olan yerlerden bahsediyoruz.<sup>39</sup> Mesafe gibi nicelikleri ölçmek için cetvel gibi belli bir standart kullanırız. Belli bir referans türü kullanmaksızın konum veya mesafeleri tanımlamak mümkün olmayacaktır.

Yine de Newton'a göre, bir nevi Tanrı'nın görüşünden belirli bir gözlemci ya da ölçü aletinin referansı olmadan uzay ve yer üzerinde düşünmek mümkün değildir. Bu Newton'un mutlak uzay ve yer kavramıyla kastettiği şeydir. O zaman, izafi yer tespit çabalarımız mutlak kavramların (kusurlu) tanımlamaları olarak anlaşılmalıdır. Buradan yarım metre uzakta olan bir sandalye veya dünyadan 93 milyon mil uzaktaki güneşten bahsederken, mutlak yerler hakkında konuşabilmek için izafi yerler kullanmak durumunda kalıyorum. Mutlak uzay kavramı, herhangi bir bakış açısına değil, tüm mutlak yerlere dayanmaktadır. Yani gözlemci ya da

ölçüm aletlerinden bağımsız şekilde tüm eşya konumlarında bulunur.

Leibniz, mutlak uzay fikrinin metafizik olarak tutarsız olduğunu düşünüyordu. (Newton'un savunduğu mutlak zamanı da reddetmiştir.)<sup>40</sup> Bunu desteklemek için, şimdiki adıyla kaydırma (shift) argümanını kullanmıştır.<sup>41</sup> Bu argümanın anlaşılması amacıyla, mutlak uzay kavramına inandığınızı varsayalım. Tüm dünyayı bir anda hayal edelim. Bu anda, her şey (her cisim) mutlak uzay içerisinde bir bölgede bir yer işgal etmelidir. Şimdi de evrendeki tüm cisimlerin, dünyanın merkezini güneşin merkezine bağlayan hat yönünde söz gelimi 1,5 metre kaydırıldığını varsayalım. (Elbette bu varsayımda dünya ve güneşin kendileri de kaydırılmalıdır.)

Her şey kaymış olacağından, tüm izafi noktalar aynı kalacaktır: Açı veya mesafelerin hiçbirisi değişmeyecektir. (Newton ve Leibniz'in mutabakata vardığı geometrik nicelikler anlamlı ve ölçülebilir olacaktır.) Yine her şey kaymış olduğundan, her nesne farklı bir mutlak uzay parçasını işgal edecektir. Başka bir deyişle, sıradan yöntemlerimizi kullanarak tarif edemeyeceğimiz ya da ölçemeyeceğimiz şekilde, her şeyin konumunu mutlak uzaya göre değiştirebiliriz. Bu yüzden evrendeki her şeyin, aralarında ölçülebilir veya fiziksel bir fark bulunmayan (her olası kayma için sonsuz sayıda) iki farklı olası dizilişi bulunmalıdır.

Leibniz'e göre bu argüman, Newton'un mutlak uzay fikri hakkındaki iki temel sorunu ortaya çıkarmıştır. Öncelikle, Leibniz iki fiziksel durumun birbirinden ayırt edilemez olması hâlinde, ilkesel olarak da olsa bunların aynı olması gerek-

tiğine inanıyordu. Kabaca, iki şey farklı olacaksa aralarında farklılık gösterdikleri bir şeyler olmalı; yani bazı özellikleri farklı olmalıdır. Bu fikrini *Ayırt Edilmezlerin Özdeşliği* (*Identity of Indiscernables*) adlı eserinde dile getirmişti. Fakat burada, Leibniz ayırt edilebilir olmayan iki durum bulunduğunu iddia etmiştir. Bu yüzden, farklı durumların olmadığı mutlak uzayın gerçek olmadığı sonucuna ulaşmıştı.

İkinci problem daha da derinden gidiyordu. Leibniz'in de tartıştığı gibi, eğer mutlak uzayın varlığı, orijinal evren ile kaymış evrenin fiziksel olarak önemli bir şekilde farklılık göstermediğini ima ettiyse, Tanrı evreni yaratırken evrendeki bütün cisimleri mutlak uzayda nereye koyacağına ilişkin bir seçim yapmış olmalıydı. (Bu, Leibniz'in uzayla ilgili argümanlarını, Clarke ile aralarındaki yazışmalarında ne şekilde teolojik konularla bağlantılandığını göstermektedir.) Ve bu tercih tamamen keyfi olurdu: Tanrı, herhangi bir fiziksel niceliği değiştirmeksizin farklı bir seçimde yapabilirdi. Leibniz'e göre bu imkânsızdı. Çünkü bu, Yeterli Neden İlkesi (Principle of Sufficient Reason) olarak adlandırdığı, önemli bir neden olmaksızın kendisinin ikinci ilkesini ihlal etmek olurdu. Bu ilkeye göre (yine kabaca), Tanrı belli bir nedeni olmaksızın değişiklik yapamazdı. Keyfi davranmak, onun sonsuz rasyonelliğiyle tutarsızlık oluştururdu. Ve yine, mutlak uzay imkânsızdı.

\*\*\*\*\*

Leibniz'in argümanını tek başına düşünürken, anlaşmazlığın teoloji ve metafizik kombinasyonu hâline geldiğini ve fizikle pek alakası kalmadığını gözlemleyebiliriz. Ancak Clarke'ın Leibniz'e cevabını dikkatli biçimde ele aldığımızda anlaş-

mazlığın özünün tam olarak nerde bulunduğunu görebiliriz. Bu aynı zamanda, ilk olarak Newton'un mutlak uzay ve mutlak yer kavramlarını metafiziğe bulaşmanın çok ötesinde ortaya koyduğunu, Newton'un Principia fiziğinin anlam kazanabilmesi için bu kavramlara ihtiyaç duyduğuna inandığı konularını da gösteriyordu.<sup>42</sup>

Clarke, Leibniz'e verdiği cevaplarda gerçekten yeni olan bir şey sunmamıştır. Verdiği yanıtlar arasında en ikna edici olanı Principia'daki önemli bir metne işaret etmişti.<sup>43</sup> Bu pasaj, Newton'un izafi/mutlak ayrımını takdim ettiği bölümün sonunda yer alır ama doğrudan mutlak alan veya yere atıfta bulunmaz. Bunun yerine mutlak hareketi ele alır.

Yukarıda da ifade ettiğim gibi Newton'un *Principia*'daki esas amacı, hareket üzerinde etkili olan yasaları sunmak ve bu yasaların sonuçlarını araştırmaktır. Newton fiziğinin temelini oluşturan üç hareket yasasını ortaya koydu: Bunlar aşağıdaki şekilde ifade edilebilir: (1) Bir cisme dışardan bir kuvvet etki etmedikçe düz bir çizgi üzerinde sabit bir hızda hareket etmeye devam eder. (2) Bir cisim üzerine uygulanan kuvvet, kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir. Burada ivme cismin düz çizgiden ve sabit hızdan ne kadar saptığını ölçmektedir. ( $F=m.a$ ) (3) Bir cismin diğerine uyguladığı kuvvet kadar diğer cisim de ona eşit ve zıt yönde kuvvet uygular. Newton, dünyada gördüğümüz hareketlerin bazılarını açıklayan evrensel yer çekimi yasasını da takdim etmiştir. Yer çekimi, Newton'un hareket yasaları tarafından yönetilen kuvvetlerinden birinin örneğidir.

Hayati nokta da burasıdır. Bu yasaları yazabilmek için Newton hareketle ne demek istediğini tanımlamaya ihtiyaç

duyuyordu. Sonuçta hareket ve kuvvet yasalar çerçevesinde ortaya çıkan temel kavramlardır.<sup>44</sup> Bunu yapmak için, ortaya başka bir mutlak/izafi ayrımı daha attı: Mutlak hareket ve izafi hareket arasındaki ayrım. İzafi yer gibi, izafi hareket de bir gözlemci veya ölçüm yapmak amaçlarına yönelik bir araçlar sistemi olarak, belli bir cisim referans alınarak gözlenen harekettir.

Otoyolda araba kullandığınızı ve başka bir arabanın da sizi solluyor olduğunu varsayalım. Aracınız hem yola hem de diğer arabaya göreli olarak hareket etmektedir. Fakat siz, bu arada kendi aracınıza göre hareket etmiyorsunuz. Yola ve diğer araca göre hareket ediyorsunuz. Bunların hepsi göreceli hareketlerdir.

Mutlak hareket, başka bir referans cisimden bağımsız olarak gerçekleşen harekettir. Yani mutlak uzay referansına göre hareket eder. Newton fiziği açısından son paragrafta anlatılan tüm şeyler, siz ve arabanız gibi bazı şeyler bir diğerine göre hareket etmiyor olmasına rağmen mutlak hareket hâlinindedir.<sup>45</sup> Bunun nedeni Dünya güneş yörüngesinde ilerlerken, Güneş de Samanyolu Galaksisi'nin merkezinde dönerken, dünyaya göre sabit olan şeyin yol olması ve onun üzerinde mesafe kateden tüm arabaların da dünya eksenini etrafında dönüyor olmasıdır.

Newton'un hareket yasalarının geçerli olduğu şey mutlak harekettir. Bunu görmek için Newton'un ilk yasasını düşünelim. Bunu biraz önce verdiğimiz araba örneğine uyguladığımızı varsayalım. Sürtünme ile ilgili endişeniz varsa, bunları galaksiler arası uzayın derinliklerinde yol alan roketler olarak düşünün. Bu yasanın izafi olan versiyonu, solunuzdan

geçen arabanın dışardan bir kuvvet etki etmediği sürece düz bir çizgi üzerinde, arabanıza göre sabit bir hızda devam etmesi gerektiğini söyleyecektir. Lakin bu doğru değil, aracınızın ve sizi geçmeye çalışan kişinin görelî hızlarını değiştirmenin kolay bir yolu var: Ayaklarınızla frenlerinize basmak! Bu durumda, kendi aracınıza bir kuvvet uygulamış olursunuz ama aracınızın görelî hızı da değişmiş olur. Gerçekten de nirengi (referans alınan) cismin hareketi keyfî olarak değişebileceği için izafî hareket esasına dayanan bir hareket yasası bulmak da mümkün olmayacaktır.<sup>46</sup> Yasanın işe yaraması için, genel olarak görelî hareketle ilgili olması gerekir. Bunun, mutlak hareketin sağlayabileceği özel bir hareket türü olması gerekiyordu.

Dolayısıyla Newton'un hareket kanunlarının anlam kazanabilmesi için mutlak hareketi tanımlaması gerekiyordu. Ama mutlak hareket mutlak yer üzerinde belli bir (mutlak) zamandaki değişim olmasından dolayı, mutlak hareketi tanımlamak için mutlak yeri tanımlamasının gerektiğine inanıyordu. Mutlak uzaya göre hareket etmenin anlamı buydu.

Leibniz tarafından bunların ne kadarının anlaşıldığı bilinmemektedir. Newton fiziğinin çeşitli bölümlerine şüpheyle yaklaşıyordu fakat kendi fizik kuramlarını geliştirmeye yönelik çabalarında Newton gibi o da varsayılan olarak düz çizgi, sabit hızda hareket ve mutlak hareket kavramlarını kabul etmiş görünüyordu. Ancak mutlak uzay olmadan bu tür hareketi anlamaya yönelik tutarlı bir hikâye ortaya koyamamıştı.<sup>47</sup> Yani bir yandan hareket yasası geliştirmeye uygun bir mutlak hareket kavramı olsun diyor, diğer yandan da mutlak uzay kavramını reddetmek istiyordu.

Leibniz'in mutlak uzaya karşı argümanları, bu kavram olmadan alternatif bir hareket tanımı verememiş olsa da ikna edici olabilirdi. Öyle olsaydı, Newton'un mutlak hareket fikrinde yanlış olan en azından bir şey olurdu. Aslında doğru olan daha çok şey vardır: Mutlak yer gibi Newton'un bakış açısındaki mutlak hareket de tespit edilemez nitelikte bulunursa, Leibniz mutlak uzaya karşı verdiği argümanların aynısını mutlak harekete karşı da verebilirdi. Örneğin, bütün dünyayı beş fit sola kaydırmak yerine, bütün bağıl hareketler aynı olacak şekilde, evrendeki her şeye hareket verdiği-nizi varsayın, fakat şimdi her şey mutlak uzaya göre sabit bir yönde sabit bir hızla hareket eder.<sup>48</sup>

Bu olasılık Newton'un *Principia*'da beklediği bir şeydi ve Clarke'ın da Leibniz'e yönelttiği pasajlar bunlardı. Newton, bir dereceye kadar mutlak hareketin saptanabilir olduğunu ileri sürüyordu. Verdiği örnek, fizik tarihinde çok ünlü olmuştu.<sup>49</sup> Suyla dolu bir kova olduğunu farz edelim. Kova, dünya üzerinde yeryüzüne göre sabit duruyorsa, suyun yüzeyi (aşağı yukarı) düz olacaktır. Şimdi, kovayı üstünden altına doğru uzanan eksenini etrafında döndürmeye başladığımızı varsayalım. Kova dönmeye başlarken, suyun yüzeyi yavaş yavaş şeklini değiştirecek, kenarlara yakın olan kısımlar yükselecek ve su yüzeyi neredeyse bir kap şeklini alacaktır.

Elbette, bu örnekte yeryüzüne göre dönmekte olan bir kovadan bahsedilmektedir. Fakat Newton bir adım daha attı. Suyla dolu tek bir kova dışında evrenin tamamen boş olduğunu varsayalım. Kovanın sabit durduğu durum ile hareket ettiği durum arasında bir fark olacağını iddia etti. Bu fark suyun yüzeyinin alacağı şekle bakarak kolaylıkla anla-

şılabilirdi. Ama şimdi, evrende kovanın kendilerine göreli olarak hareket edebileceği hiçbir şey yoktur.

Su yüzeyinin aldığı değişik şekiller arasındaki farklılıklar neyle açıklanabilirdi? Newton'a göre fark gelip mutlak hareketin değişik hâllerine dayanıyordu. Ve mutlak hareketi mutlak uzay yoluyla tanımladığı için yine de mutlak uzayın fiziksel önemi olduğunu iddia etmişti.

\*\*\*\*\*

Newton'un çarpıcı veba senesinden üç yüz yıl sonra, 1967'de yayınlanan çığır açıcı bir çalışmasında yirminci yüz-yıl filozofu Howard Stein felsefeci ve tarihçilerin *Principiadyı* anlayış biçimlerini önemli ölçüde değiştirecek şaşırtıcı bir gözlem yapmıştı.<sup>50</sup> Stein, Newton ve Leibniz arasındaki anlaşmazlığın özünde gerçekten başarılı bir fizik kuramı geliştirmek için hangi tür yapı kullanılması gerektiği olsaydı, o zaman anlaşmazlığın uzayın yapısına ilişkin olmayacağını; bundan ziyade uzay ve zaman arasındaki ilişkiye dair olacağını ileri sürüyordu. Bu, farklı zamanlarda aynı yerden bahsetmenin anlamlı olup olmadığı konusunda bir anlaşmazlıktı.

Elbette, farklı zamanlarda aynı yer hakkında sıklıkla konuştuğumuz açık durumlar mevcuttur. Örneğin evim, manav veya Virginia'nın farklı zamanlarını konuşabilirim. Birkaç yıl aynı evde yaşadığımı ya da her hafta manava gittiğimi veya bugün Virginia'nın Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bir eyalet olduğunu ama on sekizinci yüzyılın başlarında bir İngiliz kolonisi olduğunu söylersem demek istediğim şeyde muğlaklık kalmamış olur.

Fakat daha önce de gördüğümüz gibi bu konulara bakmanın bir başka yolu daha vardır. Sonuçta, arabanın içinde olma örneğinde olduğu gibi bahse konu tüm yerler yeryüzü üzerindedir ve yeryüzünün hareket ettiğine inanıyoruz. Dolayısıyla, tek bir anlam -daha doğru bir tabir ile bağlı bir anlam- olmasına rağmen benim önemsemiğim, evimin çeşitli diğer yol işaretlerine ve manavın evime ve Virginia'nın Kuzey Carolina ve Maryland'e göre konumu -ki bunlar değişik zamanlarda değişik yerlerdir- olduğundan, "benim evim", "manav" ve "Virginia'nın" değişik zamanlarda aynı yere denk gelmediği ikinci bir anlam daha vardır.

İkinci anlamın gerçekten de ilkinden farklı olup olmadığı veya Virginia'nın "gerçekten" yerini değiştirdiğini söylemesinin bir anlamı olup olmadığı temel sorumuzdur. Başka bir deyişle, durum sadece evimin etrafındaki diğer evlere göre konumunun değişmemesi (bu anlamda zaman içerisinde aynı yerde kalması) ancak Güneş, Mars ve Samanyolu Galaksisi'nin merkezi gibi bazı referans cisimlere göre hareket ediyor olması ve bu anlamda belirli bir zamanda aynı yerde kalmaması mıdır? Ya da bu yer değişikliklerinin görece anlamlarının tamamının doğru olup yine de yerle ilgili meydana gelen değişiklikler dikkate alınmaksızın, bir şeyin iki farklı zamanda aynı yerde olup olmadığı konusunun temel gerçekliği midir? Tahmin edebileceğiniz gibi farklı zamanlarda aynı yeri işgal eden belirli bir cisim olup olmadığından asla bahsedemeyecek olsak da Newton, konunun aslında böyle bir gerçekliği olduğunu düşünmüştü. Leibniz de saptayabileceğimiz tek şeyin görece hareketler olmasından dolayı, farklı zamanlarda aynı yeri veya farklı yeri işgal eden belirli

bir cisim olup olmadığı hakkında bir bulgu olmadığını düşünüyordu.<sup>51</sup>

Şimdiye kadar bu sadece vitrin süsleme işiydi: Zamana göre yerin aynılığı hakkında düşünmek sadece yukarıda anlatılan tartışmayı, biraz farklı terimlerle yeniden açmaktır. Fakat bu yeni düşünme biçimi daha derin bir kavrayış sağlamaktadır. Yukarıda da değindiğim gibi, Newton ve Leibniz, uzayın geometrisi konusunda mutabakata varmış ama uzay-zaman geometrisi konusunda uzlaşmaya varmamışlardır.

“Uzay-zaman” ile neyi kastediyorum? Yukarıda açıkladığım gibi, uzayı ok veya düz çizgilerle ilişkilendirilmiş noktalar topluluğu olarak düşünebiliriz. Uzay-zaman da yine düz çizgilerle ilişkilendirilen noktalar topluluğu olarak düşünülebilir lakin burada uzay üç boyutluyken, uzay-zaman dört boyutludur. Uzay-zamandaki herhangi bir  $p$  noktasında dört ok bulabilirim. Bunları  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ve  $t$  olarak adlandırabiliriz. (1) Bu dördünden hiçbirini büyütme, küçültme ve diğer üçünü ekleme gibi yollarla oluşturulamaz. (2) Büyütme, küçültme ve/veya  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ve  $t$ 'yi birlikte ekleyerek başka bir ok oluşturabilirim. Bu dört boyutlu yapıyı aşağı yukarı, iki boyutlu sayfalar yığınının üç boyutlu bir kitabı oluşturması gibi dördüncü bir boyutta üst üste dizilmiş sonsuz sayıdaki uzay kopyalarından doğan bir yapı olarak düşünebiliriz.

Olağan uzaydaki noktaların, çok küçük cisimlerin işgal edebileceği sonsuz sayıdaki küçük yerler olmalarını beklediğimizi hatırlayalım. Fakat uzay-zamandaki bir nokta nedir? Uzay ve zamandaki bir konumdur. Bu tarz uzay-zamansal (spatio-temporal) konumları işgal eden şeylere

de “olaylar” denir. Olay, küçük bir uzay bölgesinde belirli bir zamanda meydana gelen şeylerdir. Parmaklarınızı şaklatmanız veya ilk öpücüğünüzdür.<sup>52</sup> Ne uzayda uzatılan nesneler (örneğin bir ip) ne de zamanla devamlılık gösteren nesnelerin (diyelim ki bir parçacık) uzay-zamandaki tekil noktalarla temsil edilmediğine dikkat edin. Bunun yerine, bunlar birçok farklı olaydan oluşan çeşitli eğri ve yüzeylerle temsil edilirler.

Yukarıda, uzaydan bahsederken noktaların mesafelerle ilişkilendirildiklerini görmüştük. Uzay-zamandaki noktalar arasında analog ilişkiler bulunur. Böyle bir ilişki eşzamanlılıktır (simultaneity): İki elimle iki çift parmak kullanarak aynı anda şaklatmam gibi, aynı belirli zamanda iki olay meydana gelebilir. Daha genel bir ifadeyle, eş zamanlı olmayan olaylar belli bir sırayla meydana gelir: Birincisi gerçekleşir, sonra da diğeri olur. Son olarak, süre kavramı var: İki olay arasında ne kadar zaman geçtiğini söyleyebilmem değişik zamanlarda gerçekleşen olaylar arasındaki zaman mesafesiyle ifade edilir. Belirli bir zamanda uzayın bir kopyasına denk düşen karşılıklı eş zamanlı olaylar topluluğu olarak düşünebilirim. Ve olayların zamansal sıralaması da bunları birbirini takip eden zamanlarda ardışık olarak düzenlenmiş bu uzay kopyaları olarak düşünmeme izin verir.

Bu uzay kopyalarının her biri, aynen benim yukarıda anlattığım şekildedir: Noktalar arasında nesnel bir mesafe olan, düz çizgiler arasında açı bulunan ve üç boyutlu. Fakat şimdi, artık şeylerin zaman içinde gerçekleştiği büyük bir konteyner hayal etmeliyiz. Her bin anda farklı bir uzay kopyası olduğunu hayal ediyorum.

Stein çalışmasında az önce anlattığım dört boyutlu uzay-zaman yapısına, *Principia* fiziği için tam olarak ihtiyaç duyduğu yapı olduğundan bahisle, Galileo Galilei şerefine “Galilei uzay-zamanı” adını vermişti. Yukarıda gördüğümüz üzere Newton’un *Principia* için ihtiyaç duyduğu şey, cisimlerin uzayda sabit bir hızda, düz bir çizgi boyunca ilerlediği, objektif, mutlak, göreceli olmayan bir anlamdı.<sup>53</sup> Kuvvet, cisimlerin ivmelenmelerine, hız ve yönlerinde değişiklik olmasına neden olur. Şimdi elimizde şu var: Bir cismin, ardışık zamanlarda cismin konumunu izleyerek elde ettiğiniz uzay-zaman içerisindeki eğrisi düz ise, düz bir çizgi boyunca sabit bir hızda hareket ettiğini söyleyebiliriz.

Stein’in yaptığı büyük tespitlerden biri, bu uzay-zaman yapısının Newton’un *Principia*’sı için gerekli olduğunu düşündüğü şeydi. Yukarıda söylediğim gibi Newton, *Principia* ve diğer platformlarda mutlak uzay ve mutlak yeri savunduğu zaman cisimlerin farklı zamanlarda aynı yeri işgal edip etmediklerine ilişkin maddenin bir gerçekliği olması gerekliliğini belirtiyordu. Yani, bir cismin mutlak uzaya göre sabit olup olmadığını söyleyebilmek için yeterli yapı olmalıydı. Ve henüz açıkladığım uzay ve zaman arasındaki ilişki, Newton’un hareket yasalarını anlaması için varsayması gereken minimum bilgi düzeyi bir cismin eylemsiz olup olmadığını söylememiz için yeterli olmamaktadır.<sup>54</sup> Bunun sebebi, uzay-zamanın bir diğeri üzerine yığılmış uzay kopyalarından oluşmuş olmasına rağmen, bir kopya (bir kopyadaki uzay) içerisindeki yerlerin, bir önce veya bir sonra gelen kopyalarla nasıl bağlandığı hakkında hiçbir şey söylememiş olmamdır. Şimdiye kadar verdiğim şey, sabit hızlı hareketle

uzay kopyalarını boydan boya ve tüm yönlerden ve çizgilerin farklı durumlarına karşılık gelerek kesen, geniş bir düz çizgiler topluluğudur. Bu yönlerden hiçbirisi özel bir durum olarak, yani eylemsizlik durumu olarak algılanmamaktadır. Bunun yerine bu çizgiler bize, bir zamandaki yerlerle diğer zamandaki yerleri ilişkilendirmenin çok çeşitli ve eşit derecede güzel yollarını verir.

Başka bir deyişle Newton, yasalarının daha temel ve mutlak bir ivme kavramına ihtiyaç duyduğu konusunda haklıydı. Fakat mutlak ivmenin, mutlak hızı (veya mutlak sürat) varsayması gerektirdiği konusunda yanlış düşünüyordu. Gerçekte, mutlak uzay veya mutlak yere ihtiyacı yoktu.

Farkı görmek için Newton'un kova örneğini tekrar düşünün. Kova dönerken, su yüzeyinin kenarları yukarı doğru kıvrılır. Newton, bunu bir cismin hareket hâlinde olmasının bazı fiziksel sonuçları olduğunu ifade etmek için kullanmıştı. Ancak kova sabit hızda, düz bir çizgi boyunca hareket etmemekte, dönmektedir. Bu, kovanın her bir parçasının bir daire etrafında dolaşırken hareket yönünü sürekli olarak değiştirdiği anlamına gelir. Ve bu tür bir değişim bir ivme çeşididir. Newton'un örneği, ivmelenen cisimlerin bazı fiziksel sonuçlar doğurduğunu göstermiştir.

Sabit hızdaki böyle bir davranışla, düz çizgi boyunca hareketi karşılaştırabilirsiniz. Dönen bir kova yerine, bir trenin zemininde su dolu bir kova düşünün. Tren istasyondayken suyun yüzeyi düz olacaktır. Fakat tren hareket etmeye başladığında, su yüzeyi değişecektir: Trenin arkasına doğru yüzey yükselecek ve önüne doğru alçalacaktır.

Bu, trenin hızlandığı konusunda fiziksel bir işarettir. Fakat

tren belli bir hıza ulaştıktan sonra hızlanmadan veya yavaşlamadan düz bir rotada devam ederse ne olacaktır? Su yüzeyi yine düz bir hâl alacaktır? Kovadaki su yüzeyinin, tren istasyonda hareketsiz dururken su yüzeyinin aldığı durumdan ayırt edilebilir bir farkı olmayacaktır.

Bunların hepsi, Newton'un kovasının mutlak hareket ile mutlak hareketsizlik arasında sonuçta bir fark olduğunu göstermediği anlamına gelmektedir. Bunun yerine, mutlak ivme veya en azından mutlak dönüş ve ivmesiz hareket arasında fiziksel bir fark olduğunu göstermektedir.

Stein'in çalışmasının bu kadar heyecan verici olmasının sebebi kısmen buydu. Kendi ışığı altında, Newton'un mutlak uzay konusunda yanlış olduğunu (veya) en azından kendi hareket yasalarının mutlak uzay ve mutlak yere ihtiyaç duyduğu konusunda yanlış düşündüğünü gösterdi. Ancak bu, Leibniz'in haklı olduğu anlamına mı geliyordu? Tam olarak değil. Yukarıda belirttiğim gibi Leibniz'in tamamen tutarlı bir hareket teorisi geliştirdiği net değildir. Fakat en azından Leibniz-Clarke yazışmalarında, Leibniz dönüşler gibi ivmeli hareketlerin de dâhil olduğu tüm hareketlerin göreceli olduğunu iddia ettiği anlaşılmaktadır. Fakat bir cismin hızlanıp hızlanmadığı konusunda hiçbir gerçeklik yoksa, bir cismin uzay-zamanda düz veya eğri bir çizgiyi takip edip etmediğine dair de bir gerçeklik yok demektir. Başka bir deyişle Leibniz, Stein'in tanımladığı uzay-zaman geometrisini reddederdi gibi görünüyor. Ve en azından bu kadar olmaksızın, Newton'un yasaları başarılı şekilde uygulanamıyor.<sup>54</sup>

Stein yukarıda tanımlanan Galileo uzay-zaman yapısını belirleyen ilk kişi değildi. Bu onur, 1918'de *Uzay-Zaman Me-selesi (Space-Time Matter)* kitabını yayınlayan matematikçi Hermann Weyl'e aitti. Weyl izafiyet teorisinden (gelecek bölümün konusu) on yıl sonra fizikçileri uzay, zaman ve maddenin yapısını yeniden düşünmeye zorlamıştı. Bu da, Newton'un fikirlerinin fiziğe hâkim olduğu iki yüzyıldan fazla sürede bile, Newton'un yasaları tarafından öngörülen şekliyle uzay ve zaman arasındaki ilişkinin tam olarak anlaşıl-mamış olduğu anlamına geliyordu. Bu gerçek, *Principia* üzerine yazan iki önemli on sekizinci yüzyıl Fransız yorum-cusu olan Voltaire ve Emilie du Chatelet'in Newton üzerine yaptıkları yorumlarda Leibniz ve Clarke'ın uzay ve zamana dair argümanlarına açıkça yer verdikleri de göz önüne alın-dığında daha çarpıcı bir hâl almaktadır. Benzer şekilde, on sekizinci yüzyılın en önemli matematiksel fizikçisi Leonhard Euler de 1748'de yazışmalarla ilgili yorumlar yapan bir ça-lışma kaleme almıştır (Clarke'ın tarafını tutmuştur).<sup>55</sup>

Ve fizik, temellerindeki bu belirsizlikten yılmadan (ve gö-rünüşe göre yavaşlamadan) yoluna devam etmişti. En iyi teorilerimiz başa çıkılmaz kavramsal ve hatta matematiksel problemlerle karşı karşıya geldiğinde, çoğu zaman fizikçiler olarak çabalarımıza devam etmekten başka seçeneğimiz yoktur.

Yine de detaylar tam olarak çözülmemiş olsa bile Newton ve Leibniz'in hayatlarında dahi bazı şeyler netleş-mişti. Sonuçta, birkaç şey üzerinde anlaşmışlardı ve esas itibarıyla anlaşma noktaları fizikte ilerlemek için yeterliydi. Yukarıda gördüğümüz gibi, uzayın geometrisi ve üç boyutlu

oluşu, çizgilerin düzgünlüğü, konumlar arasındaki mesafeler ve düz çizgiler arasındaki açılar gibi temel ilişkileri üzerinde mutabakata varmışlardı. Verilen bir anda, bu geometrik olguların hiçbirinin referans veya gözlemci seçimine bağlı olmadığı konusunda da fikir birliğine sahiplerdi. (Aynı şeyin hareket hakkında söylenip söylenemeyeceği konusunda anlaşmazlığa düşmüşlerdi.) Descartes ve Aristo karşısında Leibniz'in gerçek dünyanın boş alanlara sahip olabileceğine inanmamasına rağmen, uzayın maddeden yoksun olabilesinin hem düşünülebilir hem de mümkün olabileceği konusunda da uzlaşmışlardı.

Yirminci yüzyılın başlangıcındaki fiziğin belkemiğini oluşturan şeyler, işte bu anlaşma noktaları, mutlak uzayın gerçekten var olup olmadığı varsayımları ve hareketin bazı hâllerinin özel durumları olmasıydı. Newton'dan önce ve Newton'un hayatı boyunca bu konuların hepsi çok tartışmalı meselelerdi. Sonraki yüzyıllarda dogma hâlini alsalar da hepsi yeniden ele alındı ve gözden geçirildi.



## 2. BÖLÜM

### UZAYIN KENDİ DALGALARI

1900 yılı yazında yirmi bir yaşında olan Albert Einstein, İsviçre'nin Zürich  hrindeki Zurich Polytechnic okulunda lisans eğitimini tamamlamı tı.<sup>56</sup> Bu okulun, bırakın İsviçre'yi Zürich'teki  niversiteler arasında bile bir prestiji yoktu. Öğrencileri fizik   retmenli ine hazırlayan Einstein'ın eğitim programından o sene dört   renci mezun olmuştu. Notlarına göre Einstein, bunlar arasında en sonda geliyordu. Aynı şekilde son araştırma projesinde öğrenciler arasındaki en d    k notu almıştı. Bu not, o zamanlarda kız arkadaşı ve daha sonra e i olan Mileva Maric'ten sonraki en d    k nottu. (Maric'in notları o kadar d    kt  ki mezun olmasına izin verilmemi ti.)

Einstein'ın fizik doktorasına devam edebilmesi için notları önemliydi. O zamanki şartlar içinde bunun ilk adımı, kendisini asistan olarak kabul edecek ve doktora tezine destek verecek bir profesör bulmaktı. Lisans eğitimi aldığı fak lteyle ba ladı. Maalesef, Polytechnic'teki iki fizik profesöründen biri Einstein'ın performansından hiç memnun değildi. Hatta bu profesör, derslere hazırlıksız gelmesinden ve gayretsiz tutumundan dolayı  niversite yönetiminden resmi olarak

kınama verilmesini talep etmişti. Yine bu profesör, Einstein'a deneysel fiziğe giriş dersinde (dersi geçmek için gerekli eşik puandan çok daha) düşük bir not vermişti. Einstein'ın bu profesörle hiçbir şansı olamazdı. O da Heinrich Weber isimli diğer profesöre dilekçe yazmıştı.

Weber'in Einstein hakkındaki görüşleri de diğer profesör-rünkinden daha iç açıcı değildi. Son araştırma projesinde Einstein'a düşük not veren profesör de Weber'den başkası değildi. Einstein, mezunlar arasında o sene asistanlık için fizik bölümüne başvuru yapan tek kişi olmasına rağmen Weber onu reddetti.

Çaresiz kalan Einstein sevdiği tek profesöre yazmak zorunda kalmıştı: Ona Calculus'u öğreten Adolf Hurwitz'e. Yine şansı yaver gitmeyecekti. Einstein derslerinin çoğunu asmış, bu da Adolf Hurwitz'in dikkatinden kaçmamıştı. Sonunda, hiçbir pozisyona kabul edilmeyerek matematik ve fizik sınıfında bu duruma düşen tek kişi olmuştu.

İki yıl boyunca çoğunlukla ortaokul öğrencilerine ders vermek gibi başka işlerde çalışmıştı. Avrupa çapında önde gelen fizikçilere asistan olabilmek için dilekçeler yazmış, red cevabını vermeye bile çok azı tenezzül etmişti. 1901 yılı Kasım'ında, kendi başına çalışarak Zürih Üniversitesi'ne doktora tezi sundu; reddedildi.<sup>57</sup> Üç ay sonra, Maric'in bir kız bebeği oldu.<sup>58</sup> Einstein ile henüz evli değillerdi ve o İsviçre'deyken Maric, Sırbistan'da ailesinin yanında yaşıyordu. Maric İsviçre'ye geldiğinde Einstein kendisini ziyaret bile etmedi. Maric sonra çocuğu Sırbistan'a bıraktı. Görünüşe göre Einstein kızıyla hiç tanışmamıştı. Nihayet, 1902 Haziran'ında İsviçre'nin Bern şehrinde bir patent memurluğu

iş i teklifi almış tı. Bu çok istediğ i akademik pozisyon dan dağ lar kadar farklıydı ama kabul etti, baş ka seçeneğ i de pek yoktu.

Einstein patent bürosunda yedi yıl kaldı.<sup>59</sup> Araştırmaları na katkı sağlayacak bir iş değ ildi. Haftanın altı g ünü çalış ması bekleniyordu. 1903'te Maric ile evlendi ve ertesi yıl bir oğ lu oldu. Bir yandan da genişleyen ailesine katkı sağlamak için öğrencilere ders verme iş lerine devam etti. Yine de kendi baş ına fizik alanında araştırmalarına devam edebil-  
mek için zaman ayırmayı baş ardı.

Ardından, 1905'te fizikte devrim yarattı. Üç kere.<sup>60</sup>

O sene Mart ayında, belli bir amaca yönelik olarak ış ığın “ış ık kuantumu (light quanta) ya da foton” olarak adlandırdı-ğ ı münferit, parçacığ a benzer enerji paketlerinden oluş tuğ u-  
nu ispatlayan bir makale yazdı.<sup>61</sup> Bu araştırma, 1921'de No-  
bel Ödülü'nü almasını sağlayan kuantum fiziğ ine giden yol-  
da önemli bir adım oldu. Bu o yılın ilk devrimiydi.

Sonraki ay moleküllerin büyüklüğ ünü tahmin etme konu-  
sunda yeni bir yöntem sunduğ u, o yıl için hazırladığ ı en  
önemsiz makalesini yazdı.<sup>62</sup> Bu çalış masını doktora tezi ola-  
rak Z ürich Üniversitesi'ne sundu. ilk başarısızlığ a uğ radığ ı  
giriş iminden üç buçuk yıl sonra tezi kabul edildi. On bir g ün  
sonra, Brown hareketi olarak bilinen bir süreçle atomlar ta-  
rafından titreştirildikleri küçük parçacıkların istatistiksel özel-  
likleri üzerine çok daha iddialı bir çalış ma yapmış tı.<sup>63</sup> Bu ça-  
lış ma kısa süre sonra, gözlemlenemeyen atomların var ol-  
duğ unu gösteren deneyler için teorik bir temel teşkil ede-  
cekti. Bu, ikinci devrim olmuş tu.

Haziran ayının sonunda, “Hareket Eden Cisimlerin Elekt-

rodinamiği Üzerine (*On the Electrodynamics of Moving Bodies*)” adlı dördüncü makalesini yazmıştı.<sup>64</sup> İzafiyet teorisini ilk kez ortaya atması, kendisiyle birlikte anılan fikirlerini topladığı bu eserde olmuştu. (Fikirlerini daha geliştirerek ünlü  $E=mc^2$  formülünü bu senenin beşinci çalışmasında ortaya atmıştı.)<sup>65</sup> Einstein’ın amacı ışığın nasıl hareket ettiğini daha iyi anlamaktı. Bunu çözebilmek için Newton’un uzunluk, eş-zamanlılık ve süre gibi temel kavramlarını gözden geçirmesi gerektiğini anlamıştı.<sup>66</sup> Bu da onu uzay ve zamanın yapısı hakkında radikal bir yeni anlayışa ve nihayet hiçbir şey olmasa dünyanın nasıl bir yer olabileceği hakkında çarpıcı yeni bir resme doğru taşıdı.

Bu da üçüncü devrim olmuştu.

\*\*\*\*\*

Einstein’ın 1905’teki belirsizliğine (ve pek de iyi olmayan akademik geçmişine) rağmen, izafiyet teorisi kısa süre içerisinde büyük bir katkı olarak kabul edildi.<sup>67</sup> Bunun nedeni, fizik alanındaki herkesin önemli gördüğü bir soruna yeni ve çekici bir çözüm sunmasıydı. Bu problem on dokuzuncu yüzyılın ortalarında, İskoç fizikçi James Clerk Maxwell’in eserlerinde ortaya çıkmıştı. Maxwell, Einstein ve Newton’un kullandığı radyoyu anlamasa da tarihin en büyük fizikçileri listesinde kesinlikle ilk beş içerisinde olmalıydı.<sup>68</sup>

Maxwell, pek çok konuda fiziğe katkıda bulundu. Bunların en önemlisi elektrik ve manyetizma teorisiydi.<sup>69</sup> Bu teoriye göre, Eski Yunanlılar ve Çinlilerce de bilinen demir ve diğer bazı metalleri çekebilen manyetik malzemeler (doğal mıknatıs taşı olarak da bilinir<sup>70</sup>) bulunuyordu. Elektrik, sürtü-

nen kehribarın bazı maddeleri çektiği bazılarını ise çekmediğini gösteren deneylerin yapıldığı 1600'lü yıllara kadar dayanan yeni bir keşifti. (Antik Yunanlılar ovulan kehribarın bazı maddeleri çekebileceğini biliyordu lakin belli ki elektrik ve manyetizmanın farkını ayırt edememişlerdi.) Uzaktan çekme ve itme kuvvetleri oluşturabilen gizemli kuvvetler olmaları açısından elektrik ve manyetizma genelde aynı insanlarca ve beraber çalışılan iki konu olmuştu.

On dokuzuncu yüzyılın ortalarında Maxwell bu konuyla ilgili çalışırken, fizikçiler çeşitli elektrik olaylarının (statik elektrik, elektrik akımı, piller) aynı fiziksel temellere dayanan farklı tezahürler olduklarını anladılar. Ana resme bakıldığında, bazı cisimlerin elektrik yükü olarak bilinen bir özellik taşıdıkları anlaşıyordu. Bu elektrik yüklü cisimler birbirlerine kuvvet uygular ve bu kuvvetler elektriksel etkilere neden olurlar.<sup>71</sup> Elektrik akımının manyetik olaylara sebep olduğu da biliniyor ve elektrik ve manyetizma arasında karmaşık bir etkileşimin olabileceği ileri sürülüyordu. Fakat birkaç elektriksel formülün ötesinde, elektrik veya manyetizma kuramına yaklaşabilen bir çalışma yoktu.

Maxwell bunu değiştirdi. Elektrik ve manyetizma hakkında, Newton'un *Principia*'sında teorileştirdiği şekilde bu kuvvetleri yer çekimiyle beraber ele alarak ayrıntılı bir matematiksel kuram geliştirdi. İlk adım elektrik ve manyetizmanın derinden bağlı olduğunu anlamaktı. Maxwell'in teorisi, manyetizmadan doğan elektrik kuvveti kuramı değildi. Maxwell'in elektromanyetik alan dediği yeni bir şeyin teorisiydi. Elektrik ve manyetizma, bu yeni şeyin üretebileceği iki farklı etkiydi.

Maxwell, farklı elektriksel ve manyetik olaylardan öğrendikleri ışığında uzayın sıradan maddelere nüfuz eden, deneysel olarak üretilen yokluk-boşluk durumunda dahi eşit yoğunlukta bulunan “esir maddesi” ile dolu olduğunu savunuyordu. Esir maddesi (bazen ışık yayan bir esir veya sadece esir) çeşitli şekillerde titreşebilen ve titreşimlerin arasında hareket edebilen bir ortamdı. Elektromanyetik alanı oluşturan esirdeki titreşimler de bunlardı.<sup>72</sup>

Bunun ne anlama geldiğini anlamak için etrafınızdaki havayı düşünün. Hava çeşitli şekillerde titreşebilen küçük madde parçacıklarından oluşur ve bunlar viyolonsel, ses telleri veya hoparlörün titreştiği gibi titreşebilirler. Bu olurken, titreşen her bir atom yakınındakilere çarpıp titreşimi iletmek suretiyle havada hareket eder. Bunlar, titreşimi üreten kaynaktan uzakta bulunan kulak zarı veya mikrofonlar gibi başka nesnelerde de titreşimler üretebilir.

Ses, ortam (hava) içerisindeki titreşimler şeklinde oluşmaktadır.

Maxwell’e göre hava ses için neyse, esir de elektromanyetik alan için oydu. Yani elektromanyetik alan, elektrik yüklü veya mıknatıslanmış (titreşen viyolonsel telleri tarafından üretilen müzik gibi) nesneler tarafından üretilen titreşimlerdir. Bu titreşimler, müziğin kulak zarımızı titreştirmesi gibi doğdukları noktadan uzakta diğer şeyleri etkilemek için hareket eder, diğer yüklü veya mıknatıslanmış nesnelerin hareket etmelerine neden olurlar.

Uzaya nüfuz eden esir maddesi fikri tamamen yeni değildi.<sup>73</sup> Aristo, Descartes ve Leibniz gibi uzayın bir çeşit plenum ile dolu olması gerektiğini düşünen önceki fizikçilerin

izlerini taşıyordu. Fakat bu kuramlar, kısmen Aristo ve Descartes'in aksine Newton'un hareket kuramının cisimlerin hareket etmesi için plenum gerektirmemesi, kısmen de on dokuzuncu yüzyılın ortalarında laboratuvar ortamında hava pompası marifetiyle yokluk-boşluk durumu oluşturabilmek için iki yüzyıllık tecrübenin olması nedenleriyle Newton'dan bu yana yıllar içerisinde zayıflamıştı.<sup>74</sup>

Maxwell'in esir teorisi bunu değiştirdi. Teorisine göre elektromanyetik alan, esir içerisinde titreşimler hâlinde bulunuyordu. Deneysel çalışmaları manyetizma ve elektriğin, hava pompası gibi araçlar aracılığıyla yaratılan yokluk-boşluk durumları (bu deneyler gerçek bir boşluk oluşturmuyordu) içinden geçebildiğini göstermişti.<sup>75</sup> Havanın dışarı pompalandığı kısımlarda hâlâ esir maddesi kalmış olmalıydı. Aksi takdirde elektromanyetik alan oradan geçemezdi. Newton'un bahsettiği boş uzay belki de o kadar boş değildi.

\*\*\*\*\*

Maxwell'in teorisinde birleştirilen tek şey elektrik ve manyetizma değildi. Önemli bulgulardan biri de ışığın elektromanyetik alanın bir tezahürü olmasıydı. Maxwell'e göre ışık sadece esir maddesi içindeki belli bir titreşim çeşididir. Yani, uzayda hareket eden esir içerisindeki dalga benzeri bir titreşim olan bir elektromanyetik radyasyon türüdür. (Diğer örnekler de radyo dalgaları, mikrodalga ve X ışınlarıdır.) Fiziksel bir perspektiften bakıldığında ışık o kadar da özel değildir: Kulaklarımızın algılamaya alıştığı bir titreşim türü olan ses gibi, gözlerimizin algılamaya alıştığı bir elektromanyetik radyasyon türüdür.

Yine de bizim onu algılayabilmemiz ışığı bizim için özel kılıyor. Işığın davranış biçimi de özellikle Einstein'ın dikkatini çeken şey olmuştur.<sup>76</sup> Bunun nedeni, ışığın ve diğer elektromanyetik radyasyon hareketlerinin Maxwell'in kuramı için kavramsal sorunlara yol açmasıydı. Bulmaca, Maxwell'in elektromanyetik alanı yöneten denklemlerine eklenen bir parametre olan ışık hızının nasıl yorumlanacağıyla ilgiliydi.

Önceki bölümden hatırlayalım. Newton fiziğine göre başka bir nesnenin hızını ölçtüğümüzde, göreceli bir değer olan başka bir nesnenin bize ve bizim ölçü aletimize göre hızını ölçmüş oluyoruz. Hız kadranı ya da radar, sadece arabanın yola göreli hızını bize söyleyebilir. On dokuzuncu yüzyılda fizikçiler şu mantığı yürüttüler: Işık hızını ölçtüğümüzde göreceli bir ölçüm yapıyoruz; ışık hızını kendimize göre ölçüyoruz.

Newton'un zamanında dahi ışığın sınırlı bir hızda ilerlediği biliniyor ve ölçümler yapılıyordu<sup>77</sup>. Maxwell'in konu hakkında yazmaya başladığı on dokuzuncu yüzyılın ortalarına gelindiğinde bu hız gayet doğru bir şekilde yaklaşık 300.000 km/s olarak ölçülmüştü. Maxwell'in kuramında kullanılan bu deneysel değer büyük bir başarıydı.

Bulmaca bu noktada ortaya çıkıyordu. Bazı tahminlerde bulunmak için deneysel olarak belirlenmiş bir değeri yeni bir teoride kullanmakta yanlış olan bir şey yoktur. Bu fizikte her zaman olur. Fakat bu kuramda tuhaf olan bir şey vardı. Bu şey, doğanın temel bir sabiti olarak ışık hızının yeryüzündeki gözlemcilere göre göreceli bir değer olmasıydı. Sonuçta, bunun anlamı elektromanyetik alanı yöneten bir temel doğa yasasının yeryüzünde bulunan sadece bizler tarafından

özel olarak belirlenmesi gereken bir sayı olması gerektiğidir. Bizi bu kadar özel yapan şey nedir? Ya Ay'a ya da Mars'a kadar gitseydik ve hatta uzaydaki hareketimizin deniz seviyesindeki hareketimizden farklılaşacağı bir dağın tepesine çıkmış olsaydık ve ışık hızını oradan ölçmeye çalışsaydık? Muhtemelen, on dokuzuncu yüzyıl fizikçilerinin hız ölçme konusunda bildikleri her şeyi göz önüne aldığımızda, yeni ölçme aletimizin eski ölçme aletlerimize göre olarak hareket ettiği gerçeğini yansıtan farklı bir cevap alırdık.

Işık hızı temel bir sabit olacaksa, fizikçilerin gerekçelendirmelerine göre gerçek değerini veren özel bir bakış açısının olması gereklidir. Elbette Newton, tam da böyle özel bir bakış açısının olduğunu düşünüyordu: Mutlak uzay perspektifi. Mutlak uzaya göreli olan hız (mutlak hız) doğanın temel teorilerinde anlamlı olarak özel bir rol oynayacaktı: Artık fizik yasalarında görünecek olan biz değil, uzay olacaktı.

Maxwell ve çağdaşları, deneysel olarak belirlenen ışık hızının denklemlerinde yeterince iyi çalışıyormuş gibi görünmesine rağmen denklemler için gerekli olan gerçek değer, mutlak uzaya göre görelilik olarak hızı değil, belki esire göre görelilik olarak, ışığın mutlak hızı gibi bir şey olduğunu varsayıyorlardı. Başka bir deyişle Maxwell'in inandığı gibi elektromanyetik alan esir içindeki titreşimlerden oluşuyorsa ve esir tüm alan boyunca yayılmış bir çeşit madde ise o zaman esir özel bir hareket hâli belirlemelidir. Böylece esire göreli olarak bulunan hızlar, gerçek ışık hızını yansıtacaktı. Esir, fizikte Newton'un mutlak uzaya ilişkin hayal ettiği role benzer bir rol oynuyordu.

Bütün bunlar teorik olarak mantıklıydı. Sorun, bunların herhangi biri doğruysa muhtemelen bazı deneysel sonuçlar doğuracak olmasıydı. Örneğin, kimse yerkürenin esire göreli olarak eylemsiz olduğuna inanmıyordu. Dünya kendi ekseni ve aynı zamanda güneş etrafında dönüyor ve esir de bu yollarla ilerliyor olsaydı, büyük bir tesadüf olurdu. On dokuzuncu yüzyıl fizikçileri, yerkürenin esire göreli olarak hareketinden kaynaklanan etkileri tespit etmemiz gerektiğini oldukça makul buluyorlardı. Aynı şekilde, dünyanın yüzeyinde hareket eden cisimlere göre (mesela, birbirine göreli olarak hareket eden farklı sensörlere göre) ışığın hızını ölçseydik, ışık hızında farklılıklar tespit etmeliydik.

Bu deneyler gerçekleştirildi.<sup>78</sup> Ve hiçbir şey bulamadılar. Yerkürenin esire göre hareket ettiğine dair bir kanıt yoktur ve hareket eden cisimler tarafından ölçülen ışığın hızında farklılıklar yoktur. Hiçbir şey. Uzay, zaman ve hareketle ilgili temel Newtoncu fikirler, hareketli aygıtlarla ölçüldüğünde ışığın farklı hızlara sahip olması gerektiğini ima ediyordu. Ancak herkesin yapabileceği deneyler öyle olmadığını gösteriyordu.

Einstein'ın 1905'te izafiyet kuramı üzerine çalışmasında yazdığı bulmaca buydu. Aldatıcı basit bir çözüm sundu: İddiasına göre ışık hızı, bu gözlemciler birbirlerine nazaran ne kadar hızlı olursa olsun hızlanmayan her gözlemci için aslında aynıdır. Esire göreli olarak özel bir eylemsizlik durumu yoktur: (Hızlandırılmamış) hareketin herhangi bir durumu diğerlerinininkiler kadar iyidir ve hepsi ışık hızının ölçümü için aynı sonuçları verecektir. Bu nedenle Maxwell teorisinin, bu deneyler gözlemcilerin esire göre eylemsiz olan gözlemciler

tarafından gerçekleştirilmiş olmamalarına rağmen deneysel olarak belirlenen ışık hızıyla çok iyi çalışmasında gizemli bir durum yoktu. Deneysel olarak belirlenen ışık hızı, ışık hızıydı, nokta.

Işık hızının her gözlemci için aynı olduğu fikri, size çok garip geliyor olabilir. Gerçekten de Newton fiziğinden ve gündelik hayattan görelî hareket hakkında bildiğimiz her şey bunun karşısında uçup gidiyor. Einstein'ın bizzat kendisinden bazı klasik örnekleri alalım. Bir trene bindiğinizi ve aşağı yukarı sabit hızda ilerlediğinizi varsayalım. Trenin önüne bir beyzbol topu atıyorsunuz. Trende bulunan birtakım aletlerle topun hızını ölçebilirsiniz ve bazı sonuçlar alabilirsiniz.

Şimdi trenin bir istasyondan geçtiği esnada topu fırlattığınızı ve istasyon platformunda oturan arkadaşınızın da topun hızını ölçtüğünü varsayalım. Elbette, arkadaşınız farklı bir cevap alacaktır: Platformdan ölçüldüğünde top daha hızlı hareket edecektir çünkü tren aynı zamanda aynı yönde ilerlemektedir. Bu, karayolu üzerinde şerit değiştirmekten havadaki bir frizbiyi yakalamaya kadar her türlü sıradan faaliyet içinde bulunabilecek hayatın gerçeklerinden biridir.

Fakat Einstein'a göre bu temel yaşam gerçeği, en azından yaklaşık olarak bazı hareketlere uygulanabilse de ışığın hareketine uygulanmaz. Bir beyzbol topu atmak yerine bir el feneri açıp trenin önüne yaklaştıkça ışığın hızını ölçüyorsam, yaklaşık 300.000 km/s sonucunu alırım. Platformdaki arkadaşım aynı ışığın hızını ölçüyorsa, sanki kendisi ışık kaynağına göre eylemsizmiş gibi o da aynen 300.000 km/s sonucunu bulacaktır. Ve bu tren ne kadar hızlı olursa olsun geçerli olacaktır.

Yukarıda Einstein'ın Maxwell'in teorisinin karşılaştığı problemlere sunduğu çözümün ilginç şekilde basit olduğunu söylemiştim. Yanıltıcı olmasının nedeni, dünyada Einstein'ın ışığın yaptığı gibi hareket eden başka bir şey varsa, o zaman hareket onun ifade ettiğini düşündüğü şeyle aynı anlama gelemezdi. Einstein'ın ışık hareketinin düz ve doğrudan oluşu ile ilgili iddiaları, Newton tarafından tanımlanan ve fizikçi nesillerince kabul edilen uzay, zaman ve hareketin yapısı ile tutarsızdı.

Einstein bunu anladı ve bu kavramları yeniden tanımlayarak izafiyet teorisine ilişkin ilk çalışmalarını başlattı. Bir soruyla başladı: Bir cismin hareketini ölçmek için varsaymamız gereken şey nedir?<sup>79</sup>

Bir futbol sahasında, yetenekli bir oyun kurucunun yanında bir şut çektiğinizi düşünün. Topun hızını nasıl ölçebilirsiniz? Bunun bir yolu, topu oyun kurucunun elini terk ederek 20 yarda çizgisini geçerken izleyip zamanı kaydetmektir. Ardından saatinizi düzenli aralıklarla kontrol etmeye devam edin, top 30 yarda aralığından 40'a geçtiğinde ve her aralıkta zamanı kaydedin.

Bu ölçümlerden, topun on metreye kadar ne kadar sürede gideceğini hesaplayabilir ve daha sonra hızının ne olması gerektiğini çıkarabilirsiniz. Fakat bu çıkarım bir varsayım üzerine kuruludur: Yani, sizin topun 30 yarda çizgisini geçtiğini gördüğünüz an (ve saatinize baktığınız an) ile topun 30 yarda çizgisini gerçekten geçtiği an eş zamanlı olmalıdır. Ama bu doğru değildir. Topun 30 yarda çizgisinden geçtiğini görebilmeniz için ışığın toptan yansıyarak gözünüze doğru ilerlemesi gerekecektir. Yani, bizim kaydettiğimiz zaman

topun 30 yarda çizgisini geçtiği zaman değil, ışığın yansıyarak size ulaştığı zamandır. Ne kadar sonra? Tam olarak ışığın 30 yarda çizgisinden sizin bulunduğunuz 20 yarda çizgisine geri gelmesi gereken süre kadar geçmiş olacaktır. Dolayısıyla bu prosedür, ışığın 30 yarda çizgisini geçtiği andaki (saatiniz ile tespit ettiğiniz) ışık hızını bilmenizi gerektirmektedir.

Şimdi çizim tahtasına geri dönelim. İşte karşımızda, söz edilen sorunu önlemek için başka bir prosedür daha var. Tüm ölçümleri 20 yarda çizgisinden yapmak yerine 30 yarda çizgisinde durup bir arkadaşınızı ölçüm yapması için görevlendirebilirsiniz. Ardından topun oyun kurucunun elinden ayrıldığı zamanı ve arkadaşınızın topun kendisini geçtiği zamanı kaydedersiniz.

Artık ışığın 30 yarda çizgisinden geri dönmesi için gereken süre konusunda endişelenmenize gerek kalmamıştır. Ancak yeni bir sorun daha var. Bu iki farklı ölçüm, ancak siz ve arkadaşınızın saatlerinin senkronize edildiğinden emin olduğunuzda kullanılabilir. Yani, her iki anda da saatler aynı zamanı göstermelidir. Durumun böyle olup olmadığını nasıl anlayabiliriz? Tıpatıp aynı saatlerle başlasanız ve top atılmadan birbirinizin yanında bunları senkronize etseniz bile, ölçümler gerçekleştiğinde eş zamanlı olmaktan çıkma ihtimalleri vardır. Belki de arkadaşınız saatin 30 yarda çizgisine doğru koştuğu sırada zamanı kesti veya belki de saat piliniz azalıyordu.

Açık bir çözüm varmış gibi gelebilir. Herkes yerini aldığı anda ve top atılmaya hazır olduğunda saatlerin hâlâ eş zamanlı olup olmadığını kontrol etmek için siz ve arkadaşınız

saatlerinizin hâlâ eşit olduğunu görmek için birbirinize sinyal gönderirsiniz. Ancak, bu sinyaller de birbirinize geçmek için biraz zaman alacaktır. Bu nedenle saatler senkronize ediliyorsa, bu seyahat süresini hesaba katmanız gerekir.

Modeli görmeye başlayabilirsiniz. Bu ölçüm usullerinin her ikisinde de birbirinden uzakta bulunan iki olayın eş zamanlı olup olmadığını belirlemenin bir yolunu bulmanız gerekmektedir. Ve bu tespitler zor olacaktır: Sinyalleri saptamanın bir yolunu bulmanız gerekecek ve sinyalin de ne kadar hızlı hareket ettiğini bilmeniz lazımdır ki bu da eşzamanlılığın nasıl işlediğini anlamanıza ve dolayısıyla bir gerilemeye neden olacaktır. Çıkış yollarından biri, saatlerimizin mükemmel şekilde güvenilir olduğu ve olayların eş zamanlı gerçekleştiği gibi konularda herkesin hemfikir olduğunu varsaymaktır. Bu aslında Newtoncu yaklaşımdır. Bu ayrıca otobüsü yakalamaya çalışırken veya arkadaşlarımızla bir şeyler içmek için buluşmaya çıktığımızdaki yaklaşımdır. Bununla birlikte bu varsayımla ışığın hızı tüm gözlemcilere göre aynı olamaz. Aynı sebepten dolayı bir aracın hızı tüm gözlemcilere göre aynı olamaz.

Peki, bu varsayımı yapmak yerine Einstein'ın ışık hızının tüm gözlemciler için aynı olduğu varsayımını kabul etseydik? O zaman, bu ikilemden çıkmak için başka bir yolumuz vardır. O da koordinat sinyalleri göndermek için ışık veya başka elektromanyetik radyo sinyalleri kullanmaktır. (Bu arada ışık hızının ölçülmesi kolaylaşmıştır: Bilinen uzak mesafedeki bir aynadan ışın yansıtılması ve bu ışının oraya ne kadar sürede gidip geri döndüğünün hesaplanması.) Artık herkes ışık hızı konusunda hemfikir olduğu için hareket du-

rumumuz ne olursa olsun, ölçümlerimizdeki seyahat süresini hesaba katmak amacıyla gerekli hesaplamaları kolaylıkla yapabiliriz.

Bu bakış açısının, hareketin nasıl ölçüleceği sorununa bir mühendislik çözümü sunduğu için benimsenmesi masum ve hatta pragmatik görünebilir. Ancak bu hızlı bir şekilde şaşırtıcı bir sonuç çıkarıyor: Eşzamanlılığı belirleme metodumuz buysa, birbirlerine göre hareket eden farklı gözlemciler iki olay aynı anda olduğunda farklı tespitler yapacaklardır. Diğer bir deyişle, eşzamanlılık (şu an evrende ne oluyor?) hareketin kendisi gibi izafi bir kavram olmalıdır.

Bunların hiçbiri (ışık hızının izafi olmayışı: eşzamanlılığın izafiyeti) önceki bölümde anlattığım Newton fiziğinin Galileocu uzay-zaman yapısıyla bağdaştırılamaz. Bunun anlam kazanabilmesi için uzay-zaman geometrisi hakkında tamamen yeni bir resim çizmeye ihtiyacımız var.

\*\*\*\*\*

Einstein izafiyet teorisinin uzay ve zamanı yeniden tanımlaması gerektiğini biliyordu. Ama şunu fark etmedi: Yeni teorisi uzay-zaman geometrisine ilişkin yeni bir anlayışa varıyordu.<sup>80</sup> Bunu Zürih Polytechnic'teki Einstein'ın eski matematik profesörlerinden biri olan Hermann Minkowski fark etmişti. Minkowski uzay-zamanı olarak bilinen yeni bir uzay-zaman geometrisi türünü tanımlamaya çalışmaktaydı.

Fizikçiler bugün özel izafiyet için doğru geometrik ortam olarak Minkowski uzay-zamanını kabul ediyorlar. Fakat Einstein bunu ilk duyduğunda fazla etkilenmiş görünmüyordu. Minkowski'nin çalışmalarını "gereksiz öğrenme" olarak

eleştiriyor (belki şakacı bir üslupla) ve anlamadığında ısrar ediyordu.<sup>81</sup> (Minkowski ise kendi açısından, arkadaşına yazdığı bir mektupta öğrencilik döneminde Einstein'ın tembel bir köpek olduğu şeklinde meslektaşlarının Einstein hakkındaki görüşlerini paylaşıyordu.) Sonraki altı veya yedi yıl boyunca, Einstein'ın görüşleri çarpıcı biçimde değişmişti. Nihayet, Minkowski'nin izafiyet kuramı hakkında derin bir bulgu ortaya çıkardığını fark etti.

Galileo uzay-zamanında olduğu gibi Minkowski uzay-zamanında da dört boyutlu bir olaylar “uzayı” vardı.<sup>82</sup> Klasik fizikte olduğu gibi,  $p$  ve  $q$  gibi herhangi iki nokta  $p$ 'den çıkıp  $q$ 'da biten eşsiz bir ok ile  $q$ 'dan başlayıp  $p$ 'de biten eşsiz bir ok gibi (birinci okun tersi) bağlanıyordu. Bir kez daha bu “düz çizgi” kavramı uzay-zaman yapısına işaret ediyordu.

Ancak burası benzerliğin durduğu yerdir. Özellikle, olaylar arasında bir “eşzamanlılık” ilişkisi yoktur. Yani, iki olay ele alındığında ya aynı zamanda olur ya da olmazlar durumu artık geçerli değildir. Basitçe ifade etmek gerekirse, uzay-zamanın böyle saptamalar yapacak yapısı yoktur. Bu ilişki olmadan, uzay-zamanı farklı zamanlardaki üç boyutlu dilimlerine ayıramayız. Bu dilimleme olmadan da uzaydaki iki eş zamanlı noktanın ne kadar uzak olduğunu sorabilmek bile mantıklı olmazdı. Sonuçta, ne “eşzamanlılık” vardır ne de “uzay”. Olaylar arasındaki süreyi sormak da mantıklı olmamaktadır. Çünkü daha önceki “süre” kavramımız tarafından öngörülen yapı pencereden dışarı atılmıştır.

Vazgeçilecek çok şey olduğu artık su götürmez bir gerçek hâlini almıştı. Uzay ve zaman hakkında sıradan düşünce ve konuşmalarımızın büyük kısmı klasik bir uzay-zaman

yapısını gerektirir. (“Çocuklarım alt katta yemek yiyorken dişlerimi fırçalıyordum” veya “Alarm çaldığı gibi uyandım” demek için gerekli olan yapı.) Yine de izafiyet teorisinin Newton fiziğinden daha doğru bir dünya sağladığını kabul edersek (ve ampirik kanıtlar bunun imkânsız olduğunu düşündürürse) bu yapıyı bırakmak zorunda kalmışız gibi görünüyor.<sup>83</sup>

Bu, sıradan konuşma ve düşünme yollarımızdan vazgeçmek zorunda olduğumuz anlamına gelmiyor. Sonuçta bunlar önem verdiğimiz tüm amaçlar için mükemmel hizmetler sunuyor. Ancak uzay, zaman ve eşzamanlılık hakkında sıradan konuşmaların en iyi ihtimalle meydana gelen şeylerin kabaca tahminleri olabileceğini ve sezgilerimizin yalnızca dünyayı daha sistematik bir şekilde anlamamızı sağlayabileceğini kabul etmek zorundayız.

Galileo uzay-zamanından Minkowski uzay-zamanına geçmek için vazgeçmek zorunda olduğumuz çok şey var. Bunun yerine elimizde ne tür bir yapı var? Minkowski uzay-zamanında, uzay-zaman metriği diye bilinen bir temel ilişkimiz var. Uzay-zaman metriği, uzay-zamandaki yönleri (bir noktadaki oklar) üç sınıfa ayırabilmemizi sağlamaktadır: Zamanı göre, uzaya göre ve önemini açıkça birazdan anlatacağım bir ara yöntem olarak ışığa göre. Aynı zamanda, farklı olaylar arasındaki uzay-zaman mesafesi olarak bilinen niceliği belirlememize imkân tanımaktadır.

Uzay-zaman mesafesi, terim anlamıyla uzay ve zaman içindeki olaylar arasındaki bir mesafedir. Fakat bilmediğiniz bir şehirde manava nasıl gideceğinizi anlamaya çalıştığınızda, peşinde olduğunuz şey olaylar arasındaki mesafe olma-

yacaktır. İstedığınız şey zamandaki süre ve uzaydaki mesafe gibi sıradan kavramlarımızdır. Uzay-zaman metriği de bu bilgileri kodlar fakat çıkarım yapmak biraz emek gerektirir.

Genellikle kendimizi ya da fiziksel bedenimizi geçmişten geleceğe doğru zaman içerisinde hareket eder diye düşünürüz. Bu fikir, bedenlerimizi farklı uzay dilimlerini kesen eğrilerle temsil eden Galileo'nun uzay-zamanına benzetmektedir. Minkowski uzay-zamanında, bu fikir zamansal yönde hareket eden eğriler veya zamansal eğriler kullanarak yakalanmaktadır. Bunlar, büyük cisimler ya da ideal gözlemciler için uzay-zaman boyunca olası yörüngeleridir. İki olay bir zamansal eğriyle bağlanırsa o zaman olaylar farklı zamanlarda, biri diğerinden erken gerçekleşir. Herkes bu konuda hemfikirdir.

Minkowski uzay-zamanında zamansal eğrilerle temsil edilen sıradan insanlar, işlerine doğru giderlerken süre ölçümleri yapabilirler. Saatleri kullanarak bunu her zamanki yaptıkları gibi yaparlar. Bu ölçümler, uzay-zaman metriğiyle belirlendiği üzere izledikleri zamansal eğrinin uzunluğuna karşılık gelir. Galileo uzay-zamanında, herkes olaylar arasındaki süre üzerinde hemfikirdir. Bir an ve bir sonraki an arasında geçen kesin bir zaman miktarı vardır. Ancak izafiyet teorisinde, bu doğru değildir. Süre, bir gözlemci tarafından, gözlemcinin uzay-zaman da yörüngesi boyunca saatine bakarak ölçtüğü bir şeydir. Aynı iki olay arasındaki farklı yörüngeleri izleyerek, aynı saatler farklı süreleri kaydedeceklerdir.

Bu arada, ışığa göre olan düz çizgiler, çok özel yörüngeleri temsil ederler: Işığın olası yörüngeleri. Bunlar, uzay-

zaman içerisinde maksimum hız sınırını temsil eden zamansal eğriler için bir sınır olarak düşünülebilir. Her noktada, tüm zamansal eğrilerin içine düştüğü ve uzaysal olanların dışına düştüğü bir konik yapı oluştururlar. Işık için bu özel yörüngeler, uzay-zaman yapısına yerleştirilir. Bu, tüm gözlemcilerin hareket durumları ne olursa olsun, ışığın ne kadar hızlı olduğu konusunda fikir birliğine vardıklarını açıklamaktadır. Işık, uzay-zamanda siz ve benden farklı bir eğri boyunca hareket etmektedir.

Işığın tüm gözlemciler için aynı hıza sahip olması, onu saatleri senkronize etmek için güçlü bir araç hâline getirmektedir. Mesafeleri ölçmek gibi diğer şeyler için de aynı derecede yararlıdır. Minkowski uzay-zamanında bu işlemler ışıksal çizgilerle gösterilir.

Bunu daha somut bir şekilde anlatayım. Kendiniz ve başka bir nesne arasındaki mesafeyi ölçmek istediğinizi varsayalım. Bunu bir el feneri ve bir kol saatiyle yapabilirsiniz: Uzaklığı ölçmek istediğiniz şeyin üzerine bir aynayı tutturun ve sonra el fenerini aynaya tutun. Gidiş dönüş süresini ölçerek, ışığın ne kadar yol katedeceğini tahmin edebilirsiniz. Bütün bunlar Minkowski uzay-zamanında kolayca temsil edilebilir. Siz ve ayna, her ikisi de zamansal çizgilerle temsil edilirken, ışık el fenerinizi açtığınız uzay-zaman noktasından çıkan ışıksal çizgiyi izleyecektir. Bu ışıksal çizgi, aynanın yörüngesini keser ve sonra tekrar yörüngemizle kesişerek geri döner. El fenerinizi açmanız ve ışığın yörüngesi kendinizinki ile tekrar kesişmesi arasındaki uzay-zaman metriği tarafından belirlendiği üzere süre, ışığın aynaya gidiş ve geliş için geçen süredir.<sup>84</sup>

Aynı temel yapıyı kullanarak ışığın aynaya ne zaman ulaştığını da öğrenebilirsiniz: El fenerini açmanız ve ışığın aynadan yansıyarak geri döndüğü an arasındaki yarı yol zamanında. Minkowski uzay-zamanında eşzamanlılığın belirlenmesi bu şekilde işlemektedir. Minkowski uzay-zamanındaki karşılıklı olarak eş zamanlı tüm olayları toplayarak, yani bu temel usulü kullanarak, bir gözlemci tarafından belirlendiği gibi verilen bir andaki uzay kavramını elde edebilirsiniz. Ve yukarıda tarif edilen usulle belirlediğiniz aynanızla sizin aranızdaki mesafe, ışığın aynaya vurduğu olayla kendi tarihinizin eş zamanlı olduğunu saptadığınız olay arasındaki kesin uzay-zaman mesafesidir. Uzay-zaman metriği, sıradan şekilde mesafe olarak düşündüğümüz şeyi yani, uzaydaki mesafeyi kodlamaktadır.

Bu usuller, Minkowski uzay-zamanını Galileo uzay-zamanındaki gibi uzay ve zamana ayırmanıza yaramaktadır. Fakat önemli olan fark, bu yapının sonuçlarının gözlemcinin hareket durumuna dayanmasıdır. Yani, birinin kendisiyle (zamansal eğri ile) birlikte başladığı zamansal eğriye bağlı olmasıdır. Farklı bir zamansal çizgiyle temsil edilen farklı bir gözlemciyle başlasaydık, o gözlemci aynı işlemi kullanarak uzunluklar ve eşzamanlılık için farklı cevaplar elde edecekti. Bazı mesafeler daha uzun bazıları daha kısa görünecek, eş zamanlı olaylar farklı zamanlarda olacak ve farklı zamanlardaki olaylar da eş zamanlı olacaktı.

Eşzamanlılığın izafiyeti hakkında daha önce söylediklerim göz önüne alındığında, bu tam da beklediğimiz şeydir. Ancak şimdi ise izafiyet teorisinin şaşırtıcı özelliklerinin tamamı, uzay-zaman boyunca kendi yörüngelerimizin ışınla-

rın yollarıyla nasıl kesiştiği ve bundan çıkardığımız mesafe ve eşzamanlılık hakkında ne çıkarımlarda bulunduğumuz noktasına indirgeniyor.

\*\*\*\*\*

Einstein geometrik olarak (henüz) düşünmüyor olsa da tamamını açıkladığım eşzamanlılık, 1905 yılına ait, uzunluk ve sürenin revize edilmesinin özü hakkındaki çalışmasında görülmekteydi. Maxwell teorisindeki problemleri bu revizyonlarla çözmüştü: Herkesin ışığın hızı konusunda hemfikir olduğunu kabul etmesini şart koştuğumuzda, esire görelî olarak harekete ilişkin kaygımız kalmıyor. Fakat Einstein daha radikal bir iddiada bulundu: *Esir yoktur*. Einstein'a göre Maxwell'in teorisinde esirin oynadığı rol, ışık hızını anlamaya çalışmaktı. Bu rol olmadan, esir gereksizdi.<sup>85</sup>

Peki bu, Maxwell'in teorisini nerede bırakmaktadır? Sonuçta, Maxwell elektromanyetik alanın esirdeki titreşimlerden oluştuğuna inanıyordu. Esir yoksa ne titreşiyor olabilir-di? Cevap, elektromanyetik alanın kendisinin yeni bir şey olmasıdır. Esir içindeki farklı salınımlar olarak düşünülen şeyin aslında, bu yeni varlık türünün (bu alan) konfigürasyonlarıdır. Bu konfigürasyonlar dalgalı veya salınımlı olabilir fakat esir resminin önerdiği gibi herhangi bir şeydeki salınımlar değildir. Esirin, hepimizin etrafında bir elektromanyetik alan olduğu düşüncesine geçişteki bir zıplama tahtası olduğu ortaya çıktı.

Daha önce esirin Aristoteles, Descartes ve Leibniz'in dolu alan olduğuna inandıkları plenuma biraz benzediğini söylemiştim. Bu elektromanyetik alan olgusunun mümkün

olduğu bir dünyada boş uzayın mümkün olmadığı çünkü bir esirin her yerde mevcut olması gerektiği anlamına geliyordu. Hiçbir şey ya da en azından elektromanyetik olay var olabildiği sürece hiçbir şeyin olmadığı uzay bölgeleri olmazdı.

Einstein, Newton'un plenumu reddettiği gibi esiri reddetti. Fakat onun yerine geriye tüm uzaya nüfuz eden elektromanyetik alan kalıyordu. Tüm göstergeler aslında tüm evrende, içinde sabit ve düşük düzeyde elektromanyetik radyasyon yayılımı geçen bir Kozmik Mikrodalga Arka Plan (Cosmic Microwave Background) olduğuna işaret ediyordu.<sup>86</sup>

Evrenimiz tüm uzay ve zamanı dolduran bir elektromanyetik alana sahip olsa bile, elektromanyetik alan olmayan bir evrene veya en azından elektromanyetik alan olmayan bir uzay bölgesine sahip olup olamayacağımızı merak edebiliriz.

Bu sorunun, görüldüğünden daha zor olduğunu görüyoruz. Elektromanyetik alanı, alan kuvveti olarak bilinen bir büyüklük ile ölçüyoruz. Bu büyüklük, radyasyon bir bölgeden geçtiğinde titreşir, yüklü cisimler alan kuvveti üretir ve alan kuvveti ne kadar büyük olursa, yüklü cisimlere uygulanan ivme de o kadar artar. Kabaca, alan kuvvetini bir yerde ne kadar elektromanyetik alan bulunduğunu söylemek olarak düşünebiliriz.

Şimdi, alan kuvvetinin sıfır olduğu bir uzay-zaman bölgesi olduğunu varsayalım. Bu, bölgede hiç ışık, hiç X-ışını ve hiç elektromanyetik alan olmadığı anlamına gelir. Fakat bu hiç elektromanyetik alan olmadığı anlamına mı geliyor? Bir

bakış açısına göre cevap kesinlikle “evet”tir. Alan kuvveti sıfır ise tespit edilebilir elektromanyetik etki olmayacaktır. Mevcut alanın “miktarı” sıfır olur ki bu alanın mevcut olmadığını söylemenin başka bir yoludur.

Ancak başka bir ihtimal vardır. Elektromanyetik alanın tüm alanı doldurduğu fakat evrendeki yüklerin dağılımı ve diğer faktörlere bağlı olarak farklı şekillerde yapılandırılmış olabileceği düşünülebilir. Alan kuvveti sadece alanın nasıl yapılandırıldığını açıklamanın bir yöntemidir. Ve prensip olarak başka herhangi birinden farklı olmayan olası bir konfigürasyon, bir bölgedeki alan kuvvetinin her yerde aynı olduğu konfigürasyondur. Bu düşünce biçiminde alan kuvvetinin sıfır olduğunu söylemekle alanın hiçbir şey yapmadığını söylemek aynı şeydir. Lakin hiç alan olmadığını söylemekle aynı şey değildir.

Şu şekilde düşünelim: İnsanlarla dolu bir beyzbol stad-yumu düşünün. Bu insanlar, düzenli bir biçimde sırayla kollarını havaya kaldırarak stadyum boyunca salınıyor gibi gelen bir “dalga” tezahüratı yapabilirler. Bunu yaptıklarında, stadyumun bir bölgesindeki konfigürasyonlarını, o alanda kaç kişinin ayağa kalktığını söyleyerek tanımlayabilirim. Bu bir çeşit “dalga kuvveti” olurdu. Yine de bazen, kimsenin kalkmaması gibi dalga da var olmayabilirdi. Dalga kuvveti sıfır olurdu. Ama bu oturakların boş olduğu anlamına gelmezdi. Benzer şekilde, alan kuvvetinin olmaması elektromanyetik alan olmadığı anlamına gelmez.

Bunlardan hangisi doğrudur? Klasik elektromanyetik teoride, burada anlattığım gibi her iki görüş için de argümanlar verilebilir. (Ben kendimi ikincisini tercih eder buldum.<sup>87</sup>)

Fakat sonraki bölümde göreceğimiz üzere, kuantum alan teorisine geçilmesi alan hakkında düşünmenin ikinci yolu için bazı kanıtlar sunuyor. Bu, uzay ve zamanın bir bölgesinde “hiçbir şey” olmadığını söylemenin ifade ettiği şeyin gerçekten önemi olduğunu ortaya koyuyor. Hiçbir şey, şeylerin yokluğu değildir; şeylerin sadece olası bir konfigürasyonudur.

\*\*\*\*\*

Einstein, 1905'te çalışmasını yayınlandığında hâlâ Bern'de bir patent memuruydu.<sup>88</sup> O, haklı olarak olağanüstü olduğuna inandığı sonuçları heyecanla bekliyor ve bunun kendisini nihayet akademik tanınmaya götüreceğini umuyordu. Ve bir dereceye kadar bu olmuştu. Önemli ve nüfuzlu Avrupalı fizikçiler izafiyet teorisi hakkında yayınlar yapmaya başladılar.

Fakat takdir edici alıntılar ve pozitif dikkat masaya ekmek koymadı, yeni iş teklifleri de ortalarda görünmüyordu. 1907'de de Bern Üniversitesi'ne tekrar akademik bir iş başvurusunda bulunmayı denedi. Başvurduğu pozisyon prestijli ya da kazançlı değildi. Giriş seviyesinde bir pozisyondur ve doktorasını henüz bitirmiş kişiler için uygundur. İşe alım komitesinin bir üyesi Einstein'ın başvurusunu destekledi ancak meslektaşlarını ikna edemedi. Bu pozisyon başka birine gitmişti.

Einstein, şimdiye kadar akademik bir iş bulma konusunda umutsuz olmaya devam ediyordu. 1905 yılındaki başarıları yeterli değilse başka ne yeterli olabilirdi? Elektrikli cihazların tasarımı ve satılması da dâhil olmak üzere diğer

projelerde çalışmaya başladı.<sup>89</sup> Ayrıca, ortaöğretim okullarında gençlere fizik ve matematik öğretme iş başvurusunda başarısız oldu.

Ertesi sene, Bern Üniversitesi'nde bir görev için tekrar başvuruda bulundu. Sonunda göreve atanmıştı. Ancak bu bir pirus zaferiydi (ÇN: Galibiyet için büyük kayıplar verilen zafer): Uzun süredir özlemini duyduğu yeni pozisyonunda kendisine o kadar az ücret ödeniyordu ki patent ofisindeki eski işinden ilişkisini kesmek için bile yeterli olmuyordu. Bu da araştırmaları için başka bir zaman kaybına sebep olmuştu. (Sonunda, en azından üniversite kütüphanesini kullanmaya yetkisi olmuştu. Böylelikle, başkalarının izafiyet teorisini genişletmek için ne yaptıklarını öğrenebilecekti. Bunun öncesinde bu konuda bir fikri yoktu. Çünkü mevcut literatüre erişimi yoktu!<sup>90</sup>)

Adımını bir kere eşikten içeri attığında artık işler hızla gelişmeye başlamıştı. 1909'un başında yine Zürih Üniversitesi'nde doçent olarak göreve çağrıldı. Bern'deki pozisyonundan daha iyi olmasına ve Einstein'ın sonuçta kabul etmesine rağmen, Zürih pozisyonu hâlen cazip bir yer değildi: İsviçre dâhil olmak üzere Alman sisteminde doçent genellikle profesörlerin gözetiminde çalışıyor ve bir nevi üst araştırma ve öğretim asistanı olarak çalışıyordu.

İki yıl sonra Ocak 1911'de Einstein, Prag Üniversitesi'nde kendisine uygun bir profesörlük teklifi aldı. Zürih Üniversitesi'nden 1912'de başka bir profesörlük kabulü alana kadar bu teklifi kabul etti.

Bu yeni atama, doktorasını ve kısa süre doçentlik yaptığı Zürih Üniversitesi'nde değildi. Lisans eğitimini tamamladı-

ğı Polytechnic'teydi. Ve böylece, ayrılmasının üzerinden geçen on yıldan da fazla zamandan sonra Einstein başladığı yere geri döndü. Ama şimdi işler değişmişti. Eleştirilerin hedefindeki vasat öğrenci uzun süredir unutulmuştu: Einstein işini başarmış mahallenin çocuğu ve muzaffer bir kahraman olarak dönmüştü. Ve bu arada Polytechnic kendisini değiştirmişti: 1911'de mezuniyet derecesi verme hakkına sahip tam bir üniversite yapılmıştı. Adı da İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü olarak değiştirilmişti.

Tesadüf eseri Einstein, yeni kurulmuş üniversitede kendi sınıfından mezun olup profesör olan tek kişi değildi. Eski bir arkadaşı olan Marcel Grossmann da orada matematik profesörü olarak görev yapıyordu.<sup>91</sup> Grossmann, Einstein'ın zar zor verdiği sınavlardan mükemmel puanlar alarak Einstein'ın lisans döneminde yıldızlı matematik öğrencisi olmuştu. Gerçekten de Grossmann, ders notlarını Einstein ile paylaşarak Einstein'ın derslerden geçmesini sağlamıştı. (Bu, Einstein'ın matematikle tam olarak mücadele ettiğini söylemek anlamına gelmez. Dersleri asıyor ve Grossmann da onun arkasını kolluyordu.) Daha sonra Grossmann, Einstein'ın patent bürosunda çalışmasına da yardımcı olmuştu.

Einstein 1912'de Zürih'e döndüğünde çabucak Grossmann'ı arayıp bulmuştu. Eski günlerdeymiş gibi matematikle ilgili biraz yardıma ihtiyacı vardı.

1905'ten bu yana yıllarca, Einstein izafiyet teorisinin eksik olduğunu düşünmeye başlamıştı. Modern bir perspektiften, meselenin özünde Newton'un çekim teorisi ile kendi teorisinin uyumsuzluğu yatıyordu. Newton'un teorisine göre,

cisimler birbirlerine uzun mesafelerden anlık olarak yer çekimi kuvveti uyguluyorlardı. Fakat “anlık” eylem fikrinin kendisi, iki olayın eş zamanlı olması gibi bir gerçek olmaması nedeniyle izafiyet teorisiyle uyumsuzdu. Dolayısıyla Einstein’ın izafiyet teorisinin uzay-zaman yapısıyla uyumlu yeni bir çekim teorisi bulmaya ihtiyacı vardı. (Bizim amaçlarımız için önemli olmadığı hâlde teori üzerinde çalışırken Einstein’ın teorisinin motivasyonlarını biraz farklı olarak algıladığını kaydetmek de ilginçtir.<sup>92</sup>)

Bu projeyi 1907’de açıp açıp kapadı. Ancak teori, Grossmann’ın kapısını çaldığında hâlâ başlangıç seviyesindeydi. O da kendisine bir dizi rehber görüş ile dönüş yapmıştı. Örneğin, yer çekiminin ışık demetlerinin yörüngelerini etkilemesi gerektiğini düşünüyordu. Yukarıda gördüğümüz gibi ışık, uzay-zaman içerisinde düz ışıksal çizgilerle temsil edilen özel yolları izler. Einstein’ın fark ettiği şey, ortamda yer çekimi olduğunda bu çizgilerin artık düz olamayacağıydı. Evrendeki diğer maddelerin çekimsel etkisine bağlı olarak bir dereceye kadar kavisli olmalıydı.

Fakat Einstein, ışığın bu şekilde davranabileceği bir teori bulmak için mücadele etmekteydi ve ışığın bu davranışını izafiyet teorisinin kalaniyla tutarlı olacak şekilde başka çekimsel kuvvetlerle de bağdaştırmalıydı. Yani yine arkadaşına döndü. Einstein şu ana kadar neler bulduğunu anlattı. Bunlar, bazı rehberlik eden ilkeler, işe yarar gibi görünen bir ön teori ve buradaki birtakım özel vaka taslaklarıydı. Grossmann’dan bu teorisinin başarılı olabilmesi için ne tür bir matematik öğrenimi yapması gerektiği hakkında bir fikri olup olmadığını sordu.

Grossmann bu görüşmeyi Einstein'ın söyledikleri üzerine heyecanla bitirdi ama kendisine ne önereceği konusunda emin değildi. Biraz düşündükten sonra bir fikri oluşmuştu. Einstein'ın daha fazla geometri öğrenmeye ihtiyacı vardı.<sup>93</sup>

\*\*\*\*\*

Şu ana kadar açıkladığım iki uzay-zaman yapısı (Newton fiziğinin Galileo uzay-zamanı ve Minkowski uzay-zamanı göreceli teorisi) uzay ve zamanın yapısının farklı görüntülerini sunuyor gibi görünüyor. Ama bunların tam olarak aynı olduğu bir yol vardır: Bu her iki uzay-zaman yapısında da iki nokta birinde başlayıp diğerinde biten ok ile veya düz çizgiyle birbirine eşsiz bir biçimde bağlanabilir. Modern geometri dilinde bu, uzay-zaman yapılarının her ikisinin de düz (flat) olduğu anlamına gelir.<sup>94</sup>

“Düz” kelimesini matematiksel anlamda kullanıyorum fakat bu anlam sıradan kullanımla çok yakından ilgilidir. Matematikçiler bir uzayın düz olduğunu söylediklerinde eğri değil demektir. Eğri uzayların, oklar marifetiyle eşsiz bir şekilde bağlanabilme özelliği yoktur. Bunu görmek için bir basketbol topu düşünelim. Basketbol topunun yüzeyi (araba kaputu, at eyeri veya çenemiz gibi) kavislidir. Cetvelin kenarı gibi düz bir çizgiyi alıp bir ucunu basketbol topunun yüzeyine koysaydım, diğer ucu basketbol topuna hiç dokunmazdı. Direkt olarak yüzeyin dışına taşardı. Bu, basketbol topunun yüzeyindeki bir noktadan başlayan düz çizgilerin o noktayı basketbol topunun yüzeyindeki diğer noktalarına bağlamadığı anlamına gelmektedir. Ya da basketbol topu üzerine çizdiğiniz hiçbir çizgi düz olmayacaktır.

Bunu yapamayacağım bazı düz alanlar daha bulunmaktadır. Örneğin, bir masanın üzerinde duran bir kâğıt parçası (yaklaşık olarak) düzdür. Genellikle, kâğıda bir cetvel koyabilir ve her iki noktayı cetvelin kenarıyla bağlayabilirim. Ama ya sayfanın ortasından bir kalp şekli kesip çıkarırsam? O zaman kâğıdımız hâlâ düz olmasına rağmen, kalbin iki yanında noktaları birbirine bağlayan düz bir çizgi çizemem. Ancak, herhangi iki noktayı, daha önce anlattığım oklarla benzersiz bir düz çizgiyle bağlayabiliyorsam o zaman doğru olan uzayın düz olması gerektiğidir.

Basketbol topu üzerindeki iki noktayı cetvelin kenarıyla birleştirememem, basketbol topu üzerindeki farklı noktaları birleştirebilen çizgi çizemeyeceğim anlamına gelmez. Ayrıca yine kabaca ifade etmek gerekirse, mümkün olduğunca düz çizgiler çizemediğim anlamına da gelmez. Örneğin, yüzeyde herhangi iki nokta seçersem ilk noktadan ikinci noktaya giderken çok fazla sağa sola kayan bir çizgi çizebileceğimi de hayal edebiliyorum. Ve giderek daha az sağa sola kayan çizgiler çizerek, nihayet hiç kaymayan bir çizgi elde ettiğimi de hayal edebiliyorum. Çok katı bir bakış açısıyla, basketbol topu üzerinde düz çizgi olamayacağı için bu çizgi bile düz değildir. Fakat diğer çizgilere göre daha düzdür.

Minkowski uzay-zamanında ışığın uzay-zaman metriği tarafından belirlenen özel statüye sahip düz çizgiler boyunca hareket ettiğini hatırlayın. Einstein ve Grossmann'ın kısa zaman sonra fark ettikleri şey, yer çekimi ışığın yörüngelerini büküyorsa o zaman yer çekimi ışığın katedeceği eğrileri değiştirmeliydi. Bunun anlamı, yer çekiminin uzay ve zaman geometrisini gerçekten değiştirdiğidir: Işık, Minkowski uzay-

zamanındaki düz, ışıksal çizgi boyunca hareket etmek yerine kavisli bir uzay-zaman içinde en düz şekilde ışıksal çizgileri takip ediyordu. Benzer şekilde, diğer küçük cisimler de düz uzay-zamandaki düz zamansal çizgiler boyunca hareket etmek yerine kavisli uzay zamanında mümkün olan en kısa zaman çizgileri boyunca ilerlemektedir. Böylece uzay-zaman eğriliği fikri doğdu.<sup>95</sup>

Einstein'ın nihai olarak geliştirdiği teoride (1905 teorisindeki genel izafiyetin tersine şimdi özel izafiyet olarak bilinir) kendini küçük cisimler ve ışınların hareketinde fiziksel olarak gösteren uzay-zamanın bu eğriliği, yer çekimi olarak düşündüğümüz şeyin yerini almıştır. Newton'un teorisine göre büyük nesneler birbirlerine doğru hızlanır çünkü birbirlerine bir yer çekimi kuvveti uygularlar. Einstein'ın teorisinde, bu aynı nesneler hiç hızlanmıyor: Her ikisi de doğru bir çizgide ilerlemiyorlar. Çizgileri gerçekten düz olmayan bir uzay zamanda mümkün olan en düz çizgilerde hareket ediyorlar.<sup>96</sup>

Uzay-zamanın eğriliği, aynı cisimlerin uzay ve zaman boyunca nasıl dağıldığına bağlıdır. Diğer bir deyişle, madde aslında uzay-zaman geometrisini değiştirir. Böylece en düz çizgiler birbirine doğru hareket eder, tıpkı ekvatordan başlayıp kutupta noktalanan yerkürenin yüzeydeki iki çizgisinin kademeli olarak Kuzey Kutbu'na doğru ilerledikçe birbirlerine yaklaşması gibi. Bu, devasa cisimlerin birbirlerini çekme eğiliminde oldukları ya da Newton'un yer çekimi teorisinden beklediğimiz gibi hareket ettikleri anlamına gelir. Ancak aslında ortada hiçbir kuvvet yoktur. Yer çekimi olarak düşündüğümüz şey, sadece uzay-zaman geometrisinin bir teza-

hürüdür.

\*\*\*\*\*

Genel izafiyet tarafından yapılan en önemli değişikliklerden biri, uzayın ve zamanın geometrik yapısının aslında uzay ve zamandaki şeylere bağlı olduğu fikridir. Uzay-zamanın eğriliğini belirleyen budur ve cisimlerin nasıl hareket edeceğini de belirler. Ama uzay-zamanda herhangi bir şey yoksa ne olur? Genel izafiyette boş uzay-zamanın yapısı nedir?

Uzay-zaman boş olsaydı, (bir ihtimal) Minkowski'nin uzay-zamanına benzeyecekti. Başka bir deyişle eşyalar kavise neden oluyorsa, eşyalar olmadan kavis olmayacağını varsayabilirsiniz. Ve Minkowski uzay-zamanı, eğriliği ve eşyası olmayan uzay-zaman için mükemmel bir adaydır.

Fakat Einstein genel göreliliği 1915'te keşfettikten kısa süre sonra, başka fizikçiler bir şeyler fark ettiler. Şimdi Einstein'ın denklemi olarak adlandırdığımız teorinin merkezi denklemi, maddenin özelliklerini, yani maddenin enerjisini ve momentumunu uzay-zamanın eğriliğiyle ilişkilendirmişti.<sup>97</sup> Bu denklemin çözümleri teoriye göre olası evrenleri temsil eder. Bunlar eğrilikleri, enerjileri ve momentumları Einstein'ın denkleminin de gerektirdiği şekilde dört boyutlu uzay-zamanlardır. Bu fizikçilerin farkına vardıkları şey, maddenin uzay-zaman diliminde nasıl dağıtıldığını basitçe belirlemenin genelde uzay-zamanın eğriliğini düzeltmek için yeterli olmadığıydı. Gerçekten de içinde herhangi bir şey olmayan genel izafiyetin izin verdiği sonsuz sayıda olası evren vardır (veya daha iyi ifadeyle, dört boyutlu uzay-zamanlardan bahsettiğimiz için evren geçmişleri vardır.)

Bunların hepsi, hiçbirini herhangi bir madde içermemelerine rağmen Einstein'ın denkleminin eğrilikleri açısından birbirlerinden farklı olan çözümlerdir.<sup>98</sup>

Başka bir deyişle, eşyanın dağılımı kavis ile ilişkili olsa da hiçbir şey hiçbir kavisi garanti etmemektedir. Bu, genel izafiyetteki boş uzayın özel izafiyettekinden ya da Newton fiziğindeki çok çok daha zengin olduğu anlamına gelir. Gerçekten de “boş”un anlamını neredeyse kırılma noktasına kadar uzatması, durumu çok zengin bir hâle getirmiştir.

Bu anlama ulaşmanın en çarpıcı yolu, Einstein'ın genel izafiyetin temel denklemini bulduğu yıl olan 1915'te keşfedilen boş bir evren örneğini tanımlamaktır. Bu örnek, Alman fizikçi Karl Schwarzschild tarafından bulundu ve bu nedenle Schwarzschild uzay-zamanı olarak bilinmektedir.<sup>99</sup> Schwarzschild'in amacı, bir voleybol topu ya da (yaklaşık olarak) bir yıldız gibi mükemmel küre şekline sahip bir nesneden başka bir şey olmayan uzay-zaman dönüşümünü tanımlamak için genel izafiyeti kullanmaktır.

Schwarzschild, soruna plaj topu gibi bir nesne varsayarak yaklaştı ve uzay-zamanı başka hiçbir şey olmayan yerde, onun dışında tanımlayacaktı. Pragmatik anlamda bu mantıklıydı. Örneğin güneş sistemini anlamak istiyorsanız, başlangıçta güneşin içinde olanlarla ilgili sorularınızı kenara koyup uzaktaki gezegenlerin hareketini tanımlamaya çalışabilirsiniz.

Schwarzschild, kendisi için belirlediği sorunu başarıyla çözdü. Fakat o pazarlığını yaptığı şeyin fazlasını bulmaya başladı. Bulduğu çözüm, ortada hiç voleybol topu olmasa bile mükemmel bir şekilde geçerli oluyordu. Başka bir de-

yişle, evrenin herhangi bir yerinde madde olmasa bile olası bir fiziksel durumu tanımlıyor olması bakımından mantıklıydı.

Verilen bu örnek ile ilgili önemli noktalardan biri, madde olmasa bile Schwarzschild'in uzay-zamanının Minkowski uzay-zamanıyla aynı olmadığıdır. Düz değildir. Gerçekten de özelliklerini incelemek için küçük bir nesneyi bomboş bir uzay-zamana (ya da roketteki bir gözlemci) koyduğunuz hayal ederseniz, nesnenin Minkowski uzay-zamanında davranacağından çok farklı davrandığını görürdünüz. Schwarzschild uzay-zamanında nesne, bir yıldız gibi büyük bir nesnenin hareket etmesini beklediğiniz gibi hareket edecekti. Sanki bir şeylere doğru düşüyor gibi davranacaktı. Fakat hiçbir şey yoktur, en azından nesnenin çarpışabileceği türden herhangi bir şey yoktur.

Bunun yerine daha garip bir şey olurdu. Schwarzschild uzay-zamanında bir uzay gemisinde hareketsiz bir nesne yerine örneğin, arkadaşınız (ve hatta pek de sevmediğiniz biri) olduğunu, sizin de uzaklarda bir yerde başka bir uzay gemisinde olduğunuzu varsayın. Arkadaşınızın bir şey olmayan şeye (non-thing) doğru çekildiğini ve zaman zaman ışık ışınlarıyla mesaj göndererek durumu hakkında size mesajlar gönderdiğini düşünün. Bu mesajlarda, arkadaşınızın saatine göre mesajın gönderilme zamanı da yazmaktadır. Mesajları okumaya devam ettiniz ve arkadaşınız aynı düzen dâhilinde, örneğin her beş dakikada bir mesajları göndermeye devam ettiğini bildirse de zaman geçtikçe mesajların sıklığı azalır gibi görünmeye başlar. Sonunda mesajlar tamamen kesilir.

Mesajlar neden durdu? Bunun nedeni, arkadaşınızın

ışınların kaçamayacağı kadar uzay-zaman eğriliğinin aşırı olduğu Schwarzschild uzay-zamanının çok uzak bölgelerine “düşmüş” olmasıdır. Artık kendi üzerlerine doğru büküldüklerinden, ışık dahi arkadaşınız gibi “düşüyor” gibi davranacaktır.

Schwarzschild’in bu uzay-zaman alanı eşiğinin bir adı vardır: Olay ufku. Bu bir geri dönüşü olmayan noktadır. Olay ufkunu geçtikten sonra ne kadar roket yakıtı kullanırsanız kullanın geri dönüş yapamazsınız. Işık kaçamayacağı içinde dışarı sinyal de gönderemezsiniz. Arkadaşınız ta ki sonunda birden bire ortaya çıkana kadar düşmeye devam edecektir.

Muhtemelen olay ufuklarını daha önce veya en azından uzay-zamanın bir bölgesinin olay ufku ile kuşatıldığı ve renkli bir ifade olan “kara delik” ifadesiyle bile olsa duymuşsunuzdur.<sup>100</sup> Esasen, Schwarzschild’in tam olarak fark etmeden keşfettiği şey Einstein’ın izafiyet kuramının kara deliklerin varlığını öngördüğüydü.

Kara delikleri şu şekilde düşünmek cazip ve oldukça yaygındır: Şeyler. Genellikle, kendi ağırlıkları altında çöken yıldızların kalıntıları olarak tanımlanırlar. Kabaca tarif etmek gerekirse konumları vardır, yıldız ve gezegenlerin yaptığı gibi aynı şekilde diğer nesneleri etkilerler ve sizin, ayın ya da herhangi bir nesnenin sahip olduğu gibi bir kütleleri vardır.

Bu açıdan bakıldığında Schwarzschild uzay-zamanını, içinde kara delikler gibi şeyler olan bir evren olarak tanımlamak doğaldır. Ancak çok dikkatli olmalıyız. Schwarzschild uzay-zamanında bir kara delik olmasına rağmen, herhangi

bir yerde ya da herhangi bir zamanda herhangi bir şey yoktur. Bir toz zerreciği bile. Schwarzschild uzay-zamanında yol alan bir roket gemisinde seyahat eden bir gözlemciye “Yanında herhangi bir madde var mı?” diye sorsaydınız, gözlemci etrafına bakıp herhangi bir şey göremiyorum derdi. Einstein’ın denklemi için bir çözüm; her bir parçanın Minowski uzay-zamanı kadar boş olmasıdır.

Bu sebeple, Schwarzschild’in uzay-zamanındaki kara delik evrenimizde var olduğuna inandığımız kara deliklerden farklıdır. Bunlar, yıldızlar gibi devasa cisimlerin kendi ağırlığı altında çökerek oluştuklarını düşündüklerimizdir. Schwarzschild uzay-zamanı ise içinde her zaman var ola-gelmiş ebedi ve değişmeyen bir kara deliğin olduğu evreni tarif ediyordu. Hiçbir şeyin kalıntısı değildi. Bir bakıma, bu yüzden önemli bir örnektir. Kara deliklerin tamamen geometrik bir fenomen olduğunu, hiçbir maddenin olmadığı bir evrende bile mümkün olduğunu göstermektedir.

Öyleyse Schwarzschild uzay-zamanı boş mudur, dolu mu? Net bir “evet” veya “hayır” cevabı imkânsız görünüyor. Uzay-zamanda herhangi bir yerde konumlanmış madde yoktur. Yine de böyle bir evren, süper yoğun bir yıldız gibi devasa bir cisim içeren evrenin tüm özelliklerini taşır. Elbette, arkadaşınız size bir odanın boş olduğunu söylese ve siz de kara delik bulmak için içeri gerseniz, arkadaşınız bir mada-haklı da olsa pek yapabileceğiniz bir şey olmadığı için hemen rahatsız olurdunuz. Genel izafiyetin “boş”un anlamını kırılma noktasına getirdiğini söylediğimde bunu kastetmiştim. “Kara delikten başka hiçbir şey” ifadesi çok şey ifade ediyor gibi.

Schwarzschild uzay-zamanı Einstein'ın denklemi için kim-senin (Minkowski uzay-zamanı hariç) keşfedemediği ilk çö-zümdür. Kısa süre sonra diğerleri de onu izledi. Bunun önemli bir örneği Hollandalı bir matematiksel fizikçi Willem de Sitter sayesindeydi. Schwarzschild'in uzay-zamanında olduğu gibi Sitter'in uzay-zamanı da boştu. Yani uzay veya zamanın herhangi bir yerindeki gözlemci herhangi bir mad-de gördüğünü söyleyemezdi. Yine Schwarzschild uzay-zamanı gibi, Sitter'in uzay-zamanı da kavisliydi ve bu ne-denle de Sitter uzay-zaman fiziği Minkowski uzay-zamanıinkinden çok farklıydı.<sup>101</sup>

De Sitter uzay-zamanının ayrıntıları o kadar önem arz etmemektedir. Önemli olan şey ise şudur: Einstein'a çözü-münü ilk kez 1917'de bir mektupla açıklarken, Einstein'ın yakın zamanda önerdiği çözümle kıyaslama yapıyordu. Einstein bu fikirden nefret etmişti. En çok nefret ettiği şey, onu bizim için en ilginç yapan özellikti. Gerçek evrenin sa-hip olmasını beklediğimiz özelliklerin çoğunu barındıran bir örnekti fakat burada hiçbir şey yoktu.

Einstein'ın ondan nefret etmesinin nedeni, genel izafiye-tin uzay-zaman geometrisinin uzay ve zaman boyunca yayılmış sıradan madde tarafından tam olarak belirlendiği bir teori olduğuna inanıyor olmasıydı. Gerçekten de Newton fiziğini reddetmesinin nedenlerinden biri, Newton'un teorisi-nin aslında var olan ve uzay ile zaman içinde hareket eden şeylerden bağımsız olarak her türlü yapıya dayandığıdır. Einstein bu tür yapıların metafiziksel tezvirat olduğunu dü-şündü ve bundan kurtulmak istedi.

Ancak ürettiği teori birçok açıdan daha kötüydü. Sabit bir

arka plan uzay-zaman yapısı olmadığı hâlde, madde dağılımı sabitlendikten sonra dahi artık uzay-zaman geometrisinin ne olduğu hakkında büyük bir serbestlik vardı.

Başka bir deyişle, Einstein Newton'un teorisini beğenmedi çünkü sadece cisimlerin hareket edeceği belirli varsayılan yörüngeleri olduğunu kabul ediyordu. Ya "Neden bir cisim şu değil de bu şekilde gitmektedir?" diye sorarsak... Newton, sadece "Uzay-zaman işte böyledir" demekten fazla bir şey söyleyemezdi. Einstein bu soruya daha iyi cevap istiyordu. Bu cevaba şöyle bir ekleme yapmak istiyordu: "Uzay-zaman böyledir çünkü evrendeki şeyler bu şekilde düzenlenmiştir." Herhangi bir madde olmaksızın bile uzay-zamanın olabileceği çok yol var olmasından dolayı böyle bir şey söyleyemediği ortaya çıktı.

Sonraki on yıllar boyunca Einstein ve diğerleri, Sitter ve Schwarzschild uzay-zamanlarının sadece buzdağının görünen kısmı olduğunu anlamaya başladılar. Aslında, Einstein'ın aksine güçlü tercihlerine rağmen boş bir evrenin sonsuz sayıda yolu olabilir. Bu, yarattığımız fizik teorileri üzerinde ne kadar az kontrole sahip olduğumuzu gösterir: Çoğu durumda belirli hedefler düşünülerek kuramlar kurarken, matematik her zaman umut ve beklentilerimize ulaşmada bizimle iş birliği yapmaz.

\*\*\*\*\*

Daha önce 1. Bölüm'de, elektromanyetizmanın modern anlayışını (esir olmaksızın) belirtmiştim. Elektromanyetik alan çeşitli şekillerde düzenlenebilen yeni bir şeydir. Bu farklı düzenlemelerin ışık, radyo dalgaları veya Wi-Fi sinyalleri

gibi çok tanıdık olgulara karşılık geldiği ortaya çıkıyor. Ne olursa olsun, ışık da bir çeşit şeydir. Işıkla dolu bir dünya gerçekten boş değildir. Benzer şekilde radyo dalgaları, X-ışınları, Wi-Fi sinyalleri de bir şeydir. Daha önemlisi, elektromanyetik alan genel izafiyette bir madde sayılır. Elektromanyetik alanın çeşitli konfigürasyonları, onlarla ilişkili farklı enerji ve momentum miktarlarına sahiptir. Enerji ve momentum güneşin yaptığı gibi uzay-zamanın kavisini etkilemektedir.

Az önce genel izafiyet tarafından izin verilen iki şaşırtıcı boş uzay-zaman örneğinden söz ettim. Fakat başka bir uzay-zaman sınıfı daha var ve bazı yönlerden daha önemliler. Bunlar, Sitter'ın uzay-zamanıyla ilk karşılaştığında Einstein'ı çok fazla rahatsız ettiği şekilde içinde hiç madde olmadığı uzay-zamanlardır. Yine de bunlar ışık veya radyo dalgaları gibi şeylerle doludur.

Bu size bir bilmece gibi gelmeye başlıyorsa, yakalıyor sun demektir. Size biraz yardımcı olayım. İzafiyet teorisi tarihinin çok erken dönemlerinde Einstein, kendi adıyla anılan denkleminin üzerinde oynamalar yaparken Maxwell'in elektromanyetik alan denklemlerine çok benzeyen yeni denklemler üretebileceğini fark etti. Bu, büyük bir sürpriz değildi. Aslında Einstein, genel izafiyeti inşa etme modeli olarak Maxwell'in elektromanyetizma teorisini kullanmıştı. Öyleyse, denkleminin de Maxwell'e benzemesi gerekirdi.<sup>102</sup>

Bu benzerliklerin umulmadık bir sonucu yoktu. Maxwell'in denklemlerinin elektromanyetik radyasyonu tanımladığını zaten biliyoruz. Yani bir yerden başka yere giden dalgalar gibi görünen alanın konfigürasyonu: Tam olarak, bir

ampul ışığının gözünüze ulaşması veya Wi-Fi cihazınızdan gelen bir sinyalin bilgisayarınıza erişmesi ile gerçekleşen olay. Einstein'ın fark ettiği şey, kendi ve Maxwell'in denklemleri arasındaki benzerliklerin genel izafiyete çok benzer bir şeye izin verdiği anlamına geliyordu: Bir yerden diğerine gidebilecek dalgalar. Şimdi bunlara yer çekimi dalgaları diyoruz.

Maxwell, elektromanyetik radyasyonu ilk kez ortaya attığında, esirin belirli bir osilasyon türü olduğunu anladı. Göreliliğin ortaya çıkışıyla birlikte bu dalgalar yeniden yorumlandı: Artık elektromanyetik alanın kendisi bir tür varlıktı ve benzer elektromanyetik olaylar üretmek için çeşitli yollarla titreşebiliyordu. Peki, yer çekimi dalgalarına ne oldu? Bunların bir tür salınım olması gerekiyorsa o zaman titreşen nedir? Elektromanyetik alanın rolü nedir?

Cevap, uzay-zaman geometrisinin kendisinde salınım yapan yer çekimi dalgalarıdır.

Bu ne anlama geliyor? Uzay-zaman metriğiyle kodlanan uzay-zaman geometrisinin kavisli uzay-zamandaki uzunluk ve açılar gibi şeyleri belirlediğini unutmayalım. Ayrıca, Galileo uzay-zamanının düz çizgilerinin küçük cisimlerin hareketlerinin belirlemesi gibi maddenin varsayılan hareketini de belirlemektedir. Yani bir yer çekimi dalgasının uzay-zaman geometrisinde bir salınım olduğunu söylemek, yer çekimi dalgası uzay-zamanının bazı bölgelerinden geçtiğinde o bölgedeki “en düz” çizgilerin salınacağını söylemek demektir. Küçük parçacıklar işlerine giderken, üzerlerine etkiyen bir güç olmaksızın ileri geri, birbirlerine doğru ve sonra birbirlerinden uzağa olmak üzere aniden hareket etmeye baş-

layacaklardır. Benzer şekilde, yer çekimi dalgasının geçerken uzay-zamanda bir yay olduğunu düşünelim. Yay dalga tarafından gerilecek ve sıkıştırılacaktır.

Yer çekimi dalgaları boş evrenlerde dahi mümkündür. Bunun anlamı onların birtakım şeyler olduğudur ve benzer durum kara delikler için de geçerlidir. Yer çekimi dalgaları, maddenin bulunduğu evrenlerde de mümkündür ancak bu durumlarda da kendileri madde olarak değerlendirilmez. Ve bu, belki de Schwarzschild'in uzay-zamanındaki kara delikten daha fazla uzay-zamanın boş olduğunun ne anlama geldiğini söylemeye zorlar.

Biraz önce bahsettiğim yay örneğini düşünelim. Sıradan bir metal yay salındığında, metal içindeki sürtünme sonucu giderek yavaşlar ve nihayet durur. Bu olduğunda, yay ısınır ve enerji serbest bırakılır. Bu enerji çeşitli formlarda serbest bırakılabilir fakat bazıları ışık şeklinde olur: Yani yay ısınırken çok hafif şekilde parlayacaktır. Bu, yer çekimi dalgasının önce yavaş ve sonra da ışık ve ısı olarak enerji aktarabileceği anlamına gelir.<sup>103</sup>

Başka bir örnek daha verelim. Piezoelektrik kristaller, deforme olduklarında bir akım üreten birtakım kristallerdir. Bu da bunları ampul gibi bir devreye bağlayarak ve onları titreştirerek ampule güç sağlayabileceğiniz anlamına gelir. Fakat ya kristal bir yer çekimi dalgası tarafından titreştirilirse? Dalga geçtiğinde, kristali etkileyen bir madde ya da enerji olmasa bile muhtemelen ampul kendiliğinden yanacaktır. Bu vakaların her ikisinde de yalnızca boş uzay-zamanın sıradan nesneleri hareketlendirmekle kalmaz, bu hareketler yukarıda belirttiğim gibi elektromanyetik radyas-

yon üretebilir. Dolayısıyla yer çekimi dalgaları, doğru araçlarla sıradan bir madde üretebilir.

Başka bir deyişle genel izafiyet, doğru tipte yay ve geçen bir yer çekimi dalgasıyla hiçbir şeyden bir şeyler üretmenin mümkün olabileceğini söylemektedir.

\*\*\*\*\*

İlk endişelerine rağmen Einstein, boş uzay-zamanın oldukça hızlı şekilde zengin bir yapıya kavuşabileceğini fikrine ulaştı: 1918 yılına kadar Sitter'in çözümüne karşı yaptığı argümanlarda ısrar etmesine rağmen, 1920'ye kadar uzay-zaman geometrisinin sadece kısmen evrendeki madde tarafından belirlendiğini ve kısmen de maddenin yokluğunda bile karmaşık olaylara yol açacak şekilde uzay-zamanın geri kalanının geometrisi tarafından belirlendiği fikrini benimsemiş gibi göründü.

Gerçekten de Einstein 1920'de verdiği bir konferansta metriğin kendisini, hem uzay-zaman geometrisini belirleyen hem de elektromanyetik alan gibi maddi bir varlığın özelliklerinden bazılarına sahip olan bir tür "esir" olarak tanımlama noktasına gelmiştir.<sup>104</sup> Genel izafiyetin gelişimine ilham kaynağı olan elektromanyetik alan ile metrik arasındaki bu yakın ilişki, şimdi Einstein için yeni bir önem arz etmeye başlamıştı. Einstein, yakında genel izafiyeti ve elektromanyetizmayı Maxwell'in elektrik ve manyetizmayı birleştirdiği gibi kaynaştıracak "birleşik alan teorisi" kurmayı amaçlayan, kariyerinin geri kalan kısmında kendisini meşgul edecek olağan dışı bir projeye başladı. Bu amaca hiçbir zaman ulaşamadı ve gerçekten de gelecek bölümde göreceğimiz gibi

yirminci yüzyılda elektromanyetik teori keskin bir viraja girdi.

Ancak karmaşık yapılı boş uzay-zaman olasılığını nihayet kabul ederken, Einstein'ın yer çekimi dalgaları üzerine görüşlerinin çok daha karmaşık ve kararsız olduğu da ortaya çıkmaya başladı.<sup>105</sup> Bunu ilk bulan kendisi olmasına rağmen; ilk çalışmaları hatalıydı ve bu hataları düzeltirken yer çekimi dalgalarının bazı şaşırtıcı özelliklerini keşfetmeye başladı. Bunların en çarpıcısı, bu dalgaların enerji taşıyor gibi görünmeleri idi.

Bulmacalar o kadar zordu ki 1936 itibarıyla kendini yer çekimi dalgalarının hiç olmadığı konusunda ikna etmişti. Aynı yıl, yer çekimi dalgalarıyla ilgili daha önceki çalışmalarının çeşitli yakınlaştırma ve tahmin yöntemlerine bağlı olduğunu ve şu anki inandığı şeyin yanlış olduğunu göstermek amacıyla araştırma görevlisi Nathan Rosen ile "Yer Çekimi Dalgaları Var Mıdır?" başlıklı bir makale hazırladı.

Einstein ve Rosen makaleyi, 1930'ların ortaları itibarıyla Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ve belki dünyadaki en prestijli fizik dergisi olan *Physical Review*'e gönderdiler.<sup>107</sup> Einstein, yıllardır düzenli olarak dergide çalışmalar yayınlamıştı ve bu eserin de basit bir şekilde kabul edileceğini bekliyordu. Ancak bu çalışmayla ilgili bir şeyler derginin editörünün tereddüde düşmesine neden oldu. Hemen kabul etmek yerine, çalışmayı değerlendirmek ve yayın için uygunluğu hakkında önerisini sunması için bir dış uzmanı hakem olarak atadı. Hakem, çalışmanın sonucu ve içeriğindeki bazı argümanları şiddetle eleştiren on sayfalık ve birçok bilimsel makaleden daha uzun bir raporla cevabını gönderdi. *Physical Review*, raporu Einstein ve Rosen'e uzmanın kimliğini

açıklamadan ileterek Einstein'ın bahsedilen eleştirilere hitap etmedikçe çalışmanın mevcut hâliyle yayınlanamayacağını ifade ettiler.

Bugün, bu süreç hakem denetimi olarak bir norm hâlini almıştır: Günümüzde büyük akademik dergilerde dış uzmanlar tarafından gözden geçirilmeksizin bir çalışmanın yayınlanmasını düşünmek mümkün değildir. Hatta akademik derginin kalite ve prestiji direkt olarak hakem denetimi süreçlerinin sağlamlığıyla ilişkilendirilmektedir. Fakat yirminci yüzyılın ortalarında olduğu gibi, bu sistem yeni başlamıştı ve mükemmel dergiler ara sıra herhangi bir dış incelemeye tabi tutmaksızın bazı çalışmaları yayınlıyorlardı.

Einstein o zamanlar, dünyadaki en ünlü bilim adamı değildi: Dünyadaki en ünlü insanlardan biriydi. 1921 yılında aldığı Nobel Ödülü de dâhil olmak üzere fizikteki başarılarının yanı sıra, Avrupa'daki hem faşizm hem de komünizm hakkında alenen eleştirilerde bulunuyordu.<sup>108</sup> Nazi sempatanlarından gelen tehditlerle 1933'te İngiltere'ye, ardından Amerika Birleşik Devletleri'nin New Jersey eyaletinin Princeton şehrinde bulunan İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne yerleşerek Kıta Avrupası'ndan kaçmıştır. Orada, Almanya'dan gelen diğer Yahudi mültecileri savunarak Batı Avrupalı liderleri faşizmin yükselen dalgasını ciddiye almaya çağırان güçlü bir siyasi güç olmuştur.

Kendisinin icat ettiği bir teorinin isimsiz bir "uzman" tarafından eleştirel tarzda değerlendirilmesine alışık değildi. Einstein'ın aldığı raporu okuduğu bile şaibelidir. Bunun yerine Physical Review'in editörlerine, kendisi ve Rosen'ın onlara çalışmalarını gözden geçirilmesi için değil yayınlanması

için gönderildiğini ifade eden sert bir üslupta cevap yazdı. Makaleyi geri çekti ve bir daha asla bu dergiye çalışma göndermedi. Bunun yerine çalışmasını uzman tarafından düzeltilen imla hatalarını bile değiştirmeden başka bir dergiye gönderdi. Bu dergi ise çalışmayı seri bir şekilde kabul etti.

Ancak mesele orada bitmedi. Yine de Einstein'ın hırslandığı uzman haklı çıkacaktı. Einstein o zaman (ya da belki de hiç) bunu bilmesede uzman Howard Robertson'du. Robertson gerçekten izafiyet kuramıyla ilgili uzmanlaşmış kendisi de bunu kabul etmişti. O zamanlar Robertson'un üniversitede, Einstein'ın da enstitüde olmak üzere Princeton'da kalıcı görevleri vardı.

Robertson çalışmayı inceledikten sonra California'da izne çıkmıştı. Henüz New Jersey'e dönmeden önce, birkaç ay sonra Einstein çalışması hakkında detaylı bir konuşma yaptı.

Robertson, isimsiz raporunun ışığında Einstein'ın görüşlerini hiç değiştirmedeğini fark etti. Robertson'un ileri sürdüğü eleştirileri anlamak için zaman bile ayırmamıştı. Görünüşe göre kendisinin anonim uzman olduğunu hiç sezdirmeden Robertson, Einstein'ı kademeli olarak kusurlu olduğuna ikna etmiş olacak ki Einstein yayınlamadan önce çalışmasını tekrar tamamen gözden geçirmişti. Yayımlanan nihai versiyonunda, tam tersi bir sonucu ileri sürüyordu: Yer çekimi dalgalarının yine genel izafiyette mümkün olduğuna inanıyordu.

Bu fiyaskodan sonra bile Einstein, periyodik olarak yer çekimi dalgalarının kendi evrenimizdeki gerçek fiziksel sis-

temler tarafından üretilip üretilmeyeceğine dair şüphelerini ifade etmişti. Mesele hakkında tutarlı bir görüşe varıp varmadığı da net değildir.

Günümüzde fizikçiler arasında yer çekimi dalgalarının mümkün olmadığı lakin kendi evrenimizde çevrede gezindikleri konusunda geniş fikir birliği bulunmaktadır. Fizikçiler, yıldızların patlayarak süpernova olduklarındaki gibi olaylarla oluştuklarına inanmaktadır. Çoğu fizikçi, yer çekimi dalgalarının büyük patlamadan (big bang) hemen sonra evrenin ilk zamanlarından beri üretilmeye başladığına ve bunların günümüzde evrende seyahat ettiklerine inanmaktadır. Yer çekimi dalgaları, Newton yer çekiminin tam zıttı olan genel izafiyet kuramının yeni temel tahminlerinden biri olarak görülmektedir.

Yakın zamana kadar, hikâyenin sonu buraya kadardı: Bir asır önce tahmin edilmiş, bulunmaları için milyarlarca dolar sarf edilmiş ve on yıllar boyu emekler adanmış olsa bile herhangi bir yer çekimi dalgası hiç gözlenmemişti. Fakat 14 Eylül 2015 günü, sabahın erken saatlerinde bu durum değişmiştir. İlk kez, biri Louisiana ve diğeri de Washington'da olmak üzere iki ayrı Lazer Girişimölçer Kütleçekimsel Dalga Gözlemevi (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) tesisinde yer küremizden geçmekte olan bir kütleçekimsel dalganın sinyalleri kaydedilmiştir. Bu sinyallerin analiz edilmesiyle, dalganın bir milyar ışık yılı mesafede üretildiği, iki kara deliğin birbiriyle çarpışarak uzay ve zamanda bir dalgalanmaya sebep olduğu ortaya çıkarıldı. Bu keşif, teorinin tanımladığı boş uzay-zaman yapısı da dâhil olmak üzere, genel izafiyet için güçlü bir kanıt teşkil

etmektedir.<sup>109</sup>

### 3. BÖLÜM

#### HİÇ HİÇLİKLER (The Nothing Nothings)

Paul Dirac, elektron olarak bilinen parçacıklar teorisi için temel oluşturan denklemini yani en büyük keşfini yaptığında kimseye bundan bahsetmemiş, bir ay boyunca sessizliğini muhafaza etmişti. Ne bir mektup ne de öğrencileri veya meslektaşlarına sıradan notlar... Hiçbir şey.<sup>110</sup> Muhteşem bir keşif yapmış olmanın sevinciyle deneysel fiziğin temel gerçekleriyle karşı karşıya kaldığında bu keşfin çökebileceği korkusu arasında duygusal bir ikilemde olduğundan çalışmasını kendine saklıyordu. Kendini, keşfinin akla yatkınlığına ikna etmek için bazı başlangıç hesaplamaları yaptıktan sonra keşfinin yanlış çıkması korkusuyla daha ayrıntılı bir çalışma yapamıyordu. Bunu başkasıyla paylaşmak istedi ama insanların kendine inanamayabileceği riski vardı.

O haftalar boyunca Cambridge sokaklarında Dirac ile karşılaşan kimse onun içinde kopan fırtınaları tahmin bile edemezdi. Dirac ne düşündüğü sezilemeyen, üç beş kelimeden fazla konuşmayan biriydi. Arkadaşları ve beraber çalıştığı insanlar bile ismini zar zor hatırlardı. Dirac'ın gizli teorisini açıkladığı ilk kişi Cambridge fizikçilerinden Charles

Darwin (Charles Darwin'in torunu) idi. Darwin ona birkaç ay önce, Dirac'ın yazışma ve çalışmalarının altına attığı imza hakkında "P.A.M. ne anlama geliyor?" diye yazarak sormuştu. Birbirlerini altı yıldır tanıyorlardı.<sup>111</sup>

Sessizliği yanında doğal bir alçak gönüllüğü de vardı.<sup>112</sup> Cambridge'deki odaları neredeyse boştu. Çalışmalarının çoğunu yaptığı odasında sadece öğrencilerin oturacağı cinsten bir sıra ve ara sıra misafir gelirse yer gösterebileceği bir kanepesi vardı. Herhangi bir dekorasyon yoktu. Günlerini katı bir çalışma ritüeliyle geçirirdi. Her sabah hızlıca uyanır, gün boyunca sadece öğünler için durup sürekli çalışırdı. Çalışmadığı akşamlar ve Pazar günlerinde çoğu zaman yalnız yürüyüşe çıkardı. 1929'da Dirac, Wisconsin-Madison Üniversitesi'ni ziyaret ettiğinde oradaki bir gazeteci kendisiyle bir röportaj yaptı.<sup>113</sup> Gazeteci ona "sinemaya gider misiniz?" diye sordu. Dirac da her zamanki kısa ve öz tavrıyla "Evet" diye cevapladı. Gazeteci "En son ne zaman gittiniz?" diye sordu. "1920'de, belki de 1930'da" diye cevapladı. (Daha önce de Dirac'ın araştırmalarını sıradan okuyucunun anlayabileceği tarzda özetleyip özetleyemeyeceği sorusuna karşılık olarak basitçe "Hayır" yanıtını vermişti.)

Nadiren konuştuğunda da kimse ne demek istediğini anlamıyordu. Dirac'ın problemlere yaklaşımında eşsiz bir kabiliyeti vardı. Diğer yaklaşımları anlamıyor ya da anlamak istemiyordu. İnsanlar ya Dirac gibi düşünmeyi öğrenmek zorundaydı ya da onunla iletişim kurmaktan vazgeçeceklerdi. Fakat Dirac'ın dilini öğrenmenin diğer insanlara sunacağı faydalar Dirac'ın kariyerinin başlarında açıkça ortaya çıktı. Doktorasını 1926'da Cambridge'de yirmi üç yaşında ta-

mamlamıştı. Çalışması kuantum teorisi hakkındaki ilk tezdî. O zaman zor ve karmaşık bir doğumun sancılarını çekiyordu. Yeni teorisi hakkında araştırma yapmak için burs kazanarak bu konuda iki büyük merkez olan Danimarka'nın Kopenhag ve Almanya'nın Göttingen şehrine seyahat etti. Genel olarak sevilme de özellikle Alman meslektaşları onu entelektüel ve şahsen zor biri olarak değerlendiriyorlardı. Kendisine hemen saygı gösterilmesini istiyordu.<sup>114</sup>

Ekim 1927'de Cambridge St. John's College'in bursunu kazanarak Cambridge'e geri döndü. Kısa bir süre sonra, o yılın Kasım sonu ve Aralık başlarında gizli denklemini bulmuştu. Sadece yirmi beş yaşındaydı ama Avrupa'daki en ünlü ve belki de Newton'dan beri en büyük İngiliz bilim adamlarından biri olmuştu.<sup>115</sup> (Maxwell'in bir İskoç olduğunu hatırlayalım.) Yirmi dokuz yaşında, 1666'da Newton'un getirildiği pozisyon olan Lucasian Matematik Profesörlüğü'ne getirilecekti.

Bir yıldan biraz fazla bir süre sonra otuz bir yaşındayken, tamamen yeni bir maddenin varlığını tahmin etmek amacıyla denklemini başarılı bir şekilde kullandığı için Nobel Ödülü almıştır. Kendisinden önceki Maxwell teorisi gibi bir elektromanyetik kuantum teorisi geliştirmiştir. Bu teorisi hiçbir şeyin fiziği anlayışımızı sonsuza dek değiştirmiştir.

\*\*\*\*\*

1920'lerin ortalarında radikalizm ve devrimci ruh kuantum teorisine eşlik etmişti. Çoğu devrimci hareket gibi bu da gençlerin oyunuydu. Teori ilk büyüme atılımı yaparken Dirac önemli katkılarda bulunanlardan biri olmuştu. Werner Hei-

senberg, Louis de Broglie, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan gibi diğer büyük oyuncular da yirmili yaşlarında veya otuzların başlarındaydı. Genç kâşifler olağanüstü bir şey yaptıklarını biliyordu ve izlerini bırakmak istiyorlardı.

Bununla birlikte, eski fizikçiler arasında önemli bir şüpheliklik vardı. Berlin'deki ve Göttingen'deki kuantum hakkındaki önemli yerleri düzenli olarak ziyaret eden Hollanda'nın Leiden şehrindeki fizikçi Paul Ehrenfest, Almanca "Fakat beyler, bu fizik değil!" diye konuşabilen bir Seylan papağanıyla seyahat ederdi. Ehrenfest kuantum teorisi tartışmalarına papağanının katılmasını önermekten hoşlanıyordu.<sup>116</sup> (Aynı zamanda teoriye muazzam ölçüde katkı sağlayanlardan biridir.)

Aslında papağanın duyguları anlaşılabilirdi. Yeni kuantum teorisi gerçekliği, Einstein'ın da dâhil olduğu çoğu fizikçiden öyle belirgin bir farklılıkla ortaya koymuştu ki, fizikçiler artık gerçekliğin tam resminin başka hiçbir şeyin ortaya koyamayacağına inanmaya başlamışlardı.<sup>117</sup>

Önceki bölümlerde ele aldığımız teoriler pek çok açıdan farklılıklar arz etmektedir. Ama hepsinin ortak bir özelliği vardır. Hepsinde de aşağı yukarı tanımlanmış sınırları olan uzayda (ve zamanda) bir yerde konumlanmış cisimleri düşünmek suretiyle, belirli bir anda veya zamanda fiziksel nesnelerin konfigürasyonu üzerine düşünülür. Yani, verilen şartlarla ilgili düşünmek gayet doğaldır. Örneğin Newton'un yer çekimi kavramında, uzayı sonsuz üç boyutlu, olası lokasyonlardaki "konteyner" olarak sunabilirim. Bunun içerisinde belirli bir anda gezegenler, beyzbol topları gibi sıradan şeyler bulunmaktadır. Klasik teori veya izafiyet teorisi-

ne göre dört boyutlu uzay-zaman boyunca farklı zamanlarda farklı konumlar işgal eden aynı eşya türlerini düşünüyoruz.

Şartları simgelemenin bu yöntemi veya fizikçilerin özetle durum demelerinin sezgisel bir referansı vardır. Sonuçta, görsel alanlarımızda şöyle bir şey bulunmaktadır: Dünyaya baktığımızda az çok belirli şekil ve ebatta ve uzaya dizilmiş nesneleri görüyoruz. Belli bir kişinin gözlerini açtığında görebildiklerinden bağımsız şeyler arasındaki uzaysal (ve uzay-zamansal) ilişkileri simgeleyen bir “hiçbir yerden bakış” perspektifini benimsemeye çalışmamız haricinde, uzay veya uzay-zamanda durumları gösterme biçimimiz tamamen analogdur.

Kuantum teorisinde, nesnelerin uzay ya da uzay-zamanında belirli dizilişlerdeki durumlarını gösteren bu resim pencereden dışarı çıkmaktadır.<sup>118</sup> Kuantum durumu daha soyut bir şeydir. (“Durum” ifadesini sıradan kullanımdan çıkararak, giderek kuantum teorisinde bahsedilen daha teknik anlamıyla kullanmaya başladığıma dikkat ediniz.) Hâlâ durumları fiziksel eşyanın olası konfigürasyonları olarak düşünüyoruz. Fakat bu olası durumlar, artık uzay ve zamandaki cisimlerin belirli dizilişlerine çıkan direkt yollara karşılık gelmemektedir. Örneğin sandalyenizin bulunduğu konum veya bir otobüsün ne kadar hızlı hareket ettiğine ilişkin kuantum durumundan Newton veya izafiyet fiziğindeki benzer tanımlarındaki tarzda bir okuma yapılamaz.

O zaman kuantum durumu bize ne anlatmaktadır? Kuantum durumu yer ve hızları açıkça tanımlamaktan ziyade, bazı fiziksel nicelikleri ölçmeye çalıştığınızda karşılaşılabileceğiniz olasılıkları kodlamaktadır. Prensip olarak bir nesnenin

konumu, momentumu ve yükü gibi ölçebileceğimiz niceliklerle gözlemlenebilir. Bu yüzden kuantum hâli, gözlemlenebilir cisim üzerinde bir ölçüm yaptığımızda verilen sonucun doğruluk ihtimalinin nasıl olacağını belirleme yöntemidir.

Klasik yani, yukarıda tarif edilen türden kuantum dışı bir durum da bu şekilde düşünülebilir. Klasik bir atari oyunu olan Pong Pong'u hatırlayalım. İlk atari oyunlarından biri olarak 1972 yılında piyasaya çıkmış ve şimdi artık faaliyetlerine son vermiş Atari firması tarafından geliştirilmiş bir yazılımdı.<sup>119</sup> Tenis veya masa tenisinden esinlenilerek her bir oyuncu için ekran iki yarıya bölünmüştü. Ekranda sağa sola zıplayan bir "top" (aslında birkaç piksel) vardı. Topun ekran sınırları dışına çıkmasını önlemek amacıyla "topa" vurmak için oyuncuların ekranın kendi tarafında kullanabilecekleri "kürek"leri vardı. Oyuncular iyiye, top ekranda uzun süre zıplayabilirdi.

Topun konumunun Pong'da gösterilme şekli tam olarak gerçek bir tenis topunun klasik fizikte gösterilme şeklini temsil ediyordu: Zamana göre uzaydaki konumunu belirlemek suretiyle. Bu bize, topun belirli bir anda belirli bir yerde bulunması ihtimalini belirlemek için ihtiyaç duyduğumuz bilgileri sağlar. Topun konumunu oyunun her anında kaydettiğimizi düşünürsek, elde ettiğimiz olasılıklar çok ilgi çekici olmayacaktır: Her bir anda topun bir konumu olacaktır. O hâlde, klasik temsilimize göre topu o konumda bulma ihtimalimiz yüzde 100'dür. Aynı şekilde, topu başka bir yerde o anda bulma ihtimalimiz de yüzde 0'dır. Sonuçta, top ya orada ya da değildir. Top oradaysa ve orada olup olmadığını gözlemlemeye çalışırsak, kesinlikle buluruz; aksi hâlde ke-

sinlikle bulamayız.

Bununla birlikte, klasik bir şekilde bile olsa topun konumuna daha ilginç olasılıklar belirleme durumu olarak düşünebileceğimiz durumlar vardır. Örneğin top her tura, ekranı ikiye ayıran çizgi üzerinde başlamaktadır. Fakat top her zaman bu çizgi boyunca aynı yerde başlamaz. Ya da hep aynı yönde aynı hızda hareket etmez. Çeşitli olası başlangıç konfigürasyonlarına ihtimaller atayarak topun ilk konumunu temsil edebileceğimizi düşünebiliriz. Bu durumda, tur başında oyunun durumunu topun belli bir yere sahip olma olasılıklarını atayan bir şey olarak düşünmek çok yararlı olacaktır.

Bu olasılıkların zaman içinde nasıl değişebileceğini de sorabiliriz. Turun başlangıcında, topun orta çizgiden uzakta ki küreklerden birinin yakınında bulunma ihtimali hâlen yüzde 0'dır. Fakat birkaç dakika sonra, top hareket etmiş olacak ve artık belirli bir yerde bulunma ihtimali hâlihazırdaki konum ve hızla ilgili başlangıç olasılıklarına bağlı olacaktır.

Bu olasılıkların dünya hakkında neleri kaydettiklerine ilişkin net olmak önemlidir. Oyunun başlamasından birkaç dakika sonra topun belli bir yerde bulunma ihtimalini düşünmemizin nedeni, nereden başlayacağımız konusunda bir fikrimiz olmamasıdır. Başka bir deyişle olasılıklar, topun konumuyla ilgili belirsizliklerimizi yansıtır.<sup>120</sup> Örneğin ilk konum, ilk hız ve yönü gibi daha fazla kesin bilgiye sahip olduğumuzu belirtebilirsek topun belirli bir süre sonra nerede olabileceğinden (en azından kürekle topa vurmak gibi yeni belirsizlik yaratabilecek bir şey olana kadar) emin olabiliriz.

En önemlisi, bazen oyunun herhangi bir anında topun bir

konuma sahip olmadığı, olasılıkları kullanan klasik bir durumun önerilmediğini düşünebileceğimiz gerçeğidir; tek mesele konumun ne olduğunu bilip bilmediğimiz konusudur. Bu, dünya ile ilgili değil tamamen bizimle ilgili bir durumdur.

Diğer taraftan, kuantum teorilerinde durumların gözlenebilirliğe atanma olasılıkları tamamen farklı bir meseledir. Kuantum teorisinde, top hakkında bilmek istediğimiz her şeyi bilebilir ve yine de topun yüzde 50 olasılıkla oyuncu tarafında, yüzde 50 olasılıkla da diğer oyuncu tarafında olma ihtimaliyle karşı karşıya kalabiliriz. Elbette, bu olasılıklar topu nerede bulacağımız konusunun net olmadığı anlamına gelmektedir. Fakat sebep, konuyla ilgili bazı bilgilerimizin eksikliği de olmayabilir. Kuantum teorisi başka olasılıkları da sağlamaktadır: Topun iki konumdan birinde veya başka bir konumda olmadığı.

Başka bir deyişle kuantum teorisi, kesinlikle bir konuma sahip olabilen ve ne zaman olursa olsun onu aramaya çalıştığımızda bir konumu olan bir topun, her zaman bir konuma sahip olmayabileceğinden bahsetmektedir.

Bir önceki bölümde izafiyet teorisinin bize bazı tuhaf sonuçlar verdiğini söylemiştim. Ancak kuantum teorisi çok çok daha tuhaftır.

Bu şeylerin en tuhaflarından biri şu örnekte hemen görülebilmektedir. Yukarıda bahsettiğim kuantum teorisine göre, tıpkı klasik fizikte olduğu gibi eğer topu aramayı denerseniz yani konumu ile ilgili bir ölçüm yaparsanız bir konuma sahip olduğunu keşfedersiniz. Ancak yapılan ölçümlerin gerçek olması gerekmez. (Tekrar söylemek gerekirse, bu sadece topun nereye gittiğine ilişkin bir belirsizlik meselesi değildir!)

Buradaki büyük gizem şudur: Ölçümü bu kadar özel yapan şey nedir? Ve neler ölçüm olarak sayılabilir? Ölçümleri sadece insanlar mı yapabilir? Köpekler yapabilir mi? Peki ya robotlar?

Şaşırtıcı bir şekilde modern biçimindeki kuantum teorisi yaklaşık yüz yaşında olmasına rağmen, kimse bu soruların cevabını bilmiyor. Teori boyunca çeşitli şekillerde ortaya çıkan bu temel problem ölçme problemi olarak bilinmektedir. Olasılık teorisini değiştirmekten tutun kuantum teorisine benzer tahminler yapan alternatif teoriler oluşturmaya kadar değişen aralıkta, gerçekleşebilecek her şeyin içinde gerçekleşebildiği birçok paralel dünyanın olduğunu varsayarak birçok olası çözüm önerilmiştir.<sup>121</sup>

Tüm bunların savunucuları vardır ama aralarında bir konsensüs yoktur ve bilinen tüm yaklaşımlar kendi ciddi sorunlarıyla yüzleşmektedir. Fakat ölçüm problemi için tatmin edici bir çözüm bulana kadar, hiç kimsenin kuantum teorisini tam olarak anlamadığını söylemek yanlış olmaz.

\*\*\*\*\*

Dirac ilk kez 1923 yılında Einstein'ın genel izafiyet hakkındaki ilk çalışmalarını yayınlamasından on yıl geçmeden bir lisansüstü öğrencisi olarak Cambridge'e gelmişti. Özel izafiyet bile daha taze bir konuydu. Dirac kariyerinin başlangıcından itibaren izafiyet teorisinin içine doğru çekilmişti. Lisansüstü eğitimindeyken ilk danışmanlarından biri, İngiltere'de Einstein'ın yeni teorisinin en etkili savunucusu Arthur Eddington'du. Eddington, Einstein'ın fikirlerini İngilizceye ve ayrıca Einstein'ın çalışmasını takdir edebilmek için çoğunun

yeterli matematik eğitimi olmayan fizikçilerin anlayabileceği bir dile çevirmek için yorulmadan çalıştı. Eddington 1919'da güneş tutulmasını fotoğraflamak için Afrika'nın batı kıyısındaki Principe Adası'na seyahate çıktı. Bu fotoğraflar, Einstein'ın teorisini oturtmak için çok önemliydi. Çünkü güneşin çekimsel etkisinin uzaktaki yıldızlardan gelen ışığı, Newton'un değil Einstein'ın teorisi tarafından tahmin edilen şekilde büküğünü gösteriyordu.<sup>122</sup>

Dirac'ın dikkati hızlı bir şekilde yeni kuantum teorisine yöneldiyse de izafiyet hakkındaki ilgisini muhafaza etti ve çok sonraları konu hakkında etkili bir ders kitabı yayınladı. Kuantum alanında en önemli katkılarından biri de yine izafiyet teorisi hakkındaydı. Kuantum teorisi ilk geliştirildiğinde, birçok hesaplamayı basitleştirdiği için Newton uzay ve zaman anlayışını benimseme alışkanlığı vardı. Yine de Dirac, daha önceki bölümlerde de gördüğümüz üzere kendisini elektromanyetizma ile izafiyet teorisinin yakından bağlantılı olması nedeniyle izafiyet teorisinin geometrisini dikkate almaya iten bir proje olan elektromanyetik alanın kuantum teorisini geliştirmek istemişti.<sup>123</sup>

1927'nin başında, elektron teorisini bulmasından yaklaşık dokuz ay önce kuantum teorisine elektromanyetizmayı birleştiren bir çalışma yayınladı. Burada yeni teorisinde, kısaca QED dediğimiz "kuantum elektrodinamiği" terimini kullandı<sup>124</sup>. Bu Maxwell'in on dokuzuncu yüzyılda fizik alanına takdim ettiği ve Einstein'ın fikirlerinde çok önemli bir rol oynayan alanların kuantum teorisini geliştirmeye yönelik ilk büyük girişimdir. İzafi kuantum teorisinde boş uzayın tam olarak anlaşılması on yıllar sonra birçok başka parçanın da

bulunmasıyla mümkün olacak olsa da bu çalışmasında Dirac hiçbir şeyin fiziği hakkında tamamen yeni bir anlayışa doğru ilk adımları atmıştır.

Dirac QED üzerinde çalışmaya başladığında, Einstein'ın fizikte hâlâ büyük bir ağırlığı vardı. Üstelik fizik alanında ve dünyada çoktan meşhur bir şahsiyet olmuştu. Dirac lisanüstü eğitimine başlamadan kısa bir süre önce o, 1922'de Nobel Ödülü'nü aldı. Ancak Dirac ve arkadaşının çalışmasını yakından izlemeyecek kadar yaşlı ve ünlü değildi. Ehrenfest gibi, Einstein da kuantum teorisine önemli katkılarda bulunan ve yeni teoriyi takip eden eski nesil fizikçilerden biriydi. Ehrenfest'den de daha fazla takipte kalarak 1920'lerin gelişmelerini dirsek mesafesinde tuttu.<sup>125</sup>

Dirac ve Einstein 1927'de, Belçika'nın Brüksel şehrindeki Beşinci Solvay Konferansı'nda bir araya geldiler.<sup>126</sup> Ernest Solvay, Belçikalı bir kimyager ve 1911'de büyük uluslararası konferansları fonlamaya başlayan bir sanayiciydi. 1911'deki ilk Solvay Konferansı, ilk erken kuantum mekaniği fikir ortamlarından biriydi. Bu erken çabalara konu olan Einstein'ın ışık kuantumu hakkında 1905 yılında yazdığı makalesiyle oradaki en genç ikinci fizikçi olmuştu. Kariyerlerini tamamen klasik bir dünyada yapmış fizikçiler arasında hem yeni izafiyet teorisini hem de erken kuantum teorisinin yöntemlerini savunan genç bir radikaldi.

Ancak 1927 itibarıyla Einstein artık yaşlı bir tutucuya dönüşmüştü. Bu konferansta Dirac genç katılımcı, Einstein ise aksi şahıstı. Dirac'ın ağır utangaçlığı ve Einstein'ın endamı göz önüne alındığında, pek doğrudan temas kurmamışlardı. Bunun yerine Dirac, Einstein'ın mevcut diğer fizikçilerle tar-

tışmasını seyretti. Örneğin, Einstein'ın kendi kuşağının bir üyesi ve kuantum fiziğinin aldığı virajlar konusunda heyecan duyan Niels Bohr da bunlardan biriydi.<sup>127</sup> Bohr yeni kuantum hareketi için bir baba tavrı takınmış ve daha genç fizikçiler de ona liderleri olarak hürmet göstermişlerdi. (Dirac'ın doktorasını bitirdikten sonra 1926'da Kopenhag'da ziyaret ettiği kişi Bohr'du.)

Daha sonra Dirac, bu tartışmaları dinlemesine rağmen kendisini sıkıldığını ifade etmişti.<sup>128</sup> Einstein da Bohr da felsefe ile derinden ilgililerdi: Her ikisi de yeni fizik ile dünyayı nasıl tanıdığımız ve dünyanın o zamanlar nasıl bir şeye benzediği konusundaki kendi anlayışlarını uzlaştırmaya çalışıyorlardı. Fizikle ilgili düşüncelerini etkileyen temel felsefi anlaşmazlıkları vardı.

Dirac, kendisi ve eseri için dikkat dağıtıcı olduğuna inandığı felsefi konulardan uzak kalmayı tercih etmişti. Ona göre, ilk hedef doğru matematiğin geliştirilmesiydi ve ilgilenecekler için bu matematiğin felsefi olarak memnün edici bir şekilde yorumlanması ise ikincildi. Ne Einstein ne de Bohr kesin matematiksel iddialara dönüştürülebilecek hiçbir şey söylemiyordu. Hepsi de yalnızca konuşmalardan ibaretti. Dirac ise konuşmayı seven bir tip değildi.

Einstein, Dirac'ı farklı bir şekilde daha rahatsız etmişti. Einstein, kendini ifade ederken bazen Tanrı'ya ithaflarda bulunuyordu. (Kuantum teorisinin olasılıksal yönleri hakkında endişelerini sık sık şu ünlü sözüyle özetliyordu: Tanrı zar atmaz.<sup>129</sup>) Dirac için Tanrı'nın ne tarz işlere müsaade edip nelere etmeyeceğini tartışarak bir konferansı amacından saptırmak felsefi ve yorumsal konularla gerçek çalışmaların

engellenmesine yönelik endişelerini artıran bir şeydi.

Dirac'ın kendi jenerasyonundan bir katılımcı olan Heisenberg'e göre Dirac'ın patlamasına neden olan da işte bu Tanrı ithaflarıydı. Bir akşam, otel lobisindeki genç fizikçiler arasındaki bir sohbet sırasında normalde sessiz biri olan Dirac'ın "Din gerçeklikte bir temeli olmayan düzensiz sahte iddialardır. Tanrı fikrinin kendisi insan hayal gücünün bir ürünüdür."<sup>130</sup> şeklindeki çıkışı herkesi şaşırtmıştı.

Cevap olarak yine gençlerden biri olan Wolfgang Pauli "Tanrı yoktur ve Dirac onun peygamberidir!" demiş ve Dirac dahi buna gülmüştü.

\*\*\*\*\*

Tüm teorileri bırakın, herhangi bir büyük bilimsel fikri sadece bir dâhiye mal etmek her zaman aşırı basitleştirme olacaktır. Fakat ne kadar basitleştirme olduğu bir seviye meselesidir. Leibniz ve Hooke'un bu konuda konuşmalarına bakarsanız, Newton sadece onlardan fikir almıştır. Ve Minkowski ve Grossmann'ın zamanında yaptığı müdahaleler olmadan, Einstein genel izafiyete giden yolu bulamayabilirdi.<sup>131</sup> Einstein ile Newton kesinlikle diğer bilim insanlarının çalışmaları üzerinde yükselmiş ve uzay, zaman, kütleçekim teorileri hakkında kendi isimlerini taşıyan ve çağdaşlarını bile aşan katkılarda bulunmuşlardı. Onların çalışmalarına odaklanmak o kadar yanıltıcı olmayacaktır.

Kuantum teorisi farklı bir meseledir. Ona tek bir isim atfetmek büyük bir çarpıklık olurdu. Hakkındaki bilgiler, Alman fizikçi Max Planck'ın 1900'de yayınladığı çalışmalarda, Einstein, Niels Bohr ve Alman fizikçi Arnold Sommerfeld'in

büyük ve erken katkılarıyla ortaya çıkmıştı.<sup>132</sup> Fakat bu çalışmalarının hiçbiri *Principia*'da Newton'un çekim gücü için veya Einstein'ın 1905 ve 1915 tarihli makalelerinde izafiyet hakkında yaptığı tanımlamalara benzer şekilde kesin bir kuantum teorisi tanımlaması içermiyordu. Kuantum fiziği hakkındaki bu erken çalışmalar, belirli problemlere şaşırtıcı fikirler içeriyordu ancak yeni bir teorinin mimarisinden yoksundu.

Çok hızlı bir gelişmeler dizisiyle tam bir teorinin ortaya çıkması ancak 1925 yılında mümkün olacaktı. Kademeli olarak geliştirilmiş ve Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Pascual Jordan, Wolfgang Pauli, Paul Ehrenfest ve elbette Dirac gibi bazı insanlar büyük katkıları olan şahsiyetler olarak ön plana çıkmıştır. Son olarak Dirac ve Macar matematikçi John von Neumann, 1930 ve 1932'de yayınlanan etkili kitaplarında yeni teoriyi sentezleyerek bütün parçaların nasıl birbirine uyum sağladıklarını göstermişlerdi. Bu kitaplar, kuantum teorisini sistematik olarak sunmak için yapılan ilk ciddi girişimler olarak konu hakkında takip eden çalışmalar için bir başlangıç noktası olmuştur. Fakat her iki durumda da asıl görev, otuz yıllık araştırmaları tutarlı bir bütün hâline getirmektir. Sıfırdan yeni bir teori icat etmek değildi.

QED bu yeni fikirler yumağında sadece tek bir iplikti. Dirac, 1927 tarihli makalesinde bu terimi kullanarak sistematik bir teori geliştirilmesine ilk bıçağı çalan kişiydi. Sadece önceki araştırmacıların bıraktığı yerden başlıyordu. Aslında Planck ve Einstein'ın kuantum teorisi hakkındaki ilk fikirleri zaten QED hakkında fikirlerdi: Einstein'ın 1905 tarihli maka-

lesi, elektromanyetik radyasyonun kuantum özellikleriyle ilgiliydi. Orada Dirac'ın teorisinde temel bir kavram hâline gelecek olan "ışık kuantumu" fikrini ortaya atmıştı.<sup>133</sup> Dirac 1926 sonbaharı ve 1927 kışında QED üzerinde çalışmaya başladığında amacı en azından elektromanyetizma hakkındaki bu eski çalışmayı kuantum teorisindeki en yeni gelişmelerle paralel hâle getirmektir.

Dirac, QED hakkındaki ilk raporunda bile dikkate değer ilerlemeler kaydetmişti. Fakat projeyi bitirememişti. Pascual Jordan isimli başka bir fizikçi bir teori ortaya koyma konusunda bir sonraki büyük adımı atmıştı.<sup>134</sup>

Jordan, Göttingen merkezli olacak şekilde, Born ve Pauli ile birlikte iş birliğinde bulundu. Dirac'tan sadece iki ay daha genç olan ve 1920'lerin atak döneminde kuantum teorisine büyük katkılarda bulunan tek kişi olmuştur. (Doktorasını Dirac'tan iki yıl önce 1924'te tamamlamıştı!) Dirac gibi o da sıkılgan ve anlaşılması güç bir karakterdi. Jordan'da ise konuşmama değil kekeleme problemi vardı. İki adam 1927'de Dirac Kopenhag'tan Göttingen'e gittiğinde bir araya geldi. Bu görüşme QED hakkındaki erken çalışmaların zirvede olduğu sıralarda ve tuhaf genç erkekler arasındaki yoğun bir rekabet ortamında gerçekleşmişti.

Jordan 1926'da Born ve Heisenberg'le bazı ön hesaplamalar yapmış, Dirac'ın QED çalışmasının temellerini atmıştı. Fakat en kayda değer katkısı Dirac'ın makalesini yayınlamasından sonra gerçekleşmişti. Makale maddenin dalga özelliğiyle ilgiliydi.<sup>135</sup>

Kuantum teorisinin temel fikirlerinden biri, sıradan maddenin bazen çok küçük ayrık parçacıklar gibi davranması

bazen de dalga davranışına sahip olmasıdır. Bu şaşırtıcı durum “ya bu ya o” sorularına “her ikisi” ve de “ikisinden hiçbiri” gibi yanıtlar döndüğü anlaşıncı kuantum alanında “dalga-parçacık düalizmi” gibi bazı mistik tartışmalara yol açmıştı. Ayrıca, parçacıklı yapıya sahip maddenin dalgasal özellikleriyle ilgili bazı somut teorilere yol açtı. 1925 yılında Louis de Broglie’den gelen önceki fikirleri takip ederek Erwin Schrödinger, bu dalgalı özellikleri yakalayan bir denklem önermesinde bulunmuştu.<sup>136</sup>

Schrödinger denklemini, ilk önce “dalga mekaniği” olarak adlandırdığı kuantum teorisinin bir parçası olarak önermişti. Merkezdeki varsayım, maddenin aslında elektromanyetik radyasyon gibi bir dalga olmasıydı. Bu yoruma çabucak meydan okuyan birileri çıktı ve kısa süre sonra Schrödinger’in dalgalarının olasılıksal yeni bir yorumu Max Born tarafından yapıldı.<sup>137</sup> Günümüzde Born’u takip ederek fizikçiler, Schrödinger’in dalgalarının maddeyi tanımlamadığına ve daha önce tanımlandığı şekliyle doğrudan durumları temsil ettiğine inanmaktadır. İlgili durumların olasılıklarının salınması nedeniyle bu dalga benzeri özellikler ortaya çıkmaktadır.

Jordan’ın, Schrödinger’in teorsini geliştirme yöntemleri hakkında bir fikri vardı. Bu fikirlerden biri oldukça farklı bir yöne doğru gidiyordu. Jordan’ın fikri, elektronlar da dâhil olmak üzere sıradan maddenin kuantum teorisi çerçevesinde dalga gibi değerlendirilmesi gerektiği idi. Bu, Schrödinger’in fikrinin tekrarı gibi gelebilir ama aslında bir ilerlemedir. Nasıl olduğunu görmek için 1920’lerde veya bugün, kuantum teorilerinin geliştirilmesinde ortak usulü anlamak ge-

reklidir. Newton parçacık mekaniği veya Maxwell elektromanyetizması gibi klasik bir teoriyle başlayıp bunu kuantum teorisini geliştirmek için bir model olarak kullanmakla başlanılır. (Dirac'ın QED'e ulaşması için yaptığı şey buydu.) Bu açıdan Schrödinger'in dalga mekaniğinin, özellikle klasik parçacık teorisine tekabül eden bir kuantum teorisi olduğu düşünülür.

Jordan'ın fikri, bir kuantum elektron teorisi kurmaktır, Schrödinger dalgası gibi klasik düzeyde bir şeyle başlamalıydı. Daha sonra Dirac'ın QED'ler için kullandıklarına benzer stratejiler kullanarak kuantum elektron teorisini inşa etmeye devam edebilirdi. Başka bir deyişle, klasik olarak alanda ele alınsa bile elektromanyetizma kuantum teorisinin nasıl geliştirilebileceğini ilk gösteren Dirac olmuştu. Ardından Jordan da klasik olarak parçacık benzeri bir yapıda gibi görünen madde de dâhil olmak üzere diğer şeylerin de tıpkı elektromanyetik alan gibi görülmesi gerektiğini savundu.<sup>138</sup> O zaman elektron kuantum teorisi geliştirmek, Dirac'ın elektromanyetik alan için yaptığı şeylerin çizgileri boyunca uygun bir elektron alanının kuantum teorisi geliştirmeye evrileceği anlamına gelecekti.

Fakat bu "elektron-alan" nasıl bir şey olmalıydı? Bir seçenek olarak Schrödinger'in dalgalarına bakılabilirdi. Fakat bu işe yaramayacaktı. Çünkü Schrödinger'in denklemi izafiyet teorisiyle bağdaşmıyordu. Newton'un yer çekimi kanununa çok benzer bir şekilde Schrödinger'in teorisi, uzaktan anlık harekete izin veriyordu. Başka bir ifadeyle, Eşzamanlılığın bazı özel standartlarını ön şart olarak kabul ediyordu. Aslında bu, tam da izafiyet teorisinin dışladığı bir durumdu.

Schrödinger denklemindeki bu zorluklardan dolayı Dirac, Schrödinger'in denklemine benzeyen ancak izafiyetle uyumlu yeni bir dalga denklemi geliştirmeye çalıştı.<sup>139</sup> Bunu yapmaya başladığında diğerleri daha önce bunun yapıldığına inanıyordu: Bir yıl önce 1926'da bazı fizikçiler Schrödinger denkleminin izafiyetçi benzerlerini öne sürmüşlerdi. Bu öneri Klein-Gordon denklemi olarak biliniyordu.<sup>140</sup> (Jordan'ın önerisinden önce bile Schrödinger denklemi ve izafiyet teorisi arasındaki uyumsuzluk hakkında bir şey yapılması gerektiği açıktı.) Dirac'ın motivasyonu Jordan'ın argümanlarından değil, öncelikle bu genel uyumsuzluktan kaynaklanıyordu. Dirac keşfinin başlamasından yalnızca bir ay önce, Ekim 1927'deki Solvay Konferansı'nda Bohr'tan bahsederek elektronları açıklayan bir denklem aradığını söylediğinde, Bohr bu problemin zaten çözülmüş olduğunu açıklamış ve ona başka şeylerle ilgili çalışma yapmasını tavsiye etmişti.

Dirac, Bohr'un tavsiyesini pek dikkate almadı. Klein-Gordon denkleminin elektron teorisi için yetersiz olduğunu düşünmek için teknik sebepleri vardı<sup>141</sup> ve Dirac haklı çıktı: Günümüzde Klein-Gordon denkleminin elektronlardan ölçülebilen farklı özelliklere sahip çok farklı bir parçacık türünü tanımladığını söyleyebiliriz. Ancak Klein-Gordon denklemindeki problemlerin, Dirac'ın kendi denklemi hazırlanmadan önce ne ifade ettiğini kestirmek neredeyse imkânsızdı. Çünkü bir elektron için tatmin edici bir denklemin nasıl bir şey olacağı belli değildi. (Bu tür şeyleri kestirmenin Dirac için öncelik olmadığından değil.) Klein-Gordon denkleminin yetersizliklerini ve ileriye giden yolu görmek Dirac için mükem-

mel bir fiziksel sezgi örneğiydi.

\*\*\*\*\*

Dirac'ın gizli elektron teorisi uzun süre gizli kalmadı. 1927 yılbaşına gelindiğinde, bunu keşfettikten yaklaşık bir ay sonra konudan Darwin'e bahsetti. O da Bohr'a hemen keşfin ayrıntılarını içeren bir mektup yazdı. 1928 yılının yeni yıl gününü Dirac, Kraliyet Topluluğu'na yaptıklarını anlatan bir yazı sundu.<sup>142</sup> O zaman bile üzerindeki kapağı örtülü bırakarak Göttingen'deki arkadaşlarına ve beraber çalıştığı kişilere mektuplarında birkaç kelimeden fazla konuya değinmedi.

Yine de Dirac'ın harika bir şey gerçekleştirdiği hızlı bir şekilde dile getirildi. Kimse aslında tam olarak ne olduğunu bilmiyor, gizlilik de beklenti hissini tetikliyordu. Çalışma Şubat ayında basılı olarak ortaya çıktığında, kuantum alanındaki herkes okumak için can atıyordu.

Dirac'ın denklemi nihayet görüldüğünde, hemen büyük bir başarı olarak tanınmıştı. (Kendi elektron teorisini geliştirmeye çalışan Jordan depresyona girdi ve neredeyse fiziği bıraktı.) Dirac, hesaplamaları kendisi yapmaktan çok korkmuş olmasına rağmen, meslektaşlarından bazıları onun denklemine dayanarak elektron teorisinin birkaç önemli deneysel sonuç üretilebileceğini saptadılar.<sup>143</sup> Dolayısıyla şaşırtıcı derecede orijinal bir matematiksel gelişme olmasına rağmen, hemen deneylerle bağlantılı hâle getirildi. İşler çok güzel gidiyordu.

Ama bu sorun olmadığı anlamına gelmiyordu. Dirac'ın hızla fark ettiği ve diğerlerinin de kendisini ikaz ettikleri kadarıyla denklemi, elektronları doğru olarak tarif ediyor gibi

görünse de çok fazla şeyi tanımlıyordu. Aynı zamanda başka kimsenin görmediği bir parçacık türünü tarif ediyordu.<sup>144</sup>

Denklemin aynı anda iki türdeki parçacığı tanımlayacak şekilde yorumlanması pek görülebilen bir şey değildi. Denklemin amacının, genellikle gözlemlendiği durumundan çok farklı olası durumları olan elektronları işaret ettiği anlaşıldı. Yani, bir elektronun pozitif enerjisine sahip olmadığı keyfi olarak negatif hâle gelebildiği durumlar olarak görünüyordu.

Bu negatif enerji durumları hem deneysel hem de kavramsal olarak ciddi sorunlara yol açtı. Birincisi, bu durumdaki elektronların teoriye göre davranışı çok garipti. Böyle bir elektron hiç yükü olmayan bir elektron gibi davranmıyordu. Ters yüklenmiş gibi davranıyordu. Fakat bunun dışında diğer tüm açılardan bir elektronla aynıydı. Deneylerde böyle davranan bir elektron görülmemişti. Nesneler yavaş yavaş enerjiyi kaybetme eğiliminde olduklarından, daha düşük enerjili durumlara geçerken bu negatif enerji durumları gerçekten mümkün olsaydı onları her zaman gözlemleyebilirdik şeklinde düşünülmüştü.

Bu durumla nasıl başa çıkılabileceği tam olarak kestirilemiyordu. Dirac'ın kendi görüşleri sonraki iki ya da üç yıl içinde birkaç kez değişmişti. Ama 1931 itibarıyla yerleşmiş bir görüşe varılabildi. Bu negatif enerji durumları, deneysel fizik tarafından bilinmeyen, aynı kütle ve elektronlarla zıt yüke sahip olan “yeni bir parçacığa” karşılık geliyordu.<sup>145</sup> Bu parçacıklara “anti-elektron” adını vermişti. Ancak meslektaşları hemen bir dublaj yaparak onlara “pozitif elektronlar” veya “pozitronlar” adını verdiler. Şu an “antimadde” dediğimiz bir şeyin ilk örneği bunlardı.

Antimadde kelimesi her türlü şeyi çağrıştırabilecek kadar süslü bir isimdir. (Ve gerçekten Dirac en azından başlangıçta antimaddeyi, negatif enerjiyle yüklü olmasına rağmen bir denizde madde biçiminde bir “delik” olarak hayal etmişti.) Özetle pozitronlar, bir pozitronun bir elektron kadar elektromanyetik alana ters tepki vermesi dışında, elektronlara her bakımdan özdeş olan yeni bir madde türüdür. Bir elektron yükselirse, birbirlerinin zıttı ikizler gibi bir pozitron aşağı inecekti.

Dirac bu öneriyi yaptığında radikal bir değişiklik yapmıştı. Kimse böyle bir varlığı herhangi bir deneyde gözlemlememişti. Sanki Dirac, güzel denklemini biraz daha canlı tutmak için birtakım yeni şeyler yapmaya çalışıyordu. Yeni parçacıklar olduğunu ileri sürmek, deneyselcilerin gözlemledikleri olayların teorilerini geliştirme geleneğine uymuyordu. Dirac'ın bu yaptığı, kaçak güreşmek de diyebileceğimiz iyi bir kaçış yoluydu.

Lakin fizikçilerin pozitron hakkındaki görüşleri çok basit bir nedenle hızlı bir şekilde değişti: Neden, bazı fotoğraflarda görünmesiydi.<sup>146</sup> Ağustos 1932'de Kaliforniya Pasadena'daki Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde, kozmik dalgalar üzerinde doktora sonrası çalışma yapan araştırmacı Carl Anderson, ara sıra dünyayı uzaydan bombardımana tabi tutan çok yüksek enerjili parçacıklar olan kozmik ışınları izliyordu. Su buharıyla dolu kapalı bir kutu olan bulut odası dediğimiz bir cihaz kullanıyordu. Yüklü bir parçacık bulut odasından geçtiğinde, geçtiği yol boyunca bir sis üreterek görsel bir iz bırakır. Bu iz fotoğraflanarak izlenebilir. Bu yolların özelliklerine bakarak yüklü parçacıkların hangi tür odadan

geçtiğinin çıkarımı yapılabilir.

Anderson, odasında bazı izlerin tuhaf davrandığını hemen fark etti. İzler tam olarak elektron izleri gibi duruyordu. Ancak manyetik alanlarda yanlış yönde ilerliyorlardı. Bir yıl içinde diğer fizikçiler benzer fotoğraflar ürettiler.<sup>147</sup> 1933 yılı başları itibarıyla, şüphelilik yerini korkuya bırakmıştı. Dirac'ın radikal önerisi şaşırtıcı bir şekilde doğru bir tahmin yapmıştı. Nobel Ödülü o yılın Kasım ayında geldi.

\*\*\*\*\*

Pozitronun keşfedilmesi, 1920'lerin sonundaki baş döndürücü ilerleme hızına rağmen yeni teorideki zor problemler ve küresel siyasetin sürtünme etkisi yüzünden 1930'larda yavaşlayarak duraksadı. İlk önce Buhran ve Weimar Almanya'sının sıkıntıları geldi. Bunları Almanya'da Nasyonal Sosyalizmin yükselişi ve İkinci Dünya Savaşı'nın başlangıcı izledi.<sup>148</sup> Einstein gibi birçok kişi ve 1930'ların bilim adamları yerlerinden edildi ve Naziler'den kaçtı. Sonra, savaş sırasında askeri projelerde çalışmak üzere görevlendirildi. Eski den iş birliği yapan bazı bilim adamları da şimdi düşman olmuşlardı. Ve böylece, 1920'lerde kuantum devriminin liderleri başladıkları projeyi artık tamamlayamıyorlardı. Savaştan hemen sonraki dönemde, genç fizikçi jenerasyonu QED'i bir sonraki noktaya taşıyacaktı.

Yolu açan iki Amerikalıydı: Richard Feynman ve Julian Schwinger.<sup>149</sup>

Dirac'ın pozitronları çelişkileri nedeniyle çarpıcı bulunmuştu. Onlara, parçacıkların tersi oldukları fikrini yansıtmak amacıyla antiparçacıklar adı verilmişti. Ama aslında, sadece

yükleri açısından zıtlardı. Diğer açılardan, parçacıklar ikizdir: Pozitronlar bir elektronunkiyle aynı kütleye sahiptir, tam olarak aynı istatistiksel özelliklere sahip olup aynı kuvvetlerden etkilendirler. Gerçekten de zıt yükleri bu kadar ilginç hâle getiren bu benzerliklerdir. Parçacık ve antiparçacıkların aynı olmaları tam olarak söz konusu olmasaydı, bu kadar mükemmel olmazlardı.

Newton ve Leibniz için de aynı şey söylenebilir. Hemen hemen aynı yaşta ama farklı ülkelerde doğdular. Aynı devrimci matematik teorisinin bağımsız kâşifleriydiler. Fakat çarpıcı biçimde farklı biçimcilikleri ve vurgularıyla her ikisi de matematik, fizik ve teolojide benzer problemlerin içine çekildi ve nihayet biri diğerinin eserini eleştirdi. Birlikte anılıp, mukayese edilmeyi talep ettiler. O kadar şaşırtıcı derecede birbirine benzemiyor olsalardı, anlaşmazlıkları da o kadar ilgi çekmezdi.

Dirac için ise Jordan vardı. Birbirlerine yaş olarak çok benzeyen, en önemli katkılarını yaptıklarında çok genç ve hatta genç dâhiler arasında olan şahsiyetlerdi. Birbirlerini takdir eden rakipler olarak neredeyse aynı problemlerle uğraştılar ve en az bir vakada bağımsız olarak aynı çözüme ulaştılar. İkisi arasında, alanların kuantum teorisi icat edildi.

Feynman ve Schwinger de bu çiftlere başka bir örnektir. Her ikisi de (1918'de ay farkıyla doğmuşlardı) Doğu Avrupa Yahudi göçmenlerinin çocuklarıydı ve New York'un yerlisi olmuşlardı. Her ikisi de dünyanın en iyi öğretmenleri ve araştırmacıları tarafından yetiştirilen ve hâlâ gençlerken fizik ve matematikte olağanüstü yetenekleri fark edilmiş dâhilerdi. Her ikisi de İkinci Dünya Savaşı'nın tecrübesini yaşamış-

lardı. Feynman Los Alamos'daki Manhattan Projesi'nde baş teorisyen olarak, Schwinger de MIT'deki Radyasyon Laboratuvarı'nda bir radar uzmanı olarak görevlendirilmişlerdi. Her ikisi de, savaş öncesi ve özellikle de savaş sonrası QED teorisine önemli katkı yaptılar ve 1965'te Nobel Ödülü aldılar (Japon fizikçi Sin-Itiro Tomonaga ile beraber).

Bu benzerlikler, 1940'lı yıllarda fizikçiler arasındaki yaygın görüş olan Feynman ve Schwinger'in QED'yi bitirmek için bir yarışa kapılmış oldukları fikrine katkıda bulunmuştu.<sup>150</sup> Görünüşe göre Newton ve Leibniz arasındaki anlaşmazlık hakkındaki öncelik tartışmasını akla getirecek biçimde, bu sefer Nobel komitesi nihayet başarının ikisi arasında paylaştırılmasına hükmediyordu. Her ikisi de diğerinin katkısı küçümsenirse kendi katkılarının yeterince iyi değerlendirilmiş olmayacağını kabul etmişlerdi.

Ama aslında durum oldukça farklıydı. Bu iki dev arasında rekabet hissi duymasına rağmen Dirac, Tomonaga ve Freeman Dyson gibi insanların yanında hem Feynman hem de Schwinger'in büyük katkılarıyla düzensiz şekilde QED konusunda ilerlemeler kaydediliyordu. Daha da önemlisi ne Feynman ne de Schwinger, QED'i Newton ve Leibniz'in Calculus'u sahiplenmeleri gibi sahiplendiler. Birbirlerinden öğrenerek, birbirlerinin görüşlerine saygı duydular.

Feynman ve Schwinger arasındaki benzerlikler, bazı çarpıcı farklılıkları hafifletmek için kullanıldı. Bunlardan biri kişilikleriydi. Feynman sosyal, girişken ve dışa dönüktü; Schwinger ise sıkılgan ve utangaçtı. Nobel Ödülü'nü aldıktan sonra Feynman ünlü olarak ortaya çıktı ve genel okuyucu kitlesine yönelik bir dizi kitap yazdı. Bunlardan ilki, QED

dâhil olmak üzere modern fiziği fizikçi olmayanlara açıklamak için ciddi girişimlerde bulunduğu kitaptı. Fakat kariyerinin sonuna doğru hayatı hakkındaki eğlenceli hikâyelere yer vermişti. (Başka bir Nobel Ödülü sahibi ve CalTech'teki Feynman'ın meslektaşlarından biri olan Murray Gell-Mann, "Dick'in Şaka Kitabı" şeklinde alaycı bir atıfta bulunmuştu.<sup>151</sup>)

Bu arada Schwinger, Nobel Ödülü'nü kazandıktan bir süre sonra gözlerden düştü ve kariyerinin çoğunu giderek yeni ve daha özensiz araştırma dizileri geliştirmeye adanmaya başladı. Feynman bir efsaneye dönüşürken, Schwinger gittikçe izole hâle geldi. 1971'de İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana bulunduğu Harvard'tan, meslektaşlarının çalışmalarını çok resmi ve belirsiz olarak eleştirmeleri nedeniyle demoralize olup UCLA'ya geçti. 1980'lerin sonlarına gelindiğinde soğuk füzyon hakkında yaptığı derin araştırmaları ana akımdan o kadar uzağa düşmüştü ki çalışmasını büyük dergilerde yayınlamadı.<sup>152</sup> Nihayetinde Amerikan Fizik Topluluğu'ndan (ABD'deki en büyük profesyonel fizik topluluğu ve Physical Review'in yayıncısı) istifa ederek, topluluğu akademik özgürlüğü baskılamak ve çalışmalarını sindirmekle suçladı. Bu tavrının fizik camiası topluluğundan pek ilgi çekmemesi de kariyerinin geldiği noktayı göstermesi açısından önemlidir.

Kişiliklerindeki bu farklılıklar, bu adamların ilk çalışmalarında kendini göstermişti. Feynman ve Schwinger'in birbirine benzerliklerinin bir yönü de Dirac gibi her birinin problemleri düşünmek için kendi yollarını geliştirmeyi denemiş ve sonunda dünyayı anlamak için kendi kişisel dillerini ge-

liştirmeye karar vermiş olmalarıydı. Sonuç olarak, QED'e tamamen farklı yönlerden yaklaştılar.<sup>153</sup> Feynman'ın söylediği gibi, "farklı taraflardan aynı dağa tırmandılar." QED'ye ilişkin çalışmaların yoğun olduğu dönemde genellikle birbirlerini anlayamıyorlardı. Ama sonuçları karşılaştırabilmişlerdi. Her ikisinin de aynı cevaplara ulaşmaları, aynı şekilde düşünmeleri gerçek ve önemli bir şey üzerinde duruyor olduklarını gösteriyordu.

Örneğin Feynman, problemleri çözmek için ayırt edici biçimde geometrik yöntemi benimsemişti. QED'e yapmış olduğu en önemli katkılarında biri, uzay ve zaman içindeki parçacık yörüngelerini hayal ederek fizikçilerin çözümleri hızlı bir şekilde hesaplamalarına olanak veren ve günümüzde Feynman diyagramları olarak bilinen bir hesaplama yöntemi idi. Bu arada Schwinger, diyagramlar çizmek yerine biçimsel ve cebirsel düşünmeyi ve bir sayfadaki sembolleri manipüle ederek hesaplamalar yapmayı tercih etmişti. (Einstein'ın teorisi belki de fizikteki en önemli "geometrik" teoriydi ve Dirac'ın herhangi bir diyagram olmadan izafiyet teorisine ait bir ders kitabı yazmayı başarabilmesi sebebiyle çok daha şaşırtıcıydı. Bu itibarla Schwinger, Einstein gibi; Feynman da Dirac gibiydi.<sup>154</sup>) Schwinger, Feynman diyagramlarının yararlı olabileceğini fakat hem matematiği hem de fiziği muğlaklaştırdığını düşünüyordu. Harvard'daki kurslarında bunları öğretmedi ve öğrencilerini de bunları kullanmamaları yönünde uyardı. Lakin yine de kullandılar.<sup>155</sup>

Schwinger ve Feynman doğanın temel yapı taşlarının gerçekte ne olduğuna dair farklı fikirlere sahipti. Bir bakıma, kuantum teorisinin çekirdeğini oluşturan anlaşmazlığın

zıt taraflarını ve QED'deki boş alanın anlaşılması için gerekli olan tarafları temsil ettiler.

QED'e giden yolda Feynman'ın ilk adımı, elektromanyetik alanın hiçbir rol oynamadığı bir elektromanyetik etkileşim kuramı geliştirmektir. Oysa ki elinde olan şey küçük, noktasal, içsel olmayan madde parçalarıydı ve bunlar aralarında mesafe olmasına rağmen birbirlerine etki edebiliyorlardı.<sup>156</sup>

Genel izafiyet teorisinin kısmen Newton'un yer çekimi teorisinde yer çekim kuvvetlerinin uzak mesafelerde etkiyebilmesi gerçeğinden kaçınmak için geliştirildiği de göz önüne alındığında, böyle bir teorisin mümkün olması bile şaşırtıcı görünebilir. Fakat Newton'un yer çekimiyle ilgili asıl sorun, artık özel izafiyet bağlamında bir anlam ifade etmeyecek şekilde, yer çekiminin uzak mesafeden *hemen* etkimesidir. Feynman'ın parçacıklara özgü teorisinin bu özelliği yoktu; bunun yerine parçacıklar elektromanyetik radyasyonun (ya da bir fotonun) bir parçacıktan diğerine yayılması için gereken süre olan bir gecikmeyle birbiri üzerinde etkiyebiliyordu.

Teorinin işleyebilmesi için tuhaf görünüşlü bir parçayı da dâhil etmesi gerekiyordu. Parçacıkların, zamanda birbirlerini ileriye ve *geriye* doğru etkiyebilmesine izin vermesi gerekiyordu. Böylelikle, buradaki bir parçacığın hareketi hem parçacıkların geçmişteki dağılımlarına hem de gelecekteki diğer parçacıkların dağılımına bağlı olacaktı. Feynman'ın elektromanyetik etkileşimleri kuantum teorisine dönüştürmeye çalıştığı ve nihayet kendisini QED'deki problemleri çözmesine sevk eden teori, parçacıklara özgü teoriydi.

Schwinger, diğer yandan temel varlıklar olarak alanlarla

başlamak istiyordu. Bunlar, Maxwell'in fizikte tanıdığı türden bir kuantum teorisi ve Jordan tarafından önerilen maddenin resmiydi.<sup>157</sup> Geliştirdiği teori, Feynman'inkinden tamamen farklı görünüyordu: Uzak mesafeden etkileşime girmek yerine, *kuantum alanı* denilen yeni bir varlık bulunuyordu. Bunun bir elektromanyetik alan gibi davranması gerekiyordu. Ancak olası durumlardan biri, yani gözlenebilme olasılıklarının atanması, yukarıda açıklanan kuantum yoluyla anlaşılmıyordu. Bu kuantum alanı, bir elektromanyetik alanda farklı analog salınımlara benzer oldukları düşünülen çeşitli "uyarma" türlerine sahip olabiliyordu.

Parçacıklar, teorinin doğal bir parçası bile değildi. Parçacık benzeri olaylar kuantum alanında özel bir tarzda uyarılar olarak düşünülürdü.

1940'ların sonlarında Feynman ve Schwinger de dâhil olmak üzere, bu teorilere göz atan biri için bunlar oldukça farklı görünüyorlardı. Bu tür farklı şeyler gerçekleşebileceğine göre, dünyadaki farklı türdeki şeylerin (bir vakada parçacıkların, alanlar değil; diğer vakada da alanların, parçacıklar değil) teorileriydi. Olaylara farklı açıklamalar sunuyor, farklı sorunlarla yüzleşiyor ve dünyanın nasıl bir yer olması gerektiği konusunda çok farklı sezgilerden motivasyonlarını alıyorlardı. Ve yine de laboratuvarlarda görülebilecek bir şey için aynı tahminleri yapıyorlardı. Aslında gözlemlenebilir olsun veya olmasın, her tür fiziksel nicelikle ilgili aşağı yukarı aynı hesaplamaları üretiyorlardı.

Bugün fizikçilerin, parçacık ve alanla ilgili görüşleri arasında bir tür uzlaşma söz konusudur.<sup>158</sup> Yani, Feynman gibi konuşma eğilimindeler. Günümüzdeki mevcut en iyi teorile-

rimize göre elektron, kuark ve Higgs bozonlarının (üçü de temel parçacıklardır) özelliklerini inceleyebilmek için parçacık dedektörü ve parçacık hızlandırıcıları inşa ediyoruz. Bu, aslında hâlâ Schwinger'ın modern kuantum alan teorisinin merkezini oluşturan maddi gerçekliğinin göstergesidir. Modern parçacık fiziğindeki parçacıklar, klasik anlamdaki lokalize edilmiş, minik bilyeler gibi etrafta zıplayan cisimlerdir. Bunlar, bir kuantum alanının konfigüre edilebilmesi konusunda belli yöntemlerin göstergeleridir. Zira ışık, (klasik) elektromanyetik alanın konfigüre edilebilmesine ilişkin belli yöntemlerin göstergesidir. Aynı şekilde tsunamiler de okyanusu konfigüre edebilme yönteminin tezahürüdür.

Bunlar parçacık benzeri davranış sergiledikleri ve kuantum alanları dünyasındaki temel parçacıklar hakkında sağlıklı bir şekilde düşünebildiğimiz kuantum alanlarıyla ilgili dikkate değer gerçeklerdir. Nitekim, aşağıdaki parçacıklara değinmeye devam edeceğim. Fakat burada “parçacık” ifadesinin bir kuantum alanının belirli bir konfigürasyon şeklini tanımladığını hatırlamak önemlidir. Bu, parçacıklar dünyası fikrinin parçacıklar arasında boş uzay alanları bulunduğu- nun ileri sürülmesi sebebiyle önemli görülmektedir. Ve ilerde göreceğimiz üzere, kuantum alan teorisi böyle bir şeyi mümkün kılmamaktadır.

\*\*\*\*\*

Klasik bir teoride, olayların durumunun belli konumları işgal eden ve uzay ya da uzay-zamanda belli hızlarla hareket eden belli nesneleri içerdiği hâlde, uzay-zamanın herhangi bir şey içermediğini söylemenin ne anlama geleceği açıktır.

(Genel izafiyette, bu anlamda boş olan evrenlerin bile o kadar zengin bir şekilde yapılandırıldıklarını ve boş olduklarını söylemenin zor olduğunu görmüştük. Şimdilik bunu bir kenara bırakıyoruz.) Bununla birlikte kuantum fiziğinde, işler bu kadar açık değildir. Durumlar, gerçekliğin daha soyut temsilidir ve bir durumdan fiziksel niceliklere veya ölçüye giden yol, doğal olarak olasılıklardır. Öyleyse hiç cisim olmadığını söylemek ne anlama gelir?<sup>159</sup>

Bu soru için kuantum alan teorisinde, uzay ve zamanın bir kısmındaki (veya bütün olarak evrenin) parçacıkların sayısının bir fiziksel nicelik olarak düşünülmesi ve teknik ve sıradan anlamda, bizim prensipte parçacık dedektörü inşa ederek ve tıklamaları sayarak ölçebileceğimiz “gözlemlenebilir” olması gerektiği cevabını alırız.<sup>160</sup> Bu nedenle, bir durumu göz önüne aldığımızda teori bize uygun bir deney ortamı kurabilirsek bir, iki, üç veya daha fazla parçacığın içinde bulacağımız olasılığın ne kadar olacağını, “Nasıl bu kadar çok parçacık olabilir?” şeklinde sormamıza izin veriyor. Bu şekilde, benzer birçok deney yapmış olsak, sonuçta bulmayı umduğumuz “ortalama” parçacık sayısını hesaplayabiliriz.

Bununla birlikte, yukarıda açıklanan diğer gözlemlenebilirler gibi, bu gözlemlenebilir parçacık sayısından elde edilebilecek olasılıklar da genellikle bizim bilgisizliğimizin bir yansıması değildir. Başka bir deyişle teori, yalnızca evrenin belirli bir bölümünde veya evrende bir bütün olarak bazı sabit sayıda parçacıkların bulunmasına rağmen, sırf kaç parçacık olduğunu bilmememizden dolayı olasılık sonucu üretmektedir. Hiç de öyle değil. Bunun yerine, kuantum alan

teorisinde genelleyici durumlar, sadece belli bir bölgede belli bir zamanda herhangi bir parçacık olup olmadığı ya da bütün evrende ezelden beri parçacık olup olmadığı konusu meselesidir. Sadece bir kere “ölçüm” yaptığımızda, bir bölgede belli sayıda parçacık sayısı elde ederiz. (Ölçüm sorunu burada da açığa çıkar elbette.)

Az önce söylediğim şey; kuantum durumlarının herhangi bir sayıda parçacık bulma ihtimali, olanlardaki gibi çok özel vakalar hariç olmak üzere genelleyici durumlar için geçerlidir. Ancak bazı istisnalar vardır: Evrende tam olarak bir ya da iki veya daha fazla parçacık bulunduğundan emin olunan durumlar bulunabilir. Bütün evrende hiçbir parçacık bulunmadığı mutlak surette kesin olan durumlar dahi mevcuttur. Bu özel durumlar, vakum durumları (yokluk-boşluk durumları) olarak bilinir.

Evrende hiçbir şeyin bulunmadığı vakum durumu, kuantum alanı teorik tanımlamaları için en uygun adaydır. Ayrıca teorisinin kavramsal gelişimi için de gereklidir: Kuantum alan teorisinde, bulunabilecek diğer durumlar genellikle vakum durumuyla başlayıp, sezgisel konuşmak gerekirse vakum “artı” diğer şeyler olarak yeni durumları tanımlamak suretiyle inşa edilirler. Bu yüzden vakumun anlaşılması, QED de dâhil olmak üzere kuantum alan teorisini anlamak için çok önemlidir.

Dolayısıyla bütün evrendeki parçacık sayısının ölçümü bir şekilde yapıldıysa bile, ölçülen hiçbir parçacık olmayacağının kesin olacağı hâlleri temsil etmesine rağmen, bu durumdan yapılacak çıkarımların hiçbirisi geçerli değildir. Daha da önemlisi bundan bütün evreni ölçersek hiç parçacık bu-

lamayacağımız sonucu değil, kendi arka bahçemize girip bir parçacık dedektörü inşa etsek bile orada bir parçacık bulamayacağımız sonucu çıkar. Aslında bu evrenin kendi arka bahçemize gittiğimizde çimlerimizi, ağaçlarımızı ve hırdavatlarımızı bulabileceğimiz bir vakum durumunda olmasıyla tutarlıdır. Bildiğimiz hâliyle bütün dünya vakum hâlindedir.<sup>161</sup>

Bütün bunlar kulağa çok paradoksal geliyor. Bir bakıma da öyle. Sonuçta bütün evrende bir şey yoksa, evrenin bir parçası olarak nasıl bir şey olabilir?

Vakum hâlinin tanımı bize komik gelse de klasik hiçlik kavramıyla ilgili esas mesele kuantum teorisinin bize verdiği hiçlikle uyuşmamasıdır. Bunu, elektromanyetik alanı tartıştığımızda zaten görmüştük. Hiçbir salınım olmayan bir elektromanyetik alanın hiçlik sayılıp sayılamayacağı konusunu dikkatinize sunduğumu hatırlayınız. Sıfır alan bir şey midir? Peki, ya sıfır alanın zıt yönlerde hareket eden, iniş ve çıkışları tamamen birbirini iptal eden, birbirinin birebir aynısı olan iki dalga olduğunu söylersem? Bu iki şey mi yoksa hiçbir şey mi olur?

Belki de kuantum vakumunun pek de sezgisel olmayan özelliklerini anlamak için en iyi yol, kuantum teorisinin sıfır alanının bile çok fazla şey olduğunu anlamaktır. Bir vakum durumu da belki bir elektromanyetik alanın, sıfır alanın kuantum mekaniğindeki benzeri olarak düşünülebilir. Başka bir deyişle, kuantum alan teorisinde vakum durumu, bazı belli ilkesel küresel ölçümlere bazı anlamlı olasılık atamaları yapılabilen fakat lokal olarak parçacık dedektörleriyle ölçüldüğünde oldukça farklı sonuçlar verebilen, maddenin sadece başka bir hâlidir. Parçacıkların, alanların kuantum alan

teorisinde sergilediği belli bir fenomen olduklarını hatırlarsak, vakum durumu sadece parçacık benzeri olayları en aza indirgediğimiz alan konfigürasyonunu temsil eder. Bununla beraber onları tamamen gitmeye zorlayabileceğimiz bir konfigürasyon bulunmamaktadır.

Genel olarak fizikçiler, uzay ve zamanın bazı küçük bölgelerindeki vakum durumunda bir ölçüm yaptığımızda “bir şey” bulma ihtimalinin sıfır olmayan bir olasılığını, sıfır durumundan “dalgalanarak” uzaklaşan alanı yakalama ihtimalimizi yansıttığı şeklinde tarif ederler. O hâlde, vakumda sap-tanan bir parçacığa “vakum dalgalanması” denir. Dalgalanmalar ölçümde olabilecek şeyleri ilgilendirip, klasik anlamdaki asıl olayları ilgilendirmedigi için vakumun sezgisel resmi bir faaliyetler ya da daha iyi bir tabirle, bir olasılıklar denizidir. Eski radyo veya televizyonunuzda kanallar arasında dolaşırken duyduğunuz parazitler gibi düşünebilirsiniz. Bahsedebileceğimiz bir sinyal yoktur, parçacık sürekliliği de yoktur fakat sessizlik vardır da denilemez. Sadece rastlantısal, tutarsız arka plan sesi ve parazit gürültüsü vardır. Birtakım dalgalanmalar. Aslında fizikteki bazı deneysel senaryolarda, vakum dalgalanmaları tam beyaz gürültüye benzetilmektedir.

Dirac’ın antimaddesi, vakum dalgalanmalarıyla ilgili yeni bir virajı alıyor. Dirac’ın bulduğu elektronun pozitif ve negatif enerji durumlarını (yani, elektron ve pozitronlarla ilişkilendirdiğimiz durumlar) iniş ve çıkışları birbirlerini tamamen iptal eden, elektron için yukarıda tanımladığımız varsayımsal elektromanyetik dalgalara benzediğini düşünebiliriz. Bu, bir elektron ve bir pozitrondan oluşan bir çiftin hiç parçacık

içermeyen bir duruma “eşdeğer” olduğunu gösterir. Madde ve antimadde, tüm evrendeki şeylerin hesaplanmasında birbirlerini etkili bir şekilde iptal ederler.

Klasik teoride bu işe yaramaz. Çünkü elektron ve pozitronlar hem kütle hem de enerjiye sahiptirler. Ancak vakum dalgalanmaları, bir elektron/pozitron çiftinin kendiliğinden ortaya çıkıp, bir süre dolaştıktan sonra tekrar bir araya gelmesi ve birbirini yok etmesi için gerekli olan küçük miktardaki enerjiyi sağlar. Bu şekilde yaratılan parçacıklara bazen “sanal” parçacıklar denir. Çünkü vakum dalgalanmaları gibi kendilerinin de belirsiz, esirsel bir doğaları vardır. Arka plandaki küçük bipler gibi, sanki hiç var olmamışçasına bir anda gelir ve giderler. Ancak yine de diğer fiziksel süreçleri etkileyebilirler. Bunların sanki evrende rastgele meydana gelen olaylarmış gibi düşünülmesi sezgiseldir.

Teori bize, onları bulmaya çalıştığımızda parçacık bulma olasılığımızı söylüyor. Ancak bize bu parçacıkların ne yaptığı ve hatta ölçümler arasında kesin olarak orada olup olmadıkları hakkında bir şey söylemiyor. Kuantum alan teorisinde hiçliğin neye benzediğini anlamaya çalışırken aklınızda bulunması yararlı bir resimdir. Klasik teoride kapalı bir televizyonun karanlığından, kuantum alan teorisinde ise hiçbir kanalın parazitinden bahsedilebilir.

\*\*\*\*\*

Yukarıda tarif ettiğim kuantum alan teorisinde vakumun özellikleri (hiçbir şey olmadığında bile bir şeyler bulma şansı; madde ve antimaddenin var olduktan bir an sonra yok olması) neredeyse inanılmazlık sınırında gezinen şaşırtıcı

olaylardır. Elbette teorinin doğru olamayabileceğini de düşünebilirsiniz. Kulağa spekülasyon ve mistisizm gibi geliyor. Daha da kötüsü, tutarlı bile değil.

Aslında, QED vakumunun kendine özgü özellikleri deneysel olarak test edilebilir. Ya da en azından deneysel fizikte yaygın olan bir çeşidin test edilebilir sonuçları mevcuttur. Vakum polarizasyonu verebileceğimiz önemli bir örnektir.<sup>162</sup> QED'deki vakumun yapısının gerçekten ne kadar karmaşık olduğunu görmeye başladıkları sıralarda, vakum polarizasyonu ilk kez 1934'te Dirac ve diğerleri tarafından fark edilmişti. Ancak 1930'ların fizikçileri, o zamanki kavrayışlarıyla bir çıkarımda bulunamamışlardı. Vakum polarizasyonunun gözlemlenebilir bir sonucunu (Lamb kayması olarak bilinen bir etki) doğru şekilde tarif eden ilk teorik hesaplamalar, Feynman'ın İkinci Dünya Savaşı sırasında Los Alamos'daki teori bölümünde eski patronu olan Hans Bethe tarafından yapıldı.

Fizikteki efsanenin durumunu ele alan hikâyede, 1947'de New York'taki Shelter Adası'ndaki bir konferanstan eve giderken Bethe'nin hesaplamaları trende yapmış olduğu anlatılmaktadır.

Bu konferans QED'in gelişmesinde önemli bir dönüm noktası olmuştu. Savaş sonrası ilk büyük konferanstı. Savaş çabalarının bir parçası olarak geliştirilen, birçoğu askeri sır olarak görülen fikirler artık siviller arasında tartışılabilir duruma gelmişti. Schwinger ve Feynman da oradaydı ve her ikisi de ilk kez QED hakkındaki en yeni fikirlerini sunabilmişlerdi. Bethe, özellikle bu genç nesil fizikçilerden duyduğu konuşmalardan ötürü heyecanlı olduğunu ve bu yeni fikirleri

düşünmeden edemediğini beyan ediyordu.

Şimdiye dek ışık ve elektromanyetik ışınım hakkında söylediklerimin çoğu, etrafında başka bir şey olmadığında meydana gelenlerle ilgiliydi. Yani, boş olan uzayda ışığın hareketi. Ancak elektromanyetik ışınım cam ve su gibi bazı meryalden de geçebilmektedir.<sup>164</sup> Bu olduğunda, ortamdaki elektromanyetik alanın davranışı değişir. Bunun nedeni sıradan nesnelerin atomlardan oluşmasıdır, atomlar da protonlar ve elektronlardan oluşur. Bunlar elektromanyetik yük taşımakta olup bu da elektromanyetik alanda uyarıları hem üretip hem de bunlardan etkilendikleri anlamına gelir. Dolayısıyla ışık, su gibi bir şeyden geçtiğinde bu parçacıklarla etkileşime geçer ve bu esnada ışığın hareketi de değişim gösterir. İçinden geçen radyasyona karşı ortamın reaksiyona ortamın polarizasyonu denir. Bu tür bir etkileşim, birçok sıradan olaydan tutun pencerelerin kısmen gökkuşağını yansıtabilme özelliğine varana kadar birçok şeyi izah etmektedir.

Vakum polarizasyonunun temel fikri şudur: QED'deki vakum sanal elektron/pozitron çiftleriyle doluysa, gelişmekte olan QED kuramının belirttiği gibi camdaki elektronlar ve protonlardaki gibi ışık da bu parçacıklarla etkileşim kurmalıdır. Ve bu etkileşim, (aksi hâlde) boş uzaydaki elektromanyetik alanı etkilemelidir.

Polarizasyon genellikle bir ortamdan geçen radyasyonun özelliklerini inceleyerek ölçülür. Fakat etkiler, boş uzaydaki ışığın hareketine göre açıklanmaktadır. Bu yüzden, boş uzayın polarize olması durumunda ışığın hareketini inceleyerek anlatmanın doğrudan bir yolu yoktur. Çünkü ışığın

hareketini karşılaştırmak için başka bir standart yoktur. Ancak Bethe, etkiyi test etmek için daha ince yöntemleri fark etmişti. Özellikle aynı mekanizma, elektromanyetik alanın izole edilmiş yüklü parçacıkların yakınında nasıl davrandığını etkilemektedir; bu da yüklü bir parçacık ile yakınlardaki elektromanyetik alan arasındaki klasik ilişkiye yapılan bir düzeltmedir. Ve bu etki, bir proton etrafında farklı yörüngelerdeki elektronları kıyaslayarak ölçülebilir olmalıdır.

Bethe'nin hesabı tam olarak bir tahmin de değildi. Aslında, Columbia Üniversitesi'nden iki deneysel fizikçi olan Willis Lamb ve öğrencisi Robert Retherford, Shelter Island Konferansı'na katılmışlar ve son zamanlarda gerçekleştirdikleri deneyde hidrojende şaşırtıcı bir etki bulduklarından bahsetmişlerdi. Bu deney Bethe'e yaptığı hesaplamalar için ilham verdi. Ancak hesaplamaları ile Lamb ve Retherford'un gözlemlediği ve konferansta kimsenin açıklayamadığı etki arasındaki anlaşma, hesaplamanın teorisinin erken bir başarısı olarak kabul edilmeye yakın olduğunu işaret ediyordu. Daha da önemlisi, QED'deki garip ve yeni hiçlik fiziği bize kimsenin beklemediği bir şey, yani gerçek dünyadaki boş uzay hakkında bir şeyler söylediğine ilişkin ikna edici kanıtlar elde edilmişti.

\*\*\*\*\*

QED son derece başarılı olmuştur: Fizikte geliştirilmiş en doğru tahmin edici teoridir ve bazı öngörüler on basamak veya daha üst seviyede doğrulanmıştır.<sup>165</sup> Bununla birlikte, bu konuyla ve genel olarak kuantum alan teorisi hakkında her zaman ilginç şeyler olmuştur. Feynman ve Schwinger

olağanüstü doğru tahminler üretmekle meşgulken bile, daha genç nesil fizikçiler (en önemleri Arthur Wightman, Rudolph Haag ve Daniel Kastler) teoriden kuşku duyuyorlardı.<sup>166</sup> Doğru tahminler ürettiği için mesele ne olursa olsun işler yolunda gidiyor diye düşünüyorlardı. Fakat Wightman, Haag ve diğerleri bundan fazlasını istiyorlardı. Teorinin sağlam matematiksel gerekçelere dayandırılabilmesini, bunun gerçekten tutarlı olduğunu ve diğer fizikçilerin sürekli olarak yaptığı çıkarımların gerçekten güvenilir olduğunu bilmek istiyorlardı.

Bu biraz şaşırtıcı olabilir. Sonuçta, Feynman, Schwinger ve diğerleri, gözlemlenen her fenomeni açıklayan bu teoriyle düzenli olarak hesaplamalar yapıyorlardı. Elbette, bunu yapabilmek için matematik kısmını halletmişlerdir diye düşünebiliriz. Fakat gerçekte fizik, matematiksel hesaplama, fiziksel sezgi ve düzgün tahmin işleminin kompleks bir karışımını içeren çok daha sert bir zeminde gelişir. Fizikçiler, dünyanın nasıl işlediğine dair bir kavrayış geliştirme ve “yeterince iyi” cevaplar bulmaya yönelik pragmatik konulara, formüllerle uğraşmaktan daha fazla ilgi duymaktadırlar. Bu durum, fizikçiler yeni bir teori üzerine çalışırken daha da geçerlilik kazanmaktadır. Daha sonra matematikçiler gelerek detaylı temizlik yapabilirler. Günümüzde berrak bir matematiksel fizik modeli olan izafiyet teorisi bile bir dizi provokatif düşünce, deney ve şüpheli fiziksel argüman olarak hayata başlamıştı.

Özellikle Feynman, sezgisel bir sihirbazdı: Kariyeri boyunca problemleri çözme yaklaşımı çoğu zaman fikrinin diğerlerine nadiren uyabildiği (genelde doğru cevaba ya da

en azından başkalarının daha sıradan yöntemlerle nihayetinde ulaşabileceği cevaba) sıçrayışlarla sihirli gibi görünüyordu. Aslında fizikçilerin nihayetinde, kuantum alan teorisindeki problemleri çözmek için Schwinger'in daha geleneksel yöntemleri yerine Feynman'ın resimsel yaklaşımını benimsemiş olmalarına rağmen, Feynman'ın fikirleri 1940'lı yıllarda büyük kuşkuyla karşılanıyordu.<sup>167</sup> Örneğin, 1948'deki bir konferansta Feynman'ın konuşması esnasında Niehl Bohr gibi seçkin büyük fizikçilerin Feynman'ın bazı temel kuantum teorisine ait kavramlara yeterince vakıf olmadığını ileri sürmeleri sonucunda bir kargaşa çıkmıştı. Daha sonra Feynman, konuşmasından kimsenin bir şey anlamamış olması nedeniyle bildirisinin tam bir başarısızlıkla sonuçlandığını ifade etti.

İronik bir şekilde, Feynman'ın diğerlerinden daha iyi neyi yaptığını anlamasa da Schwinger kendisine güvenmekte çok daha istekli olmuştu. Çünkü Schwinger o sırada Feynman'ın sonuçlarını bağımsız olarak kontrol edebilen az sayıdaki insandan biriydi. Bu arada Schwinger'in QED'e yaklaşımı ilk etapta fizik camiasının geri kalanı tarafından daha iyi karşılanmıştı. Fakat standart matematiksel yöntemleri kullanmak için daha kararlı olmasına rağmen karşılaştığı sorunlar son derece zordu ve bazen de sezgisel sıçrayışlara ve varsayımlara başvuruyordu.

Wightman, bu tartışmalar olurken 1940'ların sonlarında Princeton Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrencisiydi. Beş yıl önceki Feynman'ın çalışmalarını denetleyen John Wheeler ile birlikte çalışıyordu. Wightman, Feynman ve Schwinger'in daha sezgisel yöntemlerinin bıraktığı boşlukları dol-

durma işini üstlenmişti. Yaklaşımı, Feynman ve Schwinger'ın teorilerini geliştirmeleri, onları kesin matematiksel iddialar olarak kodlamak ve Schwinger, Feynman ve diğerlerinin elde ettiği sonuçları kanıtlamaya çalışmak için kullandıkları bir avuç ilkeyi belirlemektir. Fark, Wightman'ın bunu saf matematiği kullanarak yapmayı hedeflemesiydi. Teorinin şimdiye kadar büyük başarılarla imza atmış ve hiç kimse bunun bir derecede matematiksel olarak doğru olduğundan şüphe etmemiş olmasından dolayı Wightman'ın projesi, belki fizikçilerin önemseyemediği amaçlar için gereksiz olsa da yönetilebilir görünüyordu.

Wightman, Haag ve Kasler ile onlarca öğrencisi ve iş birliğinde bulunan kişinin başarısız olduğunu söylemek yanlış olur. Kuantum alan teorisiyle ilgili birçok önemli sonuç çıkarmayı ve önemli bir araştırma programı başlatmayı başardılar. Ancak bu program da başarısız oldu. Wightman, kuantum alan teorisinin matematiksel temelleri üzerinde çalışmaya başladıktan altmış beş yıldan fazla bir süre sonra, matematiksel fizikçiler matematikçilerin talep ettiği matematiksel titizlik düzeyinde QED de dâhil olmak üzere gerçekçi kuantum alan teorilerini işleme sokmanın yolunu hâlâ geliştirememişlerdi.

Bu hiçbir ilerleme kaydedilmediği anlamına gelmemektedir. Örneğin, teorisinin ilk günlerinden başlayarak, fizikçilere anlamsız olmayan cevaplar verme eğiliminde olan bir teori-den anlamlı tahminler çıkarmaya izin veren "renormalizasyon" olarak bilinen bir prosedüre ilişkin en rahatsız edici sorunların çoğu, Kenneth Wilson adlı bir fizikçinin kendisine 1982'de Nobel Ödülü'nü kazandıran çığır açan bir çalışma-

ısıyla çözülmüştür. Wilson, geçici ve şüpheli bazı manevralar yaptı ve tutarlı bir fiziksel yorumlama yönteminin nasıl verilebileceğini gösterdi. Fakat Wilson teorik yapıda en belirgin çatlaklardan ödün vermiş olsa da tüm problemleri çözmemişti.<sup>168</sup> Wattman'ın eski öğrencilerinden biri olan ve Harvard'da fizik ve matematik profesörü olan Arthur Jaffe, son zamanlarda UC Irvine'de bunu bir konuşmasına dâhil ettiğine göre hâlâ kuantum alan teorisini anlamıyoruz.

Bunu şaşırtıcı bulmak için birçok nedenimiz var. Dirac, Feynman ve Schwinger'in kurduğu teori 1970'lerin başında çeşitli parçalardan toplanan Standart Parçacık Fiziği Modeli için teorik temel oluşturmak üzere geliştirilmiş ve genişletilmiştir. Bu arada Standart Model, 40 yıllık deneyime sahipti ve son derece güçlü kuramsal bir makineydi.

Fizikçiler kuantum alan teorisini anlamamış olsaydı, Standart Model'in bu düzeye erişmesine imkân yoktu. Ve hiç kimse teorinin matematikle nasıl çalıştığını Wilson'un görüşlerinin ışığında bile tam olarak ifade etmeyi başaramadı. Çoğu fizikçi bu konu üzerinde pek düşünmüyor. Özellikle Feynman'ın, kuantum alan teorisinin titizliği konusundaki endişeleri artmıştı. Ancak Schwinger bu sorunları çok ciddiye almış ve teoriyi daha sağlam bir matematik temel üzerine oturtmak için kariyerinin büyük bölümünde buna çalışmıştır. Ve Dirac, Feynman ve Schwinger'ın geliştirdiği olgun QED teorisini düpedüz rahatsız edici bulmuştu. "Karmaşık ve çirkin" demişti bir keresinde. Başka bir seferde de "makul bir matematik değil" şeklinde ifade kullanmıştı<sup>169</sup>.

Bu kuantum vakumunu nerede bırakıyor? Matematiksel olarak konuşmak gerekirse aslında, kuantum alan teorisin-

de iyi anlaşılan bir şey varsa o da vakumdur.<sup>170</sup> Yukarıda belirttiğim, madde ve antimadde ve spontane dalgalanmalarla ilgili olarak vakum fenomeninin yorumlarının bazıları belki de şüphelidir. Vakum polarizasyonu bile deneysel olarak iyi kurulmuş olmasına rağmen, tam olarak anlaşılamamıştır. Fakat bu yorumların, hiçbir şeyin olmadığı bir evrende bir şeyler bulma ihtimaline ilişkin bize biraz bilgi vermesi gerektiği temel fikri en yüksek titizlik standartlarına göre kurulmuştur. Kuantum alan teorisinin titizliği hakkında endişe edebilecekleri birçok yer vardır. Fakat vakumun garip özellikleri bunlar arasında değildir.

## SON SÖZ

### HİÇLİK NEDEN GERÇEKTEN ÖNEMLİDİR? KUANTUM YER ÇEKİMİ VE ÖTESİ

1973 ve 1974'te, parçacık fiziği dönüşümlü olarak işlendi.<sup>171</sup> Bir dizi teorik ve deneysel bulgu, bir atom (proton ve nötronlar) çekirdeğinde yer alan parçacıkların kendilerinin kuark adı verilen başka bir parçacıktan oluştuğunu kesin olarak ortaya koymuştu. Aynı dönemde proton, nötron ve diğer parçacıklara (toplu olarak hadron olarak bilinen) ilişkin bilinen tüm deneysel sonuçların kuarklardan oluştuğunu açıklayan kuantum alan teorisi önerildi. Bu yeni teori, şimdi kuantum kromodinamiği ya da kısaca QCD olarak adlandırılmakta olup, kuantum elektrodinamiğiyle çok benzerlik taşıyordu. ("Kromo-" ön eki, kuarkların yeni bir yük türü taşıdığı gerçeğini ifade eder ve genellikle renk yükü denir.) QED'nin soyundan gelen QCD, Parçacık Fiziğinin Standart Modeli'nin özünde yer alan bir parçadır. Yaklaşık on yıldır QCD'den bağımsız olarak ortada olan kuark modeli ve QCD'nin büyük başarıları bazı galibiyetlere yol açmıştı. Bu iki yıl içinde, beş fizikçi kuark ve QCD ile ilgili çalışmaları dolayısıyla Nobel Ödülü aldılar.<sup>172</sup>

Ancak bunca tantana içerisinde, hadronik fiziği açıkla-

mak için makul olan diğer yarışmacılar olarak rekabet eden teoriler göze pek çarpmadı. 1960'lı yıllarda küçük ama adanmış bir çalışmayla kazanan alternatif bir teori de kuark modellerini, kuarkların bir hadron içerisinde nasıl birbirine yapıştığını açıkladığı düşünülen küçük sicimlerle zenginleştirmişti.<sup>173</sup> Teorinin bazı başarıları ve bazı sorunları vardı. Ancak QCD sahneye girdiğinde bu durum uzun sürmedi.

1974'te, şu an artık geçersiz sicim teorisinin eski takipçilerinden Joel Scherk ve John Schwarz'ın ve (bağımsız olarak) Tamiaki Yoneya, onu tozlu raflardan alarak üzerine yeni bir kat boya atmaya ve yeni tür teoriye dönüştürmeye karar verdiler. Bu ikinci enkarnasyonunda, sicim teorisi artık kuarkları bir arada tutan şeyin açıklanmasının bir yolu değildi. Bu yeni vizyon çok daha iddialıydı. Artık sicimlerin eski teoride olduğundan daha küçük olması gerekiyordu ( $10^{20}$  kat kadar daha küçük) ve artık kuark paketlerini saran şerit gibi değillerdi. Yeni teoride sicimler fiziğin en temelinde yer alıyordu. Sicim teorisi her şeyin teorisi olarak önerilmişti.

\*\*\*\*\*

Bu kitapta tartıştığım teoriler (Newton mekaniği, Maxwell'in elektromanyetizması, izafiyet teorisi, kuantum alan teorisi) sadece hiçbir şey olmasaydı dünya nasıl bir yer olurdu sorusuyla yetinmeyip, hiçbir şey sözünün anlamı hakkında da radikal ve farklı kavramlar ortaya koymuşlardır. Newton fiziğinde hiçbir şey olmayan bir dünya, boş uzay ve zamandan oluşacaktır. Böyle bir evrende, uzay-zamanın sabit, değişmez bir geometrik yapısı vardır ve eşya aniden ortaya çıksa bile bu geometrik yapının temel özellikleri değişmeyecektir.

Bu, eşyanın takdim edilmesi için hazır bekleyen basit anlamda bir konteynerdir.

Genel izafiyette, hiçbir şeyi olmayan bir dünya yine herhangi bir şeyden yoksun bir evren olurdu. Yani, uzay-zaman herhangi bir yerde bulunmaksızın var olur. Ancak sabit ve değişmez olmaktan öte, uzay-zaman geometrisi hiç madde olmaksızın dahi zengin ve dinamiktir. Ve bu zenginlik, eşyanın özelliklerinden birçoğuna sahip olan saf geometrik olgulara izin verir. Bu olgular, tıpkı gezegenler ya da yıldızlar gibi yakınlarındaki uzay gemilerinde gözlemcilerini etkileyen kara delikler, yayları titreştiren, ampülleri yakan ve sizleri hayran bırakan yer çekimi dalgalarıdır. Boş uzay-zamanın geometrisi, hiçbir şeyin olmadığı bir evrende mümkün olan şeylerle ilgili beklentilerimizin az bir kısmının karşılandığı türde bir şeydir.

Ayrıca, genel izafiyet tartışmasıyla bağlantılı olarak, Maxwell'in elektromanyetik alan teorisinin hem fizikte yeni bir konu (elektromanyetik alan) meydana getirdiğini hem de boş olmanın evrenin bir bölgesi ve hatta tamamı için ne anlama geldiğine ilişkin önemli sorular ortaya attığını gördük. Işık da dâhil olmak üzere elektromanyetik radyasyon, bir çeşit "şey" olarak sayılırsa (genel izafiyette olması gerektiği gibi güneşin yaptığı şekilde uzay-zamanının bükülmesine katkı sağladığından dolayı) o zaman ışık dışında herhangi bir şeyin olmadığı uzayın bir bölgesi ve zaman da boştur denilemez. Daha da önemlisi, elektromanyetik alanda hiçbir titreşim ya da uyarım içermeyen bir evrenin hiç alanı olmayan bir evren olarak sayılıp sayılmayacağına dair bir soruya da işaret etmiştim. Işık parçacık mıdır, yoksa titreşimli olup

olmamasına bakmaksızın esir gibi tüm evrene nüfuz eden, alandaki belli bir örüntü müdür?

Bu son soru, kuantum alan teorisine geçtiğimizde özellikle önem kazanmıştır. Orada evrendeki “hiçlik” durumu bir vakum hâliyle temsil edilir. Fakat bu tarz bir hâl hiçbir şey olmadan bir evrenden bekleyeceğimiz özelliklere sahip değildir: Özellikle etrafa bakmaya başlarsak bazı parçacıkları da bulabiliriz. Önerdiğim bu vakum hâli, elektromanyetik alanda herhangi bir uyarım bulunmadığı durumla yakından ilişkilidir. Yine de bir varlığın (alan) mevcut olduğu hâllerde vakum polarizasyonu gibi gözlemlenebilir olgulara neden olabilecektir. Bunu, (vakum dalgalanmaları, elektron/ pozitron yaratma ve yok etme) anlamak için bazı keşifsel yöntemleri tanımlamıştım. Ancak bu temel gerçekler, boş bir evrende ne tür ölçüm çıktılarının mümkün olduğu ve bunların basit anlamıyla tuhaf olduğuyla ilgilidir.

“Hiçlik” ansiklopedisinin ayrıştan birkaç özelliği var. Birincisi, bu teorilerin her birinde hiçbir şeyin olmamasının ne anlama geldiğini gösteren mükemmel bir kesinlik vardır: (Gerçeklik olarak, hiçlik hakkında sıradan düşüncelerimizden daha doğrudur) bunlar boş uzay-zamanlar, sıfır alanlar, vakum hâlleridir. Hiçliğe ait bu kesin kavramlar, bizim sıradan “bir şeyin” yokluğunu kavramımızla ilgili değildir. Bunların ikisi aynı şey de değildir. Her bir durumda bir fizik teorisi geliştirirken, fizikçiler sıradan bir hiçlik kavramını alıp (elbette önceki fizik teorilerinden haberdar olarak) ve onu bileyerek çalışmalarına dâhil ederler.

Bu tür bir hareket, bilimde yaygın olarak bulunur. Günlük yaşam için taze olan fikirler (“türler”, “parçacık”, “enerji”,

“bağ”, “hayat”, “rastlantısallık”) spesifik bilimsel amaçlar için çalışmaya başlandıkça dönüştürülmüşlerdir. Bilimsel kuramsallaştırmanın kesinliği, terimlerimizin anlamları konusunda titiz olmamızı gerektirir. Fakat bu hassasiyet aynı zamanda karışıklık ve çatışma için yeni ihtimaller üretir. Çoğu zaman en iyi bilimimizi felsefi, siyasi ve hatta dini önemi olan sorulara taşımak istiyoruz. Ancak bunu yaparken, kelimelerin sözlük anlamları ile bu sözlerin bilimde sahip olduğu daha spesifik, ince ve nüanslı anlamları arasında kaymalara uğrayacak şekilde nasıl konudan konuya atladığımızın farkına varmamız gerekir.

Bu noktayı vurgulamak amacıyla, giriş bölümünde gündeme getirdiğim soruyu tekrar açmak isterim. Neden hiçbir şey değil de bir şey var? Önerdiğim gibi, bunun eninde sonunda en iyi fizik bilğimiz tarafından cevaplandırılacak bir tür soru olduğunu düşünebiliriz. Fakat artık, sorunun kendi anlamının fizikte kullanılan bir arka plan teorisinin ayrıntılarına bağlı olduğunu görüyoruz. Belki de en uç durum, kuantum alan teorisindeki vakum durumudur. Burada, “bir şey” ve “hiçbir şey” birbirini dışlayan özellikte değildir: Hiçbir şeyin olmaması ve onu algılamaya çalıştığımızda ortaya çıkması tamamen tutarlıdır. Fakat genel izafiyette bile tamamen şey gibi görünen hiçliğin varyasyonları vardır. O zaman, hiçbir şeyin ötesinde neden kara delikler var? Kara deliklerin sadece hiçliğin bir varyasyonu olduğu da ortaya çıkmıştır.

Bu tarz cevaplar tatmin edici midir? Kesinlikle orijinal soruya yanıt vermiyorlar: “Bir şey” ile büyük olasılıkla “yer çekimi dalgası” ya da “vakum dalgalanması”; “hiçbir şey” ile

de “kuantum vakum durumu” kastedilmez. Peki o zaman ne demek istedik? Belki de aklımızda, hiçlik olsaydı dünya nasıl bir yer olurdu ve tam tersi, ne gibi şeyler “eşya” sayılır? O hâlde, en iyi fizik bilgimizce seçilen bu fikirlerin önceki sezgilerimizle uyumlu olmayışı önemli görünmektedir. Önceki anlayışımız birtakım teorilere dayanıyorsa bu, kuantum alan teorisi ya da genel izafiyetle desteklenir mi?

Ve değilse, neden ilk etapta sorunun önemsendiğini tekrar düşünmemiz gerekmez mi?

\*\*\*\*\*

Sıradan kavramlarımızın bilimsel çalışma için yeniden yaratılabileceği yöntemler, önceden teorik ya da geleneksel olarak “felsefi” sorulara dayandığında sadece karışıklığa neden olmaktan daha fazlasını yaparlar. Ayrıca bilim içinde çatışmalara neden olabilirler. Durum ne olursa olsun, genel izafiyetteki “hiçbir şey”, kuantum alan teorisindeki “hiçbir şey”den tamamen farklı bir anlam taşır. Gelecekteki fiziksel teorilerde “hiçbir şey”in her iki anlamının da geride kalacağını düşünmemiz için de iyi nedenlerimiz vardır.

İsterseniz açıklayayım. 1970’lerde parçacık fiziğinde ileri doğru sıçrayışlar, kuantum alan teorisinin ve Standart Model’in teorik temel çerçevesinde birleştirilmesiyle üç “temel kuvvet”i ortaya çıkardı. Bu üç temel kuvvet proton, nötron ve diğer hadronlarda kuarkları birbirine bağlayan ve QCD tarafından tanımlanan kuvvettir. Esas olarak QED tarafından tarif edilen elektromanyetizma ve bir atomun çekirdeğinde gördüğümüz bazı süreçleri açıklayan ve elektromanyetizmanın çok yakın bir akrabası olduğu anlaşılan “zayıf

kuvvet” olarak bilinen bir teori tarafından yerinden edilmiştir.<sup>174</sup> (Aslında QED yerini elektromanyetizma ile “elektroweak teorisi” olarak bilinen zayıf güce bırakmıştır. QED’nin yalnızca elektromanyetik olaylarla ilgilenen birine yönelik elektroweak teorisi için iyi bir yaklaştırım olduğu ortaya çıkmaktadır.) Bütün bu vakalarda “hiçbir şey”, dalgalanmalar ve birçok farklı türde yaratma/yok etme ile dolu kuantum alan teorik vakumu anlamına gelir.

Bu üç parçayla birlikte Standart Model, sadece bazı küçük ayrıntıları her zamankinden daha hassas deneysel sonuçlarla doldurmak dışında, 1974’te tamamlanmıştı. Bu durum o zamandan beri günümüze kadar böyle kalmıştır. Fakat fizikçilerin bu üç kuvveti kontrol altına alma konusundaki başarıları, sadece yeryüzündeki dördüncü ve geriye kalan yer çekimi “kuvvetine” dikkat çekti. 1980’lerin başında Standart Model tam olarak ifade edildikten sonra parçacık fizikçileri toplu olarak, yeterli bir kuantum çekimi teorisi oluşturma problemine yöneldiler.<sup>175</sup>

Bu problem son derece zor çıktı. Amacı anlamak bile zordu. Örneğin birçok parçacık fizikçisi ve kuantum yer çekimi uzmanının kullanımini takiben, yer çekimini dördüncü “kuvvet” olarak tanımladım. Bu cazip bir düşünce biçimidir: Hareketi açıklamak için kuvvetler kullanmak eğilimindeyiz ve yer çekimi, vinçlerin devrilmesinden güneşin doğuşu ve batışına kadar dünyada gördüğümüz pek çok hareketin sorumlusudur. Üstelik, klasik Newton fiziğinde yer çekimi bir kuvvet olarak düşünülür ve bu bağlamda üç kuvvetle çok benzer görülür. Dolayısıyla, diğer üç kuvvetin kuantum teorilerini üretmek için kullanılan temel aletlerle saldırmak için

doğal bir hedef gibi görünüyor.

Fakat genel izafiyette, bu benzerlikler parçalanmaya başlar. Yer çekimini “kuvvet” olarak düşünmek çok daha tartışmalı hâle gelir. Genel izafiyette, yerçekimsel etkilerinin sadece uzay-zaman eğriliğinin bir tezahürü olduğunu hatırlayın. Hem Newton fiziği hem de izafiyet teorisinde kuvvet, bir cismi ivmelendiren bir şeydir. Yani, cismi düz çizgi üzerindeki hareketinden saptıran bir şeydir. Fakat genel izafiyette yer çekimi bunu yapmaz. Dolayısıyla yer çekimi bir kuvvet değildir. En azından elektromanyetizma ve güçlü ve zayıf kuvvetler ile aynı tarzda değildir. Bu, yer çekiminin ya da en azından genel izafiyetin kuantum alan teorisinin kontrolü altına nasıl alınacağını görmeyi çok zor bir hâle getirmektedir.

Bu, iki teorinin (kuantum alan teorisi ve genel izafiyetin) hiçliğe nasıl davrandığı konusunda ciddi bir gerilime neden olmaktadır. Kuantum alan teorisinde vakum durumu, tüm zamanlar boyunca tüm evrenin bir ölçümünü yaptığınızda bir şey bulma olasılığınız hakkında bilgi vermektedir. Yine, arka bahçeniz veya Dünya ile Mars arasındaki uzay gibi daha küçük bölgelere baktığınızda herhangi bir şey bulma olasılığınızı da verecektir. Belirttiğimiz gibi, vakum durumunda bile bu küçük bölgelerde bir şey bulma olasılıkları sıfırdan farklı olabilir.

Bunların hepsi, evrenin bölgelerini olası gözlenebilirlerle ilişkilendirmenize olanak tanıyan bazı sabit arka plan uzay-zaman yapısının varlığında anlamlıdır. Fakat genel izafiyette buna sahip değilsiniz. Uzay-zamanın yapısı katıyen sabit değildir. Bu, herhangi bir şey olmadığında dahi uzay-

zamanın bir “bölgesi”nden bahsetmenin mümkün olmayacağı anlamına gelir.<sup>176</sup> Daha da kötüsü, uzay-zamanın yapısı aslında bir şeyin varlığı ya da ne tür bir varlık olduğuna bağlıdır. Dolayısıyla, boş bir uzay-zamanı sabitlemeye çalışırsanız, o uzay-zamanın bir bölgesini seçin ve o bölgedeki parçacıkları ölçümleyin, önünüze birtakım sorunlar çıkacaktır. Bunun nedeni, sonuçta orada parçacık bulma olasılığı olmasıdır. Yani, uzay-zamanın geometrisi ilk etapta düşündüğünüz gibi olamayacağı anlamına gelir. Çünkü artık uzayın boş olduğunu varsayarak başladınız!

Kuantum çekim gücü fikriyle ya da genel izafiyet kuantum teorisi ile bazı temel tutarsızlıklar olduğunu önermek istemiyorum. Fakat burada gerçek zorluklar var ve bunların çoğu genel izafiyet ve kuantum alan teorisi temel kavramları arasındaki uyumsuzluklara yol açmaktadır. “Hiçbir şey” her iki teoride de biraz garip olabilir fakat her bir durumda tek başına tutarlıdır. Ancak bunları bir araya getirdiğinizde, işler bozulmaya başlar. Bu çok farklı teorilerin nasıl güzelce birlikte çalışacağını bulmak, modern fiziğin kırk yılı aşkın bir süredir karşılaştığı en zor ve önemli sorulardan biridir.

\*\*\*\*\*

Fizikçiler uzun zamandan beri, genel izafiyet ve kuantum alan tezini bir arada yürüten bir teori bulmakla ilgili birçok zorluğun farkındaydılar. Yer çekimi kuantum teorisini geliştirme yönündeki çabalar, 1930'lara dayanan ilk denemelerin yapılmasına kadar dayanır ve QED kadar eskidir.<sup>177</sup> 1950'lerde, Dirac ve diğerleri şimdi “kanonik” kuantum çekim gücü olarak bilinen programı başlattılar. (“Kanonik” çün-

kü stratejisi fizikte “kanonik değişkenler” olarak bilinen bir konuya dayandırılmıştır. Bu metodun kanonik, yani geleneksel olmasından değildir!)

Bu programı, 1960’ların ortalarına kadar Wheeler (Feynman ve Wightman’ın doktora sorumlusu) ve Harvard’da Schwinger’in öğrencisi olan Bryce DeWitt’in çalışmalarıyla mümkün olduğu kadar ileri götürmüşlerdir. Bera-ber, kuantum çekimi teorisi için Schrödinger denkleminin benzeri olan Wheeler-DeWitt denklemini üretmişlerdir. Sonuçta, kimse herhangi bir gerçek problemi çözmek için Wheeler-DeWitt denkleminin nasıl kullanılacağını bulamamıştı ve yaklaşım bocalıyordu. Biri, kanonik kuantum çekimini probleme bir “kaba kuvvet” yaklaşımı olarak düşünebilirdi ve bir noktada belki de buna ihtiyaç duyulabileceği anlaşıldı.

Sicim teorisinin başlıca satış noktası, her şeyin teorisi olarak reenkarne olduğunda, gerekli inceliği sağlıyor oluşuydu. Teorinin ardında yatan düşünce, dünyanın farklı kütlelere, farklı yüklere vb. sahip farklı olası parçacıklara teka-bül eden farklı olası titreşimleri olan küçük titreşen sicimler-den oluşmasıydı. Eski sicim teorisinin karşılaştığı en büyük sorunlardan biri çok fazla şey sunuyor gibi görünüyor oluşuydu. Açıklamasını beklediğiniz hadronlara ek olarak eski sicim teorisi, hiç kimsenin gözlemlemediği yeni bir parçacığın varlığını gerektiriyordu. Bu ölümcül bir konu değilse de bir kaygı kaynağıydı.

Teori Scherk ve Schwartz tarafından yeniden tasarlandığında, bu garip sorun parçacığı bir utanç olmaktan çıkarak teorinin en büyük erdemi hâline geldi. Bu parçacığın, bir

gravitonda bekleyecekleri özelliklere tam olarak sahip olduğunu iddia ettiler. (Yani foton'un QED'deki elektromanyetik alanla ilişkilendirildiği bir kuantum çekim teorisiyle ilişkili bir parçacık olduğunu kesin olarak iddia ettiler.) Başka bir deyişle sicim teorisi, doğrudan genel göreliliği "nicelleştirmeye" gerek kalmadan, çekimin dâhil olduğu bir kuantum teorisine sahipmiş gibi görünüyordu.

Başlangıçta, bunu kabul eden fizikçi sayısı çok azdı. Fakat 1980'lerin başında bu durum değişti. Bir yandan Schwarz ve Michael Green adlı genç bir mesai arkadaşı, sicim teorisinin diğer benzer teorilere bela olan "anomaliler" olarak bilinen belirli bir problem sınıfından uzak kalabilmeyi başardığını gösterdi. Öte yandan, bir yer çekimi kuantum teorisini geliştirmenin ne kadar zor olduğu giderek daha açık şekilde ortaya çıktı. Sicim teorisi birdenbire cazip hâle geldi ve bütün teorisyenler jenerasyonu bu konu üzerinde çalışmaya başladı.

Teori bazı erken başarılarla sahipti, aynı zamanda bazı sorunları da vardı. Örneğin, evrenin, sıradan tecrübeler ile doğduğu ve diğer fizik teorilerinin çoğunun verdiği gibi üç boyutlu ya da dört boyutlu değil de çok sıkı birbirlerine bağlandıkları için kolayca gözlemlenemeyen altı "ekstra" boyutun daha bulunduğu on boyuta sahip olduğu öngörülüyordu. Teoriden, çağdaş teknoloji ile test edilebilen en azından anlamlı tahminlerin çıkarılması da çok zordu. Bu nedenlerden dolayı, önceki bazı jenerasyonların önde gelen fizikçilerinden birçoğu teoriye itiraz etti. Mesela Feynman, 1988'de sicim teorisinin hiçbir şey üretmediğini ve çoğu zaman mazur görülmesi gerektiğini, doğru görünmediğini yazmıştı.<sup>178</sup>

Teoriye kapılan genç fizikçiler için bu problemler giderek artıyordu. Feynman ve diğerlerinin itirazlarıyla beraber yeni teori, bu teoriyi öğrenmeye zahmet etmeyen eski nesiller tarafından engelleniyordu. Sonuçta Einstein yeni kuantum teorisini asla kabul etmedi ve bu, Feynman'ı durdurmadıysa neden sicim teorisyenleri Feynman'ın sözüyle dursun?<sup>179</sup>

\*\*\*\*\*

Sicim teorisinin ilk hedeflerinden biri, dizgelerin olası konfigürasyonlarını düzgün bir şekilde analiz ederek sicimler tarafından idare edilen bir evren içinde Standart Model'in bir anlamda kaçınılmaz olduğunu göstermektir.<sup>180</sup> Yani sicim teorisyenleri, parçacık hızlandırıcılarında gördüğümüz fiziğin, bu yeni teorisinin düzgün bir şekilde yorumlandığı şekli olduğunu göstermesini umuyorlardı. Eğer bu gösterilebilseydi, teorisyenler inanırdı. Hem sicim teorisine biraz itibar kazandırır hem de dünyanın neden böyle olduğu konusunda bir tür açıklama getirebilirdi. Sicimler üzerine bina edildiği için olabilecek tek çıkış yolu buydu.

Ancak 80'li yıllara gelindiğinde, bu hedef her zamankinden daha zorlayıcı hâle geldi. Hiç kimse sicim teorisinden Standart Model'e ya da onun gibi herhangi bir şeye nasıl geçileceğinden tam emin değildi. Genel izafiyeti düşünmeyelim bile. Sicim teorisi Standart Model'e yol açsa bile, bunu o kadar benzersiz şekilde yapmak pek mümkün değildi.

Daha sonra 1987'de İsviçre ve Almanya'daki bir grup teorisyenin şok edici bir tahmin yaptıkları çalışma yayınlandı.<sup>181</sup> Sicim teorisi Standart Model'i tam olarak benzersiz şekilde (gerçekten de sicim teorisi Standart Model ile hiç

uyumlu değil!) ifade etmiyordu. Fakat Standart Model'e sicim teorisiyle eşit derecede uyumlu olan birçok alternatif vardı. Tahminlerine göre bu sayı yaklaşık  $10^{1500}$  idi. (Günümüzde bu sayı aşağıya revize edilmiştir. Birçok tahmin, fark çok büyük mesele oluşturmaya da  $10^{500}$  sayısını vermiştir.<sup>182</sup>) Buna karşın, görülen evrende  $10^{500}$ 'ün çok altında olduğuna inanılmaktadır.

Bu tahminler birçok yönden oldukça çarpıcıdır. Fakat amaçlarımız için en önemli olan şudur: Standart Model'e bu olası alternatiflerin her biri sicim teorisinin izin verdiği farklı bir vakum durumuna karşılık gelir. Başka bir deyişle, sicim teorisyenlerinin 1980'lerin sonunda yavaş yavaş fark ettikleri üzere hiçlik olması için sicim teorisinin yaklaşık  $10^{500}$  farklı yolu vardır.

Bu ne anlama geliyor? Bir yandan bu şaşırtıcı değil: Sonuçta genel izafiyet, evrende hiçbir şey bulunmaması için sınırsız sayıda yolu mümkün kılar. Çünkü teori sonsuz sayıda boş evrene izin verir. Ancak sicim teorisi farklı bir karakter olarak ortaya çıkıyor. Kuantum alan teorisinde, vakumun garip özelliklerini anlama yöntemlerinden birinin "dalgalanmaların" kısa süre yaşayan ve sonra ortadan kaybolan parçacıklar üretebileceğini unutmayalım. Ancak ne tür dalgalanmalar mümkündür? Ne tür vakum durumu olduğuna bağlıdır. Örneğin QED'deki vakum durumu, sanal elektron/pozitron çiftlerinin görünüp kaybolmasına izin verir.

Ancak QED, örneğin kuarkların pat diye ortaya çıkışı hakkında hiçbir şey söylemiyor. Bunun nedeni, kuantum alan teorisindeki vakum hâlinin elektromanyetik alanın sıfır hâli gibi, yalnızca belli alanlar koleksiyonu hâli olmasıdır.

Belli bir vakum durumunda mümkün olan dalgalanmalar, o durumun karakterize ettiği alanlara bağlıdır. QED kuarklar hakkında bir şey söylemez ve bu nedenle QED vakumunda dalgalanabilecek herhangi bir kuark alanı bulunmaz.

Bu, sicim vakumunun radikal benzersiz olmama hâlini anlamının iyi bir yoludur. Aynı zamanda sicim teorisinin Standart Model'e benzersiz şekilde yol açıp açmadığı üzerinde durmanın nedenini anlamının bir yoludur. Sicim teorisinde  $10^{500}$  olası vakum hâlinin bulunduğunu fizikçiler söylediklerinde bu, sicim teorisinin  $10^{500}$  olası alan kombinasyonuna izin verdiği ve her kombinasyonun bazı belirgin sıfır durumuna karşılık geldiğini söylemenin bir yoludur. Standart Model, olası böyle bir kombinasyonu tanımlamaktadır.

\*\*\*\*\*

Çok sayıdaki sicim vakumu teorisinin sonunun gelmesine neden olmamış lakin bazı bulmacalar doğurmuştur. Sicim teorisi, evrenin neden böyle olduğunu açıklamaktan uzak, şimdiye kadar olduğundan çok daha fazla olanak olduğunu söylüyor gibi görünüyor. Bu vakumların tamamı mümkünse, neden Standart Model'e göre yönetilen bir dünya görüyoruz?

Bu tür sorular, teorisyenlerin sicim teorisinin başarmak istediği şeyi tekrar gözden geçirmelerine yol açtı. Bu bulmacalara tepki olarak ortaya çıkan önemli bir fikir, Stanford fizikçisi Leonard Susskind'ten kaynaklanıyor.<sup>183</sup> Susskind, gerçekte bütün sicim vakumlarının doğada gerçekleştiğini ileri sürmüştür. Bunu birkaç yönden düşünebiliriz: Ya evren düşündüğümüzden çok daha geniştir ve onun farklı bölge-

leri farklı sicim vakumlarına tekabül eder ya da her biri başka bir vakuma tekabül eden çok değişik olanları hariç hepsinde bir evren yoktur. Bu tür kuramlar “sicim tabiatı” veya bazen “çok evrenli” kuramlar olarak bilinir.

Sicim teorisine genel olarak bakıldığında bu yaklaşım konuyu değiştirmektedir: Evrenin sahip olduğu özellikleri neden taşıdığını açıklamak yerine, gördüğümüz evrenin neden belli birtakım özelliklere sahip olduğunu açıklamak ister. Bu fikir, diyelim ki  $10^{500}$  kadar çok çok sayıda evren varsa, bunların büyük çoğunluğunda var olamadıysak, o zaman çoklu evrenin varlığımızla uyumlu bir şekilde çalışan bir köşesinde kendimizi bulmamız sürpriz değildir.

Çoklu evren son derece tartışmalı bir fikirdir. Bazıları için bu, temel fizikte bilinen en zorlayıcı teorinin doğal bir sonucudur. Başkaları için ise bilimde sorumluluk bilincinin terkidir. Hiçbir tahmin imkânı bulamayan ve dünyanın muhtemelen neye benzeyeceği konusunda hiçbir kısıtlama getirmeyen bir teoridir. Böyle konular üzerinde bir önerme yapmamaktadır. Yalnız şu kadarını söyleyeyim ki sicim tabiatının yaşayabilirliği hakkında ne düşünülürse düşünölsün, bu hiçliğin farklı bir tabiatıdır. Bir kez daha ve son olarak hiçbir şeyin fiziği önde ve merkezde olup, herhangi bir şey olmasaydı dünya nasıl bir yer olurdu sorusu hakkında yeni bir kavram ortaya atıldığında, bunu da hesaba katmak zorunda olduğumuzu ifade etmek isterim.



## TEŞEKKÜR

Bu kitabı yazarken arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma yardımlarından ve desteğinden dolayı minnettarım. Projenin en erken safhalarından itibaren, Jeremy Butterfield, Tony Duncan, John Earman, Ben Feintzeig, Peter Galison, Bob Geroch, Marian Gilton, Michel Janssen, Pen Maddy, David Malament, John Manchak, John Norton, Sarita Rosenstock, Howard Stein ve Giovanni Valente ile yaptığım yararlı sohbetler ve yazışmalardan istifade ettim. Gordon Belot, Harvey Brown, Erik Curiel, Robert DiSalle, Hans Halvorson, Sam Fletcher, Eleanor Knox, Oliver Pooley, Chris Smeenk ve Chris Wuthrich ile yapılan görüşmelerden derin bir şekilde etkilendim. Kitapların çeşitli bölümlerinin ilk taslaklarını dikkatli bir şekilde okumak ve hoşnutsuzluklara karşı beni uyarmak için yeterince nazik davranan Tony Duncan, Jeff McDonough, Chris Smeenk ve John Norton'a özellikle minnettarım. Jeff Barrett, Erik Curiel, Sam Fletcher, John Manchak, David Malament, Cailin O'Connor'a ve taslak hâlindeki tüm el yazılarımı okuyan ve bana paha biçilmez tavsiyeler veren iki isimsiz hakeme teşekkür etmek istiyorum. Elbette kalan hatalar bana aittir.

Ayrıca, temsilcim Zoe Pagnamenta'ya yıllar boyunca verdiği destekten ve bu kitabın varlığına yardımcı olmasından dolayı minnettarım ve Yale Üniversitesi Yayınları'ndaki editörüm Bill Frucht'a, bu nitelikte bir kitabın yazılabileceği ve hatta yazılması gerektiğine olan inancından ve nihai metnin hazırlanmasına yardımcı olmasından dolayı teşekkür ederim.

Bu kitabın çoğu, Pittsburgh Üniversitesi Bilim Felsefesi Merkezi'nde yazılmıştır. Merkezin desteğinden dolayı minnettarım. Genel olarak buradaki materyal 1331126 izin no.su altında National Science Foundation tarafından desteklenmektedir. 1. ve 2. Bölümler, AQ51039 izin no.su altında National Endowment for the Humanities'in desteğiyle geliştirilen "What's Time?" başlıklı ders notlarından çıkarılmıştır. Ayrıca, yazdığım dönemde önemli araştırma desteği için UC Irvine Sosyal Bilimler Okulu'na da minnettarım.

Son olarak, sevgileri ve bitmeyen desteğinden dolayı ailem Maureen ve Jim Weatherall'a, Karım Cailin O'Connor ve kızlarım Eve ve Vera Weatherall'e teşekkür etmek istiyorum. Onlar olmaksızın bu eser asla yazılamazdı.

# NOTLAR

## GİRİŞ

1. Son dönemlerde bu soru Krauss (2012) ve Holt (2012) tarafından iki kitapta ele alınmıştır. Holt'un kitabı fizikçi, felsefeci ve diğerleri ile mülakatlardan oluşmakta; mümkün olduğunca bu soruyu geniş bir perspektiften ele almaya çalışmaktadır. Kayda değer bir çalışmadır. Diğer yandan Krauss, evrenin kaynağı hakkında spekülâtif bir önerme yapmakta ve bu önermenin dini inanç için öneminden bahsetmektedir. David Albert (2012), bu kitap hakkında yaptığı sert eleştirisinde, Krauss'un kitabında "hiçlik" kavramına verdiği anlamı eleştirmiş; "hiçbir şey" ifadesinin preteorik olarak anlaşılan "hiçbir şey" kavramından çok farklı olduğuna işaret etmiştir. Bu eleştiri, çoğunlukla internet (!) üzerinden, bazı seçkin fizikçi ve felsefecilerin de Krauss'un ulaştığı sonuçların felsefe için bir önemi olup olmadığı üzerinde yoğunlaşan katkılarla müdahil olduğu hararetili bir tartışmaya neden olmuştur. Burada bu savaşılarla girmeyeceğim. Fakat tartışmalar, dolaylı yollardan bu kitabın doğuşuna sebep olmuştur. Albert kesin olarak bir konuda haklıdır: Kuantum teorik sezgilerine göre "hiçlik" kavramı, bizim preteorik sezgilerimizle -ve hatta fiziğin diğer teorileri açılardan da ele alınan hâlleriyle- de taban tabana farklıdır. Buradaki amacım Albert'ın bakış açısı üzerinde yoğunlaşmak, "hiçlik" gibi kavramın fizik teorilerince nasıl ele alındığı ve böyle bir ele alışıñ dünya hakkındaki temel soruları nasıl anladığı-

mız konusunda nasıl bir değişikliğe sebep olduğunu kavramaktır. Şahsi görüşüm ise, bu kavramı bu şekilde yeniden ele almanın gayet verimli olacağı ve bilimin *içinde* karşılaştığımız soru varyasyonlarının da çok önemli olduklarıdır. Bu açıdan kendimi Krauss'un görüşlerine yakın buluyorum.

2. Bir anlamda, bu soru radikal septsizmin ardındaki soru ile bazı benzerlikler taşımaktadır: dünya hakkındaki inançlarımızı, bu inançların hiçbirine kapılmadan savunabilir miyiz? Stroud (1984) ve Maddy'nin (2007) soruyu nasıl irdelediklerine bakınız.
3. İlk notta bahsettiğim referanslara ek olarak, genel okur kitlesini hedef alan hiçliğin fiziği tartışmaları için Barrow (2001) ve Webb'in (2013) çalışmalarına bakabilirsiniz.
4. Newton'un bu konudaki notları ve uzaya "konteyner" bakış açısıyla yaklaşımıyla ilgili olarak 12 numaralı nota bakınız.
5. Üçüncü bölümde de anlattığım üzere, "eski" kuantum teorisi 1900'lerin başında geliştirilmiştir; 1920'lerin başında geliştirilen ise "yeni" kuantum teorisidir. (114 numaralı nota bakınız) Kuantum alan teorisi ise 1927 yıllarındadır ve yeni kuantum teorisinin geliştirilmesi ile aynı zamanlara denk gelmektedir. Bununla beraber, teorinin modern hâline gelmesi ancak 1940'larda mümkün olabilmektedir.
6. Diğer türdeki iddiaların modern fiziğin soruya verdiği cevaplara etkisi için, Tyrion (1973) ile 1 ve 3 numaralı notlara bakınız.

## 1. BÖLÜM

7. Newton hakkında birkaç tane kaliteli biyografi bulunmaktadır. Bunlar arasında, Westfall (1980) ve Hall (1992) bulunmaktadır. Newton'un hayatı ve yaptığı büyük işler hakkında daha kısa ancak güvenilir özetler olarak da Iliffe (2007) ve Smith (2008) karşımıza çıkmaktadır. Newton'un fizik alanındaki eserlerinin kültürel etkileri hakkında Cohen (1983), Feingold (2004) ve Buchwald ve Feingold (2012)'ye bakılabilir. Newton'un, kendisi

hakkında uzman olanlarca yorumlanmış en önemli eserlerinin çoğu için de Cohen ve Westfall (1995)'e bakabilirsiniz.

8. Boyer'ın (1959) çalışmasında Calculus'un klasik tarihine Newton'un (ve Leibniz'in) katkıları ve tarihi bağlamda fikirleri ele alınmaktadır. Kline'a (1972) da bakılabilir. Newton ve Leibniz arasındaki öncelik tartışmalarının tarihi için bkz. Westfall (1980, sf. 698-780), Meli (1993) ve Hall (2002a); kısa özeti ise Hall'da (2002b) bulunabilir. Newton'un optik eserleri hakkında metin ve yorumlar için bkz. Cohen ve Westfall (1995) ile Sabra (1981), Shapiro (2002; 2013) ve oradaki ilgili referanslar. Burada tartışılan Newton'un optik hakkındaki çalışmaları ve bazı metodolojik çalışmaları arasındaki bağlantılar Stein (Newton'un Metafizik ve Metodu Üzerine, yayınlanmamış) ile (Newton'un Metodu Üzerine Ek Düşünceler, yayınlanmamış) tarafından verilmektedir.
9. Newton'un uzay ve zamanla ilgili görüşlerini ve bu görüşlerin daha büyük projesinde oynadığı rolü anlayışımı, Howard Stein'e, özellikle de Stein'e (1967; 1977; Newton'da Metafizik ve Metot Üzerine: Yayınlanmamış) ve Robert DiSalle'e çok borçluyum. Özellikle de DiSalle'e (2002; 2006). Özellikle burada sunduğum resim, Newton'un, kendisiyle sık sık ilişkilendirilen uzayın ilişkisel kavramsallaştırmalar konusundaki metafizik sorularla (özellikle de tarif edildiği gibi Leibniz ile olan tartışması bağlamında) ilgilenmediği resimdir. Aksine, hareket yasalarını desteklemek için gerekli olan uzaysal yapıyı tanımlamak ve karakterize etmekle ilgilenmektedir. Leibniz elbette daha salt metafizik konularla ilgileniyor ve aynı zamanda aşağıda tartışılan Newton'un yazıcısı olan Samuel Clarke da, anlaşmazlıklarının neden olduğu gibi yorumlandığını kısmen açıklıyor. Newton'un görüşlerinin daha geleneksel bir okuması için bkz. Rynasiewicz (1995a; 1995b); DiSalle'nin Newton (ve Stein!) okumasına *karşı* açık argümanlar için bkz. Huggett (2012). Janiak (2008), Newton'un düşüncesinde metafiziğin rolüne bir yenisini daha ekledi; Steinsel okumaları ile Janiak tarzı görüşleri arasındaki ilişki üzerine ayrıntılı bir tartışma için bkz. Domski (2010). Newton ve Leibniz'den 20. yüzyıla kadar özdeşleşme-

cilik/işikselcilik tartışmalarına yönelik daha ayrıntılı irdeleme, Earman (1989) tarafından sunulmuştur.

10. *Principia'nın* resmi çevirisi, I. Bernard Cohen ve (1727) üçüncü baskısına dayanan Anne Whitman (Newton, 1999 [1687/1713/1726]). *Principia'yı* okumaya ilişkin arka plan ve rehberlik için, çeviri ile birlikte yayınlanan Cohen'in kılavuzuna bakın (Cohen, 1999); Ayrıca bkz. Smeenk ve Schliesser (2013). Smith'in (2002), Harper'in (2012) ve Stein'in (*Newton'taki* Metafizik ve Metot Üzerine, yayınlanmamış) olduğu gibi, Newton'un *Principia* ve diğer yerlerdeki yöntemleri üzerine tartışmalar da yararlıdır. *De Grav* en başta Newton (1962) olarak yayınlandı. Stein (2002) ve (Newton'da Metafizik ve Metot Üzerine, yayınlanmamış) (ikinci bölümünde standart çeviri ile ilgili bazı önemli notlar vardır) ve DiSalle (1994; 2002; 2006) adlı kitabın en önemli yorumu Stein (1967) ). *De Grav'un* ne zaman yazıldığı üzerinde fikir birliği yoktur. Çalışma hakkındaki orijinal yorumlarında, Halls da dâhil olmak üzere pek çok bilim adamı, erken bir döneme ve hatta belki de 1666-1667 veba yılına dayandığını kabul eder; Diğerleri, belki de en önemlisi Dobbs (1991), Newton'un *Principia'yı* yazdığı 1684'ün sonlarına ait daha olgun bir eser olduğunu iddia eder. *De Grav hakkındaki* literatürün gözden geçirilmesi ve Dobbs okumasına karşı bazı güçlü kanıtlar da dâhil olmak üzere, konularla ilgili yeni bir bakış Raffner (2012) tarafından verildi.
11. "Mekân" ve "uzay" dili, *Principia'nın* 1. Kitabının başında Newton'un Scholium'undaki tanımlardan gelmektedir (Newton, 1999 [1687/1713/1726], s. 408-415). Not 39'a ve çevredeki tartışmaya bakınız.
12. Newton uzayının "konteyner" resmi çeşitli yönlerden potansiyel olarak yanıltıcıdır. Örneğin, uzayın (ontolojik olarak) "priori" ve bedenlerden bağımsız olduğunu önermektedir. Newton'un buna inancı, en azından en güçlü anlamıyla, bazı yorumcuların kendisine attığı şekilde, açık değildir. Örneğin *De Grav'da* (Stein'in çevirisinde), Newton, uzayın "ilk var olan varlığın emanatif etkisidir, eğer herhangi uzayın konumlandırıldığı herhangi bir varlık koyarsam" diyor. (Stein, *On Metaphysics and Method* in Newton, yayınlanmamış, s. 32). Uzayda varoluşun herhangi

bir varlığın (yani cisim, zihin ya da Tanrı) varlığı için gerekli olmasına rağmen, uzayın varlığı cisimlerin varlığından kaynaklanıyor demektir ki bunu (özellikle “emanatif etki” ifadesini) anlıyorum.

13. Berryman (2011) ve Chalmers (2014), tarihsel atomculuk ve birçok referansı içeren evrimi üzerine faydalı kaynaklar veriyor.
14. Belki de yukarıda belirtilen elektronlar, kuarklar vb. gibi temel parçacıklar, on yedinci yüzyılın “atomları”na daha yakın benzetmelerdir ve çağdaş anlamda atomlardan daha önce vardır. Buna rağmen, modern parçacık fiziği, kuantum alan teorisi tarafından tarif edildiği gibi, parçacıklara veya atomlara klasik anlamda çok az benzemektedir, çünkü benzetme yararsızdır.
15. Newton’un atomculuğu hakkında daha fazla bilgi için bkz. Shapiro (2002) ve Chalmers (2014).
16. On yedinci yüzyıla kadar Orta Doğu’da boş alan kavramları üzerine arka plan için bkz. Grant (1981) ve Sorabji (1988). Jammer (1993), 20. yüzyılda Antiklerden uzay kuramlarının tarihini sağlayan başka bir klasiktir. Aristoteles’in vakum veya boşluk ihtimaline karşı argümanları Fizik (Aristo, 1984) Kitap 4, Bölüm 1-9’da verilmiştir. Metin içindeki Aristoteles’e attığım argüman, görüşlerinin ruhunu yakalamak niyetiyledir, aslında, boşluğun varlığına karşı bir takım farklı ve ince tartışmalar önermiş; Sorabji’nin (1988, s. 142-159), diğer Antiklerin yanıtladığı bir tartışmayla bunlar incelenmiştir.
17. Yine Orta Çağ’da boş (empty) alan tartışmalarının Newton’a kadar olan detaylı öyküsü için Grant (1981) ve Sorabji (1988)’e bakınız.
18. Descartes’in fizik kuramı sağlamaya yönelik en olgun ve en kapsamlı çabası Felsefe Prensipleri’nde (Descartes, 1985) görülür. Descartes’in fiziğine genel bir bakış için bkz. Slowik (2014) ve kaynaklar; Daha ayrıntılı bilgi için bkz. Garber (1992).
19. Bu argüman, Felsefe Prensiplerinin II.16’sında (Descartes, 1985, s. 229-230) görülmektedir.
20. En azından görüşleri Newton ve Leibniz tarafından reddedildi, ancak birçok fizikçi kartezyen kaldı.
21. Mektuptaki pasaj, Turnbull’da (1959, sayfa 416) görülür ve Westfall’da (1980, s. 274) aktarılır. Burada önerdiğim okuma

- eğlendirici, Westfall ve diğerleri bunu reddettiler; ancak Westfall, en azından Newton'un Hooke'a övgüler beyanlarında "sıcaklık eksikliği"nden bahseder.
22. Leibniz'in kesin biyografisi Antognazza (2009); Onun felsefi eserinin derinlemesine bir özeti Jolley (2005) tarafından verilmiştir. Leibniz'in kendi yazılarının birçoğu Leibniz (1989) da toplanmıştır. Hayatının ve eserlerinin daha kısa ve daha erişilebilir özetlerini Ariew (1995) ve Look (2014)'de bulabilirsiniz. Özellikle Leibniz'in fiziği (ve fizik felsefesi) hakkında ayrıntılar için bkz. Garber (1995) ve McDonough (2014); Leibniz'in fizik ve metafiziğinin birbirleriyle nasıl ilişkili olduğunun daha derinlemesine ele alınması için Garber'a (2009) bakınız. Newton'la olduğu gibi, Leibniz'in uzay, zaman ve hareket hakkındaki görüşlerini anlayışımı yine Howard Stein'e özellikle borçluyum. Stein (1967; 1977)-Daniel Garber'in etkisinden dolayı "monad (zerre)" sözcüğünün yalnızca burada görünmesinden dolayı!
  23. Bakınız Antognazza (2009, s. 226-227); Antognazza'nın 5. bölümünde, Leibniz'in Güney-Orta Avrupa'da Hanoverli soy ağacını belgelemek için aldığı iki buçuk yıllık yolculuğunu ayrıntılarıyla sunmaktadır!
  24. Leibniz'in örgün eğitim ve kişisel çalışmaları arasındaki gerginliğin açıklaması Antognazza (2009, s. 30-37) tarafından verilmiştir.
  25. Leibniz'in "uzlaşmacı eklektizmi" ve entelektüel gelişimindeki rolü hakkında daha fazla bilgi için bkz. Mercer (2004); Leibniz'in entelektüel kişiliğinin bu yönü de Antognazza (2009) tarafından vurgulanmıştır. Bu konuda yardım için Jeffrey McDonough'a minnettarım. Simyaya Leibniz'in girmesi hikâyesi Ariew'den (1995, s. 21); Newton'un simyası hakkında daha fazla bilgi için bkz. Dobbs (1991) ve Figala (2002).
  26. Leibniz'in Descartes üzerine yazdıkları (kritik) eserleri Leibniz'de (1989, s.235-267) toplanmaktadır. Leibniz'in Aristoteles ve Descartes hakkındaki görüşleri Jolley (2005) tarafından kısaca ele alınmıştır; Ayrıca bkz. Mercer ve Sleight (1995). Kar-tezyen bir doktrini Aristoculukla uzlaştırmaya çalışan bir Leibniz örneği için bkz. Garber'in (2009, s. 7-9) Leibniz'in Aristoteles hakkındaki mekanik felsefesi üzerine tartışması.

27. Leibniz'in boş alanla ilgili görüşleri hakkında daha fazla bilgi için Garber'a (1995, s. 304-305; 2009, s. 44-45n145) ve McDough'un (2014) 5.2 bölümüne bakın.
28. Her ne kadar Newton'un eserleri önemli ve yaygın olarak incelenmiş olsa da kabul tarihi biraz karmaşıktır ve onun çağdaşlarının birçoğu, özellikle Kıta Avrupası'nda (Leibniz de dâhil olmak üzere) ya da Principia'da neler başarmış olduklarını anlamıyorlardı. Veyahut da yer çekiminin nedensel/mekanik bir açıklamasını yapmadığı için Descartes'tan daha azını başarmış hissetmişlerdi. Principia'nın alımının aydınlatıcı bir tartışması için Smeenk ve Schliesser'in (2013) son bölümüne bakınız. Bu noktada beni düzelttiği için Chris Smeenk'e minnettarım.
29. Bir kez daha, öncelik tartışmasına ilişkin geçmiş incelemeleri için not 8'deki referanslara bakın.
30. Kitap, *Analyse des Infiniment Petits, L'Intelligence des Lignes Courbes* (Eğrileri Anlamak İçin Küçük Bir Analiz; l'Hôpital, 1696) idi. Anonim olarak yayınlanmasına rağmen yazarlığı hakkında şüphe yok.
31. Bu incelemenin öyküsü, örneğin Hall (2002a, s. 138-141) ve Westfall (1980, s. 715) tarafından verildi. *Acta Eruditorum*'un editörü, Leibniz'i editörünün kitabında yazar olarak tanımladı (Newton, 1981, sayfa 26). Üstelik Westfall, Newton'un Leibniz'in yazar olduğundan şüphe etmediğini iddia ediyor (Westfall, 1980, s. 715).
32. 1693'te Newton'un zihinsel sağlık sorunları Manuel (1968, s. 213-225) ve Westfall (1980, s. 535-540) tarafından detaylandırılmıştır; Civanın neden olduğunu ileri sürmesinden Johnson ve Wolbarsht (1979) ve Spargo ve Pounds (1979) kaynaklanmaktadır.
33. Newton'un yaratıcı eserinin 1693 yılına kadar tamamlandığına dair iddia, Westfall'tan sonra geldi (1980, s.540). Newton kesinlikle yayınlamaya devam etmesine rağmen, ortaya çıkanlardan çoğu, hayatında daha önce yaptığı çalışmaları yansıttı.
34. Leibniz-Clarke yazışmalarının tarihi arka planı Ariew (2000) ve Meli (2002) tarafından verilmiştir.
35. Yazışmalar, yorumla birlikte Leibniz ve Clarke (2000 [1715-16]) olarak tercüme edildi ve yayınlandı.

36. Ariew (2000) ve Meli (2002), Newton'un mektupların yazılmasındaki rolü ile ilgili kanıtları ayrıntılı olarak tartışılar. Ayrıca bkz. Cohen ve Koyré (1962) ve Westfall (1980, s.778).
37. Bu iddiayı bu şekilde öne sürmek anakronistiktir ve Leibniz'in hoşlanmadığı muhtemeldir, çünkü genişletilmiş cisimlerin noktalardan "oluşmuş" olduğunu düşünmüyordu; Bunun yerine, noktaların çizgilere veya diğer sürekli şeylere ikincil olarak anlaşılması gerektiğini düşünüyordu. Ancak sanırım mevcut amaçlar için zararsızdır. Bu konuda yardım için Jeffrey McDonough'a minnettarım.
38. Nitekim, Newton, De Grav'da o uzayın sonsuz olduğunu belirlemek için bunun gibi bir argüman verir. Bkz. Newton (1962, s. 133-134). Bu noktaya dikkatimi çektiği için Chris Smeenk'e minnettarım.
39. Newton bu ayrımları, Principia'nın 1. Kitabındaki ünlü Scholium'unun tanımlarından çıkarır. (Newton, 1999, [1687/1713/1726], sf. 408-415) Newton'un aklında ne olduğunu anlamak için "mutlak, gerçek ve matematiksel" uzay, zaman, mekân ve hareketi "görelî, görünür ve ortak" uzay, zaman, mekân ve hareketten ayırdığını kaydetmek gerekir. İlk düşünce kümesi Principia'nın matematiğiyle temsil edildi. Bunlar sadece doğrudan ölçtüğümüz ikinci kavramlar setiyle yaklaşıldı. Uzayın mutlak ve ilişkisel teorileri üzerine çok geniş bir felsefe literatürü var. Earman (1989) bu konudaki modern klasiktir; Ayrıca bkz. Huggett and Hoefer (2015) ve orada bulunan referanslar.
40. Leibniz, kesinlikle metafizik gerekçelerle Newton'un mutlak uzay görüşlerine saldırıyor olsa da, Newton'un görüşlerinin gerçekten ne olduğunu anlamadığına inanmak için bir nedenimiz var. Özellikle, Leibniz, uzayın "mutlak uzay" kavramıyla, uzayın Aristocu (ya da Leibniz) anlamında "madde" olması gerektiği fikrini bir araya getirmişti. Newton'un bu görüşe hiç sahip olmadığı ve çoğunlukla De Grav üzerine kurulu olduğu argümanları için bkz. DiSalle (1994; 2002; 2006) ve Stein (2002; Metafizik ve Yöntem: Newton, yayınlanmamış).
41. Leibniz esasen bu argümanı üçüncü mektubunun 5. paragrafında (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], s. 14-15) verir.

(Aslında, Clarke tartışmaya açtı ve Leibniz bunu yanıtladı. Erik Curiel'e bunu hatırlattığı için teşekkürler!) Leibniz'in argümanlarını daha ayrıntılı olarak tartışmak için, McDonough'un (2014) 5.1. Bölümüne ve burada verilen referanslara bakınız. Bu argümanın daha modern bir bağlamda tartışılması için bkz. Pooley (2013) ve Weatherall (2016b).

42. Newton'un uzayın metafizmi ve metafizik iddialarının, yapmaya devam ettiği fizik türlerini desteklemek üzere hangi yapıyı gerekli gördüğüne ilişkin metodolojik konularla nasıl örüntülediği hakkında daha fazla bilgi için bkz. Stein (2002; *Metaphysics and Method in Newton*, Yayınlanmamış); Newton'un Yöntemleri Üzerine Diğer Hususlar, yayınlanmamış) ve Stein (1977).
43. Clarke, üçüncü mektubunun 4. paragrafında (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], s.19) mutlak uzaydan mutlak harekete geçerek Newton'un dördüncü mektubunun 13. paragrafındaki örneğini aktardı (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], sayfa 31). Not 48'e de bakınız.
44. Newton'un kuvvet kavramının Leibniz'le nasıl ilişkili olduğu konusunda büyüleyici ve bilgilendirici bir tartışma ve buna bağlı olarak "mutlak hareket" kavramlarının nasıl farklılaştığını görmek için bkz. Garber (2012).
45. Aslında bu cisimlerin hepsi dönüyor. DiSalle (2006) tarafından, döngüsel olmayan, düz olarak hızlandırılmış hareketin durumu hakkında ayrıntılı olarak tartışılan büyüleyici bir mesele var. Corollary VI'ya göre, Principia'daki hareket yasalarına göre tekdüze doğrusal ivme, hızlandırılmamış hareketten ayırt edilemez. Bir cismin gerçekten ivmelenip ivmelenmediğini veya ilgili diğer göreceli hareketi belirlemek için kullanılan tüm referans cisimlerle birlikte, sadece tek bir lineer hızlanma geçirdiğini söyleyemeyeceğimizi öne sürüyordu. Ancak, aşağıda açıklayacağımız gibi bu, dönme hareketi için geçerli değildir ve bu nedenle burada tartışılan örneklerle uygulanmaz. Uzay-zaman yapısına ilişkin Corollary VI'nin önemi hakkında daha fazla bilgi için bkz. Saunders (2013), Knox (2014) ve Weatherall (2016a).
46. Belki de tamamen umutsuz değil. Örneğin bkz. Barbour ve Bertotti (1982). Bu referansı eklemem için beni ikna ettiği için Erik Curiel'e teşekkürler!

47. Leibniz'in istiyor gibi görüldüğü şey, bir cisme has bir mutlak hareket duygusu idi, böylece aslında bir şey olup olmadığı mutlak uzaya (veya herhangi bir referans cisme) göre hareketle ilgisi yoktu daha çok sadece bir iç durumdu. Ancak bu, derhâl harekete geçen cisimlerin göreceli hareketlerine herhangi bir kısıtlama getirmediği için sorunlara neden olur. Mesela prensipte, birbirine göre eylemsizlik hâlindeki iki cisim olabilir; ancak bunlardan sadece biri hareket etmektedir. Bakınız Garin (2012) ve McDonough (2014) ve Stein (1977).
48. Clarke, argümanının, üçüncü mektubunun 4. paragrafında (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], s.19) bu şekilde yürütülebileceğine dikkat çekiyor ve cevap olarak, Leibniz de aynı argümanı mutlak hareketle tüm dünyayı düz bir çizgi boyunca harekete geçirme fikrinin tutarsız olduğunu iddia ederek, mutlak uzay fikriyle çatışır. (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], s. 23-24). Burada, Clarke'ın Leibniz'in daha önceki tartışmalarına tepki olarak mutlak uzaydan mutlak harekete geçtiği söyleniyor; Bu hareket ile bağlantılıdır ve Leibniz'in cevabı, Clarke'ın Principia'daki rotasyon konusundaki Newton'un erken tartışmalarını (Leibniz & Clarke, 2000 [1715-16], s.31) referans aldığını belirtti.
49. Newton'un kova örneği Scholium, Defitions'da görünür (Newton, 1999 [1687/1713/1726], s. 412-413). Clarke aslında Leibniz'i, Scholium'un hemen öncesinde görünen fakat su kovası örneği için gerekli olan merkeze doğru kuvvetle ilgili sekizinci (ve son) tanıma işaret eder.
50. Makale Stein (1967)'dir. Stein'in çalışması hakkında daha fazla bilgi için bkz.
51. Burada Leibniz'e attığım görüş, tüm hareketin benim anladığım kadıyla görelî olduğu fikrinin bir sonucudur. Fakat Leibniz'in bu konudaki görüşleri karmaşıktır ve görünen o ki , bir cismin zorlanıp zorlanmadığı ve hareket edip etmediği, dolayısıyla mümkün olduğu konusunda bir tabiat kuralı olduğuna inanıyor gibi görünmektedir, bu nedenle Leibniz meseleleri bu şekilde ortaya koymaktan mutlu olmazdı. Daha fazla tartışma için bkz. Not 47. Bu konuda yardımı için Jeffrey McDonough'a minnettarım.

52. J.B. Manchak'dan özür dileyerek örnek verilmiştir.
53. Aslında, bu yapı daha önce Weyl (1922) tarafından tanımlanmıştır. Stein'in katkısı, Newton'un mutlak hareket tartışmasının bu dört boyutlu çerçevede nasıl anlaşıldığını göstermekti. (Stein'in çalışması ile Weyl'in daha önceki çalışmaları arasındaki ilişkiyi vurguladığı için David Malament'e minnettarım.) Newton'un yasaları için gerekli olan bu yapının kesinlikle bu yapı olup olmadığı, Saunders tarafından sorgulanmıştır (2013). İlgili konularda bir tartışma için bkz. Not 45.
54. Bir kez daha, not 47 ve 51'e bakınız.
55. Elements de la Philosophie de Neuton'da (Voltaire, 1992 [1738]) Voltaire; Institution de Physique'de du Châtelet (du Châtelet, 1988 [1742]) böyle bir yorum yapar; Euler de "Reflexions sur l'espace et le temps"te (Euler, 1750).

## 2. BÖLÜM

56. Isaacson (2007), Einstein'ın mükemmel ve okunaklı bir biyografisidir; Burada, biyografik ayrıntıların birçoğu için ona güveniyorum. Pais (1982) da resmi bir klasiktir. Frank (1947), Hoffman (1972), Bernstein (1973) ve Neffe (2009) tarafından zaman zaman kendine özgü diğer iyi biyografilerdir. Ayrıca bkz. Einstein'ın otobiyografik yorumları, Einstein (1949) olarak yayınlandı. Burada sunulan, Einstein'ın lisans yılları ve 1905 yılına kadar geçen yıllarla ilgili daha fazla bilgi için bkz. Isaacson (2007, sf. 32-89) ve Pais (1982, s. 35-48).
57. İlginç bir şekilde, 1901 tarihli bu tezi kaybolmuş gibi görünüyor ve konunun ne olduğu bilinmiyor.
58. Einstein'ın ilk çocuğu, Einstein ile Maric arasındaki yazışmalarında hiç bahsedilmedi. John Stachel tarafından ancak 1986'da "keşfedildi". Bkz. Newton (2007, s. 72-77).
59. Einstein'ın patent bürosundaki zamanı hakkında daha fazla bilgi için Galison'a (2003) bakın.
60. Einstein'ın muhteşem yılı (annus mirabilis) ile ilgili daha fazla bilgi için bkz. Isaacson (2007, s. 90-139). Makaleler, Stachel'in (2005) değerli tanıtımı ile birlikte Einstein (2005) olarak yayınlandı.

61. Başlangıçta Einstein (1905a) olarak yayınlandı; Not 60'a da bakınız. Einstein'ın Nobel Ödülü, bu fotoğrafta ele alınan "fotoelektrik etkinin yasası"nı keşfetmek içindir. Bununla birlikte, fotoelektrik etki kâğıdının küçük bir parçasıdır ve ana vurgu siyah-cisim radyasyonu ve ışık kuantumudur. Bunu bana işaret ettiğinden dolayı John Norton'a minnettarım.
62. Bu yazı ertesi yıl Einstein (1906) olarak yayınlandı.
63. Bu çalışma Einstein (1905b) olarak yayınlandı; Not 60'a da bakınız. Dikkat çekici bir şekilde Einstein, Louis-Bachelier adında az tanınmış bir Fransız matematikçinin tahmin ettiği ve birçok yönden 1900'te Sorbonne'a verilen bir tezle Brown'un hareketi olarak tanıdığımız yakın ilişkili bir teori geliştirdi. Bununla birlikte, bir sıvıda asılı moleküllerin davranışlarını modellemek için kullanmamak yerine Bachelier, bu tahvillerde fiyatlandırma yöntemi için bir yöntem geliştirilmesi amacıyla Paris Borsası'nda işlem gören devlet tahvillerinin istatistiksel özelliklerini modellemeyi amaçlıyordu. Bachelier (2006 [1900]) ve Weatherall (2013).
64. Orijinali Einstein (1905c) olarak yayınlandı; Not 60'a da bakınız.
65. Orijinali Einstein (1905d) olarak yayınlandı; Not 60'a da bakınız.
66. Principia'daki Newton'un uzay ve zaman analizinde olduğu gibi, Einstein'ın uzay ve zamanın yeniden analizini yapan DiSalle'nin (2006) tartışmalarını çekici buluyorum.
67. En azından Kıta Avrupası'nda bu doğruymuş. İngiltere'de Maxwellciler esiri savundukları için kabulü daha karışıktı. Özel izafiyetin kabulü Pais'te (1982, ss. 149-155) ve Isaacson'da (2007, s. 140-145) açıklanmaktadır. İzafiyet teorisinin kabulünün detaylı bir açıklaması için bkz. Glick (1987) ve Galison ve diğerleri. (2001)
68. Yakın arkadaşı Lewis Campbell tarafından yazılan Maxwell'in klasik biyografisi, Campbell ve Garnett (1882); Daha yeni biyografiler Everitt (1975), Tolstoy (1981), Goldman (1983), Hendry (1986) ve Mahon (2003)'dir. Harman (1998) Maxwell'in eserleri hakkında ayrıntılı bir tartışma yapmaktadır. Yakın zamanda 100 tanınmış fizikçiyle yapılan ankette Maxwell, Einstein ve Newton'dan sonra en büyük üçüncü isim oldu! Kişisel

sıralamam; Euler ve Dirac ile birlikte ilk beşe girerdi... soran olmadı ama.

69. Maxwell'in elektromanyetik alan hakkındaki özgün çalışması Maxwell (1865); Ayrıca şaheseri, Elektrik ve Manyetizma Üzerine Bir İnceleme (Maxwell, 1891). Maxwell teorisine kadar olan elektrik ve manyetizma hikâyesi hakkında daha fazla bilgi için bkz. Whittaker (1951), Meyer (1972), Heilbron (1979), Darrigol (2000) ve Baigrie (2007); Daha kısa genel bakışlar, Buchwald (2013a; 2013b) ve Steinle (2013) tarafından verilir. Maxwell teorisinin modern ders kitabı tarzında sunuları Purcell (Purcell, 1985) ve Jackson (1999) tarafından verildi; Daha fazla detay için bkz. Hehl ve Obukhov (2003).
70. Bunu bana işaret ettiğinden dolayı Erik Curiel'e minnettarım.
71. Not 69'da belirtilen tarihsel çalışmalara ek olarak Faraday'ın tarihi ve Maxwell'in elektriksel ve manyetik olguları birleştirmeye katkılarından dolayı Forbes ve Mahon'a (2014) bakınız.
72. Maxwell'in elektromanyetik alanı anlamam hakkındaki tanımım doğrudan doğruya Maxwell'den gelmektedir (1865). Maxwell'in, deneysel olarak üretilen vakumu tarif ederken "sözde vakum"dan yazdığı ve bu bölgelerin Maxwell olduğu gibi boş olmadığını vurgulaması dikkat çekicidir (1865, s. 460) Alan konseptinin büyüleyici bir geçmişi için, Newton'a uzanan, bkz. Stein (1970); Faraday'dan Einstein'a kadar alan kavramının gelişiminin detaylı analizi için Berkson (1974) ve (özellikle) Nersessian (1984)'a bakınız. Hesse (1961), antik Yunanlılara uzanan, alan kavramının daha görkemli bir geçmişini sunar.
73. Esir kuramlarının klasik tarihi Whittaker (1951) tarafından verilmektedir. Ayrıca bkz. Schaffner (1972) ve Darrigol (2000).
74. Hava pompasının ayrıntılı hikâyesi ve on yedinci yüzyıldaki bilimin gelişimi açısından önemi için bkz. Shapin ve Schaffer (1985).
75. Not 72'de de belirtildiği gibi, vakum odaları ile ilgili bu çıkarım Maxwell'in kendisinden gelmektedir.
76. Hayatının ilerleyen dönemlerinde, Einstein, izafiyet teorisine giden yolun başlangıcı olarak ışığın hareketiyle ilgili çok erken dönemdeki yansımaları (yani ünlü "ışık ışınına binme" düşünce deneyi) hatırladı (Einstein, 1949, s. 49). Elbette, Einstein'ın,

fikirlerin neredeyse yarım yılındaki gelişmeleriyle ilgili yaptığı anıları bir şüphe ile izlemek gerekiyor. Ancak, Einstein'ın elektromanyetizma konusundaki kavramsal problemleri ve özellikle elektromanyetik radyasyonun (ışığın sadece bir örneğini olduğu) yansıtarak, özel izafiyeğe geldiğine dair güçlü kanıtlar vardır. Norton (2014) tarafından açıkça ortaya konan bu vaka, Einstein'ın daha sonra hatırladığı düşünce deneyinin ışığın bir emisyon teorisine karşı bir argüman olarak gerçekten önemli olduğunu savunuyor. Daha ayrıntılı bilgi için bkz. Norton (2004); Daha kısa hesaplar Isaacson (2007, s. 113-116) ve Pais (1982, s. 111-134) tarafından verilmiştir. Özel izafiyetin kökeni hakkındaki diğer perspektifler Holton (1988, s. 191-236) ve Galison (2003) tarafından verilmiştir.

77. Bu, 1676 itibarıyla Ole Christensen Romer tarafından kurulmuştur. Bkz. Romer ve Cohen (1940).
78. Bu deneylerin önemli örnekleri Michelson-Morley deneyi (Michelson & Morley, 1887) ve Trouton-Noble deneyi (Trouton & Noble, 1904)'dir. Bunların Einstein üzerindeki etkisine dair güzel bir genel bakış Stachel (1987) tarafından verilmiştir.
79. Einstein 1905 çalışmasının I. Bölümüne böyle başlar ve kavramsal ve pedagojik sebeplerden dolayı kullanışlıdır. Fakat Einstein'ın kendisinin özel izafiyeğe nasıl dönüştüğü düşünmek için iyi bir nedenimiz var. Bkz. Norton (2014).
80. Einstein'ın Minkowski'nin çalışmalarına tepkisi hakkında daha fazla bilgi için bkz. Isaacson (2007, s. 132-133) ve Pais (1982, s. 151-152). Minkowski'nin uzay-zaman düşüncesinin tarihçesi Galison (1979) tarafından verildi; Bkz. Walter (1999). Minkowski'nin izafiyet ve ilgili konulardaki kâğıtları yakın zamanda Minkowski (2012) olarak derlenmiştir. Minkowski'nin 1908'de Köln'de verdiği bir konferansta bir uzay-zaman şeması slayt olarak sunuldu; Ders daha sonra 1909'da yayınlandı (Minkowski, 1909) ve Minkowski'de (2012) "Uzay ve Zaman" olarak görüldü.
81. Sıklıkla tekrarlanan Einstein'dan gelen bu teklif, görünüşe göre ilk olarak Pais (1982, s. 152) tarafından yayınlandı ve onun kendisiyle Bargmann'ın (ezberden) ilişkili olduğunu iddia ediyordu. Bununla ne yapılacağını kestirmek zor. Ancak, Eins-

tein'in Minkowski uzay-zamanına tepkisi ne olursa olsun, Minkowski'nin kullandığı geometrik yöntemleri çabucak benimsedi. Bu ifadenin kuşkulu menşeiini belirttiğinden dolayı John Norton'a minnettarım. Aşağıdaki Minkowski alıntısı Isaacson'tan alınmıştır (2007, s.132).

82. Benim görüşüme göre Minkowski uzay-zaman geometrisinin en iyi pedagojik, ancak teknik açıdan doğru tanımlaması Malament (2009) tarafından verilmiştir.
83. Bu örneklerin uzak eşzamanlılıkla ilgili varsayımları ortaya çıkardığı düşünülmektedir. Fakat zaman içinde uzanan ve aralarındaki mesafeler nispeten kısa olan olaylara atıfta bulunurlar, dolayısıyla olayların bazı bölümleri zamanla benzer şekilde ilişkilendirilir. Newton'un eşzamanlılık kavramlarının sıradan yaşamda o kadar iyi çalışmasının sebebi işte tam da budur: Işığın bir anda katettiği mesafe genellikle karşılaştığımız cisimlere kıyasla çok daha büyüktür. Bu nokta Stein (1991) tarafından çok net bir şekilde belirtilmiştir; Ayrıca bkz. Callender (2008).
84. Mesafeleri ölçmek için yapılan bu yapı, bir ışık ışını aynalar arasında geriye ve ileriye fırlatılarak bir "ışık saati" inşa edebilir, yani bir süre ölçmek için döndürülebilir. Bu yapı da genel izafiyet için genelleştirilebilir (Fletcher, 2013).
85. Bkz. Einstein (2005, s. 124). İlginçtir ki, izafiyet kuramıyla ilişkilendirdiğimiz ampirik sonuçların birçoğu, esiri lüzumsuz görmeyen Hendrik Lorentz (1895; 1899) tarafından daha önce çalışılmıştı. (Ayrıca bkz. [1889] ve Poincaré [1906].) O hâlde, esirin izafiyet teorisinin öngörülerıyla uyumlu olup olmadığını değil, Einstein'ın teorisinin mi yoksa Lorentz'in teorisinin bu sonuçların daha iyi açıklamalarına izin verip vermediğini belirtir. Bu, Janssen (2002a; 2002b) tarafından güzelce düzenlenmiştir; Bu açıklamalara farklı bir bakış açısı için Brown'a (2005) bakınız. Poincaré muhtemelen, izafiyet teorisini tahmin etmeye yaklaşmıştı, ancak esir hakkındaki perspektifi tartışmalı bir şekilde durdu; Bkz. Stein (Fizik ve Felsefe Buluşması: Poincaré'nin Garip Durumu, yayınlanmamış). Son olarak, Einstein kariyeri süresince, Maxwell ve Maxwellcilerin hayal ettiği türden bir ışık saçan şey olmadığını, daha genel anlamda bir esir olup olmadığı-

ğı konusundaki görüşlerini değiştirmediyi belirtti. Örneğin, 1920'de "Esir ve İzafiyet" başlıklı bir konferansta Einstein, genel izafiyette uzay-zamanın (dinamik) fiziksel özelliklere sahip olduğunu ve bu nedenle Einstein'ın belirttiği gibi bir tür fiziki varlık olarak düşünülebileceğini savundu. (Einstein, 1922). (Einstein'a da bakınız. [1924].) Genel izafiyetteki boş uzay-zamanın "hiçbir şey" sezgisel fikrine meydan okuyan niteliksel özelliklere sahip olduğu fikri, izleyen aşamalarda önemli bir rol oynayacaktır. (Bu nottaki atıflarla ilgili yardımı için Michel Janssen'a minnettarım.)

86. Keşfedilmesinin geçmişi de dâhil olmak üzere, Kozmik Mikro-dalga Arka Planı ile ilgili mevcut bilimlerin okunabilir bir incelemesi için bkz. Durrer (2015).
87. Bu ikinci görüşü tercih etme nedenlerim teorinin, elektromanyetik alanın uzay-zaman boyunca demet ailelerinin eğriliği olduğuna göre, lif demetleri dilinde formüle edilmesiyle ilgilidir. Bu açıdan bakıldığında, elektromanyetik alanın yok olması, belirli demetlerin bağlantı noktalarında olduğunu ve varlıklarının sona ermediği (herhangi bir anlamda ilk etapta "var olduklarını" söylemek istemektedir) anlamına gelir. Bu formülasyon değerlidir, zira elektromanyetizmayı zayıf ve güçlü nükleer kuvvetler de dâhil olmak üzere diğer temel güçleri tanımlamak için yaygınlaştırma olanağı tanır. Daha fazla bilgi için bkz. Bleeker (1981), Palais (1981) ve Weatherall (2015).
88. 67 no'lu notu hatırlayınız. Einstein'ın akademik bir konuma doğru yolu ve ilerleyen hamleleri Isaacson'da (2007, s. 149-155, 158-188) açıklanmaktadır.
89. Bkz. Isaacson (2007, s. 143).
90. 90. Bkz. Isaacson (2007, s. 144) ve Neffe (2009, s. 155).
91. Grossmann'ın bir biyografisi için, genel görelliliğe yaptığı katkılarla ilgili bir tartışma, bkz. Sauer (2015). Einstein-Grossmann iş birliği Pais (1982, s. 208-227) tarafından da ayrıntılı olarak ve Isaacson (2007, s. 192-202) tarafından biraz daha ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Genel görelliliğin kökeni hakkında not 92'de daha genel referanslara bakınız. Bu arada, Grossmann, ETH Zürih'teki genel izafiyete önemli katkılar sağlayacak tek Einstein'ın meslektaşı değildi: Uzay-Zaman-Maddesi (Weyl, 1922),

genel izafiyet hakkındaki modern geometrik anlayışı kristalize eden Hermann Weyl de matematik bölümünde yeni işe alınmıştı.

92. Genel izafiyetin kökeni üzerine kesin kaynak, Renn (2007) tarafından düzenlenen muazzam dört ciltli makale ve yorum koleksiyonudur. Einstein'ın izafiyet kuramının yolculuğunun mükemmel, detaylı fakat yine de okunaklı olan genel hatası, onun birçok hatasıyla birlikte Janssen (2014) tarafından verilmiştir. Daha önce yapılan tedaviler Norton (1984) ve Stachel (1989) tarafından verildi. Genel izafiyet için motivasyon tanımında geçmiş akladığımı vurgulamalıyım. Einstein'ın genel izafiyetinin gelişimi, herhangi bir ivme olmayan hareket durumunun başkaları ile kıyaslanamayacağı 1905 tarihli belgelerde "izafiyet ilkesini" genişletme arzusu ile güdülendi. Genel bir izafiyet ilkesi oldu, bu hızlansın ya da hızlanmasın herhangi bir hareket hâlini barındıracaktır. Einstein'ın eşdeğerlik prensibi aracılığıyla yer çekiminin etkilerinden, en azından yerel olarak, ivmeli hareketin ayırt edilemez olduğunu belirten (çok kabaca), genel çekimin bu çalışmayı yapmada anahtar olması bekleniyordu. Janssen'in (2014) hoşça bahsettiği gibi, Einstein bu anlamda "genel izafiyeti" elde etmek için birçok girişimde bulunmuş ancak hepsinde başarısız olmuştu ve "genel izafiyet" sonuçta ortaya çıkan teori için yanlış bir isimdir. (John Norton'a beni burada dürüst tutmaya çalıştığınız için minnettarım.)
93. Görünüşe göre Einstein öklidyen olmayan geometriyle bağlantı kurmuştu ancak henüz genel izafiyetin anahtarı olan Riemann geometrisini bilmiyordu. Einstein'ın zaten ne bildiği ve Grossmann'ın katkıda bulunduğu şey hakkında 91 sayılı nottaki referanslara bakınız. Yine John Norton'a yardım için teşekkür ediyorum.
94. Genel izafiyet üzerine "modern" geometrik perspektife ilişkin olumlu muameleler Hawking ve Ellis (1973), Wald (1984) ve Malament (2012) tarafından verilmiştir; Ayrıca bkz. Misner, Thorne ve Wheeler (1973). Bunlar ayrıca ilgili diferansiyel geometriye giriş tetkikleri sağlar. İzafiyet teorisinin geometrisinin teknik olmayan en iyi muamelesi bugüne kadar Geroch (1978) tarafından verilmiştir.

95. Burada, küçük cisimlerin ve ışık huzmelerinin hareketi vasıtasıyla uzay-zaman eğriliğinin fiziki önemini geliştirme stratejisi Weyl (1922); Daha az dikkat çekici gördüğüm alternatif bir perspektif, katı cisimlere ve saatlere odaklanmaktadır. Ayrıca bkz. Malament (2012, s. 119-128). Bu yorumun altında yatan fiziki ilkelerin durumu, yani küçük cisimlerin uzay-zamanında en düz eğrileri izlediğini ifade eden sözde jeodezik ilke yakın bir zamanda bazı tartışmalara neden olmuştur: Genel bir bakış için bkz. Weatherall (2011).
96. Nitekim, yer çekimi etkileriyle ilgili fikir, genel izafiyetten kaynaklanan uzay-zaman geometrisinin bir tezahürü olmasına rağmen, Cartan (1923; 1924) ve Friedrichs (1927) kısa süre sonra Newton'un yer çekiminin de bir teori olarak anlaşılmadığını gösterdi. Daha fazla bilgi için bkz. Malament (2012) ve Weatherall'a (2016c) bakın.
97. Bazı fizikçiler ve diğerleri Einstein'ın denklemini "Einstein'ın denklemleri" ile "s" olarak adlandırırlar. Bu şekilde konuşmayı tercih ediyorum: Anladığım kadarıyla, Einstein'ın denklemi birkaç tansörle ilişkili tek bir denklemdir. Belirli bir koordinat sisteminde, bu tansörler on bağımsız bileşene sahiptir, ancak bu maddi değildir: örneğin,  $F = ma$  bir vektör denklemdir; Biz üç bağımsız denklemden bahsetmiyoruz.
98. Einstein'ın, Mach ilkesi üzerindeki görüşleri ve izafi bir kozmoloji geliştirme girişimleri ile bağlantılı vakum çözümleri ile mücadeleleri, Hofer (1994), Janssen (2014, s. 198-208) ve Smeenk (2014) tarafından verildi. Einstein'ın genel izafiyetin erken tarihindeki vakum çözümleri hakkındaki görüşleri hakkında bildiklerimizin çoğu, Einstein ve Willem De Sitter arasındaki yazışmalardan gelir; Einstein (1998); Bkz. Schulmann ve diğerleri. (1998). Maddenin evrende dağılımını belirten gerçekleşme, gelişigüzel olarak meydana gelen kavisi belirlemek için yeterli değildi. İlk önce, mekânda gerçek anlamda evren hakkında ilave varsayımlar gerektiren Schwarzschild çözümü vardı (Schwarzschild, 1916); Sonra De Sitter çözümü geldi (De Sitter, 1917); Ve nihayetinde, Weyl'in mevcut olan hiçbir şey olmadığı zamanlarda da uzay-zaman eğriliğinin bölümünün genel karakterizasyonu sıfır olabilir (Weyl, 1922).

99. Bkz. Schwarzschild (1916); Ayrıca Hawking ve Ellis (1973), Wald (1984) ve detaylar ve tartışma için bkz. Earman (1995)
100. Schwarzschild uzay-zamanında kara delik olduğu fikri hemen fark edilmedi. Nitekim, kara delikler de dâhil olmak üzere genel izafiyette tekilliklerin doğru bir şekilde muhasebeleştirilmesi 1960'lı ve 1970'li yıllara kadar gelmedi. Einstein'ın tekillik anlayışıyla ilgili bir tartışma için bkz. Earman ve Eisenstaedt (1999); Modern tekillik anlayışının Geroch-Hawking-Penrose tekdüzelik teoremleri ile sonuçlanan hikâyesi için bkz. Earman (1995; 1999); Ayrıca bkz. Curiel (1999).
101. Çözüm, De Sitter (1917) tarafından yayınlandı, ancak Einstein ile yazışmalarında sunulduktan sonra (Schulmann, Kox, Janssen, & Illy, 1998). De Sitter uzay-zamanının aslında Einstein'ın denkleminde bir çözüm olmadığını unutmayın. Daha ziyade, Einstein'ın 1917'de sunduğu kozmolojik sabit olarak adlandırılan modifiye bir denklemin bir çözümüdür (Smeenk, 2014). Modern bir perspektiften bakıldığında, "kozmojik sabit" teriminin gerçekten uzay-zaman enerji momentumuna bir katkı olarak anlaşılması gerektiğini düşünmek için iyi nedenler vardır; bu durumda De Sitter'ın uzay-zamanını vakum çözümü olarak düşünmeyelim. Bununla birlikte, güncel tartışmanın önemli noktası, Einstein'ın bunu bir önemsiz vakum çözümü örneği olarak algılamış olmasıdır. Not 98'e de bakınız.
102. Einstein'ın genel göreliliği Maxwell teorisine benzetme şekliyle ilgili daha fazla bilgi için bkz. Rehn ve Sauer (2007) ve Janssen and Renn (2007) ve Janssen and Renn (2007).
103. Yer çekimi dalgalarının, bir maddi sistemin enerjisini artırma anlamında enerjiyi aktarabilmesi, yer çekimi dalgalarının kendilerinin enerji taşıdığı anlamına gelmez. Aslında, herhangi bir tür (lokal) enerji veya momentumun yer çekimi dalgasına atfedilmesi ile ilgili ciddi zorluklar vardır. Sam Fletcher'a beni burada dürüst tuttuğu için teşekkür ederim.
104. 85 no'lu notu hatırlayınız. Einstein'ın birleştirilmiş alan kuramı geliştirme çalışmalarının tarihçesi için bkz. Van Dongen (2010) ve Sauer (2014).
105. Einstein'ın teorisini geliştirmede rolünü de içeren (ve burada anlatılan hikâye dâhil) yer çekimi dalgalarının erken tarihçesi

- hakkında daha fazla bilgi için bkz. Kennefick (2007); Kennefick (2014) gibi daha genel bir bakışa sahiptir.
106. Kâğıt sonunda Einstein ve Rosen (1937) olarak yayınlandı.
  107. Physical Review tarihçesi Hartman (1994) tarafından verilmiştir; derginin 1930'lardaki etkisini değerlendirmek için özellikle bkz. sf. 153.
  108. Einstein'ın Avrupa'yı nasıl terk ettiği ve New Jersey'deki Princeton'da yaşadığı hikâyesi, Isaacson tarafından anlatılıyor (2007, s. 394-447).
  109. LIGO sonuçları, Abbot ve diğerleri. olarak yayınlanmıştır. (2016) LIGO da dâhil olmak üzere yere dayalı aramaları incelemek için bkz. Riles (2013); Uzaya dayalı yaklaşımlar Gair ve diğerleri tarafından tartışılmaktadır. (2013).

### 3. BÖLÜM

110. Çoğunlukla, bölüm boyunca Dirac hakkında biyografi materyali için Farmelo'ya (2009) güveniyorum; Ayrıca, Kragh (1990), Schweber (1994, sayfa 11-33; 56-72) ve Pais (1998) üzerine yazdım; bunların hepsi Dirac'ın bilimsel çalışmasının daha sofistike tedavilerini vermektedir. Ayrıca, toplanan anılara bakınız (Kursunoglu & Wigner, 1990). Dirac'ın isimsiz denklemini yazdığı koşullar Farmelo tarafından açıklanmıştır (2009, s. 140-148); Sonsuz önemi Wightman (1972) tarafından yakalanmıştır. Dirac, 1963'de Thomas Kuhn'a (Amerikalı Fizik Enstitüsü, 1963) röportajda Dirac denklemi hakkındaki endişelerini şöyle dile getirdi: Schweber'in (1994, s. 59-60) de aktardığı gibi; Kragh (1990, s.61), Dirac'ın bu noktadaki hatıralarıyla ilgili şüpheliği ifade eder. Dirac'ın kariyeri boyunca kaç tane katkıda bulunduğu göz önüne alındığında, belki de Dirac denkleminin en önemli bulgusu olduğunu söylemek eğilimindedir, ancak kesinlikle daha önemli olan diğerlerini bilmiyorum. Kuantum alan teorisinin tarihçesi ve özellikle de Dirac, hak ettiklerinden çok daha az bilimsel bir dikkate mazhar oldu. Bu nedenle, genel izafiyet ve Einstein üzerine kurulan zengin ve kapsamlı literatür gibi bir şey yoktur. Schweber (1994) asıl metindir ve burada açıklanan bilim tarihinin çoğu benim kaynaklarımdır. Dirac'ın

en önemli katkıları da dâhil olmak üzere kuantum elektrodinamik erken tarihçesi hakkında Darrigol (1984), Miller (1994) ve Duncan'ın ilk iki bölümü (2012). 1940'ların sonunda ve 1950'lerde QED tarihi hakkında daha fazla bilgi için bkz. Kaiser'in erken bölümleri (2005). Dirac'tan Standart Modele olan kuantum alan teorisinin tarihçesine kısa bir bakış Kuhlmann (2015) tarafından verilmiştir.

111. Minnesota ziyareti sırasında adını nasıl keşfettikleri üzerine eğlenceli bir hikâye için Van Vleck'e (1972) bakınız.
112. 1931'de, 1977'de Nobel Fizik Ödülü'nü kazanacak olan Cambridge'den hemşerisi Nevill Mott, ailesine şunları yazdı: "Dirac, Gandhi'ye benzemektedir. Soğuğa, rahatsızlıklara, yiyeceğe vb. oldukça kayıtsızdır" (Mott, 1986, s.42).
113. Röportaj Wisconsin Devlet Dergisinde çıktı. Bütünü Schweber (1994, s. 18-20) tarafından aktarıldı.
114. Dirac'ın çağdaşlarıyla ilişkili kuantum mekaniğine yaklaşımını tartışmak için bkz. Kragh (1990, s. 14-47); Kopenhag ve Göttingen'deki zamanı ve meslektaşlarının kendisine verdiği tepkiler Farmelo tarafından açıklanmıştır (2009, sf. 107-130). Dirac'ın tezi, ilk kez yeni kuantum teorisi üzerindeydi; Jordan ve de Broglie gibi diğerleri ise eski teori hakkında tezlerini 1924'te yazmışlardı. Ana metinde sonradan anlatıldığı gibi, kuantum mekaniğinin tarihi genelde Max Planck'ın kara cisim ışınımı üzerindeki çalışmasına dayanmaktadır. (Planck, 1900a; 1900b; 1901); Daha sonra Einstein, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld ve diğerleri tarafından, şimdi "eski kuantum teorisi" olarak bilinen çalışma yirmi beş yıl boyunca geliştirildi (Haar, 1967). Bu arada "yeni kuantum teorisi", 1925-1927 yılları arasında Werner Heisenberg, Max Born ve Pascual Jordan (Heisenberg, 1925; Born & Jordan, 1925; Born, Heisenberg & Jordan, 1926) ve Erwin Schrödinger (Schrödinger, 1926a; 1926b; 1926c) ve Dirac (1930) ve von Neumann (1932) ders kitabı işlemlerinde doruğa ulaştı. Siyah cisim ışınımı ve erken kuantum teorisinin ayrıntılı öyküsü için Kuhn (1978) ve atomun Bohr modelinin tarihi için Kragh (2012)'ye bakınız; Jammer (1966) tarafından konunun tarihine genel bir bakış açısı verilmekte ve kapsamlı

- bir işlem Mehra ve Rechenberg (1982-2001) tarafından sağlanmaktadır.
115. Dirac Bristol'da İngiliz bir anneden doğdu ama babası İsviçreli idi ve teknik olarak Dirac bir İsviçre vatandaşı olarak doğdu. 1919'da vatandaşlığa geçirildi (Farmelo, 2009, sayfa 34).
  116. 116. Bkz. Farmelo (2009, s. 125).
  117. Einstein'ın kuantum mekaniği hakkındaki görüşleri hakkında daha fazla bilgi için bkz. Howard (1985; 1990), Fine (1986), Stachel (1986) ve Lehner (2014). Ayrıca bkz. Bohr (1949) ve not 127'deki referanslar. Kuantum mekaniğinin "eksik" olduğu fikri en ünlü sözde EPR kâğıdıyla ilişkilidir (Einstein, Podolsky, & Rosen, 1935).
  118. Kuantum mekaniğinin temel yapısını sunmanın birçok yolu vardır. Burada sunulan sunum, von Neumann (1932) geleneğidir ve Jauch (1968) ve Stein (1972) -matematik olmadan da olsa geçer. Albert (1992), Susskind and Friedman (2014) ve Bub (2016) tarafından verilen, az miktarda matematik kullanan, farklı vurgulara sahip nazik, kendi kendine yeten tanıtımlar; Hughes (1989) tarafından daha sofistike, ama yine de kavramsal olarak yönlendirilmiş bir giriş yapılmıştır.
  119. Bkz. Kent (2001) ve Stanton (2015.)
  120. Veya filozofların söylediği gibi, klasik bir devletin istatistiksel tanımıyla ilişkili olasılıklar objektif olmaktan ziyade epistemiktir. Olasılıkların yorumlanması hakkında daha fazla bilgi için bkz. Hájek (2012) ve Childers (2013). Aşağıdaki metindeki kuantum olasılıkları bu anlamda epistemik değildir, yoruma bağlıdır: Örneğin Bohm teorisinde kuantum olasılıkları epistemiktir. (Kuanden teorisinin yorumlanması hakkında daha fazla bilgi için not 121'e bakın.)
  121. Ölçüm problemi üzerinde fizikçiler ve filozoflar tarafından çokça yazılmıştır. Bazı klasikler Shimony (1963), Stein (1972) ve John Bell'in kuantum mekaniği üzerine çeşitli denemeler olup, 1960'lı yıllara uzanan ve birlikte (Bell (2004) olarak yayınlanmıştır. Farklı perspektiflerin tartışılması ve soruna çeşitli çözümlerin savunması için Bkz. Jammer (1974), Fine (1986), Redhead (1987), Hughes (1989), van Fraassen (1991), Albert (1992), Maudlin (1994), Bub (1997), Barrett (1999) ve Wallace

- 2012). Olasılığın kurallarını değiştiren yorumlara örnekleri için bkz. İnce (1982a; 1982b; ayrıca Feintzeig [2014]'e bakınız), ampirik olarak benzer veya eşdeğer alternatif teoriler Bohm teorisini (bkz. Bohm [1952]; Maudlin [1994]; Ve Dürr ve Teufel [2009]) ve GRW teorisi (Bkz. Ghirardi, Rimini ve Weber [1986]), en önemli çarpıklık teorisi Everett (bkz. Everett [1957], Barrett [1999] ve Wallace [2012]).
122. Veya en azından, Eddington'un etkisiyle kısmen böyle kanıtlar sağladığı bildirildi. Tutulma verilerinin gösterdiği şeyle ilgili uzun süredir devam eden bir tartışma var —kısmen Eddington'un kendisi “tamamen tarafsız değil” (Eddington, 1920, 116) olarak kabul edildi. Yine tartışmalar da dâhil olmak üzere 1919 seferi ve bunun önemi hakkındaki ayrıntılar için bkz. Earman ve Glymour (1980), Stanley (2003) ve Kennefick (2012). Eddington'un biyografileri için bkz. Douglas (1956), Chandrasekhar (1983) ve Stanley (2007). Bu dönemde Cambridge'de matematiksel fizikte iklim hakkında daha fazla bilgi almak için, özellikle Eddington ve izafiyet teorisinin kabulü hakkında, Warwick'in (2003) 9. bölümüne bakın.
123. İzafiyet üzerine kitap Dirac (1975) olarak basıldı. Dirac'ın elektromanyetik alan hakkındaki kuantum teorisine ilişkin ilk kâğıt Dirac'dı (1927), ancak Dirac'ın gazetede gözlemlediği gibi, tedavisinin tamamen relativist olmadığını, kısmen elektromanyetik alanlarla etkileşen elektronların, rölativistik olmayan parçacıklar olarak muamele gördükleri; Bu problem Dirac denkleminin tanıtıldığı Dirac (1928)'de ele alınmıştır. Dirac'ın tartışılması için Schweber (1994, sayfa 23-32) ve Duncan (2012, s. 31-37) (1927).
124. Genel okur için QED'in en iyi tedavisi kesinlikle Feynman (1985a)'dır. QED'in ders kitabı işlemleri için bkz. Jauch ve Rohrlich (1955) ve Bjorken ve Drell (1964) gibi klasik kitapların yanı sıra Milonni'nin (1994) daha yeni kitabı; QED ayrıca, Peskin ve Schröder (1995), Weinberg (1995-2000), Duncan (2012) ve Schwartz (2013) gibi kuantum alan teorisi üzerine daha genel kitaplarda derinlemesine ele alınmıştır.

125. 1920'lerde Einstein hakkında daha fazla bilgi için bkz. Isaacson (2007, s. 309-383); Kuantum fiziği konusundaki görüşlerine ilişkin referanslar Not 117'de verilmektedir.
126. Tam bir çevrilmiş transkript de dâhil olmak üzere 1927 Solvay Konferansı hakkında daha fazla bilgi için bkz. Bacciagaluppi ve Valentini (2009) ve not 127'deki referanslar.
127. Her ikisi de eski kuantum teorisine büyük katkılarda bulunan Einstein ve Bohr arasındaki görüş ayrılıkları, özellikle 1927 Solvay Konferansı'nda telaffuz edildi, ancak bir anlamda bu sadece başlangıçtı. Einstein ve Bohr, hayatları boyunca ya da en azından Bohr'un Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsünü ziyarete geldiği 1948 yılına kadar, şahsen ve basılı çalışmalarında tartışmaya devam ettiler. Kaldığı süre boyunca, Solvay tartışmalarını hatırlattı (Bohr, 1949). Einstein ve Bohr arasındaki anlaşmazlık hakkında daha fazla bilgi için Hooker (1972), Jammer (1974), Pais (1982, s. 440-459), Fine (1986), Beller ve Fine (1994), Whitaker (1996), Beller (1999), Landsman (2006), Bacciagaluppi ve Valentini (2009) ve Lehner (2014). Beller (1999), Landsman (2006), Bacciagaluppi ve Valentini (2009) ve Lehner (2014). Einstein'ın ve Bohr'un felsefi görüşleri hakkında daha fazla bilgi için bkz. (Bohr) Folse (1985), Murdoch (1989), Faye (1991) ve Faye and Folse (1994) ve Howard'a (2014) ve kaynaklara bakınız Einstein). Bohr'un biyografileri için bkz. Silverberg (1965) ve Pais (1993).
128. Dirac'ın tartışmalarla sıkılmış olması onun taraf tutmadığı anlamına gelmiyor. Gerçekten de, şaşırtıcı bir şekilde, Dirac Einstein'ın yanındaydı (Bokulich, 2008).
129. Einstein görünüşe göre bu alıntının birçok farklı versiyonunu yazdı, ancak standart referans, 4 Aralık 1926'da Max Born'a gönderilen bir mektupta olduğu gibi; Ayrıca bkz. Bohr (1949, sayfa 218) ve Isaacson (2007, s. 326) ve ilgili not.
130. Bkz. Heisenberg (1971, s. 85-86). Heisenberg'in onu yıllar sonra hatırladığı göz önüne alındığında, tam alıntı imkânsız biçimde uzun ve nettir. Yine de, biri Heisenberg'in Dirac'ın görüşünü doğru bir şekilde almasını umabilirdi, sözler gerçekten onunki olmasa bile. Pauli'nin yanıtı Schweber'de (1994, s. 15) aktarıldı.

131. Einstein'ın başkalarının çalışmaları nasıl faydalandığına dair son zamanlardaki bir tartışma için bkz. Janssen ve Renn (2015).
132. Not 114'deki tartışma ve referanslara bakınız.
133. Einstein'ın ışık kuantları hakkındaki çalışması (1905a) olarak yayınlandı. Einstein'ın kuantum mekaniğine katkıları hakkında daha fazla bilgi için bkz. Pauli (1949), Stone (2013) ve Darrigol (2014). Burda sunulan, kuantum alan teorisinin Planck ve Einstein'ın radyasyon üzerine olan çalışmasına kadar uzanması gerektiği görüşü Duncan (2012) tarafından inandırıcı bir şekilde savundu.
134. Jordan'ın hayatı ve katkılarıyla ilgili daha fazla bilgi için bkz. Schweber (1994, s. 5-11; 33-39) ve Wise (2003); Darrigol (1986), Duncan and Janssen (2008; 2009; 2012) ve Duncan'ın 2. bölümü (2012). Jordan, önemli katkılarına rağmen, birkaç nedenden ötürü kuantum teorisinin diğer kâşiflerinden çok daha az dikkate mazhar oldu. Belki de en önemlisi, 1930'da çöküş geçirdiği ve fizikten uzaklaşmasıyla dikkatini biyoloji, psikoloji ve diğer alanlarda daha spekülatif konulara çevirmesidir. Daha sonra 1930'larda Nazi Partisi'ne katıldı ve Nazi Partisi de daha sonraki fizikçiler tarafından değerlendirmesine katkıda bulundu.
135. Bu çalışma Born, Heisenberg ve Jordan'dır (1926).
136. "Dalga parçacığı düalizmi" fikri hakkında daha fazla bilgi için Wheaton (1983) ve Büttner ve diğerleri. (2003); Schrödinger ve teorisinin de Broglie'nin eserindeki kökeni de dâhil olmak üzere dalga mekaniğinin tarihi hakkında daha fazla bilgi için, Mehra ve Rechenberg'in (1982-2001), Darrigol (2013) ve Renn'in (2013) cilt 5'e bakın. Not 114'de Schrödinger'in çalışmasına yapılan atıflara da bakınız.
137. Schrödinger'in denklemi için çözümlerden olasılıkları türetmek için sözde Born kuralı ilk olarak Born (1926) tarafından önerildi.
138. Born kuralı ile ilgili tartışmalar hakkında daha fazla bilgi için bkz. Jammer (1966) ve Beller (1999) ve ayrıca 121 no'lu notta ki ölçüm sorununun referansları (daha genel olarak); Schrödinger'in kendi görüşleri üzerine bir tartışma için bkz. Bitboll (1996). Not 134'deki tartışma ve referanslara bakınız. Jordan,

Jordan'la (1927) başlayarak, tek başına ve iş birliği içinde, bir dizi makalede nicelenmiş madde boyutlu dalga teorisini geliştirdi.

139. Dirac'ın nasıl ilerlediğinin ayrıntıları Schweber tarafından verilmiştir (1994, s. 56-60). Ayrıca bkz. Kragh (1981; 1990, s. 57-62) ve Moyer (1981a). Duncan ve Janssen (2009), Dirac'ın ve Jordan'ın bağımsız olarak geliştirdiği Dirac'ın hesaplamalarını motive eden dönüşüm teorisi hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlar. Buradaki tarihçe oldukça karmaşıktır. Metinde not ettiğim gibi, Jordan, madde dalgalarını nicelleştirmeye Schrödinger denkleminin nispeten relativistik bir analogi gerektiği konusunda öneri vermeden önce netti ve Dirac, QED üzerine yazı yazmadan önce bu sorunu 1926 yılının erken dönemlerinde düşünmüştü. Dahası, QED bildirisinde bile, resmi olarak Jordan'ın teklifini ima eden Schrödinger denklemiyle, ancak farklı bir yorumla hesaplamalar yapıyordu. Dolayısıyla Dirac'ın Jordan'ın belirlediği bir hedefi gerçekleştirmeye çalıştığını veya Jordan'ın yaptığı herhangi bir şeye yanıt olarak çalıştığını söylemek doğru değildir. Dirac denklemini bir şekilde denemiş olacaktı. Gerçekten de, en azından başlangıçta, Dirac Jordan'ın önerisine karşı çıktı. Aksine Jordan'ın 1927'deki çalışması, üretildikten sonra Dirac denkleminin yorumlanmasında ve kuantum alan teorisinin kavramsal çerçevesinin geliştirilmesinde kendi başına önemli bir adım olan çok mühim bir katkıydı. Bu dönemde Dirac ve Jordan arasındaki düşünce ilişkisi üzerine Tony Duncan'a minnettarım.
140. Klein-Gordon denklemi başlangıçta Schrödinger tarafından keşfedildi ancak yayınlanmadı; Daha sonra, Oskar Klein (1926) tarafından bağımsız olarak keşfedildi ve daha sonra Walter Gordon (1926) ve Vladimir Fock (1926) tarafından geliştirildi. Daha fazla tarihçe için bkz. Kragh (1990, sayfa 49-57) ve Schweber (1994, s. 57).
141. Bu nedenlerin tartışmaları için bkz. Kragh (1981; 1990, s. 54-56) ve Schweber (1994, s. 57-58); Dirac, Kuhn (Amerikan Fizik Enstitüsü, 1963) ile röportajda kendisi onları tartışıyor. Ana nedeni Dirac'ın "dönüşüm teorisi" dediği şeyin Klein-Gordon denklemiyle uyumsuz olduğuna inanmıyor gibi görünmesiydi.

142. Bu çalışma Dirac (1928) olarak yayınlandı. Yayınlanan sürüm kayıtları, 2 Ocak 1928 olarak alındı ancak Farmelo, yılbaşı gününde teslim edildiğini iddia etti.
143. Bu hesaplamalar, Dirac denkleminin hidrojen spektral çizgilerini açıklayabileceğini gösterdi. Hesaplamalar Charles Darwin ve Cambridge'deki Dirac'ın arkadaşı Walter Gordon ve sırasıyla Klein-Gordon denkleminin yaratıcılarından biri tarafından yapıldı. Dirac denkleminin kabulü Moyer (1981b), Kragh (1990, s. 62-65), Schweber (1994, s.58) ve Farmelo (2009, s. 143-146) tarafından tarif edilmiştir. Yine, Dirac denkleminin neden bu kadar önemli olduğunun bir hesabı için Wightman'a (1972) bakınız.
144. Dirac'ın "delik teorisi"nin, negatif enerji durumlarını ve pozitronların tahminini başarılı şekilde yorumlamasına yol açan değişiklikleri, Moyer (1981b; 1981c), Kragh (1990, s. 87-117) Ve Schweber (1994, s. 56-69) tarafından detaylı olarak tarif edilmiştir. Saunders (1991) delik teorisini ve kalıcı etkisini daha kavramsal bir biçimde ele alıyor; Ayrıca pozitronun keşfinin daha geniş felsefi ithalatına ilişkin bir tartışma için Pashby (2012)'e bakın.
145. Alıntı Dirac'tan (1931, s. 65); Ayrıca bkz. Schweber (1994, sayfa 66).
146. Pozitronun keşfi Hanson (1961), Maria ve Russo (1985) ve Roque (1997) tarafından detaylandırılmıştır. Daha öncesine ait çok yaklaşmış bir açıklama da dâhil olmak üzere pozitronun keşfi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için Leone ve Robotti'ye (2010) bakınız.
147. Anderson kâğıtları Anderson'dur (1932a; 1932b); Anderson'dan hemen sonra pozitronu gözlemleyen diğer fizikçiler Blackett ve Occialini (1933) idi ve Cambridge'de yaşıyorlardı ve çalışmalarını Dirac ile tartışmaktan vazgeçemediler. En başta Kuhn (1962) olmak üzere birçok yazar, pozitronu gerçekten keşfedenlerin Blackett ve Occialini olduğunu iddia ettiler çünkü Anderson bunu ilk gözlemlemiş olsa da onu yalnızca pozitron olarak gören ikinci yazarlardı. Tartışma için bkz. Roque (1997).
148. 1930'lu yıllarda kuantum alan teorisinin gelişimi Schweber'in (1994) 2. bölümünde anlatılmıştır.

149. Feynman ve Schwinger'in biyografik materyalleri için, çalışmalarının ayrı ayrı ve karşılaştırmalı analizleri de dâhil olmak üzere, Schweber'in (1994) 3-5, 7 ve 8 bölümlerine bakınız. Feynman'ın hayatı ve eserleri hakkında daha fazla bilgi için Mehra'nın bilimsel biyografisini (1994); Ayrıca bkz. Gleick (1992) ve Krauss (2011) ve Brown ve Rigden'in (1993) derlediği hatıralar. Feynman (1985b; 1988) bazı mizahi ve anlayışlı otobiyografik notlar içermektedir. Schwinger hakkında daha fazla bilgi için, Mehra ve Milton'un bilimsel biyografisini inceleyin (2000).
150. Schwinger'in altmışıncı doğum günü partisinde Feynman, ikisinin birbirlerini anlayamamaları da sonuçlarını karşılaştırarak nasıl düzenli olarak konuşacağını anlattı. Feynman'ın belirttiği gibi, "Birçok kişi rakip olduğumuz konusunda şaka yaptı —ancak bu şekilde hissettiğimi hatırlamıyorum" (Schweber, 1994, sayfa 445). Bu şekilde hissettiğine dair kanıtlar için, en azından bazen, Schweber'e bakınız (1994, sayfa 427). Bu arada Schwinger'in tarafı için bkz. Örneğin, Schweber (1994, s. 352-355).
151. Bu Gell-Mann alıntısı Johnson (2000), Surely You're Joking, Mr. Feynman (Feynman, 1985b)'dir.
152. Bkz. Mehra ve Milton (2000, s. 548-554).
153. Schweber'de (1994, s. 445) aktarıldı.
154. Gizli bir geometri düşüncüsü olan Dirac'ın ilginç bir gazetesine (Galison) (2000) dayandığı iddiası; Einstein'ın cebirsel bir düşünür olduğuna dair iddia, Norton'dan (2007) (ve sohbetinden) kaynaklanmaktadır.
155. Feynman diyagramları, kuantum alan teorisini konu alan herhangi bir modern kitapta açıklanmaktadır; Not 124'deki referanslara bakınız. Feynman diyagramlarının tarihi hakkında bir tartışma için bkz. Kaiser (2005) ve Würting (2010). Feynman ve Schwinger'in düşünceleri arasındaki farkı, bildirilerini okuyarak anlayabilirsiniz ancak Schweber'in (1994, s.471) aynı sınıflandırmayı yaptığını belki de belirtmek gerekir. Schwinger'in öğrencilerini Feynman diyagramlarını kullanmaktan caydırdığı iddiası Kaiser'den (2005, s. 104-108) kaynaklanmaktadır.

156. The Wheeler-Feynman teorisi Schweber (1994, s. 380-389) tarafından tarif edilmiştir; Ayrıca bkz. Wheeler ve Feynman (1945; 1949).
157. Schwinger'ın parçacıklar ve alanlar hakkındaki görüşleri için bakınız, örneğin Schwinger (1969, s. 24-36); Ayrıca bkz. Schweber (1994, sayfa 355-365)
158. Kuantum alan teorisinde, parçacıkların, alanların ve "kuanta" veya parçacıklara benzer alanlarda durumların bulunduğu fizikte ve felsefede uzun zamandır devam eden tartışmalar vardır. Örneğin, Hegerfeldt (1974), Birrell ve Davies (1982, s. 48-59), Weinberg (1987), Wald (1994, pp. 46-52), Huggett (1994), Teller (1995) Malament (1996), Clifton ve Halvorson (2001), Halvorson and Clifton (2002), Fraser (2008) ve Baker (2009). Lupher (2010), konuların güzel bir özetini sunar. Kuantum alan teorisinin parçacık ve saha yorumları ile ilgili bulmacalar, teorinin köklerine geri döner ve dalga/parçacık dualitesi ile ilgili daha önceki konularla ilgilidir. Örneğin, bkz. Duncan ve Janssen (2008).
159. Kuantum alan teorisinde vakumun ayrıntılı bir şekilde tartışılması, bir dizi yorumla Redhead (1983; 1988; 1994; 1995); Saunders (1991; 2002); Sciama (1991); Teller (1993; 1995); Rugh, Zinkernagel ve Cao (1999); Summers (2011); Ve Boi (2011); Elbette, bkz. ayrıca, kuantum alan teorisi üzerine Not 123'te yer alan ders kitapları. Yukarıdaki tartışmada taraf tuttuğumda -ki bu gerçekten açıklayıcı olması gerektiği anlamına gelir- sunduğum görüş muhtemelen Redhead'e en yakın olanıdır. Vakumun yorumlanmasının, teorinin "parçacık yorumlanması" ve "kuantum" ve "alan uyarıları" statüsü gibi kuantum alan teorisindeki diğer yorumlayıcı konularla yakından ilişkili olduğunu unutmayın. Not 158'e bakınız.
160. Aslında burada önemli bir incelik vardır: Gözlenebilir bir "küresel" sayı olarak düşünülebilecek bir gözlem olsa da, yerel sayı gözlenebilirleri yoktur, yani belirli bir alan ve zaman alanıyla ilişkili gözlenebilir değerler yoktur. Bu, vakum hâlindeki parçacıkların sayısı için daima "0" üreten yerel gözlemcilerin tanımlanmasının imkânsız olduğu anlamına gelen Reeh-Schlieder

teoremi olarak bilinen sonucun bir neticesidir. (Ayrıntılar için Redhead [1995] ve Summers [2011]'e bakınız.) Öte yandan, parçacık dedektörleri kurduğumuzda, bir şeyi ölçüyoruz ve bunu uzayın ve zamanın bazı yerel bölgeleri içinde yapıyoruz. Bir şey her ne ise, teorideki bazı lokal gözlenebilirlerce temsil edilmelidir. Bu gözlenebilirlerin, vakum durumunda gelişigüzel “yaklaşık” null sonuçları seçilebileceği görülür. Gözlemlenebilir “yaklaşık” bu anlamda ayrıntılar için Haag’ın [1992] bölüm 6, Buchholz’un 4. bölümünde [2000] ve Halvorson ve Clifton’un [2002] son bölümüne bakınız; daha yakın zamanlarda bkz. Arageorgis ve Stergiou [2013] ve Valente [2015]). Yukarıdaki yerel sayı gözlemlenebilirlerini ve parçacık dedektörleri ile ölçümlerden ne bekleyebileceğini yazdığım, ölçümlerin bu “gözlemlenen yaklaşık sayı gözlemlenebilirleri” tarafından temsil edildiğini varsayıyorum. Dolayısıyla, Reeh-Schlieder teoremi bu ölçümlerin hiçbir zaman “0” üretmeye garantili olmadığına dair iddiamı desteklemektedir.

161. Tryon (1973), evrenin bir vakum dalgalanması olduğunu savunuyor; Albert (1989), evren vakum durumu tarafından tanımlanırsa asla bilemeyeceğimiz bir etkiye merak uyandırıcı bir argüman sunuyor. Not 160’deki tartışmaya bakınız. Standart görüşler üzerine söylenen şey, dünyayı vakum hâlinde gördüğümüz şekilde bulma ihtimalimizin giderek küçülmesidir.
162. Diğerleri de var. Örneğin, Lamb kayması ve Casimir etkisi. Bunlar Milonni’nin (1994) 2. bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Vakum polarizasyonunun erken tarihçesi Schweber (1994, s. 86-87) tarafından tanımlanmıştır.
163. Shelter Island konferansı hakkında daha fazla bilgi için, Schweber’e (1994, s. 156-205, 303-318, 411-414) bakınız: Yük renormalizasyonundan Coulomb potansiyeline modifikasyonun yapılmasını sağlayan Lambshift’in skalası Schweber (1994, s. 228-231) tarafından açıklanır. Vakum polarizasyonu ve Lamb kayması arasındaki bağlantı açık bir şekilde Schwartz tarafından açıklanmaktadır (2013, s. 300-314); Bkz. Milonni (1994, s. 314-315).
164. Brillouin (1960), dielektrik bir ortamda dalga yayılımı için standart kaynak olarak kalır.

165. Örneğin bkz. Odom ve diğerleri. (2007)
166. Wightman (1989) 1950'lerde kuantum alan teorisine karşı belitsel yaklaşımın kişisel geçmişini sunar ve Fredenhagen ve diğerleri mevcut durumla ilgili güzel bir genel bakış sunar; Kuantum alan teorisini belitsel motivasyonu için Streater'e (1988), belitsel programın ilk yıllarında nelerin başarıldığına dair daha ayrıntılı bilgi için Streater ve Wightman'a (2000) bakınız. Haag (1996) ve Araki (1999), kuantum alan teorisinde cebirsel yöntemlerin klasik açıklamalarını sunar ve Brunetti ve diğerleri (2015) güncel bir açıklama sağlar. Yukarıda açıklanan çeşitli aksiyom sistemleri için titiz matematiksel modeller üretmeye çalışan yapısal kuantum alan teorisinin klasik tartışması için Glimm and Jaffe (1987)'e bakınız; Summers (2012) daha yeni bir bakış açısı sunar. Daha yakın zamanlarda, biraz farklı yöntemler kullanarak, kuantum alan teorisini titiz bir temel üzerine koymak için fizikçiler, çalışma yöntemlerini daha iyi taklit eden birtakım girişimlerde bulundu. Örneğin, Hollands (2009), Costello (2011) ve Rejzner (2016) başlıklarına bakınız, ancak bu tartışmalar kapsamlı değildir.
167. Örneğin bkz. Schweber (1994, s. 436-445).
168. Wilson renormalizasyonu hakkında daha fazla bilgi için, Wilson ve Kogut'un (1974) ya da not 124'deki ders kitaplarının herhangi birinde bulunan iç değerlendirme makalesine bakın; Wilson'ın fikirlerinden ortaya çıkan "etkin alan teorisi" resmiyle ilgili daha fazla bilgi için bkz. Polcininski (1984; 1992), Georgi (1993) ve Cao ve Schweber (1993). Birçok fizikçi için, Wilson yöntemi tüm gerçekten rahatsız olan sorunları çözmektedir. Bu tutumun genel açıklamaları için bkz. Wallace (2011) ve Duncan (2012). Fraser (2011) tarafından bir cevap veriliyor. Ana metinde Wilson'un tüm problemleri çözmediğini söylediğimde, aklımda olan şey, etkileşimlere sahip kuantum alan teorilerinin dört boyutlu (cebirsel olmayan) bir modelinin bulunmamasıdır. Ve fizikte yaygın olarak kullanılan pertürbasyon serisinin yakınsak olduğu bilinmiyor (ve bazı durumlarda, yakınsamayacağı biliniyor). Böyle bir model bulmak, Milenyum Sorunu olarak adlandırılan ve çözülmesi milyon dolarlık bir ödül ile sonuçlanacak; Binyıl Sorunu'nun ayrıntıları yukarıda bahsedilen Arthur Jaffe

ve sicim teorisinde en ilginç olan fiili olan Edward Witten tarafından açıklanmıştır.

169. Dirac'ın 1950'lerin başında QED'e tepkisini tartışmak için "Kragh" (1990, s. 183-188) ve ayrıca "mantıklı matematik" üzerine kurulu alternatif bir teori geliştirme girişimleri. Alıntılar s.184'ten alınmıştır. Bununla birlikte, "mantıklı matematik" ile Dirac'ın mutlaka "titiz matematik" anlamına gelmediğini vurgulamak önemlidir. Matematiksel olarak tam olarak tanımlanmamış hesaplamalardan ziyade geçici ya da keyfi olarak gördüğü hesaplamalarla çok daha fazla ilgiliydi. 1970'lerde geliştirilen renormalizasyona yönelik yeni tutumları takdir etmeye kalkarsa Dirac'ın nasıl tepki vereceği açık değildir. (Not 168'e bakınız.) Dirac'ın titizlik ve matematiksel güzellik hakkındaki görüşleri hakkında Kragh'ın (1990) 14. bölümüne bakınız. Dirac'ın QED ve Schwinger'ın daha sonraki çalışmaları arasında da merak uyandırıcı bir paralellik olduğunu unutmayın: Her iki durumda da, standart teori konusunda yetersiz bir şey olduğunu hissettikleri ve daha ilkeli olduklarını düşündükleri yeni bir şey geliştirmeye çalıştılar. Ve her iki durumda da, bir zamanlar onları kutlayan ana akım fizik topluluğu, yeni çalışmaları göz ardı etti, çünkü bilinen sonuçların tekrarı vardı.
170. Bkz. Summers (2011).

## SON SÖZ

171. Aklımdaki olaylar şunlardır: (1) 1973'teki keşif, kuantum kromodinamik de dâhil olmak üzere çok sayıda teorinin, "asimptotik özgürlük" olarak bilinen bir özelliği olduğu konusunda Politzer (1973) ve Brüt ve Wilczek (1973); Ve (2) J / psi meson'un Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'ndaki keşif. İlk keşif, QCD'nin QED ve diğer kuantum alan teorilerinin yapmadığı şekilde, özellikle cazip bir teori hâline getirilmesi biçiminde, iyi davrandıklarını gösterdi; İkinci keşif, yeni bir tür kuarka, yani cazibe kuarkına delil sağladı ve kuark teorisinin ve özellikle QCD'nin yaygın bir şekilde kabulüne yol açtı. Standart modelin geçmişi hakkında daha fazla bilgi için, Hoddesson, Brown, Riordan ve Dresden (1997) tarafından der-

lenen makalelere bakın. Özellikle QCD tarihi hakkında daha fazla bilgi için bkz. Cao (2010); Pickering (1984), klasik olmasına rağmen, burada benimsenenle oldukça farklı bir perspektifi vardır. Standart Modeli, QCD de dâhil, ders kitabı sunumları için bkz. Cottingham and Greenwood (2007) ve Schwartz (2013), ayrıca Peskin ve Schröder (1995) ve Weinberg (1995-2000) klasikleri.

172. Asimtotik özgürlüğü keşfetmek için 2004 ödülünü paylaşan Wilczek, Brüt ve Politzer'i aklımda tuttum ve Richter ve Ting, 1976 J / psi meson keşfi için ödülü paylaştılar. Not 171'e bakınız.
173. Burada anlattığım sicim teorisinin tarihi çoğunlukla Galison'a (1995) dayanıyor; Ayrıca bkz. Rickles (2014) ve Cappelli, Castellani, Colomo ve de Vecchia'nın koleksiyonundaki (2012) çeşitli denemeler. Sicim teorisine yönelik standart metin kitaplarına girişler Green, Schwartz ve Witten (1987) ve Polchinski (1998) tarafından verilmiştir; Daha genel bir kitleye yönelik açıklamalar Greene (1999) ve Gubser (2010) tarafından verilmektedir.
174. Bu üç güç hakkında daha fazla bilgi için, not 171'deki referanslara bakın.
175. Önemli derecede dikkat çeken bir kuantum çekim teorisi kurmak için birkaç strateji bulunmaktadır. Yer çekimini niceleme probleminin genel tartışmaları için, bütün büyük çabalara dikkat edildiğinde, bkz. Kiefer (2012); Smolin (2001), konulara daha yumuşak bir giriş sunmaktadır. Konunun kısa, genel bir tarihi Rovelli (2001) tarafından verilmiştir. Hâlen hâkim olan gelenek, 1970'lere dek uzanan, sicim teorisi; Not 173'e bakınız. Ana rakip, 1980'lerde Amitabha Sen (1982) ve (özellikle) Abhay Ashtekar (1986) çalışmalarıyla ortaya çıkan döngü kuantum çekme gücü olarak bilinir. Döngü kuantum yer çekimi, Dirac (1958), Peter Bergman (1966), Bryce DeWitt (1967) ve John Wheeler'in kanonik niceleme yaklaşımının bir sonucu olarak ortaya çıktı. Döngü kuantum gravitesinin ders kitap sunuları Rovelli (2004) ve Gambini and Pullin (2011) tarafından verilmiştir.

176. Burada açıkladığım sorun, kanonik kuantum çekiminde “yerel” gözlemlenebilir varlıkların bulunmaması ve sözde zamanın problemi ile yakından ilişkilidir. Daha fazla tartışma için bkz. Isham (1992) ve Kiefer (2012).
177. Nitekim, kuantum yer çekimi geçmişi, genel göreliliğin başlangıcına kadar uzanır. Konunun erken tarihçesi Stachel (1999) tarafından verilmiştir. Kanonik kuantum çekim tarihçesi ve özellikle ona katkıda bulunan diğerlerinin tanınması hakkında bir tartışma için bkz. Rovelli (2001). (Not 175’e de bakınız.) Wheeler-DeWitt denkleminin ilk kez DeWitt (1967) tarafından bir makaleye girdiği ve Wheeler’e atfederek “Einstein-Schrödinger Denklemi” olarak adlandırması kayda değerdir; Daha sonraki çalışmalarda Wheeler her zaman DeWitt denklemi olarak bahsetti. Ben metin içerisinde, kanonik kuantum çekim gücünün buharının bittiğini söylesem de, birçok açıdan döngüsel kuantum kütleçekimi -ki hâlen aktif bir araştırma alanı- mirasçısıdır ve bu nedenle gelenek devam eder.
178. Bkz. Davies and Brown (1992, s. 194). Bu cilt, sicim teorisini değerlendiren ünlü fizikçilerle yapılan görüşmelerden derlenmiştir. Edward Witten, Michael Green ve John Schwarz gibi bir dizi etkili savunucuyu ve hem Feynman hem de Standard Model’e büyük katkılar sağlayan bir başka Nobel Ödülü sahibi teorisyen olan Sheldon Glashow da dâhil olmak üzere bazı önemli eleştirmenleri içerir. Sicim teorisinin başlangıcından beri teoriye bağlı olan en önemli eleştirisi, deneysel bilimlerle bağlantı kurmayı başaramamış olmasıdır —özellikle ele alınması tasarlanan yüksek enerjili fizik ve kozmoloji alanlarında. Sicim teorisyenlerinin teoriyi aşırıya çekip (iddia edilen şekilde) diğer araştırma programlarını bastırdıklarından şikâyet eden Woit (2006) ve Smolin (2006) tarafından sicim teorisine yönelik özellikle güçlü eleştiriler verilmiştir. (Curiel’e de bakınız. [2001].) Sicim teorisyenlerinden gelen bu kitaplara tepki son derece olumsuzdur ve bazen “sicim savaşları” olarak bilinen kamusal tartışmalara yol açtı. Son zamanlarda, Dawid (2014) ve Conlon (2015) gibi, sicim teorisi konusunda cazip olan şeyleri, sıradan bir kitleye açıklamaya yönelik daha ayık girişimler ortaya çıktı.
179. 125 ve 127 no’lu notları hatırlayınız.

180. Bkz. Galison (1995). Davies and Brown (1992) tarafından derlenen koleksiyonda Schwarz ve Green ile yapılan röportajlarda “kaçınılmazlık” fikrini görebilirsiniz; Bkz. Greene (1999).
181. Bu çalışma Lerche, Lüst ve Schellekens (1987) tarafından yapılmıştır.
182. Örneğin,  $10^{500}$  tahmini Blumenhagen ve diğerlerinin çalışmasında görülür. (2005); Susskind (2003) tahminini  $10^{100}$  (“googol”) ile  $10^{10 \wedge 100}$  (“googolplex”) arasında bir yere koymuştur.
183. Fikir, Susskind (2003) tarafından sunulmuş olsa da, bazı tarih öncesi tarihleri vardır, bkz. Örneğin Schellekens (2006).



## KAYNAKÇA

- Abbott, B. P., et al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.
- Albert, D. (1992). *Quantum Mechanics and Experience*. Boston, MA: Harvard University Press.
- Albert, D. Z. (1989). On the Possibility That the Present Quantum State of the Universe Is the Vacuum. In A. Fine & J. Leplin, *PSA1988: Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* (pp. 127-133). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Albert, D. Z. (2012, March 23). On the Origin of Everything. *The New York Times*, p.BR20.
- American Institute of Physics. (1963). *Interview of P. A. M. Dirac by Thomas S. Kuhn and Eugene Wigner on 1962 April 1*. Amerikan Fizik Enstitüsü'nden alınmıştır: <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4575-1>
- Anderson, C. D. (1932a). The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives. *Science*, 76(1967), 238-239.
- Anderson, C. D. (1932b). Energies of Cosmic-Ray Particles. *Physical Review*, 41(4), 405-412.
- Antognazza, M. R. (2009). *Leibniz: An Intellectual Biography*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Arageorgis, A., & Stergiou, C. (2013). On Particle Phenomenology without Particle Ontology: How Much Local Is Almost Local? *Foundations of Physics*, 43(8), 969-977.
- Araki, H. (1999). *Mathematical Theory of Quantum Fields*. (U. Carow-Watamura, Trans.) Oxford, UK: Oxford University Press.
- Ariew, R. (1995). G. W. Leibniz, Life and Works. In N. Jolley, *The Cambridge Companion to Leibniz* (pp. 18-42). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ariew, R. (2000). Giriş Bölümü In G. W. Leibniz, S. Clarke, & R. Ariew (Ed.), *Correspondence* (pp. vii-xv). Indianapolis, IN: Hackett Publishing Company.
- Aristotle. (1984). Physics. In J. Barnes, *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation* (R. P. Hardie & R. K. Gaye, Trans., Vol. 1, pp. 315-446). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Ashtekar, A. (1986). New Variables for Classical and Quantum Gravity. *Physical Review Letters*, 57(18), 2244-2247.
- Bacciagaluppi, G., & Valentini, A. (2009). *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bachelier, L. (2006 [1900]). *Louis Bachelier's Theory of Speculation: The Origins of Modern Finance*. (M. Davis & A. Etheridge, Eds.). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Baigrie, B. S. (2007). *Electricity and Magnetism: A Historical Perspective*. Westport, CT: Greenwood Press.
- Baker, D. J. (2009). Against Field Interpretations of Quantum Field Theory. *The British Journal for Philosophy of Science*, 60(3), 585-609.
- Barbour, J. B., & Bertotti, B. (1982). Mach's Principle and the Structure of Dynamical Theories. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 382, 295-306.
- Barrett, J. A. (1999). *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Barrow, J. D. (2001). *The Book of Nothing: Vacuums, Voids, and the Latest Ideas about the Origins of the Universe*. New York, NY: Pantheon Books.
- Bell, J. S. (2004). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Beller, M. (1999). *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Beller, M., & Fine, A. (1994). Bohr's Response to EPR. In J. Faye & H. J. Folse, *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (pp. 1-31). Dordrecht: Kluwer.
- Bergmann, P. G. (1966). Hamilton-Jacobi and Schrödinger Theory in Theories with First-Class Hamiltonian Constraints. *Physical Review*, 144(4), 1078-1080.
- Berkson, W. (1974). *Fields of Force: The Development of a World View from Faraday to Einstein*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Bernstein, J. (1973). *Einstein*. New York, NY: The Viking Press.
- Berryman, S. (2011). *Ancient Atomism*. (E. N. Zalta, Ed.). Stanford Encyclopedia of Philosophy'den alıntılanmıştır: <http://plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/atomism-ancient/>
- Birrell, N. D., & Davies, P. C. (1982). *Quantum Fields in Curved Space*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bitbol, M. (1996). *Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics*. Dordrecht: Kluwer.
- Bjorken, J. D., & Drell, S. D. (1964). *Relativistic Quantum Mechanics*. New York, NY: McGraw Hill.
- Blackett, P. M., & Occhialini, G. P. (1933). Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 139(839), 699-720.
- Bleecker, D. (1981). *Gauge Theory and Variational Principles*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing.
- Blumenhagen, R., Gmeiner, F., Honecker, G., Lüst, D., & Weigand, T. (2005). The Statistics of Supersymmetric D-brane Models. *Nuclear Physics B*, 713, 83-135.

- Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables, I and II. *Physical Review*, 85(2), 166-193.
- Bohr, N. (1949). Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In P. A. Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (pp. 199-242). La Salle, IL: Open Court Press.
- Boi, L. (2011). *The Quantum Vacuum*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Bokulich, A. (2008). Paul Dirac and the Einstein-Bohr Debate. *Perspectives on Science*, 16(1), 103-114.
- Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37(12), 863-867.
- Born, M., Heisenberg, W., & Jordan, P. (1926). Zur Quantenmechanik. II. *Zeitschrift für Physik*, 35(8), 557-615.
- Born, M., & Jordan, P. (1925). Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 34(1), 858-888.
- Boyer, C. B. (1959). *The History of the Calculus and Its Conceptual Development*. New York, NY: Dover.
- Brillouin, L. (1960). *Wave Propagation and Group Velocity*. New York, NY: Academic Press.
- Brown, H. (2005). *Physical Relativity*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Brown, L. M., & Rigden, J. S. (1993). *"Most of the Good Stuff": Memories of Richard Feynman*. New York, NY: Springer-Verlag.
- Brunetti, R., Dappiaggi, C., Fredenhagen, K., & Yngvason, J. (2015). *Advances in Algebraic Quantum Field Theory*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bub, J. (1997). *Interpreting the Quantum World*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bub, J. (2016). *Bananaworld: Quantum Mechanics for Primates*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Buchholz, D. (2000). *Algebraic Quantum Field Theory: A Status Report*. Retrieved from archive:math-ph/0011044

- Buchwald, J. Z. (2013a). Electricity and Magnetism to Volta. In J. Z. Buchwald & R. Fox, *The Oxford Handbook of the History of Physics* (pp. 432-442). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Buchwald, J. Z. (2013b). Electrodynamics from Thomson and Maxwell to Hertz. In J. Z. Buchwald & R. Fox, *The Oxford Handbook of the History of Physics* (pp. 571-583). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Buchwald, J. Z., & Feingold, M. (2012). *Newton and the Origin of Civilization*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Büttner, J., Renn, J., & Schemmel, M. (2003). Exploring the Limits of Classical Physics: Planck, Einstein, and the Structure of a Scientific Revolution. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34(1), 37-59.
- Callender, C. (2008). The Common Now. *Philosophical Issues*, 18 (1), 339-361.
- Campbell, L., & Garnett, W. (1882). *The Life of James Clerk Maxwell*. London, UK: Macmillan and Co.
- Cao, T. Y. (2010). *From Current Algebra to Quantum Chromodynamics: A Case for Structural Realism*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cao, T. Y., & Schweber, S. S. (1993). The Conceptual Foundations and the Philosophical Aspects of Renormalization Theory. *Synthese*, 97(1), 33-108.
- Cappelli, A., Castellani, E., Colomo, F., & di Vecchia, P. (2012). *The Birth of String Theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cartan, É. (1923). Sur les variétés à connexion affine, et la théorie de la relativité (première partie). *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 40, 325-412.
- Cartan, É. (1924). Sur les variétés à connexion affine, et la théorie de la relativité (suite). *Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 41, 1-25.
- Chalmers, A. (2014). *Atomism from the 17th to the 20th Century*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philo-

- sophy, <http://plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/atomism-modern/>
- Chandrasekhar, S. (1983). *Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Childers, T. (2013). *Philosophy and Probability*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Clifton, R., & Halvorson, H. (2001). Are Rindler Quanta Real? Inequivalent Particle Concepts in Quantum Field Theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 52(3), 417-470.
- Cohen, I. B. (1983). *The Newtonian Revolution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cohen, I. B. (1999). A Guide to Newton's Principia. In I. Newton, I. B. Cohen, & Whitman (Eds.), *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (pp. 1-370). Berkeley, CA: University of California Press.
- Cohen, I. B., & Koyré, A. (1962). Newton and the Leibniz-Clarke Correspondence. *Archives internationales d'histoire des sciences*, 15, 63-126.
- Cohen, I. B., & Westfall, R. S. (1995). *Newton*. New York, NY: Norton.
- Conlon, J. (2015). *Why String Theory?* London, UK: CRC Press.
- Costello, K. (2011). *Renormalization and Effective Field Theory*. Providence, RI: American Mathematical Society.
- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (2007). *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Curiel, E. (1999). The Analysis of Singular Spacetimes. *Philosophy of Science*, 66(Proceedings), S119-S145.
- Curiel, E. (2001). Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty. *Philosophy of Science*, 68(Proceedings), S424-S441.
- Darrigol, O. (1984). La genèse du concept de champ quantique. *Annales de physique*, 433-501.

- Darrigol, O. (1986). The Origin of Quantized Matter Waves. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 16(2), 197-253.
- Darrigol, O. (2000). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Darrigol, O. (2013). A Few Reasons Why Louis de Broglie Discovered Broglie's Waves and Yet Did Not Discover Schrödinger's Equation. In W. L. Reiter & J. Yngvason, *Erwin Schrödinger—50 Years After* (pp. 165-174). Zürich: EMS Publishing House.
- Darrigol, O. (2014). The Quantum Enigma. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 117-142). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Davies, P. C., & Brown, J. (1992). *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Dawid, R. (2014). *String Theory and the Scientific Method*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Descartes, R. (1985). Principles of Philosophy. In J. Cottingham, R. Stoothoff, & D. Murdoch, *The Philosophical Writings of Descartes* (pp. 177-292). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- De Sitter, W. (1917). On the Relativity of Inertia. Remarks Concerning Einstein's Latest Hypothesis. *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen Proceedings*, 19(2), 1217-1225.
- DeWitt, B. (1967). Quantum Theory of Gravity. I. Canonical Theory. *Physical Review*, 160(5), 1113-1148.
- Dirac, P. A. (1927). The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 114(767), 243-265.
- Dirac, P. A. (1928). The Quantum Theory of the Electron. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 117(778), 610-624.
- Dirac, P. A. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dirac, P.A. (1931). Quantised Singularities in the Electromagnetic Field. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 133(821), 60-72.
- Dirac, P. A. (1958). The Theory of Gravitation in Hamiltonian Form.

- Proceedings of the Royal Society of London A*, 246(1246), 333-343.
- Dirac, P. A. (1975). *General Theory of Relativity*. New York, NY: John Wiley & Sons..
- DiSalle, R. (1994). On Dynamics, Indiscernibility, and Spacetime Ontology. *The British Journal for Philosophy of Science*, 265-287.
- DiSalle, R. (2002). Newton's Philosophical Analysis of Space and Time. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 33-56). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- DiSalle, R. (2006). *Understanding Space-Time*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Dobbs, B. J. (1991). *The Janus Faces of Genius: The Role of Alchemy in Newton's Thought*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Domski, M. (2010). Newton's Empiricism and Metaphysics. *Philosophy Compass*, 5(7), 525-534.
- Dongen, J. v. (2010). *Einstein's Unification*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Douglas, V. A. (1956). *The Life of Arthur Stanley Eddington*. London, UK: Thomas Nelson.
- du Châtelet, E. (1988 [1742]). *Institutions de Physique: Nouvelle edition*. (J. Ecole, Ed.). Hildesheim: Olms.
- Duncan, A. (2012). *The Conceptual Framework of Quantum Field Theory*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Duncan, A., & Janssen, M. (2008). Pascual Jordan's Resolution of the Conundrum of the Wave-Particle Duality of Light. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39(3), 634-666.
- Duncan, A., & Janssen, M. (2009). From Canonical Transformations to Transformation Theory, 1926-1927: The Road to Jordan's Neue Begründung. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40(4), 352-362.
- Duncan, A., & Janssen, M. (2012). (Never) Mind Your P's and Q's: Von Neumann versus Jordan on the Foundations of Quantum Theory. *European Journal of Physics H*, 38(2), 175-259.

- Dürr, D., & Teufel, S. (2009). *Bohmian Mechanics: The Physics and Mathematics of Quantum Theory*. Berlin: Springer-Verlag.
- Durrer, R. (2015). The Cosmic Microwave Background: The History of Its Experimental Investigation and Its Significance for Cosmology. *Classical and Quantum Gravity*, 32(12), 124007.
- Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time: Absolute vs. Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Earman, J. (1995). *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Earman, J. (1999). The Penrose-Hawking Singularity Theorems: History and Implications. In H. Goenner, J. Renn, J. Ritter, & T. Sauer, *The Expanding Worlds of General Relativity* (pp. 235-267). Boston, MA: Birkhäuser.
- Earman, J., & Eisenstaedt, J. (1999). Einstein and Singularities. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 30(2), 185-235.
- Earman, J., & Glymour, C. (1980). Relativity and Eclipses: The British Eclipse Expeditions of 1919 and Their Predecessors. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 11(1), 49-85.
- Eddington, A. S. (1920). *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Einstein, A. (1905a). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17(6), 132-148.
- Einstein, A. (1905b). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 17(8), 549-560.
- Einstein, A. (1905c). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17(10), 891-921.
- Einstein, A. (1905d). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18(13), 639-641.
- Einstein, A. (1906). Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen.

- Annalen der Physik*, 19(4), 289-306.
- Einstein, A. (1922). Ether and Relativity. In A. Einstein, *Sidelights on Relativity* (G. B. Jeffrey, & W. Perrett, Trans., pp. 3-24). London: Meuthen & Co.
- Einstein, A. (1924). Über den Äther. *Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 105, 85-94.
- Einstein, A. (1949). Autobiographical Notes. In P. A. Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (pp. 1-96). La Salle, IL: Open Court Press.
- Einstein, A. (1998). *The Collected Papers of Albert Einstein* (Vol. 8). (R. Schulmann, A. J. Kox, M. Janssen, & J. Illy, Eds.). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Einstein, A. (2005). *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changes the Face of Physics*. (J. Stachel, Ed.). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780.
- Einstein, A., & Rosen, N. (1937). On Gravitational Waves. *Journal of the Franklin Institute*, 223, 43-54.
- Euler, L. (1750). Reflexions sur l'espace et le temps. *Memoires de l'academie des sciences de Berlin*, 4, 324-333.
- Everett, H., III. (1957). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29(3), 454-462.
- Everitt, C. W. (1975). *James Clerk Maxwell: Physicist and Natural Philosopher*. New York, NY: Charles Scribner's Sons.
- Farmelo, G. (2009). *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom*. New York, NY: Basic Books.
- Faye, J. (1991). *Niels Bohr: His Heritage and Legacy: An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*. Dordrecht: Kluwer.
- Faye, J., & Folse, H. J. (1994). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. Dordrecht: Kluwer.
- Feingold, M. (2004). *The Newtonian Moment: Isaac Newton and the Making of Modern Culture*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Feintzeig, B. (2014). HiddenVariables and Incompatible Observables in Quantum Mechanics. *The British Journal for Philosophy of Science*. dx.doi.org/10.1093/bjps/ axu017
- Feynman, R. (1985a). *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Feynman, R. (1985b). *Surely You're Joking, Mr. Feynman*. New York, NY: W. W. Norton & Co.
- Feynman, R. (1988). *"What Do You Care What Other People Think?": Further Adventures of a Curious Character*. New York, NY: W. W. Norton & Co.
- Figala, K. (2002). Newton's Alchemy. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 370-386). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Fine, A. (1982a). Joint Distributions, Quantum Correlations, and Commuting Observables. *Journal of Mathematical Physics*, 23(7), 1306-1310.
- Fine, A. (1982b). Hidden Variables, Joint Probability, and the Bell Inequalities. *Physical Review Letters*, 48(5), 291-295.
- Fine, A. (1986). *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- FitzGerald, G. (1889). The Ether and Earth's Atmosphere. *Science*, 13, 390. Fletcher, S. C. (2013). Light Clocks and the Clock Hypothesis. *Foundations of Physics*, 43(11), 1369-1383.
- Fock, V. (1926). Zur Schrödingerschen Wellenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 38(3), 242-250.
- Folse, H. J. (1985). *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*. Amsterdam: North-Holland.
- Forbes, N., & Mahon, B. (2014). *Faraday, Maxwell, and the Electromagnetic Field*. Amherst, NY: Prometheus Books.
- Frank, P. (1947). *Einstein: His Life and Times*. New York, NY: Alfred A. Knopf.
- Fraser, D. (2008). The Fate of 'Particles' in Quantum Field Theories with Interactions. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39(4), 841-859.

- Fraser, D. (2011). How to Take Particle Physics Seriously: A Further Defence of Axiomatic Quantum Field Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42(2), 126-135.
- Fredenhagen, K., Rehren, K.-H., & Seiler, E. (2007). Quantum Field Theory: Where We Are. In I.-O. Stamatescu & E. Seiler, *Approaches to Fundamental Physics* (pp. 61-87). Berlin: Springer-Verlag.
- Friedrichs, K. (1927). Eine Invariante Formulierung des Newtonschen Gravitationsgesetzes und der Grenzüberganges vom Einsteinschen zum Newtonschen Gesetz. *Mathematische Annalen*, 98, 566-575.
- Gair, J. R., Vallisneri, M., Larson, S. L., & Baker, J. G. (2013). Testing General Relativity with Low-Frequency, Space-Based Gravitational-Wave Detectors. *Living Reviews in Relativity*, 16, 7.
- Galison, P. (1979). Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 10, 85-121.
- Galison, P. (1995). Theory Bound and Unbound: Superstrings and Experiment. In F. Weinert, *Laws of Nature: Essays on the Philosophical, Scientific, and Historical Dimensions* (pp. 369-407). Berlin: De Gruyter.
- Galison, P. (2000). The Suppressed Drawing: Paul Dirac's Hidden Geometry. *Representations*, 72, 145-166.
- Galison, P. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps*. New York: W. W. Norton & Co.
- Galison, P., Gordin, M., & Kaiser, D. (2001). *Science and Society: Making Special Relativity*. New York, NY: Routledge.
- Gambini, R., & Pullin, J. (2011). *A First Course in Loop Quantum Gravity*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Garber, D. (1992). *Descartes' Metaphysical Physics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Garber, D. (1995). Leibniz: Physics and Philosophy. In N. Jolley, *The Cambridge Companion to Leibniz* (pp. 270-352). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Garber, D. (2009). *Leibniz: Body, Substance, Monad*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Garber, D. (2012). Leibniz, Newton, and Force. In A. Janiak & E. Schliesser, *Interpreting Newton: Critical Essays* (pp. 33-47). Cambridge, UK: University of Cambridge Press.
- Georgi, H. (1993). Effective Field Theory. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 43, 209-252.
- Geroch, R. (1978). *General Relativity from A to Z*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Ghirardi, G. C., Rimini, A., & Weber, T. (1986). Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, 34(2), 470-491.
- Gleick, J. (1992). *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*. New York, NY: Pantheon.
- Glick, T. F. (1987). *The Comparative Reception of Relativity*. Dordrecht: D. Reidel.
- Glimm, J., & Jaffe, A. (1987). *Quantum Physics: A Functional Integral Point of View* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Goldman, M. (1983). *The Demon in the Aether: The Story of James Clerk Maxwell*. Edinburgh, UK: P. Harris.
- Gordon, W. (1926). Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie. *Zeitschrift für Physik*, 40(1), 117-133.
- Grant, E. (1981). *Much Ado about Nothing*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York, NY: W. W. Norton & Co.
- Gross, D. J., & Wilczek, F. (1973). Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories. *Physical Review Letters*, 30(26), 1343-1346.
- Gubser, S. S. (2010). *The Little Book of String Theory*. Princeton, NJ:

- Princeton University Press.
- Haag, R. (1992). *Local Quantum Physics*. Berlin: Springer-Verlag.
- Haag, R. (1996). *Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras* (2nd rev. ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Haar, D. t. (1967). *The Old Quantum Theory*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Hájek, A. (2012). *Interpretations of Probability*. Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/probability-interpret/>
- Hall, A. R. (1992). *Isaac Newton: Adventurer in Thought*. Oxford, UK: Blackwell.
- Hall, A. R. (2002a). *Philosophers at War: The Quarrel between Newton and Leibniz*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hall, A. R. (2002b). Newton versus Leibniz: From Geometry to Metaphysics. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 431-454). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Halvorson, H., & Clifton, R. (2002). No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories? In M. Kuhlmann, H. Lyre, & A. Wayne, *Ontological Aspects of Quantum Field Theory* (pp. 181-213). Singapore: World Scientific.
- Hanson, N. R. (1961). Discovering the Positron. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *XII*(47), 194-214.
- Harman, P. M. (1998). *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Harper, W. (2012). *Isaac Newton's Scientific Method*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Hartman, P. (1994). *A Memoir on the Physical Review: A History of the First Hundred Years*. New York, NY: American Institute of Physics.
- Hawking, S. W., & Ellis, G. F. (1973). *The Large-Scale Structure of Space-Time*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hegerfeldt, G. C. (1974). Remark on Causality and Particle Localiza-

- tion. *Physical Review D*, 10(10), 3320-3321.
- Hehl, F.W., & Obukov, Y. N. (2003). *Foundations of Classical Electrodynamics*. Boston, MA: Birkhäuser.
- Heilbron, J. L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study of Early Modern Physics*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33(1), 879-893.
- Heisenberg, W. (1971). *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*. New York, NY: Harper & Row.
- Hendry, J. (1986). *James Clerk Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field*. Boston, MA: A. Hilger.
- Hesse, M. (1961). *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. London, UK: T. Nelson.
- Hoddeson, L., Brown, L., Riordan, M., & Dresden, M. (1997). *The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hoefer, C. (1994). Einstein's Struggle for a Machian Gravitation Theory. *Studies in History and Philosophy of Science, Part A*, 25(3), 287-335.
- Hoffman, B. (1972). *Albert Einstein: Creator and Rebel*. New York, NY: The Viking Press.
- Hollands, S. (2009). Axiomatic Quantum Field Theory in Terms of Operator Product Expansions: General Framework and Perturbation Theory via Hochschild Cohomology. *Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications*, 5, 90-134.
- Holt, J. (2012). *Why Does the World Exist?* New York, NY: Liverlight Publishing Corporation.
- Holton, G. (1988). *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* (rev. ed.). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Hooker, C. A. (1972). The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein versus Bohr. In R. G. Colodny, *Paradigms and Paradoxes:*

- The Philosophical Challenge of the Quantum Domain* (pp. 67-302). Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Howard, D. (1985). Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3), 171-201.
- Howard, D. (1990). Nicht sein kann was nicht sein darf: Or the Pre-history of EPR, 1909-1935. In A. I. Miller, *Sixty-Two Years of Uncertainty: Historical, Philosophical, Physics Inquiries into the Foundations of Quantum Physics* (pp. 61-111). New York, NY: Plenum.
- Howard, D. (2014). Einstein and the Development of Twentieth-Century Philosophy of Science. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 354-376). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Huggett, N. (1994). What Are Quanta, and Why Does It Matter? In D. Hull, M. Forbes, & R. M. Burian, *PSA 1994: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* (pp. 69-76). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Huggett, N. (2012). What Did Newton Mean by "Absolute Motion"? In A. Janiak & E. Schliesser, *Interpreting Newton: Critical Essays* (pp. 196-218). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Huggett, N., & Hoefer, C. (2015). *Absolute and Relational Theories of Space and Motion*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2015 Edition): <http://plato.stanford.edu/archives/spr2015/entries/spacetime-theories/>
- Hughes, R. I. (1989). *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Ilfie, R. (2007). *Newton: A Very Short Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Isaacson, W. (2007). *Einstein: His Life and Universe*. New York, NY: Simon & Schuster.
- Isham, C. J. (1992). *Canonical Quantum Gravity and the Problem of Time*. Retrieved from arXiv:gr-qc/9210011.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Jammer, M. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York, NY: McGraw Hill.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Jammer, M. (1993). *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics* (3rd ed.). Mineola, NY: Dover Publications.
- Janiak, A. (2008). *Newton as Philosopher*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Janssen, M. (2002a). COI Stories: Explanation and Evidence in the History of Science. *Perspectives on Science*, 10, 457-522.
- Janssen, M. (2002b). Reconsidering a Scientific Revolution: The Case of Einstein versus Lorentz. *Physics in Perspective*, 4, 421-446.
- Janssen, M. (2014). "No Success Like Failure . . .": Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 167-227). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Janssen, M., & Renn, J. (2007). Untying the Knot: How Einstein Found His Way Back to Field Equations Discarded in the Zurich Notebook. In M. Janssen, J. D. Norton, J. Renn, T. Sauer, & J. Stachel, *The Genesis of General Relativity* (Vol. 2, pp. 839-925). Boston, MA: Birkhäuser.
- Janssen, M., & Renn, J. (2015). History: Einstein Was No Lone Genius. *Nature*, 527(7578), 298-300.
- Jauch, J. M. (1968). *Foundations of Quantum Mechanics*. London, UK: Addison-Wesley Publishing Co.
- Jauch, J. M., & Rohrlich, F. (1955). *The Theory of Photons and Electrons*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co.
- Johnson, G. (2000, July). The Jaguar and the Fox. *The Atlantic*, pp. 82-85.
- Johnson, L. W., & Wolbarsht, M. L. (1979). Mercury Poisoning: A Probable Cause of Isaac Newton's Physical and Mental Ills. *Notes and Record of the Royal Society of London*, 34(1), 1-9.

- Jolley, N. (2005). *Leibniz*. New York, NY: Routledge.
- Jordan, P. (1927). Zur Quantenmechanik der Gasentartung. *Zeitschrift für Physik*, 44(6), 473-480.
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Kennefick, D. (2007). *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Kennefick, D. (2012). Not Only Because of Theory: Dyson, Eddington, and the Competing Myths of the 1919 Eclipse Expedition. In C. Lehner, J. Renn, & M. Schemmel, *Einstein and the Changing Worldviews of Physics* (pp. 201-232). Boston, MA: Birkhäuser.
- Kennefick, D. (2014). Einstein, Gravitational Waves, and the Theoretician's Regress. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 270-280). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kent, S. L. (2001). *The Ultimate History of Video Games*. New York, NY: Three Rivers Press.
- Kiefer, C. (2012). *Quantum Gravity* (3rd ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Klein, O. (1926). Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. *Zeitschrift für Physik*, 37(12), 895-906.
- Kline, M. (1972). *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Knox, E. (2014). Newtonian Spacetime Structure in Light of the Equivalence Principle. *The British Journal for Philosophy of Science*, 65(4), 863-888.
- Kragh, H. (1981). The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons. *Archive for History of Exact Sciences*, 24(1), 31-67.
- Kragh, H. (1990). *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kragh, H. (2012). *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925*. Oxford, UK: Oxford University

Press.

Krauss, L. (2011). *Quantum Man*. New York, NY: W. W. Norton &

Co. Krauss, L. M. (2012). *A Universe from Nothing*. New York, NY:

Free Press.

Kuhlmann, M. (2015). *The History of QFT*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrie-

ved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy: [http://](http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/quantum-field-theory/qft-history.html)

[plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/quantum-field-theory/](http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/quantum-field-theory/qft-history.html)

[qft-history.html](http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/quantum-field-theory/qft-history.html)

Kuhn, T. (1978). *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity,*

*1894-1912*. Chicago, IL: University of Chicago Press.

Kuhn, T. S. (1962). The Historical Structure of Scientific Discovery.

*Science*, 136(3518), 760-764.

Kursunoglu, B. N., & Wigner, E. P. (1990). *Paul Adrien Maurice Di-*

*rac: Reminiscences about a Great Physicist*. Cambridge, UK:

Cambridge University Press.

Landsman, N. P. (2006). When Champions Meet: Rethinking the

Bohr-Einstein Debate. *Studies in History and Philosophy of Modern*

*Physics*, 37(1), 212-242.

Lehner, C. (2014). Einstein's Realism and His Critique of Quantum

Mechanics. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Compa-*

*nion to Einstein* (pp. 306-353). Cambridge, UK: Cambridge Univer-

sity Press.

Leibniz, G. W. (1989). *Philosophical Essays*. (R. Ariew & D. Garber,

Eds.). Indianapolis, IN: Hackett Publishing Company.

Leibniz, G. W., & Clarke, S. (2000 [1715-16]). *Correspondence*. (R.

Ariew, Ed.). Indianapolis, IN: Hackett Publishing Company.

Leone, M., & Robotti, N. (2010). Frédéric Joliot, Irène Curie and the

Early History of the Positron. *European Journal of Physics*, 31, 975-

987.

Lerche, W., Lüst, D., & Schellekens, A. N. (1987). Chiral Four-

Dimensional Heterotic Strings from Self-Dual Lattices. *Nuclear Phy-*

*sics B*, 287, 477-507.

l'Hôpital, G. d. (1696). *Analyse des Infiniment Petits pour l'Intelligen-*

- ce des Lignes Courbes*. Paris: L'Imprimerie Royale.
- Look, B. C. (2014). *Gottfried Wilhelm Leibniz*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/leibniz/>
- Lorentz, H. A. (1892). De relatieve beweging van de aarde en den aether. *Verslagen van de gewone vergaderingen der Afdeling voor de Wis-en Natuurkundige Wetenschappen*, 74-79.
- Lorentz, H.A. (1895). *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: E. J. Brill.
- Lorentz, H. A. (1899). Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)*, 1, 427-442.
- Lupher, T. (2010). Not Particles, Not Quite Fields: An Ontology for Quantum Field Theory. *Humana.mente*, 13, 155-173.
- Maddy, P. (2007). *Second Philosophy: A Naturalistic Method*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Mahon, B. (2003). *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Malament, D. B. (1996). In Defense of Dogma: Why There Cannot Be a Relativistic Quantum Mechanics of (Localizable) Particles. In R. Clifton, *Perspectives on Quantum Reality: Non-Relativistic, Relativistic, and Field-Theoretic* (pp. 1-10). Dordrecht: Kluwer.
- Malament, D. B. (2009, November). *Lecture Notes on Geometry and Space-Time*. Retrieved from <http://www.socsci.uci.edu/~dmalament/courses/geometr spacetime docs/GST.pdf>
- Malament, D. B. (2012). *Topics in the Foundations of General Relativity and Newtonian Gravitation Theory*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Manuel, F. E. (1968). *A Portrait of Isaac Newton*. Cambridge, MA: Belknap Press.
- Maria, M. d., & Russo, A. (1985). The Discovery of the Positron. *Rivista di Storia della Scienza*, 2, 237-286.
- Maudlin, T. (1994). *Quantum Non-Locality and Relativity*. Oxford,

- UK: Blackwell Publishing.
- Maxwell, J. C. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512.
- Maxwell, J. C. (1891). *A Treatise on Electricity and Magnetism* (3rd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.
- McDonough, J. K. (2014). *Leibniz's Philosophy of Physics*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/leibniz-physics/>
- Mehra, J. (1994). *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Mehra, J., & Milton, K. A. (2000). *Climbing the Mountain: The Scientific Biography of Julian Schwinger*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Mehra, J., & Rechenberg, H. (1982-2001). *The Historical Development of Quantum Theory*. New York, NY: Springer-Verlag.
- Meli, D. B. (1993). *Equivalence and Priority: Newton versus Leibniz*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Meli, D. B. (2002). Newton and the Leibniz-Clarke Correspondence. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 455-464). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mercer, C. (2004). *Leibniz's Metaphysics: Its Origins and Development*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mercer, C., & Sleight, J. R. (1995). Metaphysics: The Early Period to the Discourse on Method. In N. Jolley, *The Cambridge Companion to Leibniz* (pp. 67-123). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Meyer, H. W. (1972). *A History of Electricity and Magnetism*. Norwalk, CT: Burndy Library.
- Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*, 34, 333-345.
- Miller, A. (1994). *Early Quantum Electrodynamics: A Sourcebook*.

- Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Milonni, P. W. (1994). *The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics*. San Diego, CA: Academic Press.
- Minkowski, H. (1909). Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 104-111. Minkowski, H. (2012). *Space and Time: Minkowski's Papers on Relativity*. (V. Petkov, Ed., & F. L. Petkov, Trans.). Montreal, CD: Minkowski Institute Press.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. New York, NY: W. H. Freeman.
- Mott, N. (1986). *A Life in Science*. London, UK: Taylor and Francis.
- Moyer, D. F. (1981a). Origins of Dirac's Electron, 1925-1928. *American Journal of Physics*, 944-949.
- Moyer, D. F. (1981b). Evaluations of Dirac's Electron, 1928-1932. *American Journal of Physics*, 49(11), 1055-1062.
- Moyer, D. F. (1981c). Vindications of Dirac's Electron, 1932-1934. *American Journal of Physics*, 49(12), 1120-1125.
- Murdoch, D. (1989). *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Neffe, J. (2009). *Einstein: A Biography*. (S. Frisch, Trans.). Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Nersessian, N. (1984). *Farady to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Newton, I. (1962). On the Gravity and Equilibrium of Fluids. In A. R. Hall & M. B. Hall, *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton* (pp. 89-156). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Newton, I. (1981). *The Mathematical Papers of Isaac Newton* (Vol. VIII: 1697-1722). (D. T. Whiteside, Ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Newton, I. (1999 [1687/1713/1726]). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. (I. B. Cohen & A. Whitman, Eds.). Berkeley, CA: University of California Press.
- Norton, J. D. (1984). How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 14, 253-316.

- Norton, J. D. (2004). Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics Prior to 1905. *Archive for History of Exact Sciences*, 59, 45-105.
- Norton, J. D. (2007). *How Did Einstein Think?* Retrieved from John Norton's Goodies Page: [http://www.pitt.edu/~jdnorton/Goodies/Einstein\\_think/index.html](http://www.pitt.edu/~jdnorton/Goodies/Einstein_think/index.html)
- Norton, J. D. (2014). Einstein's Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies That Led Him to It. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 72-102). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Odom, B., Hanneke, D., D'Urso, B., & Gabrielse, G. (2007). New Measurement of the Electron Magnetic Moment Using a One-Electron Quantum Cyclotron. *Physical Review Letters*, 97(3), 030801.
- Pais, A. (1982). *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Pais, A. (1993). *Niels Bohr's Times: In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Pais, A. (1998). Paul Dirac: Aspects of His Life and Work. In A. Pais, M. Jacob, D. I. Olive, & M. F. Atiyah, *Paul Dirac: The Man and His Work* (pp. 1-45). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Palais, R. (1981). *The Geometrization of Physics*. Hsinchu, Taiwan: National Tsing Hua University.
- Pashby, T. (2012). Dirac's Prediction of the Positron: A Case Study for the Current Realism Debate. *Perspectives on Science*, 20(4), 440-475.
- Pauli, W. (1949). Einstein's Contributions to Quantum Theory. In P. A. Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (pp. 147-160). La Salle, IL: Open Court Press.
- Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Boulder, CO: Westview Press.
- Pickering, A. (1984). *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.

- Planck, M. (1900a). Ueber irreversible Strahlungsvorgänge. *Annalen der Physik*, 306(1), 69-122.
- Planck, M. (1900b). Entropie und Temperatur strahlender Wärme. *Annalen der Physik*, 306(4), 719-737.
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553-563.
- Poincaré, H. (1906). Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, 21, 129-176.
- Polchinski, J. (1984). Renormalization and Effective Lagrangians. *Nuclear Physics B*, 231, 269-295.
- Polchinski, J. (1992). Effective FieldTheory and the Fermi Surface. Retrieved from arXiv:hep-th/9210046
- Polchinski, J. (1998). *String Theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Politzer, H. D. (1973). Reliable Perturbative Results for Strong Interactions? *Physical Review Letters*, 30(26), 1346-1349.
- Pooley, O. (2013). Substantialist and Relationalist Approaches to Spacetime. In R. Batterman, *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics* (pp. 522-586). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Purcell, E.M. (1985). *Electricity and Magnetism* (2nd ed.). Boston, MA: McGraw-Hill.
- Raffner, J. A. (2012). Newton's De Gravitatione: A Review and Reassessment. *Archive for History of the Exact Sciences*, 241-264.
- Redhead, M. (1983). Quantum Field Theory for Philosophers. In P. D. Asquith & T. Nickles, *PSA 1982: Proceedings of the 1982 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* (Vol. 2, pp. 57-99). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Redhead, M. (1987). *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Redhead, M. (1988). A Philosopher Looks at Quantum Field Theory. In H. R. Brown & R. Harré, *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory* (pp. 9-24). Oxford, UK: Clarendon Press.
- Redhead, M. (1994). The Vacuum in Relativistic Quantum Field The-

- ory. In D. Hull, M. Forbes, & R. M. Burian, *PSA 1994: Proceedings of the 1994 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* (pp. 77-87). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Redhead, M. (1995). More Ado about Nothing. *Foundations of Physics*, 25(1), 123-137.
- Rejzner, K. (2016). *Perturbative Algebraic Quantum Field Theory*. Heidelberg: Springer.
- Renn, J. (2007). *The Genesis of General Relativity*. Berlin, Germany: Springer.
- Renn, J. (2013). Schrödinger and the Genesis of Wave Mechanics. In W. L. Reiter & J. Yngvason, *Erwin Schrödinger—50 Years After* (pp. 9-36). Zürich: European Mathematical Society.
- Renn, J., & Sauer, T. (2007). Pathways out of Classical Physics. In M. Janssen, J. D. Norton, J. Renn, T. Sauer, & J. Stachel, *The Genesis of General Relativity* (Vol. 1, pp. 113-312). Boston, MA: Birkhäuser.
- Rickles, D. (2014). *A Brief History of String Theory: From Dual Models to M-Theory*. Berlin: Springer-Verlag.
- Riles, K. (2013). Gravitational Waves: Sources, Detectors and Searches. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 68, 1-54.
- Romer, M., & Cohen, I. B. (1940). Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676). *Isis*, 31(2), 327-379.
- Roque, X. (1997). The Manufacture of the Positron. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 28(1), 73-129.
- Rovelli, C. (2001). *Notes for a Brief History of Quantum Gravity*. Retrieved from arXiv:gr-qc/0006061.
- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rugh, S. E., Zinkernagel, H., & Cao, T. Y. (1999). The Casimir Effect and the Interpretation of the Vacuum. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 111-139.
- Rynasiewicz, R. (1995a). By Their Properties, Causes and Effects: Newton's Scholium on Time, Space, Place and Motion—I. The Text. *Studies in History and Philosophy of Science*, 26(1), 133-153.
- Rynasiewicz, R. (1995b). By Their Properties, Causes and Effects:

- Newton's Scholium on Time, Space, Place and Motion—II. The Context. *Studies in History and Philosophy of Science*, 26(2), 295-321.
- Sabra, A. I. (1981). *Theories of Light, from Descartes to Newton*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sauer, T. (2014). Einstein's Unified Field Theory Program. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 281-305). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sauer, T. (2015). Marcel Grossman and His Contribution to the General Theory of Relativity. In R. T. Jantzen, K. Rosquist, & R. Ruffini, *Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity* (pp. 456-503). Singapore: World Scientific.
- Saunders, S. (1991). The Negative-Energy Sea. In S. Saunders & H. R. Brown, *The Philosophy of Vacuum* (pp. 65-109). Oxford, UK: Clarendon Press.
- Saunders, S. (2002). Is the Zero-Point Energy Real? In M. Kuhlmann, H. Lyre, & A. Wayne, *Ontological Aspects of Quantum Field Theory* (pp. 313-344). Singapore: World Scientific.
- Saunders, S. (2013). Rethinking Newton's Principia. *Philosophy of Science*, 80(1), 22-48.
- Schaffner, K. F. (1972). *Nineteenth-Century Aether Theories*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Schellekens, A. N. (2006). *The Landscape "avant la lettre."* Retrieved from arXiv:physics/0604134.
- Schrödinger, E. (1926a). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*, 385(13), 437-490.
- Schrödinger, E. (1926b). Quantisierung als Eigenwertproblem, II. *Annalen der Physik*, 384(6), 489-527.
- Schrödinger, E. (1926c). Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinem. *Annalen der Physik*, 384(8), 734-756.
- Schulmann, R., Kox, A. J., Janssen, M., & Illy, J. (1998). Editorial Note: The Einstein-De Sitter-Weyl-Klein Debate. In A. Einstein, R. Schulmann, A. J. Kox, M. Janssen, & J. Illy (Eds.), *The Collected*

- Papers of Albert Einstein* (Vol. 8, pp. 351-357). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Schwartz, M. D. (2013). *Quantum Field Theory and the Standard Model*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 7, 189-196.
- Schweber, S. S. (1994). *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Schwinger, J. (1969). *Particles, Sources, and Fields* (Vol. 1). New York, NY: Gordon Breach, Science Publishers.
- Sciama, D. W. (1991). The Physical Significance of the Vacuum State of a Quantum Field. In S. Saunders & H. R. Brown, *The Philosophy of Vacuum* (pp. 137-158). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Sen, A. (1982). Gravity as a Spin System. *Physics Letters B*, 119(1-3), 89-91.
- Shapin, S., & Schaffer, S. (1985). *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Shapiro, A. (2002). Newton's Optics and Atomism. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 227-255). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Shapiro, A. E. (2013). Newton's Optics. In J. Z. Buchwald & R. Fox, *The Oxford Handbook of the History of Physics* (pp. 166-198). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Shimony, A. (1963). Role of the Observer in Quantum Theory. *American Journal of Physics*, 31, 755-773.
- Silverberg, R. (1965). *Niels Bohr: The Man Who Mapped the Atom*. Philadelphia, PA: Macrae Smith Company.
- Slowik, E. (2014). *Descartes' Physics*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://>

- plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/descartes-physics/
- Smeenk, C. (2014). Einstein's Role in the Creation of Relativistic Cosmology. In M. Janssen & C. Lehner, *The Cambridge Companion to Einstein* (pp. 228-269). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Smeenk, C., & Schliesser, E. (2013). Newton's Principia. In J. Z. Buchwald & R. Fox, *The Oxford Handbook of The History of Physics* (pp. 109-165). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Smith, G. (2008, Fall). *Isaac Newton*. (E. N. Zalta, Ed.). Retrieved from the Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/newton/>
- Smith, G. E. (2002). The Methodology of the Principia. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 138-173). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Smolin, L. (2001). *Three Roads to Quantum Gravity*. New York, NY: Basic Books.
- Smolin, L. (2006). *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Boston, MA: Houghton Mifflin Company.
- Sorabji, R. (1988). *Matter, Space, and Motion: Theories in Antiquity and Their Sequel*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Spargo, P. E., & Pounds, C. A. (1979). Newton's "Derangement of the Intellect": New Light on an Old Problem. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 34(1), 11-32.
- Stachel, J. (1986). Einstein and the Quantum: Fifty Years of Struggle. In R. G. Colodny, *From Quarks to Quasars: Philosophical Problems of Modern Physics* (pp. 349-385). Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Stachel, J. (1987). Einstein and Ether Drift Experiments. *Physics Today*, 40, 45-47.
- Stachel, J. (1989). Einstein's Search for General Covariance, 1912-1915. In D. Howard & J. Stachel, *Einstein and the History of General Relativity* (pp. 63-100). Boston, MA: Birkhäuser.
- Stachel, J. (1999). The Early History of Quantum Gravity (1916-

- 1940). In B. R. Iyer & B. Bhawal, *Black Holes, Gravitational Radiation and the Universe: Essays in Honor of C. V. Vishveshwara* (pp. 525-534). Dordrecht: Kluwer.
- Stachel, J. (2005). Introduction. In A. Einstein, *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics* (pp. 3-28). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Stanley, M. (2003). "An Expedition to Heal the Wounds of War": The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer. *Isis*, 94(1), 57-89.
- Stanley, M. (2007). *Practical Mystic: Religion, Science, and A. S. Eddington*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Stanton, R. (2015). *A Brief History of Video Games*. New York, NY: Little, Brown Book Group.
- Stein, H. (1967). Newtonian Space-Time. *The Texas Quarterly*, 10, 174-200.
- Stein, H. (1970). On the Notion of Field in Newton, Maxwell, and Beyond. In R. H. Stuewer, *Historical and Philosophical Perspectives of Science* (pp. 264-287). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Stein, H. (1972). On the Conceptual Structure of Quantum Mechanics. In R. Colodny, *Paradigms and Paradoxes: The Philosophical Challenge of the Quantum Domain* (pp. 367-438). Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Stein, H. (1977). Some Philosophical Prehistory of General Relativity. In J. Earman, C. Glymour, & J. Stachel, *Foundations of Space-Time Theories* (pp. 3-49). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Stein, H. (1991). On Relativity Theory and Openness of the Future. *Philosophy of Science*, 58(2), 147-167.
- Stein, H. (2002). Newton's Metaphysics. In I. B. Cohen & G. E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 256-307). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Stein, H. (Unpublished). Further Considerations on Newton's Met-

- hods. Retrieved from <http://philsci-archive.pitt.edu/10633/>
- Stein, H. (Unpublished). On Metaphysics and Method in Newton. Retrieved from <http://philsci-archive.pitt.edu/10631/>
- Stein, H. (Unpublished). Physics and Philosophy Meet: The Strange Case of Poincaré. Retrieved from <http://philsci-archive.pitt.edu/10634/>
- Steinle, F. (2013). Electromagnetism and Field Physics. In J. Z. Buchwald & R. Fox, *The Oxford Handbook of the History of Physics* (pp. 533-570). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Stone, A. D. (2013). *Einstein and the Quantum: The Quest of the Valiant Swabian*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Streater, R. F. (1988). Why Should Anyone Want to Axiomatize Quantum Field Theory? In H. R. Brown & R. Harré, *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory* (pp. 137-148). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Streater, R. F., & Wightman, A. S. (2000). *PCT, Spin and Statistics, and All That* (rev. ed.). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Stroud, B. (1984). *The Significance of Philosophical Skepticism*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Summers, S. J. (2011). Yet More Ado about Nothing: The Remarkable Relativistic Vacuum State. In H. Halvorson, *Deep Beauty: Understanding the Quantum World through Mathematical Innovation* (pp. 317-342). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Summers, S. J. (2012). *A Perspective on Constructive Quantum Field*. Retrieved from arXiv:1203.3991 [math-ph]
- Susskind, L. (2003). The Anthropic Landscape of String Theory. In B. Carr, *Universe or Multiverse?* (pp. 247-266). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Susskind, L., & Friedman, A. (2014). *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*. New York, NY: Basic Books.
- Teller, P. (1993). Vacuum Concepts, Potentia, and the Quantum Field Theoretic Vacuum Explained for All. *Midwest Studies in Philosophy*, 18(1), 332-342.

- Teller, P. (1995). *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Tolstoy, I. (1981). *James Clerk Maxwell*. Edinburgh: Canongate.
- Trouton, F. T., & Noble, H. R. (1904). The Mechanical Forces Acting on a Charged Electric Condenser Moving through Space. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 202, 165-181.
- Tryon, E. P. (1973). Is the Universe a Vacuum Fluctuation? *Nature*, 246, 396-397.
- Turnbull, H. W. (1959). *The Correspondence of Isaac Newton*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Valente, G. (2015). Restoring Particle Phenomenology. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 51, 97-103.
- van Fraassen, B. (1991). *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Van Vleck, J. H. (1972). Travels with Dirac in the Rockies. In A. Salam & E. P. Wigner, *Aspects of Quantum Theory* (pp. 7-16). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Voltaire. (1992 [1738]). *Eléments de la philosophie de Newton*. (R. Walters & W. Barber, Trans.). Oxford, UK: The Voltaire Foundation.
- von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Wald, R. M. (1984). *General Relativity*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Wald, R. M. (1994). *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Wallace, D. (2011). Taking Particle Physics Seriously: A Critique of the Algebraic Approach to Quantum Field Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42(2), 116-125.
- Wallace, D. (2012). *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Walter, S.A. (1999). Minkowski, Mathematicians and the Mathemati-

- calTheory of Relativity. In H. Goenner, J. Renn, J. Ritter, & T. Sauer, *The Expanding Worlds* (pp. 45-86). Boston, MA: Birkhäuser.
- Warwick, A. (2003). *Masters of Theory: Cambridge and the Rise of Mathematical Physics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Weatherall, J. O. (2011). On the Status of the Geodesic Principle in Newtonian and Relativistic Physics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42(4), 276-281.
- Weatherall, J. O. (2013). *The Physics of Wall Street: A Brief History of Predicting the Unpredictable*. New York, NY: Houghton Mifflin Harcourt.
- Weatherall, J. O. (2015). Fiber Bundles, Yang-Mills Theory, and General Relativity. *Synthese*. <http://dx.doi.org/10.1007/s11229-015-0849-3>.
- Weatherall, J. O. (2016a). Maxwell-Huygens, Newton-Cartan, and Saunders-Knox Spacetimes. *Philosophy of Science*, 83(1), 82-92.
- Weatherall, J. O. (2016b). Regarding the "Hole Argument." *The British Journal for Philosophy of Science*. <http://dx.doi.org/10.1093/bjps/axw012>.
- Weatherall, J. O. (2016c). Are Newtonian Gravitation and Geometrized Newtonian Gravitation Theoretically Equivalent? *Erkenntnis*. <http://dx.doi.org/10.1007/s10670-015-9783-5>.
- Webb, J. (2013). *Nothing: From Absolute Zero to Cosmic Oblivion—Amazing Insights into Nothingness*. London, UK: Profile Books.
- Weinberg, S. (1987). *Elementary Particles and the Laws of Physics, The 1986 Dirac Memorial Lectures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Weinberg, S. (1995-2000). *The Quantum Theory of Fields*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Westfall, R. S. (1980). *Never at Rest*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Weyl, H. (1922). *Space-Time-Matter* (4th ed.). (H. L. Brose, Trans.). London, UK: Methuen & Co.
- Wheaton, B. R. (1983). *The Tiger and the Shark*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Wheeler, J. A., & Feynman, R. P. (1945). Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation. *Reviews of Modern Physics*, 17 (2-3), 157-181.
- Wheeler, J. A., & Feynman, R. P. (1949). *Reviews of Modern Physics*, 21(3), 425-433. Whitaker, A. (1996). *Einstein, Bohr, and the Quantum Dilemma*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Whittaker, E. T. (1951). *A History of the Theories of Aether and Electricity*. New York, NY: T. Nelson.
- Wightman, A. (1972). The Dirac Equation. In A. Salam & E. P. Wigner, *Aspects of Quantum Theory* (pp. 95-116). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wightman, A. (1989). The General Theory of Quantized Fields in the 1950s. In L.M. Brown, M. Dresden, & L. Hoddeson, *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s* (pp. 608-629). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wilson, K. G., & Kogut, J. (1974). The Renormalization Group and the Expansion. *Physics Reports*, 12(2), 75-199.
- Wise, M. N. (2003). Pascual Jordan: Quantum Mechanics, Psychology, National Socialism. In M. Renneberg & M. Walker, *Science, Technology, and National Socialism* (pp. 224-254). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Woit, P. (2006). *Not Even Wrong*. New York, NY: Basic Books.
- Wüthrich, A. (2010). *The Genesis of Feynman Diagrams*. Dordrecht: Springer

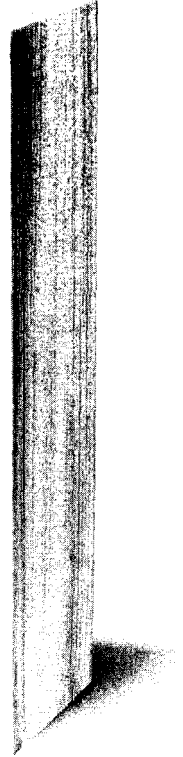


NEW YORK TIMES BESTSELLER

## ROBOTİK SAVAŞ 21. Yüzyıldaki Robotik Devrim

"Popüler kültür ve pozitif bilimleri kapsayan kaynaklardan elde edilen verilerle Singer, robotlar ile insan arasındaki ilişkinin savaşın doğasını nasıl değiştirdiğini ortaya koyuyor. Bu zamana kadar bilim kurgunun konusu olmuş yeni teknolojiler hakkında detaylı bilgi veriyor: Suyun üstünde yürüyebilen ya da penceremizin önünde havada sabit kalan ölümcül makineler, ağlara sızan ya da kendi kendine düşünebilen makineler. Bu kitabı büyüleyici, derin, eğlendirici ve korkutucu buldum."

— Howard Gordon, *24*, *The X-Files* ve *Buffy the Vampire Slayer*'in Yazarı ve Yapımcısı



# HASTA TOPLUMLAR

## İlkel Düzen Efsanesine Bir Meydan Okuyuş

“Hasta Toplamlar kitabını Türk toplumunun geleceği ile ilgilenen üniversiteli gençlerin, düşünürlerin, eğitimcilerin, siyasetçilerin, gazetecilerin okumasını isterim.”

— Doğan CÜCELOęLU

İlkel Düzen Efsanesine Bir  
Meydan Okuyuş



# Hasta Toplamlar

ROBERT B. EDGERTON

DOğAN CÜCELOęLU'N ÖN SÖZÜYLE

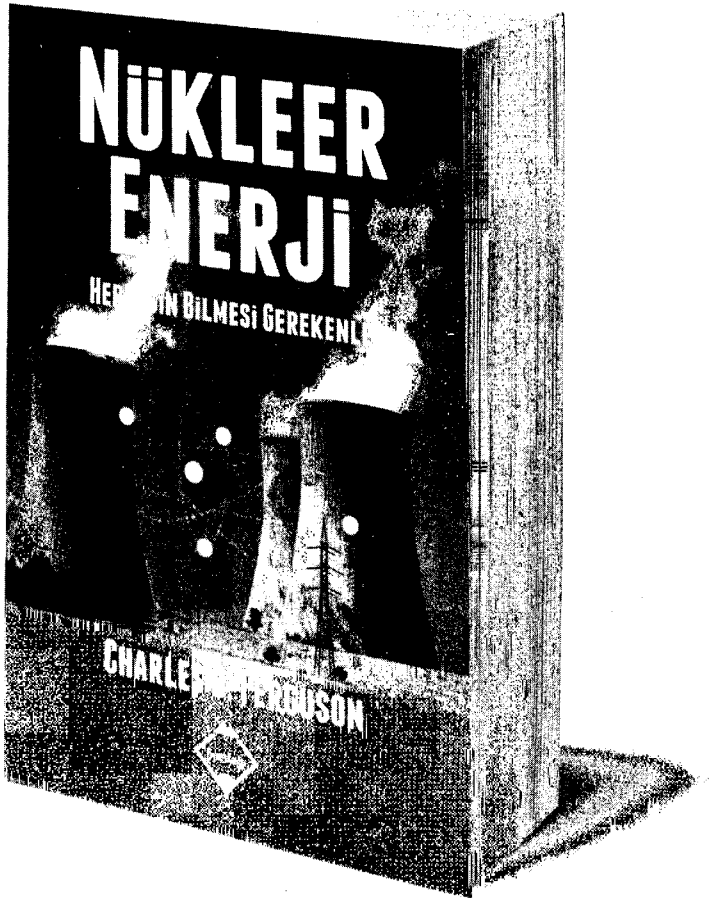


6. BASKI

# NÜKLEER ENERJİ

## Herkesin Bilmesi Gerekenler

Nükleer enerji oldukça ciddi bir konudur. Kulaktan dolma bilgiler ve sosyal medya paylaşımlarının ötesine geçip gerçekleri öğrenmek ister misiniz? Bu kitap size bunu vaat ediyor: Nükleer enerji hakkında hepimizin bilmesi gerekenleri tarafsız ve anlaşılır biçimde sunuyor. Gerçekleri bir de konunun uzmanından öğrenmek ister misiniz?



# HAYATIMIZDAKİ ALGORİTMALAR

## Günlük Kararların Bilgisayar Bilimi

"Bu kitap kesinlikle mest edici... Genç matematik öğrencilerinden sıkça duyduğunuz 'Neden ki? Bunu gerçek hayatta asla kullanmayacağım!' argümanına karşı mükemmel bir panzehir. İster Yüzde 37 Kuralının görece basit anlatımı, isterse oyun teorisinin zihimbüküm olasılıkları, tüm iş burada sunulduğu kadar hem eğlenceli hem de pratik."

—Popular Science

"Hesaplama modellerini insan psikolojisi ile birleştiren bir kitabı uzun süredir bekliyordum. Christian ve Griffiths tüm beklentilerimin üzerinde bir başarı yakaladı. Bu, dünyamızı işleten bilgisayar bilgisini -ve daha da önemlisi, hayatımız için ne anlam ifade ettiğini- herkesin anlayabileceği şekilde anlatan muhteşem bir kitap."

—David Eagleman, *Incognito: Beynin Gizli Hayatı* kitabının yazarı



İçinde mobilya olmayan bir ev düşünün. Boş mudur? Sanırım, bu soruyu cevaplamak için yeterli bilgiyi vermedik. Evde başka şeyler olabilir: İnsanlar, kıyafetler, yiyecekler ve evcil hayvanlar gibi. Bunların da olmadığını düşünün. Büyük küçük ne varsa çıkarıp atın. Yerlere paspas çekin, banyoyu pırl pırl yapın, pencerelerin tozunu alın. Şimdi ev boş mudur?

Bu kitap emlakçılık hakkında olsaydı, cevabınız muhtemelen “evet” olurdu. En azından ev yeni kiracısı için hazır denebilirdi. Peki, gerçekten boş mudur? Her ne kadar mantığımız bize odalar boştur dese de evin içinde hâlâ bir şeyler vardır. Duvarlar, yerler, elektrik kabloları, tuvaletler, küvetler ve mutfak tezgahları gibi. Bunları da çıkarın. Evi soyup soğana çevirin. Evi yıkmayacağız ama sanki evi yıkmaya hazırlandığınızı düşünün. Evin sadece kaba iskeleti kaldı. Peki şimdi boş mudur?

Elbette değildir. İçerde hâlâ hava var. Tek var olan da o değil üstelik. Ev, nüfusu büyük bir yerdeyse, büyük olasılıkla verici kuleleri de vardır ve bunların sinyalleri eve ulaşıyordur. Komşuların kablosuz internet ağları da aynı etkiye sahiptir. Evin pencereleri varsa, gündüzleri gün ışığıyla doluyordur. Radyo dalgaları ve ışınlar da elektromanyetik radyasyon çeşitlerinden olduğu için evde radyasyon vardır denebilir. Diyelim ki biri evin içinde elma düşürdü. Bu ev yüzünde bulunduğundan elma dünyanın yer çekimi etkisiyle evin zeminine düşecektir. Klasik fiziğe göre evin içinde yer çekimi alanı olduğu için ev yine boş değil denebilir.

Çok güzel, düşünmeye başladık. Bu iş giderek ince bir hâl almaya başladı. Ama biz bunun üstesinden gelebiliriz. Bu evi alıp uzaya yerleştirin; yıldızlardan veya diğer büyük kütlelerden uzakta bir yere. Havayı da boşaltın, evi her türlü radyasyondan koruyacak bir kalkan koyun. Elbette artık şimdi ev boştur. İçinde hiçbir şey yoktur. Yoksa var mıdır?

“Bilim adamları, filozoflar ve meraklı okuyucular için okumaktan zevk alacakları değerli bir kaynak.”

—Carlo Rovelli, *Fizik Üzerine Yedi Kısa Ders* kitabının

