JAMES T.
CUSHING

FİZİKTE FELSEFİ KAVRAMLAR 2

FELSEFE VE BİLİMSEL KURAMLAR ARASINDAKİ TARİHSEL İLİŞKİ

Sabancı Üniversitesi

Fizikte Felsefi Kavramlar
2

Felsefe ve Bilimsel Kuramlar Arasındaki
Tarihsel İlişki

James T. Cushing

SABANCI ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

Fizikte Felsefi Kavramlar
2

Felsefe ve Bilimsel Kuramlar Arasındaki Tarihsel İlişki

James T. Cushing

Çeviri: B. Özgür Sarıoğlu

Philosophical Concepts in Physics
The Historical Relation between Philosophy and Scientific Theories
Cambridge University Press, Cambridge, 2000

© **James T. Cushing, 1998 / Sabancı Üniversitesi, 2003**

Türkçe yayın hakları, Akcalı Ajans aracılığıyla alınmıştır
Tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında,
yayıncının yazılı izni olmaksızın,
hiçbir yöntemle çoğaltılamaz.

ISBN (takım): 975-8362-28-3
ISBN (2. cilt): 975-8362-57-7

Birinci Basım: İstanbul, Mart 2006 (2000 adet)

Yayın Yönetmeni: Zafer Karaca
Yayın Danışmanı: Tekin Dereli
Yayına Hazırlayan: İlhami Buğdaycı
Tasarım-Uygulama: 3 Tasarım
Cilt: Balkan Ciltevi
Basım: Uzerler Matbaacılık

Sabancı Üniversitesi
Orhanlı, Tuzla 81474 İstanbul
yayinlar@sabanciuniv.edu
http://yayinevi.sabanciuniv.edu
www.sabanciuniv.edu

Fizikte Felsefi Kavramlar
2

Felsefe ve Bilimsel Kuramlar Arasındaki Tarihsel İlişki

James T. Cushing

Çeviri: B. Özgür Sarıoğlu

Sabancı Üniversitesi

Fizikte Felsefi Kavramlar, bilimdeki ilerlemeleri, oluştukları tarihi ve düşünsel zeminleri göz önünde tutarak ele alıyor. Okurlara, daha öncesinde yalnızca bilimin geleneksel olarak anlatılagelen öyküleriyle verilen bakış açısından ya da geçmişe dönüp baktıklarında fen derslerindeki ödev ve çalışmalarda edindiklerinden biliyor olabilecekleri, bilimsel bir atılımın doğası üzerine derinlemesine düşünme fırsatı veriliyor. Önemli bir amaç, düşünsel olarak göz önünde tutulanların, bilimin asıl uygulamasında ve bilimsel kuramların yapımında oynadıkları temel ve göz ardı edilemez rolün okuyucunun zihnine kazınmasıdır.

Bilimsel bilgi sık sık, kabul edilegelen kesinliği ve nesnel keşif yöntemi yüzünden, özünde diğer bilgi çeşitlerinden farklı olarak görülür. Birçokları tarafından anlaşılan haliyle fizik ve felsefe, birbirlerinden herhangi iki entelektüel disiplinin uzak olabilecekleri kadar ayrık oldukları izlenimi verebilir. Bununla birlikte bu kitap, fizik ve felsefenin birbirleri üzerine bugüne dek yaptıkları ve hâlâ da yapmayı sürdürdükleri, gelişimleriyle ilgili karşılıklı etkileri örnekleriyle gösteriyor. Temel düşünsel sorunlar, özgül tarihi bağlama ve konuyla ilgili bilimsel etkinliğin asıl içeriğine sıkı sıkıya bağlı kalınarak ele alınıyor.

Önce, modern bilimin eski çağlardaki ve en başlardaki tarihi için gerekli bir giriş sunuluyor; ancak bu sırada yirminci yüzyıl fiziğini önceki yüzyıllardakinden ayıran olaylara, yani göreliliğe ve özellikle kuantum mekaniğine özel vurgu yapılıyor. Okurun temel klasik fizik üzerine az da olsa belli bir bilgi birikimi olduğu varsayılıyor, ancak görelilik ya da kuantum mekaniği konusunda herhangi bir bilgiye sahip olmadığı kabul ediliyor.

Bu kitap, daha öncesinde fiziğe giriş seviyesinde bir ders almış olan; fen, mühendislik, felsefe ve sosyal bilimler öğrencilerine, felsefenin fizikle olan ilişkisine ilgi duyan bilim insanlarına ve bilim felsefecilerine özellikle ilginç gelecektir. Ayrıca bilim felsefesi konusunda üniversite üçüncü/dördüncü sınıflarda okutulacak bir derste kaynak kitap olarak da kullanılabilir.

İçindekiler

Çevirenin Önsözü XIII

Önsöz XV

Telif Hakları İçin Teşekkürler XIX

Bölüm V 1

Mekanik Dünya Görüşüyle
Elektrodinamik Dünya Görüşü Karşı Karşıya 3

13. Eter Modelleri 5
13.1 Optik Eterin Ortaya Çıkışı 5
13.2 Esnek Katı Eter 9
13.3 Elektromanyetik Eter 10
13.4 Thomson'ın ve Maxwell'in Modelleri 12
13.5 Maxwell'in Eteri Destekleyen Savları 18
13.A Maxwell'in Eter ve Bir Uzaklıkta Etki Üzerine Düşünceleri Karşı Karşıya 19
Yararlı Kaynaklar 21

14. Maxwell Kuramı 23
14.1 Maxwell Denklemleri 23
14.2 Yer Değiştirme Akımı 26
14.3 Son Klasik Kuram 27
14.4 Michelson-Morley Deneyi 28
14.5 Göreliliğin Öncüleri 32
14.A Maxwell Denklemlerinin Matematiksel Biçimi 37
Yararlı Kaynaklar 40

15. Kaufmann Deneyleri 41
15.1 Elektromanyetik Kütleye İlişkin Birbirine Rakip Kurumlar 42
15.2 Kaufmann'ın Deneyleri 45
15.3 Planck'ın Kaufmann'ın Çalışmasını Çözümlemesi 51
15.4 e/m_0'ın Daha Sonra Yapılan Belirlemeleri 55
15.5 Sonuçlar 58
15.A Bazı Teknik Ayrıntılar 59
Yararlı Kaynaklar 61

Bölüm VI 63

Görelilik Kuramı 65

16. Özel Göreliliğin Temelleri ve Zemini 67
16.1 Albert Einstein 67
16.2 Einstein'ın Klasik Fizikle İlgili Kuşkuculuğu 72
16.3 Aksiyomlar 76
16.4 Zamanın Genişlemesi ve Uzunluğun Kısalması 80
16.5 Lorentz Dönüşümleri 84
Yararlı Kaynaklar 88

17. Einstein'in Aksiyomlarının Oluşturduğu Başka Mantıksal Sonuçlar 89
17.1 Göreli Doppler Etkisi 89
17.2 Kütle-Enerji Özdeşliği 91
17.3 İkizler Paradoksu 96
17.4 Eşzamanlılık ve Aynı Anda Var Olma 100
17.A Bazı Matematiksel Hesap Ayrıntıları 103
Yararlı Kaynaklar 104

18. Genel Görelilik ve Genişleyen Evren 105
18.1 Temel İlkeler 105

18.2 Deneysel Testler 111
18.3 Klasik Evrenin Kararlılığı 116
18.4 Einstein ve Friedmann Evrenleri 119
18.5 Hubble Yasası 123
18.6 Evrenimizin Modern Bir Modeli 127
18.A Hubble Yasasının Çıkarılması 130
Yararlı Kaynaklar 131

Bölüm VII 133

Kuantum Dünyası ve Kuantum Mekaniğinin Tamlığı 135

19. Kuantum Mekaniğine Giden Yol 137
19.1 Tarihsel Arka Plan 137
19.2 Planck Hipotezi 142
19.3 Bohr'un Yarı Klasik Modeli 145
19.4 Gerçek Buluşlarla Bulgulardan Akla Uygun Yapılar Kurma Karşı Karşıya 149
19.5 Kuantum Mekaniğine Giden İki Yol 151
19.6 Kopenhag Yorumunun Biçimlendirilmesi 156
Yararlı Kaynaklar 160

20. Kopenhag Kuantum Mekaniği 161
20.1 Bazı Basit Kuantum Mekaniksel Sistemler 162
20.2 Dalga Fonksiyonunun Yorumları 166
20.3 Büyükle Küçük Arasındaki Temel Bir Fark 170
20.4 Belirsizlik Bağıntısı 174
20.5 Foton Girişimi - Çift Yarık 177
Yararlı Kaynaklar 182

21. Kuantum Mekaniği Tam mıdır? 183
21.1 Kuantum Mekaniğinin Tamlığı 183
21.2 Einstein ve Bohr Karşı Karşıya 186

21.3 Ölçme Problemi 188
21.4 Schrödinger'in Kedisi Paradoksu 192
21.5 Dirac'ın Ölçmenin Etkisi Üzerine Düşünceleri 195
Yararlı Kaynaklar 198

Bölüm VIII 199

Kuantum Mekaniğinden Alınan Bazı Düşünsel Dersler 201

22. EPR Makalesi ve Bell Teoremi 203
22.1 EPR Paradoksu 203
22.2 EPR Makalesinin Çözümlemesi 207
22.3 Bell Teoremi 210
22.4 Bell Teoreminin Çıkarılışı 213
22.A EPRB İlintilerinin Hesaplanışı 218
Yararlı Kaynaklar 219

23. Kuantum Mekaniğinin Başka Bir Yorumu 221
23.1 Bir Özet 222
23.2 Kopenhag Yorumu 224
23.3 Mantıksal Olarak Olası, Deneysel Olarak Var Olabilir Bir Seçenek 225
23.4 Farklı Bir Yorumun Değeri 228
23.5 Açıklamayla Anlayış Karşı Karşıya 231
23.6 Kuantum Mekaniği Anlamak İçin Yapılan Denemeler 235
23.A Bohm'un Kuramının Bazı Matematiksel Ayrıntıları 238
Yararlı Kaynaklar 240

24. Tarihsel Belirsizlikler İçin Temel Bir Rol 241
24.1 Kesin Olarak Belirlenememe 241
24.2 Gerçekçi İçin Bir İkilem 246

24.3 Farklı Bir Tarihsel Senaryo 250
24.4 İçten Gelen Açıklamalarla
Dıştan Gelenler Karşı Karşıya 253
Yararlı Kaynaklar 256

Bölüm IX 257

Geriye Dönük Bir Bakış 259

25. Bilimin Hedefleri ve Bilgisinin Durumu 261
25.1 Einstein'ın Bilim ve
Bilimin Hedefleri Üzerine Düşünceleri 262
25.2 İndirgemeci Bir Çalışma Taslağı 265
25.3 Bilimsel Sonuç ve Anlam Çıkarma Biçemleri 270
25.4 Bir Doğrulama Paradoksu 275
25.5 Bilimin Paradigmâ Modeli 278
25.6 Bilimin Seçmeci Bir Tanımlaması 280
25.7 Bilimi Temel Alan Modern Bir Dünya Görüşü 283
Yararlı Kaynaklar 287

Notlar 290

Genel Referanslar 306

Bibliyografya 308

Yazar Dizini 324

Konu Dizini 327

Düzeltme 336

Nimbilasha, Christine ve Patricia'ya

Çevirenin Önsözü

Bu kitap, yazarın Önsöz'ünde de görüleceği gibi, fizikteki bazı önemli kuramların ve yasaların gelişimini, bunların olgunlaştıkları dönemin tarihi ve felsefi iklimini göz önüne alarak anlatıyor. Bunu yaparken, dönemin sosyal ortamının ve çağın öne çıkan düşünsel akımlarının fiziğe olan etkisini de sunuyor. Kitap özgün olarak yirmi beş konudan oluşuyor. Ancak kitabı ülkemiz okuyucusuyla buluştururken kitabı iki cilde ayırmanın daha uygun olacağını düşündük. Kitabın ilk yarısı, fizikte daha çok on sekizinci yüzyıla kadar geliştirilen kuramları ve bunların düşünsel etkilerini ele alırken, ikinci yarısı, özellikle bu yüzyılda öne çıkan görelilik kuramı ve kuantum mekaniği gibi çok daha modern kuramları ve bunların felsefeyle karşılıklı etkileşimlerini sunuyor.

Kitapta, sık sık doğrudan doğruya hem fiziğe hem de felsefeye önemli oranda etkide bulunmuş tarihsel kişiliklerin özgün yazılarından alıntılar yapılıyor. Bu kişilerin yazdıklarını yazıldıkları dilde okurken bile anlamak kolay olmadığından Türkçe'ye çevirmek de zor oldu. Alıntıların çevirisinde mümkün olduğunca özgün metnin anlamını birebir vermeye ve okurun özgün parçanın sunduğu 'zorlukları' hissetmesini sağlamaya çalıştık. Anlaşı-

lırlık ile metine sadık kalmanın arasındaki dengeyi tutturduğumuzu umuyoruz.

Kitabın ilk yarısında olduğu gibi, açıklanılmasının yararlı olacağını düşündüğümüz noktaların hemen ardından '(ç.n.)' ile belirtilen kısa notlar düştük. Az sayıdaki kimi teknik terimlerin karşılığını, İngilizce asıllarının Türkçe okunuşlarına karşılık gelen sözcüklerle belirttik. Aristo, Öklit gibi bizde iyi bilinen kişilikleri isimlerinin Türkçe'de yer etmiş halleriyle yazarken Einstein gibi bazı isimleri de özgün hallerindeki gibi tuttuk. Kitabın sonundaki Genel Referanslar'ın ve diğer kaynakların çoğu daha Türkçe'ye çevrilmemiş. Ayrıca kitabın ilk yarısının kendi içinde tutarlı olması kaygısıyla birinci cildin dışında bırakılan Yazar Dizini ile Bibliyografya kısımlarını elinizdeki kitabın en sonunda bulabilirsiniz. Bunun yanı sıra ilk ciltte ister istemez gözden kaçan önemli hataların düzeltilmiş hallerinin bir listesini de burada sunuyoruz.

Çeviride hata olmaması için olabildiğince titiz davrandık, ancak yine de, kaçınılmaz olarak, ortaya çıkabilecek kimi yanlışlıklar olursa, bunları da kitabın diğer baskılarında düzeltmeyi umuyoruz. Yardımlarından dolayı redaktörüm İlhami Buğdaycı'ya ve ümitsizlik anlarında beni cesaretlendiren aileme özellikle teşekkür ederim.

B. Özgür Sarıoğlu

Önsöz

Bu kitap, Notre Dame Üniversitesi'nde, güzel sanatlar, fen ve mühendislik öğrencilerine birkaç yıl verdiğim, üçüncü/dördüncü sınıf düzeyinde, bir dönemlik disiplinlerarası, seçmeli bir dersin notlarından yola çıkılarak yazıldı. Düşünsel açıdan öne çıkan bir takım seçme noktanın, fiziksel yasaların ve kuramların gelişimindeki belirli olaylar bağlamında incelenmesini sağlıyor. Bu, bazıları için rahatsız edici ancak yine de doyum verici olsa da, fen ve mühendislik bilimleri altyapısına sahip çoğu öğrencinin, aydınlatıcı olarak nitelediği bir uygulamadır. Açıklamanın önemli bir amacı, düşünsel olarak göz önünde tutulanların bilimin asıl uygulamasında oynadıkları temel ve göz ardı edilemez rolün okuyucunun zihnine kazınması olsa da, bilimin tarihine ve temel anlamına per se (ç.n. kendi başına) felsefeden daha fazla yer ayrılmıştır. Bunun nedeni, anlamlı ve yararlı bilim felsefesinin yalnızca yeni anlayışlara giden, genellikle dolambaçlı tarihsel yol bağlamı içinde yapılabileceğine inanmamdır. Bunu başka bir şekilde belirtmenin yolu da, çok az bir bilim felsefesini sağlam bir zemine oturtmak için çok fazla bilim tarihinin gerektiğidir.

Önce, modern bilimin eski çağlardaki ve en başlardaki tarihinden gerekli zemin sunuluyor; ancak yirminci yüzyıl fiziğini önceki yüz-

yıllardakinden ayıran olayların, göreliliğin ve özellikle kuantum mekaniğinin temel anlamına ve bunların onlardan hemen önce gelen öncülerine özel vurgu yapılıyor. Bu, bilimin, ne tarihinin ne de felsefesinin sistemli bir açıklaması değil; fiziğin tarihindeki ve felsefesindeki olayların ya da konuların bireysel, hatta belki de bazılarına göre fazlasıyla kişiye özel bir seçmesidir. Bilimdeki gelişmeler, oluştukları tarihi ve düşünsel zeminler göz önünde tutularak sunuluyor. Bazen 'yapı' terimi, kuramların geliştirildikleri yolları anlatmak için 'keşif'ten daha uygun düşermiş gibi görünebilir; dolayısıyla, özellikle de sonlardaki konularda, tarihi, düşünsel ve hatta sosyal etmenlerin bilimsel kuramların temel anlamına ve tam olarak biçimlerine olan etkileri sorunu ele alınıyor. Kuantum mekaniği de, bu konu için özellikle zengin bir malzeme kaynağı olarak karşımıza çıkıyor.

Okurun, klasik fizik konusunda giriş dersi düzeyinde bir yıllık bir ders aldığı ve temel bilgilere sahip olduğu varsayılıyor. Görelilik ve kuantum fiziği böyle okurlar için hâlâ yeni olacağından, kitabı hedef aldığı kitleye ulaşılabilir kılmak için, bu konular için zemin oluşturacak yeterli bilgi gerektiğince sağlanıyor. Kitabın dokuz önemli kısmının (ya da bölümünün) her birinin başında yer alan alıntılar ve konuların sonlarına konan ek materyaller, sunumun bütünlüğü için önemli parçalardır ve okunmaları gerekir. (Kitabın en son konusundan sonra yer alan Notlar kısmında bir araya getirilen) dipnotlar, literatüre verilen atıfları ve bazen de ana metin üzerine, bazı durumlarda matematiksel ayrıntılar dahil olmak üzere açıklayıcı yorumları içerir. Bu nedenlerden ötürü, dipnotlarda sağlanan bilgileri dikkate almak önemlidir. Bu notlar içinde BK, Batı Dünyasının Büyük Kitapları (Robert M. Hutchins, (editör)) için bir kısaltmadır. Birkaç konunun içerisinde, metnin ana kısmını daha geniş bir okur kitlesine uygun kılmak için matematiksel ayrıntıların ayrıldığı bir "ekler" bölümü yer alır. (Kitabın tamamında geçerli temel bir kural, metinde ileri matematiğin özellikle yer almamasıdır.) Okurlar için özel ilgi konusu olabilecek noktalar üzerinde daha fazla çalışılmak istenmesi durumunda, yardımcı ol-

mak amacıyla, her konunun sonunda ek kaynaklar verilmiştir. Dahası, kitabın sonuna doğru yer alan Genel Referanslar kısmında, tüm arka planı tamamlayıcı bilgiler için birçok eser kaynak olarak önerilmiştir. Bu kitapta atıfta bulunulan bütün kaynaklar Dizin'den önce yer alan Bibliyografya kısmında bir arada listelenmiştir.

Bu kitap, fiziğe, tarihe ve felsefeye disiplinlerarası bir yaklaşımın önemini vurgulasa ve metinde bazı birinci kaynaktan materyaller kullanılsa da, burada bir 'burada anlatılanlardan dolayı sorumlu tutulamayız' türünden (bu bir çeşit 'reklam yaparken gerçekleri söylemek' olarak düşünülmeli) bir açıklama yapmalıyız. Bilim tarihi ve felsefesi konusunda hiçbir şekilde bir uzman değilim ve ağırlıklı olarak ikincil kaynaklara dayandım. Bilim adamı olmak üzere eğitim görmüş biri olarak, fen bilimleri öğrencilerinin temel bilimle felsefe arasındaki bağlantılar üzerindeki görüşlerini genişletmekle ve bunu yaparken de tanıdıkları haliyle fizik bağlamında bu bağlantıları irdelemekle ilgileniyorum. Okurun, daha ciddi tarihsel ve felsefi incelemelerde, daha ayrıntılı çalışmayı sürdürecek kadar, bu soruya derinden ilgi duyacak hale gelmesini umuyorum. Metindeki malzeme, bir derslikte ders olarak işlenmesi durumunda, öğrenciler açısından tartışmalar ve sonrasında ek olarak okunacaklar için bir temel olarak yararlı olur. Fizikçilerin folklor 'bilgisine' ve tarihe ve felsefeye olan çarpık bakış açısına esir düşmekten kaçınamadığım yerler mutlaka vardır. Yazı biçemi genellikle resmi olmaktan uzaktır, ayrıca gerekli olabilecek tüm nitelemelere ya da açıklamalara girmek metni okunamaz hale getirirdi. Gerçek tarihçiler ve bilim felsefecileri, eminim söylediklerimden bazıları nedeniyle hoşnutsuz olacaklardır. Kaçınılmaz olarak gözlerine çarpacak olan uygunsuzluklar için, yalnızca bu sayfalarda, şimdiden özür dileyebilirim ve genel bir okurun her şeye karşın değerli ve ilginç bir şeyler bulabileceğini umarım. Burada, Notre Dame'daki ve başka yerlerdeki, bu konulardaki cehaletimi geçen yıllar süresince oldukça azaltmama yardım eden meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma teşek-

kür etmeliyim. Bilim felsefesine ve tarihine olan ilgimi, bundan yirmi yıl kadar önce, ilk kez Profesör Ernan McMullin kıvılcımladı ve bu nedenle ona teşekkür ederim - ancak 'öğrencisinin' yetersizlikleri nedeniyle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz. Profesör Ernan McMullin ile birlikte, Profesörler Samir K. Bose, Gerald L. Jones, William D. McGlinn, Stephen M. Fallon ve Robert E. Kennedy, el yazısı notlarımın bazı kısımlarını okuyacak kadar nazik davrandılar ve böylece beni bazı utanç verici durumlardan kurtardılar. Geriye kalan kusurlar yalnızca bana aittir.

Metnin baskıya girmezden önceki halinin redaksiyonundaki yardımları için özellikle Bayan Alisa N. Ellingson ve Dr Yuri V. Balashov'a, her ikisinin de metnin başlangıçtaki taslak halini okurken gösterdikleri olağanüstü özen için ve metin ile kaynakları azımsanamayacak kadar çok geliştiren son derece yararlı önerileri için gönülden teşekkür borçluyum. Çalışmaları, Notre Dame'daki Felsefe Bölümü ile Bilim Felsefesi ve Tarihi Programı tarafından desteklendi. Metindeki tüm teknik çizimlerden Bay Neal Nash sorumludur. Notre Dame Üniversitesi'ndeki Fizik Bölümü'ne ve Fen Bilimleri Yüksekokulu'na da - ve özellikle de Bölüm Başkanı Gerald L. Jones'a ve Dekan Francis J. Castellino'ya - yıllar boyunca fizikte ve felsefede disiplinlerarası dersler verebilme ve genellikle birbirinden tamamen farklı akademik alanların üst üste bindiği bölgede araştırma yapabilme özgürlüğünü sağladıkları için teşekkür ederim. Son olarak, eşim Nimbilasha, uzun yıllar boyunca bana sabır gösterdi, destek oldu ve beni yüreklendirdi, ki bunlar olmadan başlangıcı neredeyse iki on yıl öncesine giden bir projeyi tamamlamak mümkün olamazdı.

James T. Cushing

Telif Hakları İçin Teşekkürler

Belli başlı kaynaklardan birçok alıntı yapılmış materyaliyle, bu özelliklere sahip bir kitap, telif haklarını şu anda ellerinde bulunduran ya da daha öncesinde bulundurmuş olan birçok yayınevinin ve kişinin bu materyallerin kullanılmasına verdikleri izin olmaksızın mümkün olamazdı. Telif hakları yasalarının dürüstçe kullanım hükmü, yaptığım birçok alıntının yasal olduğuna onay verse ve bazı alıntılar da artık genel insanlığa ait hale gelmiş olsa da, her şeye karşın kaynak olarak kullandığım materyallerin yayıncılarının tümüyle iletişime geçtim ve bunların listesini teşekkür etmek amacıyla aşağıda vermek istiyorum. Bu metindeki her alıntı, ona eşlik eden bir dipnotta yayıncısına göre kaynak olarak gösterilmiştir ve telif hakkı bulunan materyalleri temel alarak hazırlanmış her şeklin böyle olduğu ('-den uyarlanmıştır' denerek) o şekilden ilk kez söz edilen yere uygunca konan bir dipnotla belirtilmiştir. Bütün bu yayıncılara ve kişilere teşekkür borçlu olsam da, yalnızca telif hakları bulunan materyallerin dürüstçe kullanım hükmü kavramınca tanınan iznin çok ötesine varan yayınlama izinleri için; Amerikan Fizik Derneği'ne, Britannica Ansiklopedisi'ne, Kaliforniya Üniversitesi Yayınları'na, Cambridge Üniversitesi Yayınları'na, Chicago Üniversitesi Yayınları'na, Dover Yayımcılık'a, Bayan Melitta

Mew'a, Northwestern Üniversitesi Yaymları'na, Open Court Yayımcılık Şirketi'ne ve Oxford Üniversitesi Yayınları'na sıra dışı cömertliklerini özellikle anarak teşekkür etmeliyim.

Bu durumda, telif hakkı bulunan materyallerin kullanımı için teşekkür ettiğim bütün bu yayıncıların ve kişilerin isimleri aşağıdadır. Bütün referanslar kitabın sonundaki Bibliyografya'da yer almaktadır.

Amerikan Fizik Derneği: Bloch (1976); Bohm (1952); Cushing (1981, 1982); Einstein *ve diğerleri* (1935); Frank (1949); Goldberg *ve diğerleri* (1967).

Amerikan Scientist: Jensen (1987).

Archive for History of Exact Sciences: Klein (1962).

Bantam Doubleday Dell Yayımcılık Grubu: Burtt (1927); Drake (1957); *Kudüs İncili* (1966).

C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung: Caspar (1937).

Benjamin/Cummings Yayımcılık Şirketi: Watson (1970).

The British Journal for the History of Science: Westfall (1962).

Kaliforniya Üniversitesi Yayınları: Galilei (1967); Newton (1934).

Cambridge Üniversitesi Yayınları: Archimedes (1897); Bell (1987); Bohr (1934); Descartes (1977a, 1977b); Eddington (1926); Kepler (1992); Maxwell (1890); Moore (1989); Schrödinger (1944); Ziman (1978).

Carol Yayımcılık Şirketi: Einstein (1934).

Leopold Cerf: Descartes (1905).

Chicago Üniversitesi Yayınları: Blackwell (1977); Cushing (1994); Duhem (1969); Heilbron (1985); Kuhn (1970); de Santillana (1955); Westfall (1980a).

C. J. Clay & Sons: Kelvin (1904).

Cornell Üniversitesi Yayınları: Cooper (1935).

Crown Yayımcılık: Einstein (1954a).

Daedalus: Holton (1968).

Dover Yayımcılık: Born (1951); Copernicus (1959); Heath (1981b); Jevons (1958); Lorentz (1952); Lorentz *ve diğerleri* (tarihsiz); Maxwell (1954); More (1934); Poincaré (1952).

Britannica Ansiklopedisi: Bacon (1952); Copernicus (1952); Faraday (1952); Harvey (1952); Jefferson (1952); Kepler (1952a, 1952b); Lucretius (1952); Newton (1952); Ptolemy (1952).

Harper-Collins Yayımcılık: Boorse ve Motz (1966); Heisenberg (1958, 1971); Mill (1855).

Harvard Üniversitesi Yayınları: Cohen (1971); Cohen ve Drabkin (1948); Kuhn (1957); Manuel (1968); Quine (1990).

Historical Studies in the Physical Sciences: Hanle (1979).

Johns Hopkins Üniversitesi Yayınları: Koyré (1957).

Humanities Uluslararası Yayınları: Whittaker (1973).

Profesör Max Jammer: Jammer (1989).

The Journal of Philosophy: Fine (1982b).

Kluwer Akademik Yayımcılık: Heilbron (1988); Huygens (1934).

Alfred A. Knopf: Frank (1947); Monod (1971).

Bayan Robert B. Leighton: Leighton (1959).

Literistic Ltd.: Clark (1972).

Longman, Rees, Orme, Brown ve Green: Herschel (1830).

Macmillan Yayımcılık Şirketi: Hertz (1900); Plato (1892); Thayer (1953).

McGraw-Hill Şirketleri: White (1934).

Bayan Melitta Mew: Popper (1965, 1968).

Michigan Üniversitesi Yayınları: Donne (1959).

MIT Yayınları: Feynman (1965).

John Murray Yayımcılık: Fahie (1903); Peacock (1855).

The New York Review of Books: vann Woodward (1986).

North-Holland Yayımcılık Şirketi: van der Waerden (1967).

Northwestern Üniversitesi Yayınları: Galilei (1946).

W. W. Norton & Co.: Butterfield (1965); Freud (1965).

Notre Dame Üniversitesi Yayınları: Cushing ve McMullin (1989).

Open Court Yayımcılık Şirketi: Mach (1960); Schilpp (1949).

Oxford Üniversitesi Yayınları: Aristo (1942a, 1942b, 1942c); Dirac (1958); Gell-Mann (1981); Hume (1902).

Penguin Kitapları BK: Smith (1974).

Pergamon Yayınları: Landau ve Lifshitz (1977).

Felsefe Kütüphanesi: Planck (1949); Przibram (1967).

The Philosophical Magazine: Bohr (1913).

The Philosophical Review: Quine (1951).

Princeton Üniversitesi Yayınları: Duhem (1974); von Neumann (1955).

Reports on Progress in Physics: Clauser ve Shimony (1978).

Routledge, Chapman ve Hall: Russell (1917).

Bilim Tarihi Yayınları: Cardwell (1972).

Serif Yayımcılık Şirketi: Klein (1964).

Simon & Schuster: Luria (1973); Whitehead (1967).

Sterling Lord Literistic: Koestler (1959).

Walker Yayımcılık Şirketi: Born (1971).

Profesör Richard S. Westfall: Westfall (1971).

John Wiley & Sons: Eisberg (1961); Laplace (1902).

Bölüm V

Mekanik dünya görüşüyle elektrodinamik dünya görüşü karşı karşıya

Bilim, sıradan bir gazete okuyucusuna, telgraf ve uçaklar, radyoaktivite ve modern simyanın şaşılası mucizeleri gibi, heyecan verici çeşitli utkular seçkisi olarak gösterilir. Bilimin, hakkında konuşmak istediğim yönü bu değildir. Bu yönden bilim, ancak daha yeni ve daha modern bir şeyle değiştirilene dek ilginç olan, sokaktaki adamın ilgisini çekecek pratik açıdan yararlı sonuçların - neredeyse sıradan bir olaymışçasına - ortaya çıktıkları sabırla inşa edilmiş bilgi sistemlerinden hiçbir şey göstermeyen, o an için modern ama birbiriyle bağlantısız parçalardan oluşur. Bilimle elde edilen ve giderek artan doğanın kuvvetleri üzerindeki egemenlik, bilimsel araştırmaları teşvik etmek için kuşkusuz yeterince büyük bir nedendir; ancak bu neden o kadar sık öne sürülmekte ve değeri o kadar kolay anlaşılmaktadır ki, bana göre en az bu neden kadar önemli diğer nedenler gözden kaçırılmaya uygun hale gelmektedirler. Aşağıda, bu diğer nedenlerle ve özellikle de aklın dünyaya bakış açımızı biçimlendiren bilimsel alışkanlığının özünde var olan değerle ilgileneceğim.

Telgraf örneği iki bakış açısı arasındaki farkı göstermekte işe yarayacaktır. Bu buluşun olası hale gelmesinde gerekli olan ciddi entelektüel emeğin neredeyse tamamı üç kişi tarafından sağlanmıştır - Faraday, Maxwell ve Hertz. Bu üç kişi, deney ile kuramın değişimli tabakalarında aldıkları rollerle (ç.n.: Faraday deney, Maxwell kuram ve Hertz tekrar deney ağırlıklı çalışmıştır.) elektromanyetizmanın modern kuramını inşa ettiler ve ışığın elektromanyetik dalgalarla özdeşliğini gösterdiler. Keşfettikleri sistem, görünüşe göre birbirinden bağımsız olan sonsuz çeşitlilikteki olguları bir araya getiren ve birleştiren; her cömert ruha sevinçten başka bir şey veremeyen, ama gittikçe artan bir zihin gücü sergileyen ve derin bilgi içeren entelektüel ilgi alanlarından biridir. Keşiflerinin, kullanışlı bir telgraf sistemi olarak değerlendirilebilmesi için gerekli olan ve uygun biçimde ayarlanmak üzere bırakılan mekanik ayrıntılar, hiç kuşku yok ki, hatırı sayılır derecede ustalık ve beceri gerektiriyordu; ancak bu ayrıntılar, onlara umursamaz bir derin düşünce nesnesi olarak, gerçek bir ilgi uyandırabilecek olan o geniş kapsamdan ve o evrensellikten yoksundular.

Bertrand Russell, *Bilimin Liberal Bir Eğitimdeki Yeri*

13
Eter Modelleri

14. Konu'da, (olağan ışığın yalnızca bir örnek olduğu) elektromanyetik bir dalgayı kavrayışımızın, Maxwell'in *Elektrik ve Manyetizma Üzerine Ayrıntılı Bir İnceleme* (1873) adlı büyük eseriyle, elektrik (*E*) ve manyetik (*B*) alanlarından oluşan ve (*c*) ışık hızıyla yayılan bir dalgaya dönüştüğünü göreceğiz. Bununla birlikte, su dalgaları, havadaki ses dalgaları ve titreyen bir yaydaki dalgalar gibi, doğrudan deneyim sahibi olduğumuz dalgaların çoğu bir madde ortamı aracılığıyla iletilirler. O halde akla gelecek soru, optik ve diğer elektromanyetik etkileri ileten ortamın doğasının ne olduğudur. İlk bakışta, bu etkilerin hava, su ya da katı gibi bir madde ortamı aracılığıyla iletildiklerinde fazla bir sorun olmadığı izlenimi doğabilir. Ancak elektromanyetik dalgalar, Güneş'le Dünya arasında olduğu gibi, boşluk diye adlandırılan bir ortamda iletilirler. Bu konuda ışık ve elektromanyetizma hakkındaki belirli bazı fikirlerin tarihini gözden geçiriyoruz.

13.1 Optik Eterin Ortaya Çıkışı

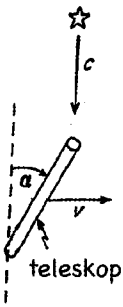
Daha önce gördüğümüz gibi, Descartes tüm uzayın *plenum* olduğuna, her yerin maddeyle dolu olduğuna ve dolayısıyla boşluğun var olamayacağına inanıyordu. Eter uzayın her yanını kaplıyordu. Ona göre etkileşimler yalnızca basınçla ve çarpışmalarla, yani bir çeşit etmenin ya da maddenin aracılığındaki somut bir etkiyle oluşabilirdi. Descartes ve sonradan Kartezyen (ç.n.: İngilizcesi 'Cartesian') okulu diye anılan takipçilerinin diğer üyeleri, bir uzaklıktaki anlık etkinin anlamsız olduğunu düşündüler. Örneğin Newton'un kütleçekim yasası (M ve m kütleleri için $F = -GMm/r^2$) ve

Coulomb'un elektrostatik yasası (Q ve q yükleri için $F = -$ *sabit* Qq/r^2) basit bir şekilde iki cisim arasındaki kuvvet yasalarını belirtirler, ama bu kuvvetin bir cisimden diğerine nasıl iletildiğini açıklamazlar. Her iki denklemde de, ortamda yaratılan değişikliğin yayılma hızı yer almaz. Bu kuramların *bir uzaklıkta etki* kuramları olarak anılmaları bu nedenledir. Descartes ışığın parçacık kuramını destekliyordu. Bu kuramın gereklerinden biri, ışığın yoğun bir ortamda seyreltilmiş bir ortamdakine ya da boşluktakine göre daha hızlı yol almasıydı. Öte yandan, Pierre de Fermat (1601–1665) ışığın daha yoğun bir ortamda daha yavaş yol alması gerektiği sonucuna yol açan (Kısım 12.1'de söz edilen en aza indirgeme ya da varyasyon ilkeleriyle ilgili) en aza indirgenmiş bir aksiyon (eylem) ilkesi ortaya koydu.

Newton'un bir çağdaşı ve rakibi olan Hooke, ışığın (ç.n.: tıpkı ses gibi) bir ortamda bir dizi salınımın yayılmasıyla iletilen bir dalga cephesi olduğunu savlayan bir kuram önerdi. Kutuplanma (ç.n.: İngilizcesi 'polarization') etkisi[1] bu kuram tarafından açıklanamıyordu, bu yüzden Newton ve diğerleri ışığın dalga özelliğine karşı tavır aldılar. Newton, *Principia*'yı yazmadan önceki yıllarda, tüm uzayın, yoğunluğu değişen bir eter ile dolu olduğuna inanıyordu. Bununla birlikte, Newton bu çalışmanın III. Kitap'ındaki Genel *Scholium*'da Kepler'in birinci ve üçüncü yasalarının yoğun bir eterin varlığıyla uyum içinde bulunmadığını öne sürdü. Bu yine de Newton'un eter fikrinden tamamıyla vazgeçtiği anlamına gelmez. Kısım 8.4'te Newton'un kendini (1690ların başlarında Richard Bentley'e (1662–1742) yazdığı bir mektupta) bir boşluk aracılığıyla uzaklıkta etki fikrinden özellikle vurgulayarak ayrı tuttuğunu ve etkinin bir ortam aracılığında doğrudan temas yoluyla iletildiğini destekler biçimde söz ettiğini gördük. Daha sonraki yıllardaysa kütleçekim etkilerinden sorumlu ve bir şekilde kendisinin Tanrı'nın aynı anda her yerde bulunabilmesi fikriyle de ilintili bir tür etkin eterin var olduğunu düşündü. Newton, bu etkin aracının doğası hakkında hiçbir zaman açık olmadıysa da, ona göre uzay asla yalnızca maddenin içinde hareket ettiği edilgen bir boşluk değildi.[2] Işık, bu eterden ayrıydı, ama onunla etkileşiyordu. Newton, yalnızca ışığın ne olduğu hakkında kütleçekimin ne olduğu konusundaki gibi açık değildi. Işığın parçacıklardan oluştuğu fikri Newton tarafından ilgili olasılıklar arasında bırakılanlardan yalnızca biri olduğu halde, onun Hooke'un dalga kuramına karşı olduğu gerçeği birçokları tarafından Newton'un

Descartes'ınkine benzer bir parçacık kuramını desteklediğinin göstergesi olarak kabul edilmiştir.

Huygens ışığın dalga kuramını destekliyordu. Huygens, birbirleriyle kesişen iki ışık demetinin birbirlerinin içinden her ikisi üzerinde de belirgin bir etki kalmadan geçmelerinden ötürü, ışığın parçacıklardan oluşamayacağını öne sürdü; çünkü aksi durumda bu parçacıklar birbirleriyle çarpışır ve kesişen ışık demetlerinde ışığın saçılması olayı gerçekleşirdi. Işık dalgalarının, yoğunluğu çok az olan ve çok esnek bir ortamda, düzensizlikler (ç.n.: İngilizcesi 'disturbance') olarak yayıldıklarını önerdi. Bu ilk dalga kuramlarında ışık bir ses dalgasına çok benzer biçimde boyuna bir dalga[3] gibi düşünüldü. Bununla birlikte Huygens'in kuramı, biraz da Newton'un tüm ağırlığıyla ışığın parçacık kuramını desteklediğine olan inançtan ötürü, kabul görmedi. Newton'un kütleçekim kuramı öylesine başarılı olmuştu ki, bir uzaklıkta etki fikri gizemli ve tamamen anlaşılmamış olsa da, kabul edilmiş bir gerçek olmuştu. Eğer kütleçekimin yayılması anlık bir olaysa o halde bir etere de gerek yoktu. Eter yoksa dalga kuramı da olamazdı ve parçacık kuramı akla daha yatkın görünüyordu. Aslında on sekizinci yüzyılın sonlarında George-Louis Lesage (1724–1803), kütleçekimin bütün uzayın tüm yönlerde yüksek hızlarda hareket eden çok büyük sayılarda ufacık parçacıklarla dolu olduğu kabul edilerek, parçacık fikriyle açıklanabileceğini önermişti. Uzayda yalnız ve hareket etmeyen tek bir cisim her taraftan eşit miktarda parçacık tarafından bombardımana uğrayacak ve dolayısıyla herhangi bir yöne doğru net bir itme kuvveti hissetmeyecekti. Bununla birlikte, birbirine yakın konumda iki cisim, birbirlerini bu bombardıman parçacıklarının akımından birbirlerine bakan taraflarında kalkan olarak kısmen koruyacak ve dolayısıyla birbirlerine doğru yönelmiş net bir itme kuvveti (ya da çekim 'kuvveti') hissedeceklerdi. Bu etkinin cisimler arasındaki uzaklığın karesinin tersiyle değişeceğini göstermek (yarıçaplarının büyüklüğü aralarındaki uzaklığa göre küçük olan iki küre için) geometrik olarak oldukça kolaydır. Bu kuramın, aralarında hareket eden bir gezegenin ön yüzünde arka yüzüne oranla daha şiddetli çarpışmalar olacağı, dolayısıyla yavaşlayacağı ve çekim etkisinin iki cismin (deneyimlerin gösterdiği gibi kütlelerinin yerine) hacimlerinin çarpımıyla orantılı olacağı gerçeklerinin de bulunduğu birçok kusuru vardır.

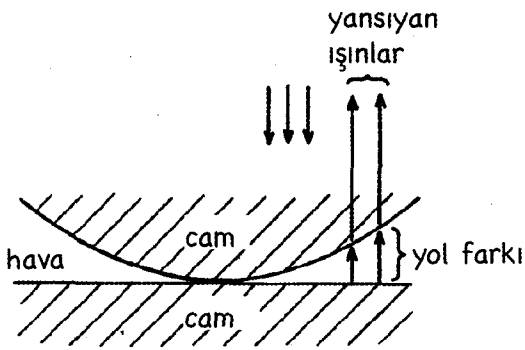


Şekil 13.1 Hareket eden bir dünya nedeniyle yıldızdan gelen ışığın sapması

James Bradley 1728'de bir yıldızdan gelen ışığın sapması olayını keşfetti. Bu, temel olarak, bir yıldız Şekil 13.1'de gösterildiği gibi tam olarak tepede yer alırsa, yıldızı görebilmek için (hareket etmekte olan bir dünyadaki) teleskopu düşeyle küçük bir α açısı yapacak kadar eğmek gerektiği demektir. Bu, düşey yönde düşen yağmur damlalarının bir soba borusu yağmurda hareket ederken eğik tutulan boru içerisinden (borunun iç çeperlerine değmeden) geçmeleriyle benzerlik kurularak, ışığın parçacık kuramını destekler yönde bir kanıt olarak kabul edilmişti. Öte yandan Euler, cisimler ortaya ışık yayarlarken fark edilebilir bir kütle kaybetmediklerinden, ışığın dalga kuramını destekliyordu. Eğer ortaya parçacıklar yayılıyorsa, bunların kütlesi ışık kaynağının kendisinden geliyor olmalıdır, oysa ışık bir ortamdan yollanan bir dalgaysa cisim tarafından hiç kütle kaybedilmeyecektir. Euler, tüm elektrik ve hatta kütleçekim olgularının da kaynağının ışığın yayılmasından sorumlu olan eterle aynı olduğu fikrini de öne sürdü.

Işık dalgaları için yapıcı ve yıkıcı girişim kavramlarını ilk kullanan Young oldu. Young bunu, durgun bir gölün yüzeyindeki su dalgalarıyla benzerlik kurarak yaptı. Newton su dalgalarındaki yıkıcı girişim fikrini, Kısım 9.A'da gördüğümüz gibi, Tonkin Körfezi'ndeki Batshaw'da görülen normal olmayan gelgit dalgaları sorununu çözmekte kullandı. Young, Şekil 13.2'de gösterildiği gibi ışık iki farklı arayüzden yansıtıldığında görülen Newton'un girişim halkaları etkisini açıklayabilmişti. Üstteki ve alttaki yüzeyden yansıyan ışınlar iki cam yüzey arasında izlenen yolun farkına bağlı olarak yapıcı ya da yıkıcı bir biçimde girişim yapabilirler. (Kısım 9.A'da Young'dan yapılan son alıntıya bakınız.) Young, Dominique Arago (1786-1853)

ve Augustin-Jean Fresnel (1788–1827) deneysel olarak birbirlerine doksan derecelik açıyla kutuplanan iki ışık demetinin girişim etkileri oluşturamayacaklarını gösterdiklerinden ışığın enine titreşimlerden[4] oluştuğunu öne sürdü; böylece ışığın yayıldığı yöne dik yönde birbirleriyle doksan derecelik açı yapan birbirinden bağımsız iki tane kutuplanma yönü oluyordu. Eterde cisimlerin başlangıçtaki durumlarına dönmelerini sağlayan kuvvetlerin, eterin yanal konum değişikliğiyle orantılı olduğu kabul edildi. Bu sıralarda ışığın dalga kuramı sağlam bir şekilde kurulmuştu. Jean-Bernard Foucault (1819–1868) ve Armand-Hippolyte Fizeau (1819–1896) 1850'de ışığın sudaki hızını dolaysız bir yolla ölçtüler ve bu hızın ışığın havadaki hızından daha az olduğunu buldular. Bu, dalga kuramı için önemli bir zaferdi.



Şekil 13.2 Newton'un girişim halkaları

13.2 Esnek Katı Eter

Eski Kıta'da ve İngiltere'de büyük matematikçilerden oluşan kuşaklar şimdi esnek katı eter kuramı üzerinde çalışıyordu. Claude-Louis Navier (1785–1836) esnek bir ortam için kesin matematiksel hareket denklemleri geliştirdi. Augustin-Louis Cauchy (1789–1857) aynı denklemler üzerinde çalıştı ve Poisson bu denklemlere bir çözüm buldu. Poisson, sıkıştırılabilen (ç.n.: İngilizcesi 'compressed') ve biçimi değiştirilebilen herhangi bir esnek katı cisim için hem enine hem de boyuna dalgaların var olması gerektiğini gösterdi.

James MacCullagh (1809–1847) 1839'da genellikle olageldiği gibi sıkıştırılmaya ve biçiminin değiştirilmesine karşı direnç

gösterenler yerine, onu oluşturan öğelerin yalnızca dönme hareketlerine bağlı bir potansiyel enerjisi olan yeni bir tür esnek katı cisim önerdi. Böyle bir ortamda yalnızca enine dalgalar iletiliyordu ve bunların yayılma hızı da, ρ ortamın yoğunluğu ve μ de esnek ortamın dönmeye karşı katılığını ya da direncini ölçen bir sabit olmak üzere $v = \sqrt{\mu/\rho}$ ile gösteriliyordu. Matematiksel denklemlerinin formu Maxwell'in sonradan elektromanyetik alan için önereceklerininkine benziyordu. MacCullagh yalnızca enine dalgaları iletecek bir esnek ortam problemini matematiksel olarak tutarlı bir biçimde çözmüştü. Bununla birlikte, çalışması kırk yılın üzerinde bir süre boyunca hiçbir zaman fazla ciddiye alınmadı; çünkü cismin yalnızca hacimsel öğelerinin dönmesine karşı direnç gösteren ve sıkıştırılamaz olan böylesine tuhaf bir katı ortam için akla yatkın bir mekanik model bulunmuyordu.

Büyük Alman matematikçisi Riemann, 1853 yılında sıkıştırılmayla ilgili özellikleri kütleçekim ve elektrostatik etkilerden, dönmeyle ilgili özellikleri de optik ve manyetik olgulardan sorumlu olan sıkıştırılmaya ve dönmeye karşı direnç gösteren bir eter önerdi. Optik ile elektromanyetizmanın birleştirilmesi işine başladı. Ne yazık ki Riemann bu kuramı asla ciddi olarak sürdürmedi. Herhalde eter için yalnızca optik olguları ele alan ciddi bir esnek katı model girişimlerinin en sonuncusu 1867 yılında Joseph Boussinesq (1842-1929) tarafından bulunandır. Onun kuramında maddesel cisimlerin ister içinde ister dışında olsun, her yerde aynı olan yalnızca bir tek eter vardı. Maddelerin optik özelliklerinden sorumlu olan, eterin parçacıklarıyla sıradan maddelerinki arasındaki etkileşimdi. Bununla birlikte, optik etkilerden sorumlu olan, ama elektrik ve manyetik etkilere ilgisiz bu türden kısıtlı kuramların modası ışığın elektromanyetik kuramı açık bir biçimde ortaya konduktan sonra geçti. Şimdi bu gelişme üstünde duralım.

13.3 Elektromanyetik Eter

Faraday'ın manyetik kuvvet çizgilerine iliştirdiği fiziksel gerçeklikten çıkarak, etkilerinin uzaydaki bir noktadan komşusu olan bir diğerine sürekli bir şekilde yayılmasını sağlayan alan kavramı gelişti. Faraday, 'Manyetik Kuvvetin Fiziksel Çizgileri Üzerine' başlıklı denemesinde kuvvet çizgisini fiziksel bir varlık gibi ele aldı.

> Daha öncesinde bir vesileyle çubuk bir mıknatısla ilgili (mıknatısın yakınına serpiştirilen demir tozlarının kullanılmasıyla göz önünde belirginleşen) belirli bazı çizgiler betimlenmiş, tanımlanmış ve bunların mıknatısın içerisinde ya da dışarısında yer alan herhangi bir bölgedeki kuvvetin doğası, durumu, yönü ve miktarını kesin biçimde belirttiği önerilmişti. O zaman çizgiler soyut olarak ele alınmışlardı. Şimdi, zamanında söylenenlerden ayrılmadan ya da anlatılanların anlamlarına dokunmadan bu tür çizgilerin olası ve akla yatkın *fiziksel varlığı* üzerine bir incelemeye girişiliyor.[5]

Kütleçekimden, statik elektrikten, elektrik akımları ve indüksiyondan ve manyetik olgulardan gelen deneysel kanıtları özetledikten sonra şu sonuca vardı:

> Şimdi bütün bu gerçekler ve daha birçokları, mıknatısların hem içerilerinde hem de dışarılarında fiziksel kuvvet çizgilerinin var olduğuna işaret ediyor. Hem düzgün hem de eğik çizgiler olarak varlar; çünkü çevresinden yalıtılmış düzgün bir çubuk mıknatısı ya da daha özel olarak manyetik ekseni çapı boyunca uzanacak biçimde düzenli bir şekilde manyetize edilmiş yuvarlak bir çelik diski düşünürsek, karşıt kutuplarının birbirleriyle kendileri dışından eğri kuvvet çizgileri aracılığıyla ilişkili bulundukları açıktır; çünkü hiçbir düzgün doğru, kuzey ve güney kutbu özellikleri taşıyan iki noktaya aynı anda değemez. Eğri kuvvet çizgileri, düşününce, yalnızca fiziksel kuvvet çizgilerinden yapılmış olabilirler.[6]

Faraday bu fiziksel kuvvet çizgilerini, etkilerin uzayda iletilmesini sağlayan bir mekanizma olarak birbirleri üzerine etki uygulamaları şeklinde düşündü.

> Manyetik kuvvetin bir uzaklığa arada bulunan parçacıkların etkisi aracılığıyla, statik elektriğin indüktif kuvvetlerinin belirli bir uzaklığa [etkilerini bir parçacıktan hemen yakınındaki bir diğerine aktarmasıyla] aktarılmalarındaki yolla ilişkili bir biçimde iletilebileceği bana olanaklı ve - dolayısıyla neredeyse - olası görünüyor; arada bulunan parçaların şimdilik - şimdiye dek birçok kereler (çok kusurlu bir fikirle de olsa) belirttiğim gibi - şöyle ya da böyle sıra dışı bir halde bulunduklarını kabul ederek....[7]

Faraday, bu manyetik etkilerin iletilmesini sağlayacak olası bir mekanizma olarak ışığın eterini önerdi, ki böylece ışığın elektromanyetik kuramı işaret edilmiş oluyordu.

> Böylesi bir etki eterin bir işlevi olabilir; çünkü eğer eter varsa yalnızca ışınımın taşınması dışında başka kullanım alanlarının bulunacağı da tamamen olanaksız değildir.[8]

Böyle bir alan kuramı düşüncesinde temel mekanizma, uzaklıkta anında etkinin karşıtı olarak sonlu bir hızda sürekli bir iletime dayanır. Faraday, güçlü bir şekilde çağındaki matematiksel düşüncenin üstünlüğüyle düştüğü aykırılığın farkındaydı.

> Bilinen indüksiyonun kendisinin tüm durumlarda *yan yana duran parçacıkların etkisi* olduğu ve elektriksel bir uzaklıkta etkinin (başka bir deyişle alışılagelmiş indüktif etkinin) arada yer alan maddenin etkisi olmaksızın asla oluşamayacağı yönünde şüphelerim oluştu.
>
> Epinus, Cavendish, Poisson ve diğer pek çok saygıdeğer insana - ki bunların kuramlarının hepsinin indüksiyonu bir uzaklıkta etki ve düzgün doğrulardan oluşmuş olarak ele aldıklarına inanıyorum - karşı duyduğum derin saygı beni çok uzun süreden beri az önce belirttiğim düşünceden alıkoyuyordu; karşıt görüşü kanıtlayacak fırsatları her zaman kolladıysam ve ana noktayla doğrudan ilgili görünen türden deneyleri ara sıra yaptıysam da... konunun aşırı genelliği deneylerimi ancak yakın zamanlarda - ve derece derece - daha da genişletmeye ve düşündüklerimi yayınlamaya teşvik etti. Şu an alışılagelen indüksiyonun tüm durumlarda akla yatkın uzaklıklardaki parçacıkların ya da cisimlerin etkisiyle olması yerine, türlü kutupluluk hallerinden oluşan yan yana duran parçacıkların etkisiyle olduğuna inanıyorum; ve eğer bu doğruysa, böyle bir gerçekliğin ayırt edilmesi ve kanıtlanması elektrik kuvvetlerin doğasının incelenmesinde daha fazla ilerleyebilmemiz bakımından çok önemli sonuçlara yol açmalıdır.[9]

13.4 Thomson'ın ve Maxwell'in Modelleri

Faraday'ın elektrik ortam kavramına bir derece matematiksel saygınlık kazandıran, sonradan Lord Kelvin olan William Thomson (1824-1907) oldu. Thomson, 1841 yılında Cambridge'de on yedi yaşında bir birinci sınıf öğrencisiyken bazı elektrostatik problemlerindeki kuvvet çizgilerinin matematiksel olarak sonsuz büyüklükte bir katı içindeki benzer ısı problemlerindeki ısı akış çizgileriyle özdeş olduklarını gösteren bir makale yazdı. Örnek olarak artı yüklü düz bir yüzeyin karşısına yerleştirilmiş bir artı Q yükü için elektrostatik alan desenini Şekil 13.3'te, ısıl olarak yalıtılmış bir duvarın yanında konuşlandırılmış bir ısı kaynağından çıkan ısı akış çizgilerinin desenini de Şekil 13.4'te gösteriyoruz. Yük ısı kaynağının ve kuvvet çizgileri de ısı akış çizgilerinin rolünü oynarken, bu problemler için geçerli matematiksel denklemler özdeştir. Bu kesin benzerliğin önemi, bir uzaklıkta etki kavramıyla betimlenmiş bir kuramla (elektrostatik) maddesel bir ortam içinde bir parçacıktan yanındaki bir diğerine aktarım düşüncesiyle açıklanmış bir diğer kuram (düz-

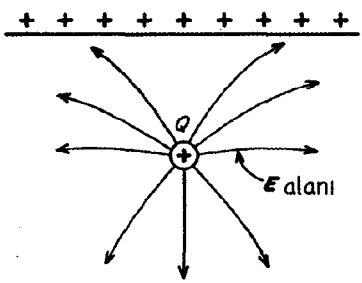
gün ısı akışı) arasında ilişki kurmasıdır. Faraday, düşüncelerine sağlanan bu destekten dolayı mutluydu.

> Profesör W. Thomson statik elektriğe uygulanmış kuvvet çizgilerine benzer bir fikirden ve Fourier'nin ısı için hareket yasasından söz ederken kuvvet çizgilerinin Coulomb'un kuramıyla aynı matematiksel sonuçları verdiğini ve bunları sonuncusundan daha kolay (eğer olanaklıysa) bir çözümleme süreciyle çıkardığını söylüyor; ve sonrasında '*manyetik bir ortamın kuvvet çizgileri için iletim gücü* üzerine bahsedilebilecek bir benzerlik için sağlam bir temelden' söz ediyor.[10]

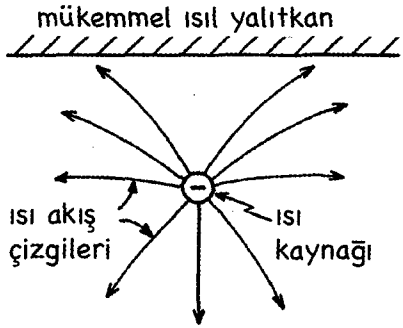
Maxwell yıllar sonra Thomson'ın bu derin kavrayışını aşağıdaki gibi değerlendirdi:

> Değeri başka bilim adamları tarafından hiçbir zaman anlaşılmayan elektriksel etkinin sürekli bir ortam aracılığıyla taşındığı düşüncesini - daha önce Faraday tarafından bildirilmesine ve kendisi tarafından araştırmalarında yol gösterici fikir olarak kullanılmasına karşın - matematiksel bilimlere ilk kez bu makale getirdi ve matematikçiler tarafından - Coulomb tarafından kurulan ve Poisson tarafından geliştirilen - elektriksel etki yasasıyla tutarsız olduğu kabul edildi.[11]

Thomson, George Green (1793-1841) tarafından kurulan doğa düşünürlerinin 'Cambridge okulu'nun ilk üyelerinden biriydi. Newton'un çağıyla Green'inki arasındaki - neredeyse yüz yıllık - sürede Cambridge, Eski Kıta'nın koca matematiğinden çok geride kalmıştı. Green'in çalışmaları Cambridge'de yeni bir gelenek başlattı. William Strutt (Lord Rayleigh) (1842-1919), Maxwell, Horace Lamb (1849-1934), Joseph Thomson (1856-1940), Joseph Larmor (1857-1942) ve Augustus Love (1863-1940) onu izleyecekti.



Şekil 13.3 İletken bir düzlem yakınındaki elektrik kuvvet çizgileri



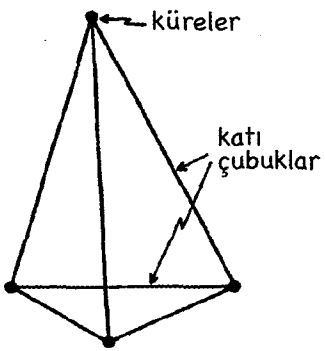
Şekil 13.4 Yalıtkan bir düzlem yakınındaki ısı akış çizgileri

Thomson 1846 yılında, elektrik alanıyla gerilim altındaki esnek bir cismin öğelerinin konum değişimi arasındaki benzerliği inceledi. *E* elektrik alanını dengeden ortaya çıkan bu yer değiştirmelerle bir düşündü. On yıl sonra, manyetik bir alan bir ışık dalgasının kutuplanma düzleminde dönmeye neden olduğundan *B* manyetik alanının dönel (ç.n.: İngilizcesi 'rotary', bir eksen etrafında dönen) açıklamasını önerdi. Thomson 1889 yılında daha önce MacCullagh tarafından önerilen, içindeki ortamın yalnızca onu oluşturan öğelerinin dönme hareketine direnç gösterdiği, sıkıştırılamayan ve biçimi değiştirilemeyen eter tipi için mekanik bir model geliştirdi. Katı eterin, Şekil 13.5'te gösterildiği gibi köşelerinde birbirine komşu kürelerin bulunduğu düzgün bir dört yüzlü (bir piramit) şeklinde dizilmiş kürelerden oluştuğunu düşündü. Her küre komşularına katı çubuklarla bağlıydı; öyle ki çubuklar küreler üzerinde kaymalarını sağlayan küresel keplere de sahipti. Bu tür bir düzenleme sıkıştırılmaya karşı değişmez kalıyordu. Her katı çubuğun üzerinde, bağlantı sağlayan bu çubukların yönlendirilişlerindeki herhangi bir değişikliğe karşı Newton'un birinci eylemsizlik yasası uyarınca direnecek, birbirine ters yönde dönen bir çift düzen teker (ç.n.: bir mil etrafında dönen ve açısal hızdaki değişimleri olabildiğince azaltmaya yarayan ağır teker) takılıydı (bakınız Şekil 13.6). Thomson'ın elektromanyetizmanın bu türden bir mekaniksel açıklaması için gösterdiği ilk çabaları genç Maxwell'in dikkatini çekmişti. Maxwell, çok sonraları ünlü *İnceleme*'sinin önsözünde hem Faraday'a hem de Thomson'a olan kavramsal borcunu kaydetmişti.

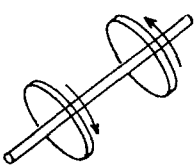
Elektrik üzerinde çalışmaya başlamadan önce Faraday'ın *Elektrik Üzerine Deneysel Araştırmalar* adlı eserini ilk kez okuyana dek konuyla ilgili hiç matematik okumamaya karar vermiştim. Faraday'ın olayları düşünme şekliyle matematikçilerinki arasında bir fark olması gerektiğinin farkındaydım; çünkü ne o ne de diğerleri birbirlerinin kullandığı dilden tatmin olabiliyordu. Bu uyumsuzluğun iki taraftan herhangi birinin yanılması nedeniyle olmadığı kanısına da sahiptim. Buna ilk kez, konu hakkında öğrendiğim çoğu şey için yayınlanmış makalelerine olduğu kadar, verdiği öğütlere ve yardımlara da borçlu olduğum Sir William Thomson tarafından inandırıldım.

Faraday'ı çalışmaya devam ederken, olayları düşünme yönteminin geleneksel matematiksel simgeler yoluyla açıkça sergilenmemiş olsa da, aslında matematiksel olduğunu kavradım. Aynı zamanda bu yöntemlerin olağan matematiksel biçimlerde ifade edilebileceklerini ve dolayısıyla nitelikli matematikçilerinkilerle karşılaştırılabileceklerini de buldum.

Örnek olarak Faraday, aklının gözüyle uzayın tümü içinden geçen kuvvet çizgileri görürken, matematikçiler belli bir uzaklıkta çeken kuvvet merkezleri görüyorlardı: Faraday bir ortam görürken onlar uzaklık dışında bir şey görmüyorlardı; Faraday olayların oturdukları yeri ortamda süre giden gerçek etkilerde arıyordu, onlarsa bunu elektrik sıvıları üzerine etki ettirilen bir uzaklıktaki etkinin gücünde bulduklarını düşünerek hoşnuttular.



Şekil 13.5 'Eter'in bir öğesi

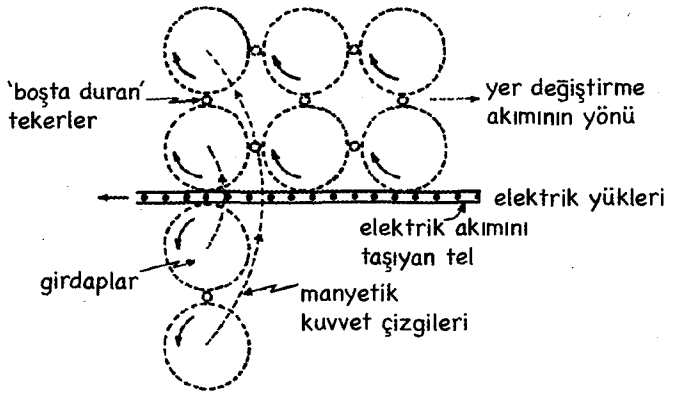


Şekil 13.6 Birbirine ters yönde dönen düzen tekerler

> Faraday'ın fikirleri olduğunu düşündüklerimi matematiksel bir biçime çevirdiğimde, iki yöntemin sonuçlarının genellikle birbirleriyle aynı olduklarını buldum, böylelikle hem aynı olayların nasıl oldukları açıklanmış hem de her iki yöntem tarafından da aynı etki yasaları ortaya çıkarılmış oluyordu; fakat Faraday'ın yöntemleri bütünden başlayıp çözümlemelerle parçalara ulaştıklarımıza benzerken, olağan matematiksel yöntemler parçalardan başlayıp sentez yoluyla bütünü oluşturma ilkesi üzerine kuruluydular.
>
> Ayrıca matematikçiler tarafından keşfedilmiş en verimli araştırma yöntemlerinin bazılarının özgün biçimlerinde olmak yerine, Faraday tarafından elde edilen fikirler cinsinden çok daha iyi ifade edilebildiklerini de buldum.[12]

Maxwell, sonuç olarak Thomson'ın B manyetik alanını eterin dönme hareketiyle bir düşünmesini kabul etti ve dahası E elektrik alanının da kaynakları ve eviyeleri olan sıkıştırılamaz bir sıvının hızı olduğunu gördü. Maxwell'in 1860lı yıllarda denklemlerini açıklamaya çalıştığı mekanik model tipi Şekil 13.7'de gösterilmiştir.[13] Bu resimde esnek bir eterin içinde elektrik yükleri ve 'boşta duran' (ç.n.: sanki rölantide çalışan bir motora bağlıymış gibi) tekerler rolünü oynayan küçük parçacıklardan oluşmuş tabakalar boydan boya yayılmış halde bulunurlar. Tel içinde akan elektrik akımı yakın komşuluğundaki eterin dönerek girdap oluşturmasına neden olur. Tel ortak merkezine sahip kapalı girdap 'iplikçiklerinden' oluşan ilmekler manyetik alan çizgileridir. Telin hemen yanı başındaki dönen girdap tabakası eterdeki parçacıkların (şekilde sağa doğru) harekete geçmesine neden olur. Bununla birlikte, eter esnek olması nedeniyle bu parçacıkların yalnızca küçük miktarda yana doğru konum değişikliğine izin verir; dolayısıyla en baştaki bu çok sınırlı konum değişikliğinden sonra girdaba her zaman değmek zorunda olan ve kaymalarına izin verilmeyen parçacıklar en baştaki girdap tabakasının tersi yönde dönerler. Bu boşta dönen tekerler dönme hareketlerini bir sonraki eter tabakasına iletirler ve ilk tabakadakilerle aynı şekilde (Şekil 13.7'de telin üst tarafında kalanlar için saat yönünde, alt tarafında kalanlar için de saat yönünün tersinde) dönen ikinci bir girdap halkaları tabakası oluştururlar. Boştaki parçacıkların en baştaki yana doğru hareketi (Maxwell tarafından aynı zamanda elektriksel yer değiştirme olarak da adlandırılan) elektrik alanıyla ilişkilidir. Bu çok kısa sürede gelip geçen bir etkiydi ve yalnızca teldeki akım akmaya başladıktan sonraki kısa bir an için vardı. Benzer biçimde teldeki akım kesildiğinde, eter en baştaki denge

konumuna geri dönerken, yine çok kısa sürede gelip geçen ancak bu kez ters yönde bir elektriksel yer değiştirme oluşurdu.



Şekil 13.7 Maxwell'in elektromanyetik eter modeli

Teldeki akım değişmeden kaldığı sürece başka elektriksel yer değiştirme oluşmazdı, ama yalnızca girdap iplikçiklerinden oluşan sabit bir manyetik alan bulunurdu. Bu Faraday'ın indüksiyon yasasına bir açıklama getiriyordu. Model aynı zamanda birbirine dik bir enine E ve B alanları kümesinin değişen bir akım taşıyan bir telden dışarıya doğru nasıl yayılacağını da açıklıyordu. Benzer şekilde, elektrostatik alan da ortamın dengeden uzaklaşması sonucu oluşan bir gerilim olarak düşünülüyordu. Bu elektrik gerilimi, ortam gerilim altında kaldığı sürece var olacak ve ortamın tekrar denge konumuna dönmesine izin verildiğinde de yok olacaktı.

Maxwell, 1861 yılında Thomson'a yazdığı bir mektupta bu ortamı betimledi.

> 'Manyetik ortamın' çok küçük parçalara ya da hücrelere bölündüğünü, bu bölümlerin ya da hücre duvarlarının tek bir küresel parçacıklar katmanından oluştuğunu ve bu parçacıkların da 'elektrik' olduklarını varsayıyorum. Hücreleri oluşturan maddenin hem sıkıştırılmaya hem de biçiminin bozulmasına karşı son derece esnek olduğunu kabul ediyorum ve hücrelerle hücre duvarları içindeki parçacıklar arasındaki ilişkinin aralarında mükemmel düzeyde kaymadan yuvarlanma olacak ve birbirlerine teğet yönde etki edecek biçimde olduğunu varsayıyorum.[14]

Sonra Thomson'a böylesi bir ortamdaki elektromanyetik yayılımın mekaniğinin ayrıntılarını anlatarak devam etti. Bunun daha kapsamlı bir betimlemesi, konunun sonundaki 13.A kısmındaki ilk parçada Maxwell tarafından verilmektedir.

13.5 Maxwell'in Eteri Destekleyen Savları

Maxwell, *Britannica Ansiklopedisi*'nin dokuzuncu baskısı için eter üzerine hazırlanmış uzun bir makaleyi, kalıcı bir mıknatısın yakınında belirsiz uzunlukta bir zaman süreci için var olması gereken girdap çizgilerini ele alarak bitirdi. İçinde girdabın oluşmasına izin verdiği bilinen herhangi bir sıvı, girdabın eninde sonunda ısı olarak dağılması gerektiğinden, aynı zamanda yapışkan (ç.n.: viskozitesi yüksek, akışkanlığa karşı daha dirençli) olmak zorundadır, bu nedenle Maxwell'in eterin bir başka tuhaf özelliğe sahip olduğunu kabul etmesi gerekti. Bununla birlikte, eterin varlığı konusunda son derece kararlıydı; hatta eterin saf fiziğin krallığı dışında da bir işlevi olacağından üstü kapalı bir biçimde söz etti.

> Bugüne dek eterin yapısı konusunda, enerjileri yavaş yavaş ortamın - bilinen ortamlar için adına ısı denilen - o düzensiz çalkalanmalarına dağılmaksızın belirsiz bir süre boyunca varlığını sürdüren böylesi bir moleküler girdap sistemini açıklayacak herhangi bir kuram icat edilmedi.
>
> Eterin yapısı konusunda tutarlı bir fikir oluşturmak yolunda ne zorluklarla karşılaşırsak karşılaşalım, gezegenler ve yıldızlar arası uzayın boş olmadığı, aksine hakkında bilgi sahibi olduklarımızın içinde kesinlikle en büyük ve olasılıkla da en değişmez (ç.n.: yoğunluğu sabit, her yerde aynı) cisim olan maddesel bir şeyle ya da kütleyle dolu olduğu hiç şüphe götürmez.
>
> Bu muazzam homojen (ç.n.: yapısı ve doğası değişmez) izotropik (ç.n.: tüm yönlerde özdeş) maddenin enginliğinin, yalnızca birbirinden uzak cisimler arasındaki fiziksel etkileşimin ortamı olmaya ve - belki de - bugüne dek hiçbir şekilde kavrayamadığımız başka fiziksel işlevleri yerine getirmeye uygun olmakla kalmayıp... aynı zamanda şu an bizimki kadar yüksek ya da bizimkinden de yüksek akıl ve yaşam işlevleri kullanan varlıkların maddesel organizmasını oluşturup oluşturmadığı sorusu fizikle ilgili spekülasyonların sınırını hayli aşar.[15]

Maxwell'in düşüncesine göre, eterin ve Faraday'ın kuvvet çizgilerinin son derece değerli bir özelliği, bunların gizemli bir uzaklıkta etki kavramının ortadan kaldırılmasına izin vermesidir. Maxwell, Londra'da Kraliyet Enstitüsü'nde (Royal Institution) verdiği bir konuşmada, bir

uzaklıkta etki düşüncesine karşı sürekli alan kavramı üzerine görüşlerini anlattı. İzleyen kısımdaki ikinci ve uzun alıntıda bunun bir parçası verilmektedir. Maxwell'in bu ve başka yazıları, onun eteri elektromanyetik olayların yayılımı için gerçekten de var olan bir fiziksel ortam olarak ne kadar ciddiye aldığını açıkça göstermektedir.

13.A Maxwell'in Eter ve Bir Uzaklıkta Etki Üzerine Düşünceleri Karşı Karşıya

Maxwell, eteri betimlerken (Şekil 13.7'e bir kez daha bakınız) şöyle yazdı:

> Bu makalenin ilk kısmında mıknatıslar, elektrik akımları ve manyetik indüksiyona yol açabilen maddeler arasındaki kuvvetlerin, manyetik alanın - eksenleri alanın her noktasında manyetik kuvvetin yönüyle aynı yönde olan - dönen maddenin sayısız girdabıyla işgal edildiği hipoteziyle nasıl açıklanabildiğini gösterdim.
>
> Bu girdapların merkezkaç kuvveti, en son etkisi yön ve büyüklük olarak gözlemlediğimizinkiyle tıpatıp aynı olan bir kuvvet çıkacak şekilde dağıtılmış basınçlar oluşturur.
>
> İkinci kısımda bu dönme hareketlerinin eş zamanlı olarak var olabilmelerini ve manyetik kuvvet çizgilerinin bilinen yasalarına göre dağıtılmalarını sağlayacak mekanizmayı betimledim.
>
> Dönen maddenin - hücrelerle karşılaştırıldıklarında çok küçük parçacıklardan yapılmış hücre duvarlarıyla birbirlerinden ayrılmış - belirli hücrelerin özünü oluşturduklarını ve dönme hareketinin bu parçacıkların hareketi - ve onların hücrelerdeki maddeye olan teğet yöndeki etkisi - sayesinde bir hücreden diğerine aktarıldığını düşündüm.
>
> Bu teğet yöndeki etkiyi açıklamayı denemedim; fakat dönme hareketinin her hücrenin dış kısımlarından iç kısımlarına aktarılmasını açıklamak için, hücrelerdeki maddenin katı cisimlerde gözlemlenen biçim esnekliğine benzer - ama derece olarak farklı - türde bir esnekliğe sahip olduğunu varsaymak gerekir. Işığın dalga kuramı, enine titreşimleri açıklayabilmek için ışığı ileten ve oluşturan ortamda bu türden bir esnekliğin bulunduğunu kabul etmemizi gerektirir. O halde manyetik-elektrik ortam da aynı özelliğe sahip olursa şaşırmamamız gerekir.
>
> Hücreler arasındaki bölünmeleri oluşturan parçacıklar kuramımıza göre elektriğin maddesini teşkil ederler. Bu parçacıkların hareketi elektrik akımını oluşturur; hücrelerin maddesi tarafından bu parçacıklara uygulanan teğet yöndeki kuvvet elektromotor kuvvettir ve parçacıkların birbirleri üzerine uyguladıkları basınç da elektriğin gerilimine ya da potansiyeline karşılık gelir.[16]

Maxwell, etere karşı bir uzaklıkta etki üzerine şu fikirleri savundu:

Bu akşam önünüze getireceğim yeni bir buluş yok. Sizlerden çok eski bir bahçeyi yeniden gözden geçirmenizi ve dikkatinizi insanoğlu düşünmeye başladı başlayalı tekrar tekrar ortaya atılan bir soruya çevirmenizi istemek zorundayım.

Soru kuvvetin nasıl iletildiğidir. Birbirlerinden belli bir uzaklıkta bulunan iki cismin, birbirlerinin hareketi üzerine karşılıklı etki ettiklerini görürüz. Bu karşılıklı etki, cisimler arasındaki uzayı işgal eden üçüncü bir şeyin varlığına, bir çeşit iletişim ortamına mı bağlıdır, yoksa cisimler birbirlerine araya herhangi başka bir şey girmeksizin anında mı etki ederler?

Faraday'ın alışageldiği bu türden olaylara bakış tarzı günümüzde çoğu araştırmacı tarafından benimsenen tarzdan farklıdır; özel amacım sizin Faraday'ın bakış açısıyla bakabilmenizi sağlamak ve O'nun ellerinde elektrik biliminin anahtarına dönüşen *kuvvet çizgileri* kavramının bilimsel değerini sizlere göstermek olacak.

Bir cismin belli bir uzaklıktaki bir diğerine etki edişini gözlemlerken, bu etkinin doğrudan doğruya ve anında olduğunu varsaymadan önce, genellikle iki cisim arasında herhangi bir maddi bağlantının olup olmadığını araştırırız ve eğer yaylar ya da çubuklar ya da cisimler arasındaki gözlemlenen etkiyi açıklayabilecek herhangi bir mekanizma bulursak, etkiyi doğrudan doğruya bir uzaklıkta etki fikrini kabul ederek açıklamak yerine, bu ara bağlantılar aracılığıyla anlatmayı tercih ederiz.

. . .

Birbirlerinden belli bir uzaklıkta bulunan cisimler arasındaki kuvvet, çoğu durumda aradaki uzayı işgal eden bir dizi cismin birbirini izleyen her bir çifti arasındaki bir dizi kuvvetle açıklanabilir; etkiyi bir aracı kullanarak dolaylı biçimde açıklama fikrine karşı olanlar, arada yer alan vasıtayı algılayamadığımız durumlarda şu an için kavrayamadığımız bir ortamın varlığını kabul etmek, bir cismin bulunmadığı bir yerde kuvvet uygulayabileceğini ileri sürmekten daha felsefi değil midir diye sorarlar.

Kuvvetin bu görünmez ortam aracılığıyla iletilmesi, havanın özellikleri hakkında bilgisi bulunmayan bir kişiye uzaklıkta bir etkinin herhangi bir örneği için olduğu gibi açıklanamaz olarak görülür; buna karşın bu durumda bütün süreci açıklayabiliyoruz ve etkinin ortamın bir parçasından bir diğer parçasına hangi hızla geçeceğini de belirleyebiliyoruz.

. . .

Kuvvet o halde eski sınıf bir kuvvettir - bir *vis a tergo* (ç.n.: Latince, arkadan etki eden kuvvet) durumu - arkadan yapılan sert bir itmedir.

. . .

Mıknatıslar ya da akımlar üzerine etki eden kuvvetlerle ya da elektriği ileten devrelerdeki akımların indüksiyonuyla ilgili her sorunun Faraday'ın kuvvet çizgilerinin göz önünde tutulmasıyla hangi yöntemler

aracılığıyla çözülebileceğini betimleyecek zamanım yok. Bu yerde asla unutulamazlar. Faraday, bu yeni simgecilik aracılığıyla bütün elektromanyetizma kuramını - matematiksel teknik ayrıntılardan arınmış bir dille - matematiksel bir kesinlikle ve en basit durumdan en karmaşık olanına kadar uygulanabilir bir biçimde tanımladı. Fakat Faraday burada durmadı. Geometrik kuvvet çizgileri kavramından fiziksel kuvvet çizgileri kavramına doğru devam etti. Manyetik ya da elektrik kuvvetin oluşturma eğiliminde olduğu hareketin, şaşmaz bir biçimde kuvvet çizgilerini kısaltacak ve birbirlerinden yanlara doğru yayılmalarına izin verecek şekilde olduğunu gözlemledi. Böylece ortamda kuvvet çizgisi yönünde - bir ip için olduğu gibi - bir gerilim içeren ve bütün yönlerde kuvvet çizgileriyle dik açı yapan bir basınçla birlikte bulunan bir gerginlik hali olduğunu anladı.

Bu, iplerdeki gerilim ve çubuklardaki basınç aracılığıyla uygulanan bir uzaklıkta etki ile aynı türde bir olaya çevrilmiş tamamen yeni bir uzaklıkta etki kavramıdır. Vücudumuzdaki kaslar bilinmeyen bir yolla onlara uygulayabildiğimiz o uyarıcı unsur aracılığıyla uyarıldıklarında lifleri kendilerini kısaltma ve aynı zamanda da yanlara doğru genişleme eğilimindedir. Kasta bir gerginlik hali oluşur ve kol ya da bacak hareket eder. Kas hareketlerine getirdiğimiz bu açıklama asla tam değildir. Gerginlik halinin uyarılmasının nedenine bir açıklama getirmez, hatta kasların bu gerilimi desteklemelerine izin veren kohezyon (ç.n.: bir cismin öğelerinin bir arada durmasını sağlayan moleküller arasındaki çekim) kuvvetlerini bile incelemez. Yine de, maddesel bir yapı boyunca aralıksız olarak süren bir tür etkinin yerine yalnızca birbirlerinden uzakta bir nedeni ve sonucu olduğunu bildiğimiz bir etkiyi koyduğu gerçeği, bizi bu açıklamayı hayvanların mekaniğiyle ilgili bilgilerimize gerçek bir ek olarak kabul etmemiz konusunda ikna ediyor.

Benzer nedenlerle Faraday'ın elektromanyetik alandaki gerilim düşüncesini - bu gerilmenin nasıl oluşturulduğunu bilmesek de - bir uzaklıkta etkiyi kuvvetin sürekli olarak iletilmesi aracılığıyla açıklamasının bir yöntemi olarak düşünebiliriz.[17]

Yararlı Kaynaklar

Sir Edmund Whittaker'ın *Eter ve Elektrik Kuramlarının Tarihi* adlı klasik eserinin birinci cildinin IV., V. ve VIII. Konuları, matematiksel eter kuramlarının Bradley'in çağından Maxwell'inkine dek olan evriminin teknik açıdan ayrıntılı bir tarihini sunar. Peter Harman'ın *Enerji, Kuvvet ve Madde* adlı kitabı on dokuzuncu yüzyıl fiziğinin kavramsal gelişiminin ve eterin bunda oynadığı rolün geniş bir özetini sunar. Jed Buchwald'ın *Işığın Dalga Kuramının Yükselişi* adlı eseri on dokuzuncu yüzyılın başlarındaki optik kuramını ve deneylerini ele alır.

14
Maxwell Kuramı

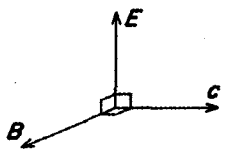
Hem deneysel nedenler hem de eterin mekanik modelleri, Maxwell'in üzerine klasik elektromanyetizma kuramını kurduğu temeli sağladılar. Bu konuda önce bu kuramın bazı biçimsel yönlerini ele alacağız, sonra da dikkatimizi onun klasik mekaniğin ilkeleriyle elektromanyetik kuramınkiler arasında derin bir çelişkiye yol açan gözlemsel sonuçlarına çevireceğiz. Bu, sonraki konularda göreliliği ele alışımız için gerekli sahneyi de oluşturacak.

14.1 Maxwell Denklemleri

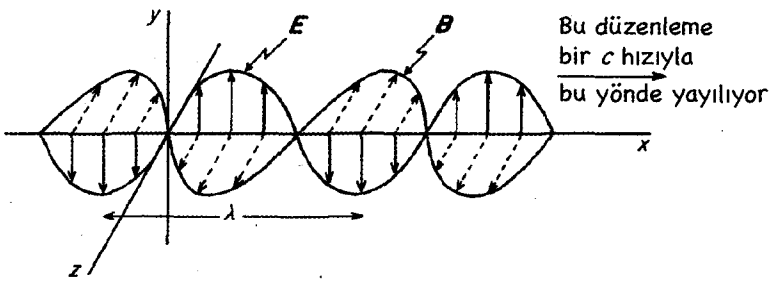
Maxwell'in büyük sentezi öncesinde, elektrik ve manyetizmanın ayrı alanlarının temel yasaları sırasıyla sabit bir q nokta yükünün oluşturduğu E elektrik alanı için Coulomb'un yasası ve i akımı taşıyan bir tel tarafından üretilen B manyetik alanı için Biot-Savart yasasıydı. (Bu yasaların matematiksel ifadeleri ve içinde bulunduğumuz kısımda öne sürülen savların birçoğunu destekleyen matematiksel ayrıntılar için Kısım 14.A'ya bakınız.) Bu yasaların her birinde deneysel olarak belirlenmesi gereken birer orantı katsayısı (sırasıyla, k_1 ve k_2 diyelim) bulunur. (Bunlar Newton'un kütleçekim yasasındaki - (8.4) denklemindeki - G sabitine benzer bir rol oynarlar.) Yani, k_1 ve k_2 sabitleri birbirlerinden bağımsız olarak ve değişik olay sınıfları (sırasıyla, elektrostatik ve manyetostatik) aracılığıyla kararlaştırılırlar. Bu sabitlerin k_1/k_2 oranı, hemen açıkça görülecek nedenlerden ötürü, c^2 ile gösterdiğimiz, hızın karesinin boyutlarına sahiptir.

Klasik kütleçekimsel etkiler için Newton'un yasalarının var olması gibi, bir bakıma elektromanyetik olaylar için var olan bu dinamik

yasaların içeriği, hareketsiz duran ve hareket eden yüklerin (akımların), sırasıyla elektrik ve manyetik alanları nasıl oluşturduklarını niceliksel ayrıntılarla betimlemeleridir. Maxwell'in *İncelemesi* sonrasında aldıkları hal bakımından elektromanyetizmanın yasaları, bu elektrik ve manyetik alanların boş uzayda (içinde herhangi bir yük ya da akım bulunmayan bir bölgede) bir dalga denklemi sağlamalarını gerektirdi. Bu, elektrik ve manyetik alanların uzayda c hızıyla yayılabilmeleri anlamına gelir. Dolayısıyla yayılan E ve B alanları Maxwell denklemlerinin çözümleridirler. Denklemler, bu E ve B alanlarının aynı zamanda birbirlerine dik olmalarını da gerektirirler. Şekil 14.1 bu alanların birbirlerine göre yönlenişlerini ve yayılma yönünü (c) gösterirken, Şekil 14.2 bir sinüs eğrisi gibi yayılan alanlar setini gösteriyor.



Şekil 14.1 c yayılma yönüne ve karşılıklı olarak birbirlerine de dik olan E ve B alanları



Şekil 14.2 Yayılmakta olan bir düzlem elektromanyetik dalga

Maxwell kuramının en önemli başarılarından biri, anılan elektromanyetik dalgaların yayılma hızının sayısal olarak nokta yükler arasındaki (elektrostatik) çekimi (ya da itmeyi) veren Coulomb'un yasasında (Kısım 14.A'da (14.9) denklemine bakınız) rol oynayan (k_1) orantı katsayısı ile ona karşılık olarak akım taşıyan iki tel arasında etki eden (manyetik) kuvveti belirleyen temel yasada (Kısım

14.A'da (14.10) denklemi) ortaya çıkan (k_2) orantı katsayısının oranının karekökü eşit olduğunu öngörmesidir. Temel nokta, bu sabitlerin her birinin birbirlerinden bağımsız, sırasıyla, elektrostatik ve manyetik ölçümleri temel alan deneyler aracılığıyla sayısal olarak belirlenmiş olduğu ve Maxwell'in çalışması öncesinde c ışık hızının da deneysel olarak ölçüldüğüdür. Bu öngörülen hızın değerinin, ışığın boşluktaki hızına (c) sayısal olarak eşit olduğu ortaya çıkar. Bu tamamen bir rastlantı olabilecekken, bunu ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunun belirtisi olarak ele almak çok daha akla yakın görünür. Maxwell, *İncelemesi*'nde şunu gözlemledi:

> Elektromanyetik çalkalanmaların (ç.n.: ortamda elektromanyetizma yüzünden oluşan değişikliklerin) yayılma hızını belirten ... v niceliği ... $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$'a eşittir.
>
> . . .
>
> Işığın elektromanyetik bir çalkalanma olduğu kuramı üzerine, ... değeri çeşitli yöntemlerle tahmin edilmiş bir nicelik olan v [c] ışık hızı olmalıdır. Öte yandan $1/\mu_0\varepsilon_0$ [... olan yöntemlerle belirlenir] ... [ki bu yöntemler] ışık hızını bulmakta kullanılan yöntemlerden tamamen bağımsızdırlar. *Dolayısıyla c'nin ve $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$'ın değerlerinin birbirlerine uyması ya da* uymaması ışığın elektromanyetik kuramı için bir test işlevi görür.[1]

Dahası, Maxwell'in denklemlerinde ortaya çıkan bu hız (c), mutlak bir referans noktasının tanımlanabileceği umudunu sağlıyor gibi görünüyordu; çünkü c'nin belirli bir sisteme göre ölçülen hız olması gerekirdi. Eter, ışık hızının ona göre ölçüldüğünde c (3×10^8 m/s) sayısal değerini aldığı referans noktası olarak hizmet edecekti. Yani, Newton'un ikinci hareket yasası ($F = ma$) herhangi bir hızı değil, yalnızca ivmeyi içerirken; Maxwell denklemleri ((14.13a)-(14.13d) denklemleri) açıkça hızı barındırırlar. Bu nedenle, Newton'un dinamiği tek ve benzersiz bir eylemsiz çerçeveyi diğerlerinden ayırt edemezken, Maxwell'inki bunu yapabiliyor görünüyordu. Bu soruya 16. Konu'da özel görelilik kuramını tartışırken geri döneceğiz.

14.2 Yer Değiştirme Akımı

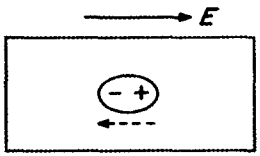
Bugün bu gerçeği göz ardı etme eğiliminde olsak da, gerçek bir elektromanyetik eter kavramı şimdi Maxwell'in kendi adıyla anılan denklemleri (Kısım 14.A'da (14.13) denklemleri) geliştirmesinde önemliydi. Bu son denklemler kümesine ulaşmasında büyük adımlar atmasını sağlayan kavrayışlardan biri, yayılan elektromanyetik dalgaların o olmaksızın olası olmadığı *yer değiştirme akımı* ((14.13d) denkleminin sağ tarafında yer alan $\mu_0\varepsilon_0\,\partial E/\partial t$ terimi) diye anılan hipotezdi.

Maxwell yer değiştirme akımı fikrine nasıl ulaştı? Çoğunlukla bunu matematiksel bir çelişkiyi ortadan kaldırmak için kullandığı tamamen mantıksal bir savla yaptığı öne sürülür. Maxwell'in kendinden önce gelenlerden miras aldığı elektrik ve manyetizma yasaları, manyetik alanı kendisini oluşturan akımlar cinsinden veren Ampère yasasını ((14.18) denklemi) ve yükün korunumunu ifade eden süreklilik denklemini ((14.13e) denklemi) içeriyordu. Bu denklemler bir araya getirildiklerinde, yalnızca değişmeyen hal durumlarında - yani, elektrik yüklerinin yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişmedikleri hallerde - tutarlı oldukları bulunur. (Bu savın matematiksel ayrıntıları için Kısım 14.A'ya bakınız.) Herkes tarafından kabul edilen öyküye göre, Maxwell bu durumda bu uyuşmazlığın Ampère yasasının ((14.18) denklemi) manyetik alana yol açmaktan sorumlu yeni bir terimin akıma dahil edilmesi yoluyla ((14.13d) denklemini elde etmek için) birazcık değiştirilmesi sonucu ortadan kaldırılabileceğini ve böylece her şeyin tutarlı hale getirilebileceğini gördü.

Bu kuşkusuz Maxwell'in büyük buluşunun nasıl yapıldığının mantıksal olarak zorlayıcı ve çok derli toplu bir yeniden oluşturuluşudur. Fakat bu, tarihi belgelerde bulduğumuz ve onlardan çıkardığımız anlama uymakta mıdır?[2] Maxwell dikkatini herhangi bir matematiksel tutarsızlığa odaklamadığı için tamamen böyle olmadığı görülüyor. Bununla birlikte Maxwell, maddesel bir ortamın zamandan bağımsız bir elektrik alanı için ($\partial E/\partial t \neq 0$) - tıpkı bir dielektrikte (ç.n.: elektriği iletmeyen, yalıtkan) olduğunu bildiğimiz gibi - kutuplanmış hâle geleceği konusunda akıl yürüttü. Şekil 14.3 birbirlerine bağlı artı ve eksi yüklerden oluşmuş bir ortama uygulanan bir E elektrik alanının etkisini gösteriyor. Bir 'molekül' bu zorla dayatılan elektrik alanının etkisi altında resimde belirtilen düzenlemeye doğru kutuplanır (ya da 'uzatılır'). Bu, sabit bir E elektrik alanı için gelip geçici bir etkidir ve her yük çifti gösterildiği gibi kısa sürede bir

denge konumuna ulaşır. Bununla birlikte, E alanı zamanla değişirse, yük düzenlemeleri de devamlı olarak değişirler. Bu hareket eden yükler bir akım - yer değiştirme akımı - oluştururlar. Maxwell, *İncelemesi*'nde bize şunları anlatır:

> Bu konum değişikliğindeki herhangi bir artış, artış süresi sırasında içeride dışarıya doğru bir pozitif elektrik akımına denktir ve konum değişikliğindeki her azalma ters yönde bir akıma denktir.
>
> Dielektrik içindeki belirli bir yüzeyin kapladığı alan boyunca konum değişikliğine uğrayan bütün elektrik miktarı, daha önce o alandan geçen indüksiyonun yüzey integrali diye incelediğimiz nicelikle ölçülür....[3]



Şekil 14.3 Bir ortamda oluşan elektrik kutuplanması

Bu, boş olmayan ama eterle dolu (onun Şekil 13.7'deki eter modelini ve ona eşlik eden tartışmayı hatırlayınız) bir 'boşluktaki' elektrik alanı için bile anlamlı olur.

Eter, elektromanyetik kuramın geliştirilmesinde kaydedilen biçimsel ilerlemelerin birçoğunda açık olarak kullanılmadığı halde, fiziksel süreçlerin altında yatan kavramsal uyum için böyle bir ortam gerekli diye görülmüştü. Örnek olarak, alanın kendisini oluşturan gerilimlerin ve girdapların birşey tarafından sağlanması gerekiyordu. Bugün bunu hatırlamayı uygun bulsak da bulmasak da, Maxwell kendi yer değiştirme akımına ve kendi elektromanyetik dalgaların yayılımını açıklamasına ulaştı; çünkü elektromanyetik eterin gerçek bir fiziksel madde olarak var olduğu düşüncesini ciddiye aldı.

14.3 Son Klasik Kuram

Maxwell, 1865 yılında yazdığı 'Elektromanyetik Alanın Dinamik Bir Kuramı' adlı makalesinde, yalnızca elektromanyetik alanı betimleyen matematiksel denklemleri sundu ve girdapları ve boşta duran tekerleri ele almadı (Şekil 13.7'yi bir kere daha anımsayın). Denklemlerin doğru oldukları bulundu ve o zamandan beri kullanıldılar. Sonuç olarak, eter için önerilen her mekanik model doğru olmayan

bir öngörüde bulundu ve en sonunda hepsi bir kenara bırakıldılar. Bu, on dokuzuncu yüzyılın sonuna gelindiğinde daha gerçekleşmemiş olsa da, o zamanlarda bile eterin 'maddesel olmayan' ve kendi başına da eşsiz bir ortam olduğu açıkça belli olmuştu. Bundan sonra, bu seçkin eter tarafından oluşturulan etkileri ortaya çıkarmak için yapılan başarısız - ama devam ettirilen - çabalar en sonunda, daha sonraki konularda göreceğimiz gibi, özel görelilik kuramına ulaşılmasını sağladılar.

Elektromanyetizma konusundaki bu gelişmeler dizisi modern bilimin birçok alanında tipik olarak görülür. Önce temel olgular deneysel olarak gözlemlendi, daha sonra bunları yöneten yasalar kesin bir biçimde ortaya konuldular. Zaman içinde yasalara tüm deneysel gözlemleri bir anlamda özetleyen ve yeni ilişkilerin de kolayca kavranmasına izin veren özlü bir matematiksel biçim verildi. Fiziksel bir model de - ki bu durumda bu eter oldu - yasaları kavramsallaştırmakta yardımcı olmak ve elektromanyetik olayları daha temel, daha az karmaşık olduğuna inanılan bir konu - yani klasik mekanik - aracılığıyla anlama çabasında kullanılmak için oluşturuldu. Yalnızca sürekli bir biçimde art arda gelen yenilgilerden sonra elektromanyetizmanın mekanik modelleri bırakıldı ve elektromanyetik kuram fiziğin temelde ayrı bir dalı olarak kabul edildi. Şimdi elektromanyetik eter kuramı tarafından daha öncesinde öngörülemeyen bir sonuca yol açan bir deneyi ele alalım.

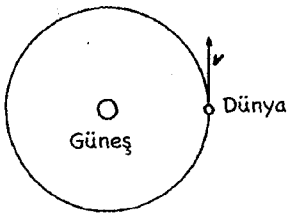
14.4 Michelson-Morley Deneyi

Michelson-Morley deneyi sıklıkla fizik tarihindeki en ünlü olumsuzlama deneyi olarak anılır. Deneyin baş tasarımcısı, mesleki yaşamının büyük bir kısmını ışık hızının son derece hassas ölçümlerini yapmaya adamış bir Amerikalı deneysel fizikçi olan Albert Michelson (1852-1931) idi. Bu çabaları ona 1907 yılında fizik dalında Nobel Ödülü'nü getirdi ve böylece bu şekilde onurlandırılan ilk Amerikalı bilim adamı oldu. Michelson, Prusya'da Strelno'da doğduğu halde, ailesi Albert daha yalnızca iki yaşındayken Birleşik Devletler'e göç etti. Kaliforniya'da küçük ve kaba bir maden kasabasında büyüdü. Michelson on yedi yaşında Annapolis'teki Amerikan Deniz Harp Okulu'na girdi. Kaliforniya'daki zorlu çocukluk yıllarının üzerine deniz kuvvetlerinde aldığı eğitim onun yaşamı boyunca ayırt edilen bir özelliği olan çok titiz ve katı disiplinli biri ol-

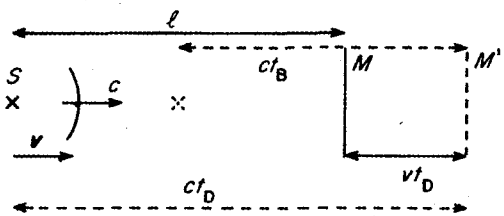
masına neden oldu. Çoğunlukla aksi biriydi ve kesinlikle sıcak bir insan değildi. 1878 yılında Harp Okulu'nda hâlâ bir öğretim görevlisiyken kendi basit deney gereçlerini kullanarak kişisel olarak ilk kez ışık hızını belirledi. Michelson, bilimsel kariyerini ciddi olarak devam ettirebilmek için 1881'de Deniz Kuvvetleri'nden istifa etti ve 1883'te Ohio Cleveland'da daha yeni kurulmuş olan Case Uygulamalı Bilimler Okulu'nda fizik profesörü oldu. Burası, 1887 yılında Dünya'nın eter içindeki hareketini ortaya çıkartmaya yetecek kadar hassas bir deney yapmak için Case'de kendisi gibi öğretim üyesi olan Edward Morley (1838-1923) ile birlikte çalıştığı yerdi. Michelson, 1889'dan 1892'ye kadar Massachusetts Worcester'daki Clark Üniversitesi'nde fizik profesörü olarak bulundu, ancak oranın rektörüyle olan ilişkisini sevimsiz bulduğu için o zamanlar daha yeni kurulmuş olan Chicago Üniversitesi'nin Fizik Bölümü için profesörlük ve aynı zamanda ilk bölüm başkanlığı teklifini kabul etti. 1929'da emekli olana dek orada kaldı.

Bir dönüm noktası olan bu deneyin şimdi anlatacağımız biçimde ele alınışı, Newtoncu kavramlara (özellikle, tüm gözlemciler için var olan bir evrensel zaman fikri) dayanmaktadır. Eterin, ışık hızının $c = 3 \times 10^8$ m/s olduğu hareketsiz referans sistemi olduğu ve deney aracımızın bu ayrıcalıklı referans sistemi içinde Şekil 14.4'te belirtildiği gibi bir v hızıyla hareket ettiği varsayılır.[4] Dünya'nın (Güneş etrafındaki yörüngesindeki) hızı yaklaşık olarak 18 mil/s [29 km/s] iken ışık hızı $1{,}86 \times 10^5$ mil/s [$3{,}00 \times 10^5$ km/s] olduğundan v/c oranı epey küçüktür ($v/c \approx 10^{-4}$). Deneyin temel fikri, ışığı bir kere dünyanın hareket ettiği doğru boyunca bir kez de bu harekete dik doğrultuda (bir ℓ uzaklığı kadar) bir aynaya yollayıp geri yansıtmak ve bu iki gidiş dönüş yolculuğu arasındaki zaman farkını ölçmektir.

Işık kaynağından aynaya olan yolun (Şekil 14.5'te gösterildiği gibi) **v**'ye paralel olduğu durumu ele alarak başlayalım ve bir ışık demetinin kaynaktan yansıtıcıya ve oradan geri dönmesi için gereken zamanı hesaplayalım. Deney düzeneği hareket etmeseydi, bu yolculuk için toplam süreyi kolayca $2\ell/c$ diye elde edeceğimize dikkat edin. Aynayla ışık kaynağı deney düzeneğinin kolu aracılığıyla birbirlerinden her koşulda sabit bir ℓ uzaklığında olacak şekilde hiç oynatılmadan tutulurlar.



Şekil 14.4 Dünya'nın eter içindeki hareketi



Şekil 14.5 Hareket etmeyen bir eterde, (hızı v olan) bir düzeneğe paralel yönde giden (c hızındaki) ışık demeti

'Eter' referans sisteminden (ki deney düzeneği bunun içinden v hızıyla gider) göründüğü haliyle, (etere göre c hızıyla yol alan) ışık sinyalinin (S) ışık kaynağından sağındaki (M') aynasına gitmesi için geçen t_D süresi Şekil 14.5'ten $ct_D = (\ell + vt_D)$ olarak elde edilir, böylece

$$t_D = \frac{\ell}{c - v} \tag{14.1}$$

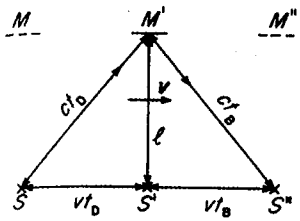
ve geri dönüş yolculuğu için geçen t_B süresi de $ct_B = (\ell - vt_B)$'den bulunur, ki bu da

$$t_B = \frac{\ell}{c + v} \tag{14.2}$$

olur. Bu nedenle **v**'ye paralel yönde toplam gidiş dönüş yolculuğu için geçen süre $T_{\parallel} = (t_D + t_B)$ ya da

$$T_{\parallel} = \frac{2\ell}{c}\left(\frac{1}{1-(v/c)^2}\right) \tag{14.3}$$

olur. (14.1) ve (14.2) denklemlerinde bulunan sonuçlar, hızların toplamı için geçerli klasik yasayı kullanarak ve ışık hızının deney düzeneğinin koluna göre ilk durumda $(c - v)$ ve ikincisinde de $(c + v)$ olduğunun farkına varılarak da hemen elde edilebilir.

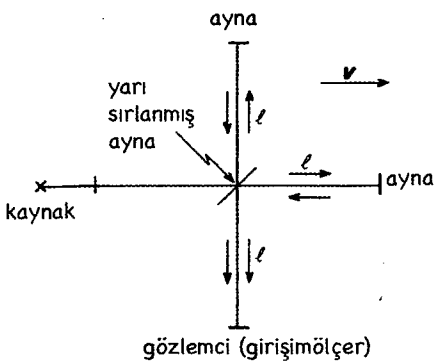


Şekil 14.6 Hareket etmeyen bir eterde, (hızı v olan) bir düzeneğe dik yönde giden (c hızındaki) ışık demeti

Bundan sonra deney düzeneğinin Şekil 14.6'da belirtildiği gibi **v**'ye dik olarak konduğu duruma dönelim. Işığın izleyeceği yolu bir kere daha eterin referans sisteminden göründüğü haliyle gösterdik. Burada $t_D = t_B$ ve Pythagoras'ın dik üçgenler için teoremini kullanarak $c^2 t_D^2 = (\ell^2 + v^2 t_D^2)$ olur, böylece

$$T_\perp = 2t_D = \frac{2\ell}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2\ell}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \tag{14.4}$$

bulunur. Deneysel düzenlemenin bütünü Şekil 14.7'de gösterilmiştir. (14.3) ve (14.4) denklemlerinden



Şekil 14.7 Michelson-Morley deneyinin idealleştirilmiş bir biçimi

$$T_{\parallel} - T_{\perp} = \frac{2\ell}{c}\left[\frac{1}{1-(v/c)^2} - \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right] \qquad (14.5)$$

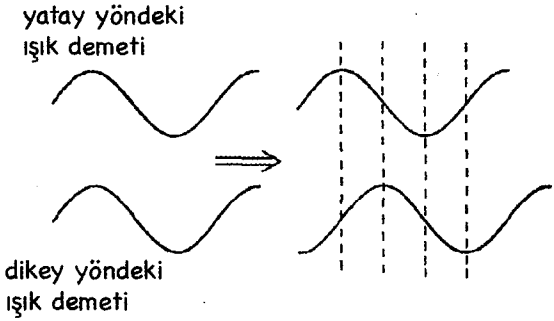
kadar bir zaman farkı olacağını bekleriz. Bu zaman farkı deneyde doğrudan doğruya ölçülmez, ancak bir girişim etkisi aranır. Dalga paketlerinin ikisi de farklı yollar boyunca olan bu yolculuklarına başladıklarında aynı fazda olduklarından ve ışık sinyallerinin iki yol boyunca olan yolculuk süreleri birbirinden farklı olduğundan, iki ışık demeti tekrar bir araya geldiklerinde çok az da olsa birbirlerinden farklı fazlarda bulunacaklardır. Bu faz farkı bir girişim saçakları deseni oluşturur. Eğer bu haldeyken deney düzeneğini (Şekil 14.7'de iki kolun kesiştiği noktadan geçen ve sayfa düzlemine dik olan bir eksen etrafında) döndürmeye başlarsak, aradaki yol farkı her iki kolun da **v**'nin doğrultusuyla yaptığı açı 45° olup sıfır oluncaya kadar azalır. Bu halde saçakların deseni yapıcı girişim gösterir. Bu yüzden, deney düzeneği özgün konumundan 90°'lik bir açı kadar döndürüldüğünde (ki böylece paralel ve dik kollar yer değiştirmiş olurlar) oluşan zaman farkı (14.5) denklemiyle verilenin iki katı, yani

$$\Delta T_{\text{toplam}} = \frac{4\ell}{c}\left[\frac{1}{1-(v/c)^2} - \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right] \cong \frac{4\ell}{c}\left(\frac{v^2}{2c^2}\right) = \frac{2\ell}{c}\frac{v^2}{c^2} \qquad (14.6)$$

olur. Burada paydalardaki ifadeleri (v/c) çok küçük olduğundan $(v/c)^2$'li terimler cinsinden açarak yaklaşık olarak hesapladık. Bulunacak etki (v/c)'nin ikinci kuvveti (yaklaşık 10^{-8}) gibi gider, ki bu nedenle deney çok büyük hassaslık isteyen zor bir deneydir.

Bu sonuçlara niceliksel ayrıntılar açısından biraz daha dikkatli bakalım. (14.5) denkleminden $T_{\parallel}$'nin $T_{\perp}$'den daha büyük olması beklendiğinden, **v**'ye paralel giden dalga paketi Şekil 14.8'de belirtildiği gibi diğer rotadan giden dalga paketinin az da olsa arkasında kalacaktır. Periyodik bir dalga için, λ dalga boyu ve ν de frekans iken $\lambda\nu = \lambda/\tau = c$ olduğunu hatırlarsak, saçak kaymalarının sayısını hesaplayabiliriz. Her τ süresi (dalganın periyodu) için bir dalga paketi diğerinin arkasında kalacağından, girişim deseninde buna karşılık bir tam saçak kayması olacaktır. Desen, bir tam saçak kayması için bir yapıcı girişimden (dalga tepesinden) başka bir yapıcı girişime

(dalga tepesine) gidecekken, bir yarım saçak kayması için bir yapıcı girişimden (dalga tepesinden) tamamıyla yıkıcı bir



Şekil 14.8 Girişimle oluşturulan bir saçak kayması

girişime (dalga çukuruna) geçecektir. Deney $\ell \cong 11\,\text{m}$ alınarak yapıldığında, deney düzeneği 90° döndürülürken kayan saçakların n toplam sayısının, Michelson tarafından kullanılan ışık spektrumunun gözle görülebilen kısmındaki tipik (diyelim $\lambda \cong 5{,}5\times10^{-7}$ m) bir dalga için yaklaşık olarak $n \approx 0{,}4$ olduğunu (14.6) denkleminden görürüz. Bununla birlikte, Michelson-Morley deneyi sıfır sonucunu verdi. Hiçbir saçak kayması bulunamamıştı.

14.5 Göreliliğin Öncüleri

Dublin'deki Trinity Koleji'nde bir doğa ve deneysel felsefe profesörü olan George FitzGerald (1851-1901), 1892 yılında Michelson-Morley deneyinin olumsuz sonucunun gerektirdiklerinden kurtulmanın bir yolunu buldu. Ölçmede kullanılan deney düzeneği eterin içindeki hareketi yönünde çok az kısalırsa sonucun sıfır çıkmasının beklenen bir şey olduğunu gösterdi. Bunu nicel olarak görmek için, Şekil 14.7'de gösterilen bir Michelson-Morley düzeneğini ele alalım, ancak bu kez **v** doğrultusundaki kolun uzunluğu $\ell_\parallel$ ve **v**'ye dik yöndeki kolun uzunluğu da $\ell_\perp$ olsun. (14.3) ve (14.4) denklemlerini buna uygun bir şekilde değiştirirsek ve sonra da deneyle uyum içinde olmak için $T_\parallel = T_\perp$ olmasını istersek,

$$\ell_\parallel = \ell_\perp \sqrt{1-(v/c)^2} \tag{14.7}$$

olduğunu buluruz. Yani, eğer bir çubuğun boyu **v**'ye paralel bir doğrultuda durur ya da hareket ederken ℓ ve hareketsizken (ya da hareket yönüne dik bir şekilde durarak yol alırken) ℓ_0 ise FitzGerald varsayımı

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1-(v/c)^2} \tag{14.8}$$

olduğunu söyler. Bir kez daha bunun $(v/c)^2$'ye bağlı ikinci dereceden bir etki olduğuna dikkat ediniz. Bununla birlikte, ince eterin içinde hareket eden bir cismin boyunu neden kısaltabileceğini anlamak çok zordu. FitzGerald bu açıklamada hâlâ Newtoncu uzay ve zaman kavramlarına sadık kalmaktaydı.

Kısalma hipotezi fizikçiler arasında kabul gördü, ama bu yalnızca Michelson-Morley deneyinin olumsuz sonuçlarını az önce işaret ettiğimiz tarzda açıkladığı için olmadı. Aynı kısalma etkisine, ondan sonra ama bağımsız bir biçimde yine 1892 yılında Leiden Üniversitesi'nde bir matematiksel fizik profesörü (ve sonrasında kendi elektromanyetik ışınım kuramı için 1902 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazananlardan biri olacak) olan Hollandalı kuramsal fizikçi Hendrik Lorentz (1853-1928) de ulaştı. Lorentz, döneminin öne çıkan kuramsal fizikçilerinden biriydi ve eter ortamı içinde birbirleriyle etkileşen elektronların son derece başarılı bir kuramını oluşturmuştu. Lorentz'in kuramının 1892 yılındaki özgün hali, Michelson-Morley deneyinin olumsuz sonucunu (14.8) denkleminde olduğu gibi bir kısalma hipotezi benimsenmediği sürece açıklayamıyordu. Lorentz, tamamen matematiksel bir 'hile' kullanarak eterin içinde hareket eden bir cismin boyunun kısalmasını açıklayan - ilk kez 1892'de ifade edilen ve sonrasında 1895 yılında tamamen olgunlaştırılan - bir akıl yürütme dizisine ulaşmıştı. Hareket eden bir referans sistemi için yazılan Maxwell denklemlerini çalışırken, bu problemin matematiksel çözümlemesinin ve çözümünün x, y, z, t fiziksel değişkenleri yerine x', y', z', t''den oluşan yeni bir değişkenler kümesi cinsinden çok daha kolay olduğunu buldu. Bu noktada x', y', z', t' ile x, y, z, t değişkenleri arasındaki matematiksel ilişkinin tam olarak ne olduğu hakkında endişelenmemize ve bunu bilmemize gerek yok. (Günümüzde Lorentz dönüşümleri diye bilinen ve modern biçimleri kendisi tarafından 1904 yılında yayınlanan bu denklemler başka bir bağlamda 16. Konu'da çıkartılacaklar.) Lorentz

elektrik kuvveti denklemini bu yeni değişkenler kümesini (ya da referans sistemini) kullanarak yazdığında başlangıçtaki sistemde yazılanla aynı olmadığını gördü. Lorentz, tüm moleküler kuvvetlerin ve etkileşimlerin doğasının temel olarak elektromanyetik olduğuna inandığından, moleküler kuvvetlerin tıpkı elektromanyetik kuvvetler gibi dönüştüklerini (ya da farklı referans sistemlerine göre onlar gibi göründüklerini) kabul ederek ortaya bir *moleküler kuvvet hipotezi*[5] sürdü. Bu hipotezi kullanarak bugün Lorentz-FitzGerald kısalma (ç.n.: İngilizcesi 'contraction', kimi Türkçe fizik kitaplarında bu terim için 'büzülme' sözcüğü de kullanılmaktadır) hipotezi olarak anılan (14.8) denklemini çıkarabilmişti. Lorentz, 1895 yılında yazdığı ve Michelson-Morley deneyini tartıştığı bir makalede, kısalma hipotezinin çıkan sıfır sonucunu açıklayabileceğini iddia ettikten sonra, bu kısalmanın akla yatkın olduğunu göstermeyi şöyle denedi:

> İlk bakışta şaşırtıcı görünebilen bu hipotezin, hiç de uydurma olmadığını - şu an bu iddiayı kesinlikle öne sürebilmemizi sağlayan elektrik ve manyetik kuvvetler için olduğu gibi - moleküler kuvvetlerin de eterin içinde iletildiklerini kabul eder etmez itiraf etmek zorundayız. Eğer bu şekilde iletiliyorlarsa, dönüşüm (ç.n.: kısalma kastediliyor) iki molekül ya da atom arasındaki etkiyi büyük olasılıkla yüklü parçacıklar arasındaki çekimi ya da itmeyi andırır bir tarzda etkileyecektir. Katı bir cismin biçimi ve boyutları eninde sonunda moleküler etkilerin şiddetiyle belirlendiğine göre, şu halde boyutlarda da bir değişiklik olması kaçınılmazdır.[6]

Bu kuramın ve dünyanın etere göre hareketini ölçmek için yapılan tüm deneysel çabaların sonucuna göre, doğa sanki mutlak hareketsiz olan bir ayrıcalıklı referans sisteminin keşfedilmesini engellemek için komplo kurmuş gibi görünüyordu. Bu, - Fransa'nın önde gelen bilim adamlarının birçoğu gibi École Polytechnique'te okumuş ve sonrasında Paris Üniversitesi'nde profesör olmuş - keskin zekâlı bir matematikçi, kuramsal fizikçi ve düşünür olan Poincaré tarafından fiziğin yeni bir ilkesi konumuna yükseltildi. Poincaré, 1899 yılında Sorbonne'da verdiği bir seminerde düşüncelerini şöyle özetledi:

> Optik olayların yalnızca ilgili maddesel cisimlerin, ışık saçan kaynakların ve optik deney düzeneklerinin *göreli* hareketlerine bağlı olduklarının çok olası olduğunu düşünüyorum ve bu ... *kesinlikle* doğrudur.[7]

Poincaré, eterin gerçekten var olup olmadığını sorguladı. Buna, 1904 yılında St. Louis'teki bir Fen ve Edebiyat Kongresi'nde *görelilik ilkesi* adını verdi; bu ilkeye göre eylemsiz gözlemcilerin bireysel mutlak hızları değil, yalnızca aralarındaki göreli hızlar fark edilebilirdi. Bu ilkeden yola çıkarak, hem fizik yasalarının tüm eylemsiz gözlemciler için aynı olması gerektiğine hem de hiçbir hızın ışık hızını aşamayacağı sonuçlarına vardı. Lorentz, aynı yıl içinde bu ilkeyle tutarlı bir elektron kuramı oluşturdu, ama buna rağmen hâlâ bir eterin var olduğu inancını da korudu. 16. Konu'da Einstein'ın içinde bir etere yer olmayan ve en sonunda evrensel olarak kabul edilen özel göreliliği nasıl biçimlendirdiğini sunacağız. Aslına bakarsanız, Lorentz'in *Elektron Kuramı* adlı eserinin 1916 yılı baskısının aşağıdaki sonuç kısmında gördüğümüz gibi 'neredeyse evrensel olarak kabul edilen' demeliyiz:

> Burada, Einstein'ın bu [görelilik] ilkesinden yola çıkarak yaptığı son derece ilginç uygulamaların birçoğundan söz edemiyorum. Elektromanyetikle ve optik olaylarla ilgili vardığı sonuçlar ... buraya kadar olan sayfalarda bulduklarımızla temel olarak uyuşuyorlar; aradaki ana fark, bizim elektromanyetik alanın temel denklemlerinden - biraz zorlanarak ve tamamen doyurucu olmayan bir şekilde - çıkardığımız sonuçları Einstein'ın en baştan kolayca aksiyomlar olarak varsayması. Kuşkusuz ki böyle yaparak, Michelson, Rayleigh ve Brace'inki gibi deneylerin olumsuz sonucunda, birbirine zıt etkilerin şans eseri birbirlerini karşılamasını değil, tersine genel ve temel bir ilkenin açıkça ortaya çıkışını görmemizi sağlaması nedeniyle onurlandırılabilir.
>
> Evet, kuramın benim sunduğum biçiminin lehinde de bir şeyler öne sürülebilir diye düşünüyorum. Enerjisi ve titreşimleriyle elektromanyetik alanın koltuğu olabilecek etere, olağan tüm maddelerden ne kadar farklı olursa olsun (ç.n.: Tanrı tarafından) belli bir derece fiziksel olarak gerçekten var olma özelliği verilmiş diye bakmadan edemiyorum. Bu düşünce çizgisinde, bir cismin eterin içinde hareket edip etmediğinin asla fark etmeyeceğini en baştan varsaymamak, uzaklıkları ve zaman aralıklarını etere göre sabit bir konumda olan cetvellerle ve saatlerle ölçmek doğal görünüyor.
>
> Einstein'ın kuramının - başlangıç noktasının son derece ilginç ve gözü pek olması yanında - benimkine göre belirli bir üstünlüğü olduğunu eklememek de haksızlık olur. Ben, hareket eden eksenler için hareketsiz bir sistem için geçerli olan denklemlerle *tam olarak* aynı biçimde denklemler elde etmeyi başaramazken, Einstein bunun üstesinden benim öne sürdüğümden biraz farklı bir yeni değişkenler sistemi kullanarak geldi. Ben, onun kullandığı (ç.n.: denklemlerle oynarken, örneğin bir değişkeni diğerleri cinsinden ifade etme gibi) yerine koymalardan yararlanmadım; bunun tek nedeni bu formüllerin, görelilik kuramının kendi-

sini kullanarak çıkarılmadıkları sürece oldukça karmaşık olmaları ve biraz yapay durmalarıdır.[8]

Bir sonraki konuda klasik mekaniğinkiyle göreliliğin dünyaya bakış açıları arasında bir karar almayı deneyen bir dizi deneyi tartışacağız.

14.A Maxwell Denklemlerinin Matematiksel Biçimi

Coulomb'un yasası, hareketsiz duran bir q yüklü parçacık tarafından oluşturulan E elektrik alanını[9]

$$E = k_1 \frac{q}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}} \qquad \left\{E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}\right\} \tag{14.9}$$

ve Biot-Savart yasası da i akımı taşıyan (yönü de belli ℓ uzunluğundaki küçük) bir tel tarafından oluşturulan B manyetik alanını

$$B = k_2 \frac{i\,\ell \times \boldsymbol{r}}{r^3} \qquad \left\{B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i\,\ell \times \boldsymbol{r}}{r^3}\right\} \tag{14.10}$$

olarak verir. Burada k_1 ve k_2, deneyle belirlenecek iki sabittir. i ve i' akımları taşıyan ve aralarında d kadar bir uzaklık olan iki uzun ve birbirine paralel düzgün tel için, $\mathrm{d}\ell$ uzunluğundaki bir tel parçası üzerine etki eden $\mathrm{d}F$ kuvvetinin büyüklüğü

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}\ell} = 2k_2\frac{i\,i'}{d} \qquad \left\{\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i\,i'}{d}\right\} \tag{14.11}$$

olur. Metinde belirtildiği gibi, k_1/k_2 oranı (c^2 ile gösterdiğimiz) hızın karesi ile aynı boyuta sahiptir:

$$\frac{k_1}{k_2} = c^2 \qquad \left\{\frac{1}{\mu_0\varepsilon_0} = c^2\right\}. \tag{14.12}$$

Elektromanyetizma yasaları, Maxwell'in *İncelemesi* sonrasında (modern gösterimle) aldıkları biçimde (14.12) denklemindeki c hızı cinsinden aşağıdaki şekilde yazılırlar:

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho \qquad \left\{\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}\right\}$$ (Coulomb yasası) (14.13a)

$$\nabla \cdot B = 0 \qquad \{\nabla \cdot B = 0\}$$ (manyetik yük yoktur) (14.13b)

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c}\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \left\{\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}\right\}$$ (Faraday'ın indüksiyon yasası) (14.13c)

$$\nabla \times B = \frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j \qquad \left\{\nabla \times B = \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 j\right\}$$ (Maxwell'in yer değiştirme akımıyla Ampère yasası) (14.13d)

$$\nabla \cdot j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \qquad \left\{\nabla \cdot j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0\right\}$$ (yükün korunumu) (14.13e)

$$F = q\left(E + \frac{\mathbf{v}}{c} \times B\right) \qquad \{F = q(E + \mathbf{v} \times B)\}$$ (Lorentz'in kuvvet yasası)[10] (14.13f)

İlk dört denklem boş uzayda (ki bu durumda $j = \rho = 0$'dır) E ve B'nin her bileşeninin dalga denklemini sağlamasını gerektirir[11]:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E = 0 \qquad \left\{\left(\nabla^2 - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E = 0\right\} . \qquad (14.14)$$

Yani, $f(\boldsymbol{r}, t)$ ile E_x, E_y, E_z ya da B_x, B_y, B_z bileşenlerinden herhangi birini temsil edersek, $f(\boldsymbol{r}, t)$ aşağıdaki denklemi sağlar:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)f(\boldsymbol{r}, t) = 0 . \qquad (14.15)$$

Örnek olarak, problemi bir boyutta ele alırsak - ki böylece f yalnızca x'e ve t'ye bağlı olur - (14.15) denklemi şu hale gelir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) f(x,t) = 0 \ . \qquad (14.16)$$

(14.16) denkleminin en genel çözümünün, – g ve h herhangi iki fonksiyon olmak üzere -

$$f(x,t) = g(x - ct) + h(x + ct) \qquad (14.17)$$

olduğunu göstermek çok kolaydır.[12] Fakat (14.17) denklemi bir c hızıyla (sola ya da sağa doğru (ç.n.: g parçası sağa, h parçası da sola doğru)) yayılan sabit şekilli dalgaları gösterir. Dolayısıyla, yayılan E ve B alanları Maxwell denklemlerinin çözümleridirler. Bu arada (14.13c) ve (14.13d) denklemleri, bu E ve B alanlarının birbirlerine dik olmaları şartını koşar. Bu sonuçlar, Kısım 14.1'deki Şekil 14.1 ve Şekil 14.2'de gösterilmiştir.

Bununla birlikte, üzerinde durulması gereken önemli bir nokta daha vardır. Maxwell'in kendinden önce gelenlerden miras aldığı elektrik ve manyetizma yasaları aslında (14.13a)-(14.13e) denklemleri olduğu halde, arada önemli bir fark vardı. Maxwell, işe (14.13d) denklemi yerine Ampère yasasıyla

$$\nabla \times B = \frac{4\pi}{c} j \qquad (14.18)$$

koyulmak zorunda kalmıştı. (14.18) denkleminin ıraksaması (ç.n.: İngilizcesi 'divergence') alındığında kolayca bir sorun olduğu görülür:

$$\nabla \cdot (\nabla \times B) \equiv 0 = \frac{4\pi}{c} \nabla \cdot j \qquad (14.19)$$

ya da

$$\nabla \cdot j = 0 \qquad (14.20)$$

elde edilir. Şu halde, bu sonucu süreklilik denklemiyle ((14.13e) denklemiyle) birleştirirsek

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \qquad (14.21)$$

olduğunu buluruz. Bu, Ampère yasasının yalnızca değişmeyen hal durumları için geçerli olmasını gerektirir. Ancak sık sık zamana bağlı fiziksel yük dağılımlarıyla karşılaşılır. Bu, Kısım 14.2'de sözü edilen 'tutarsızlık'tır.

Yararlı Kaynaklar

Ivan Tolstoy'un *James Clark Maxwell* adlı eseri, modern elektromanyetik kuramının kurucusunun iyi bilinen bir biyografisidir. Dorothy Livingston'un *Işığın Efendisi* adlı kitabı, bu büyük bilim adamının kızı tarafından yazılmış hoş ve bilgilendirici bir öyküsüdür. Jed Buchwald'ın *Maxwell'den Mikrofiziğe* adlı eseri, on dokuzuncu yüzyılın son çeyreğindeki elektromanyetik kuramının bilimsel bir araştırmasıdır. Temel elektromanyetik kuramının orta zorlukta, modern ve teknik bir biçimde ele alınışı, John Reitz ve Frederick Milford'un *Elektromanyetik Kuramının Temelleri* adlı kitabında bulunabilirken, John David Jackson'ın *Klasik Elektrodinamik* adlı eseri bu konuda standart haline gelmiş ileri seviyede bir kaynaktır.

15
Kaufmann Deneyleri

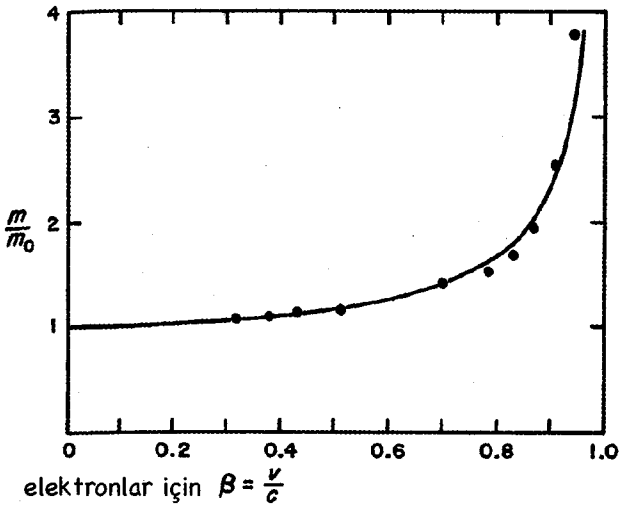
Walter Kaufmann (1871-1947) yirminci yüzyılın ilk yıllarında elektronun kütlesinin hızla olan değişimini belirlemek için bir dizi deney yaptı. Günümüzde fizik metinleri, bu deneyleri, çoğu kez özel görelilik kuramını temel alarak (bakınız Kısım 17.2) çıkarılan

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad (15.1)$$

formülünün doğruluğunu göstermeye yaradıkları şeklinde aktarırlar. Şekil 15.1'deki kesintisiz eğri m/m_0'ın $\beta = v/c$ 'ye bağlı grafiğini göstermektedir; şekilde yer alan küçük daireler de veri noktalarını temsil etmektedirler.[1] Aslında Kaufmann'ın verileri, başlangıçta - aşağıda göstereceğimiz gibi - özel görelilik kuramına karşı kanıt olarak kabul edilmişlerdi. Şimdi, bu karara nasıl ulaşıldığının ve sonunda da nasıl tersine çevrildiğinin öyküsünü göreceğiz.

Fizikçiler için, yaklaşık olarak 1900 yılını merkez alan on beş yıllık bir süre boyunca, elektronun kütlesinin bir kısmının ya da tümünün olası bir elektromanyetik kökeninin bulunup bulunmadığı hayli ilginç bir soruydu. Ayrıntılı ve niceliksel savlar sunulabileceği halde, temel düşünce, tek cümleyle bir cismin kütlesinin ya onun ivmelenmeye karşı olan direncinin ya da - buna denk bir şekilde - cismi hareket ettirebilmek için gerekli (ç.n.: fizik bağlamında) işin bir ölçüsü olarak düşünülebileceğidir. Klasik elektrodinamik, yüklü bir cisim için hıza bağlı olarak çok çabuk artan bir elektromanyetik enerji öngörüsünde bulunur. Elektronun yükünün kütlesine olan

e/m oranını belirlemek için yapılan ilk deneyler bile deneysel olarak saptanan kütlesinin, elektronun v hızı ışık hızı c 'ye yaklaşırken keskin bir şekilde arttığına işaret ediyordu. Bu durumda, deneysel olarak gözlemlenen bu kütle değişiminin klasik elektrodinamiği temel alan bir elektron modeli tarafından tamamen ya da kısmen açıklanıp açıklanamayacağını sormak akla yatkın bir soruydu.



Şekil 15.1 Elektron kütlesinin hıza bağlı değişimi

15.1 Elektromanyetik Kütleye İlişkin Birbirine Rakip Kurumlar

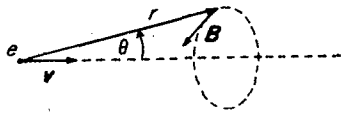
Fizik tarihinin bu dönemindeki ana karakterler Kaufmann, Max Abraham (1875-1922), Alfred Bucherer (1863-1927), Lorentz ve Planck'tı. Planck ve Lorentz yeterince iyi tanınmış fizikçilerken, Kaufmann, Abraham ve Bucherer genellikle onlar kadar iyi bilinmezler. Kaufmann, Berlin ve Münih üniversitelerinde okudu, doktora derecesini de 1894'te Münih Üniversitesi'nden aldı. 1897 yılında Berlin Üniversitesi'ndeki Fizik Enstitüsü'nde bir araştırma görevlisiyken (1896-1899) katot ışınları üzerine deneyler yaptı.[2] Bu ışınların eksi yüklü parçacıklardan oluştuklarını doğruladı, ancak bunlara elektronlar oldukları tanısını koyabilecek kadar emin olmadığını hissetti.[3] Bu

buluşu gerçekleştirme onuru, 1897 yılında Cambridge Üniversitesi'nden Britanyalı fizikçi J. Thomson'ın oldu. Kaufmann daha sonra sırasıyla Berlin, Göttingen, Bonn ve Königsberg üniversitelerinde öğretim üyesi olarak bulundu. Kaufmann, burada ele alacağımız deneylerini (1901–1906) Göttingen ve Bonn'dayken yaptı. Kaufmann buradayken (ç.n.: Göttingen'deyken), kendi - yükü şekli değişmeyen bir kürenin yüzeyinde düzgün bir biçimde dağılmış - elektron modelini 1902 yılında öne sürmüş olan Abraham'ın yakın bir çalışma arkadaşı oldu. Abraham, Berlin'de Planck'ın doktora öğrencisi olmuştu ve sonrasında Göttingen, Illinois, Milan ve Aachen üniversitelerinde öğretim üyesi olarak bulunmuştu. İnsanların doğrudan yüzlerine karşı takındığı açıkça eleştirel yapısı sonucunda, sık sık anlaşmazlıklarla karşı karşıya kalırdı. Ölürken uzun süre acı çekmişti ve ölümü çok elim bir şekilde olmuştu. Abraham'ın adı, zamanının kuramsal fizikçileri arasında iyi bilinse de, günümüzde daha çok - çoğunlukla Abraham ve Becker tarafından yazılmış ünlü versiyonuna lisans üstü fizik öğrencileri tarafından hâlâ başvurulan (ç.n.: İngilizceye '*Classical Theory of Electricity and Magnetism*' (*Klasik Elektrik ve Manyetizma Kuramı*) ismiyle çevrilmiş olan) - *Theorie der Elektrizität* isimli kitabının defalarca gözden geçirilip düzeltilmiş baskılarından birinden haberdar olan fizikçilerce tanınır.

Elektronun Abraham'ınkine rakip bir modeli, Johns Hopkins ve Cornell üniversitelerinde okuduktan sonra, 1895 yılında Strasbourg Üniversitesi'nde doktora çalışmalarını tamamlamış ve sonrasında Bonn Üniversitesi'nde öğretim üyesi olmuş olan Bucherer tarafından 1904'te öne sürüldü. Bucherer'in modelinde, elektronun biçimi eter içinde hareket ederken bozuluyordu, ancak bu öyle bir tarzda oluyordu ki, bu sırada hacmi sabit kalıyordu. Kaufmann'ın deneyleri, Abraham'ın ve Bucherer'in modelleri arasında kesin bir karar almak için kullanılamıyordu.

Lorentz, 1892'den itibaren kendi elektron kuramını geliştirdi. Bu kuram, 1904 yılına gelindiğinde öngörüleri bakımından (16. ve 17. Konuların konusu olan) Einstein'ın özel görelilik kuramından ayırt edilemez durumdaydı. Hareketsiz duran bir elektron için Lorentz'in modeli, onu düzgün bir küresel yüzey yükü olarak resmediyordu. Elektron, eter içinde hareket ettirilmeye başlandığında enlemesine (ç.n.: hareket yönüne dik yöndeki) boyutları etkilenmeden kalıyordu ancak hareket yönündeki boyu kısalıyordu ((14.8) denkleminin Lorentz-FitzGerald kısalmasını hatırlayınız). Bu modelde kütlenin hıza bağlı değişimi tam olarak (15.1) denklemiyle verilen şekilde çı-

kar. Planck'ın Kaufmann'ın verilerinin indirgenişini dikkatli bir mantıksal çözümlemeye maruz bırakması ve verilerin aslında Abraham'ınkiler yerine Einstein-Lorentz'in öngörülerini tercih ettiklerini göstermesi 1906-1907 yılları sırasındadır. Bucherer en sonunda, 1908'e gelindiğinde, Kaufmann'ın çalışmasının güvenilirliğinden o kadar kuşkuya düştü ki, farklı ve hata payı daha az bir takım ölçümler yaptı ve bunlardan Einstein-Lorentz kuramının doğru olduğu sonucuna vardı. Bu sıralarda kendi elektron modelini çoktan bir kenara bırakmıştı.



Şekil 15.2 Hareket eden bir yük tarafından oluşturulan manyetik alan

Bazı teknik ayrıntılar bu konunun sonundaki Kısım 15.A'da kaba hatlarıyla verildiği halde, burada tüm bu modelleri harekete geçiren temel düşünceyi yalın bir şekilde ele alalım. Işık hızına oranla küçük bir **v** hızıyla hareket eden bir q yükü verildiğinde, bu yük tarafından oluşturulan B manyetik alanını hesaplamak için Biot-Savart yasası kullanılabilir.[4] Şekil 15.2'de bu durum görülüyor.[5] Klasik kurama göre, elektromanyetik alan tarafından taşınan enerji, uzayın her tarafında elektrik ve manyetik enerji yoğunlukları cinsinden dağıtılmış (ya da 'depolanmış') olarak resmedilebilir; buna göre örneğin birim hacimdeki manyetik enerji yoğunluğu $U_{\text{man}} = B^2/2$ olur. Bu manyetik enerjiyi tüm uzay boyunca toplar (ya da bütün uzay üzerinde integre eder (ç.n.: integralini alır)) ve sonuçta elde edilen W_{man} toplam manyetik enerjisini elektronu v hızına çıkarmak için gereken işe (yani kinetik enerjiye) eşitlersek,

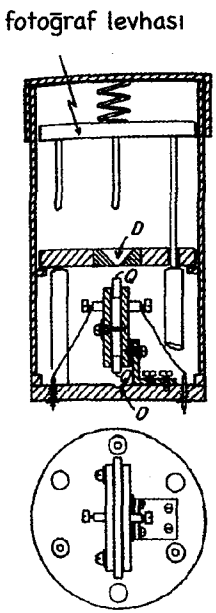
$$m = \frac{e^2}{6\pi c^2 a} \tag{15.2}$$

buluruz[6]; burada a elektronun yarıçapıdır. Bu ifade yalnızca küçük hızlar için (gerçekten de $v \to 0$ limitinde) geçerlidir ve bu koşullar altında elektronun elektromanyetik kütlesini gösterir. v, c'ye göre fark edilebilecek seviyeye geldiğinde, m'nin kendisi hıza oldukça bağlı hale gelir.

Abraham'ın temel düşüncesi, tüm mekaniğe elektromanyetik bir temel sağlamak fikriydi.[7] Bu aslında, daha öncesinde Maxwell gibi kuramsal fizikçiler arasında var olan, elektromanyetik olgulara (13. Konu'da gördüğümüz gibi) eterin mekanik modelleri aracılığıyla mekanik bir temel sağlama eğiliminin tamamıyla tersine çevrilmesiydi. Abraham'ın savlarının güzelliği, çok genel olmaları ve ayrıntılı (ve karmaşık) hesaplamalardan kaçınmalarıdır.

15.2 Kaufmann'ın Deneyleri

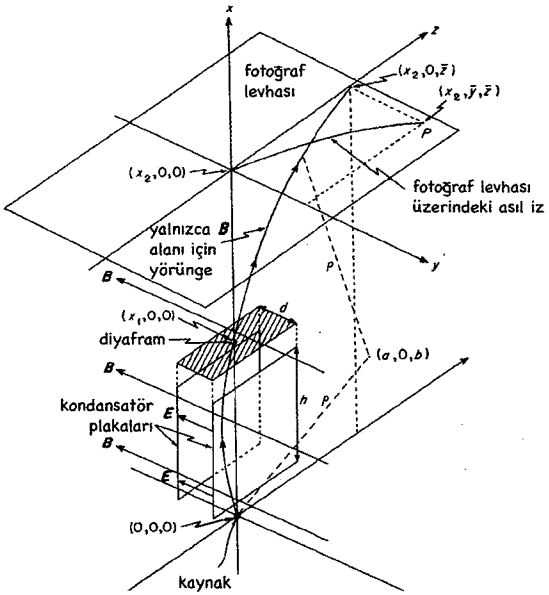
Kaufmann, 1901-1906 yılları arasında elektronun yükünün kütlesine olan oranının değişimini ölçmek için tasarlanmış bir dizi deneyin sonuçlarını yayınladı. Klasik elektrodinamiğin çerçevesinden bakıldığında, elektronun e yükünün v hızına bağlı olarak değişmesini beklemek için herhangi bir neden yoktu, oysa az önce elektronun elektromanyetik kütlesinin hıza bağlı olması gerektiğini gördük. Dolayısıyla ölçülen e/m oranında gözlemlenen düşüş m'de bir artış olduğu biçiminde yorumlanmıştı.



Şekil 15.3 Kaufmann'ın gerçekte kullandığı deney düzeneğinin bir taslağı

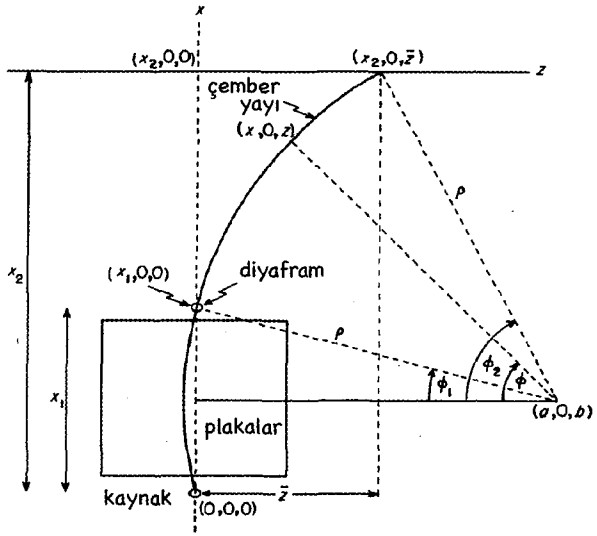
Şekil 15.3'ün (Kaufmann'ın kendi yayınlarından birine dayanan) planı, deney düzeneğinin temel tasarımını göstermektedir. En dıştaki (bir vakum odacığına konmuş) silindir biçimindeki kabın, birbirinden (şekilde Q ile gösterilen) kuvars (ç.n.: SiO_2 dünya yüzeyinde en çok bulunan mineral) yalıtkanlarla ayrılmış bir çift dikey kondansatör (ç.n.: elektrik devrelerinde statik elektrik yüklerini toplayıp biriktiren aygıt) plakası vardır. (Bu iletken-yalıtkan-iletken şeklindeki düzenlemeye bazen 'kapasitör' adı da verilir.) O noktasındaki (Pierre Curie (1859-1906) ve Marie Curie (1867-1934) tarafından temin edilmiş) birkaç grain'lık (ç.n.: İngiliz ağırlık ölçüsü 1 grain = 0,0648 gram) radyum klorür, (ç.n.: $RaCl_2$ özellikte tıpta kullanılan bir radyum tuzu) yüksek hızda β ışınlarının (ç.n.: yüksek enerjili elektronlar) kaynağı olarak kullanılıyordu. (Daha önceki deneylerde Becquerel (ya da β) ışınlarıyla katot ışınlarının (ya da elektronların) ne oldukları bulunmuştu.) Plakalar arasında (kondansatör üzerindeki bir V potansiyel farkı aracılığıyla) yatay yönde bir elektrik alanı uygulanıyordu. Tüm deney düzeneği, odacığın iç kısmındaki her yerde (E elektrik alanına paralel yönde) sabit ve yatay bir B manyetik alanı oluşmasını sağlayan bir yığın kalıcı mıknatısla çevrelenmişti. O kaynağından yukarı yönde plakalar arasından geçmek için uygun hıza sahip olan elektronlar, çok küçük (0,2 mm) bir D diyaframından (ç.n.: fotoğraf makinesinde ışığın merceklerden geçişini kontrol eden düzenek) yalnızca manyetik alanın bulunduğu, havası tamamen boşaltılmış bir bölgeye çıkıyorlardı. En sonunda, odacığın en üstünde bulunan yatay konumdaki fotoğraf levhasına (ç.n.: üzerine bir görüntünün kaydedilebildiği düz ve ince metal ya da cam tabaka) çarpıyorlardı ve levha üzerindeki noktalarda bir dizi pozlama oluşuyordu. Şekil 15.4 bu deney düzeneğinin bir planını göstermektedir. Kaufmann, bir dizi deney yaptığı halde, hepsi birbirine o kadar benziyordu ki, burada deney dizisinin bütününün tipik bir örneğini oluşturan 'karma' bir öykü anlatıyoruz.[8]

E alanı hiç olmasaydı, B alanı yalnız başına Şekil 15.4'te belirtilen x-z düzlemindeki dairesel yörüngeyi oluştururdu ve elektron fotoğraf levhası üzerinde $(x_2, 0, \bar{z})$ noktasına çarpardı. E ve B alanları birlikte uygulansaydı, elektron kondansatör plakaları arasında yol aldığı süre boyunca yatay yönde de bir ivme kazanırdı, öyle ki bu kez fotoğraf levhasına bir $(x_2, \bar{y}, \bar{z})$ noktasında çarpardı. Yani, Şekil 15.4'te gösterilen asıl yörünge aslında (birbirine dik) iki hareketin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Herhangi bir elektronun daha

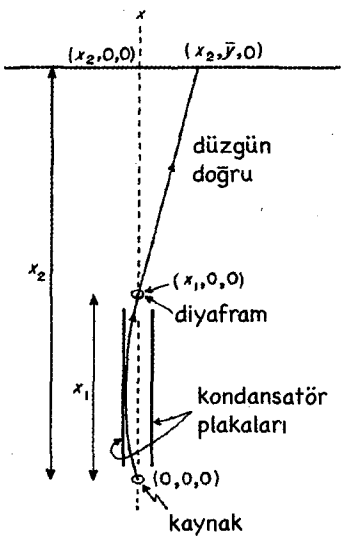


Şekil 15.4 Kaufmann'ın deney düzeneğinin bir planı

kaynağı terk ettiği andaki ilk hızı yüksek (ışık hızı c'nin fark edilebilecek kadar büyük bir kesri) ve plakalar arasındaki bölgedeki elektrik alanının etkisiyle kazandığı ivme görece küçük olduğundan, Kaufmann deney sonuçlarının çözümlemesini kolaylaştıran elektronun v hızının hareketi boyunca aslında neredeyse sabit kaldığı varsayımını yapmakta haksız değildi. Bu durumda hareketin Şekil 15.4'teki x–z düzlemi üzerine izdüşümü düzgün dairesel hareketti (Şekil 15.5'e bakınız). Bu, bu dairenin ρ yarıçapını elektronun v hızı, e/m oranı ve manyetik alanın önceden bilinen B büyüklüğü cinsinden ifade edebilmemize izin verir.[9] Aynı düzlem üzerinde bulunan üç nokta (Şekil 15.5'teki $(0,0,0)$, $(x_1,0,0)$ ve $(x_2,0,\bar{z})$ noktaları) tek bir çember belirlediklerinden, Kaufmann'ın deney düzeneğinin bilinen (x_1, x_2) boyutlarından ve ölçülen $\bar{z}$ değerinden elektronun yörüngesinin ρ yarıçapını belirleyebildiğini görürüz. Bu artı hız, manyetik alanın büyüklüğü ve bulunan eğrilik yarıçapı arasındaki kuramsal ilişki, Kaufmann'ın $\bar{z} = (e/m)(A/v)$ sonucunu elde edebilmesine izin verdi; burada A deney düzeneğini nitelendiren sabittir.[10]



Şekil 15.5 *B* alanı tarafından yalnız başına oluşturulan dairesel hareket



Şekil 15.6 *E* alanı tarafından oluşturulan düzgün ivmelenen hareket

Benzer biçimde, Şekil 15.4'te belirtilen x–y düzleminde (i) kondansatör plakaları arasındaki bölümde düzgün ivmelenen hareket[11] ve sonrasında (ii) kondansatörü terk ettikten (ve Şekil 15.6'da

resmedildiği gibi, Şekil 15.4'te gösterilen diyaframdaki $(x_1, 0, 0)$ noktasındaki delikten geçtikten) sonra düzgün doğrusal hareket yaptığını görürüz. Bir kere daha, v hızının yörünge boyunca (yaklaşık olarak) sabit kalması, y-koordinatı için olan hareket denklemini integre edebilmemize ve böylece deneysel olarak ölçülebilen ikinci koordinat olan $\overline{y}$ koordinatını $\overline{y} = (e/m)/(A'/v^2)$ olarak bulmamıza izin verir; burada A', deney düzeneğini nitelendiren başka bir sabittir.[12] Anlatmak istediğimiz şey, e/m oranı için ölçülen $(\overline{y}, \overline{z})$ koordinatları cinsinden ifadelere sahip olduğumuzdur. Elektronun elektromanyetik kütlesini açıklamaya aday olan kuramlardan herhangi birini bir $\psi(\beta)$ fonksiyonu ile nitelendirirsek (Kısım 15.A'daki (15.12) ve (15.15) denklemlerinde $m(v) = m_0\,\psi(\beta)$'nin çeşitli biçimleri açık olarak veriliyor), Kaufmann'ın verilerini çözümlemek için gereken denklemleri

$$\overline{z} = \left(\frac{e}{m_0}\right)\left(\frac{A}{c}\right)\left[\frac{1}{\beta\,\psi(\beta)}\right] \tag{15.3}$$

$$\overline{y} = \left(\frac{e}{m_0}\right)\left(\frac{A'}{c^2}\right)\left[\frac{1}{\beta^2\,\psi(\beta)}\right] \tag{15.4}$$

şeklinde yazabiliriz. Burada (e/m_0), elektron için yükün kütleye olan oranının düşük hızlardaki sınır değeridir. (Bu değer, ya verilere en küçük kareler yöntemiyle (ç.n.: istatistikte gözlemlenen veriler kümesiyle beklenenler arasındaki ilişkiyi - tüm veri kümesi için gözlemlenen değerle ona karşılık beklenen değer arasındaki sapmanın karesinin toplamını en aza indirerek - en iyi anlatan eğriyi elde etmekte kullanılan bir yöntem) uydurularak ya da başkalarınca yapılan değişik deneylerden (Kısım 15.1'e bakınız) elde edilir.)

Bilinmesi gerekenleri sıraladıktan sonra şimdi Kaufmann'ın deneylerinin sonuçlarını özetleyelim. Kaufmann'ın yüksek hızlı β ışınları ($0{,}787 \le \beta$ (13. nota bakınız[13]) $\le 0{,}945$) için elde ettiği e/m değerlerinin ilk deneysel sonuçları 1901 yılında yazdığı bir makalede yayınlandı. Bu, dikkatli çalışılması gereken tuhaf bir makaledir.[14]

Tablo 15.1 Kaufmann'ın 1902 yılındaki verileri

$\bar{z}$	$\bar{y}$	β	$\psi(\beta)$
0,348	0,0839	0,957	3,08
0,461	0,1175	0,907	2,49
0,576	0,1565	0,847	2,13
0,688	0,198	0,799	1,96

Tablo 15.2 Kaufmann'ın 1905 yılındaki verileri

		$\bar{y}_{kur}$		$\delta = (\bar{y} - y_k) \times 10^4$		β	
$\bar{z}$	$\bar{y}_{den}$	Abraham	Lorentz	Abraham	Lorentz	Abraham	Lorentz
0,1350	0,0246	0,0251	0,0246	- 5	0	0,974	0,924
0,1919	0,0376	0,0377	0,0375	- 1	+ 1	0,922	0,875
0,2400	0,0502	0,0502	0,0502	0	0	0,867	0,823
0,2890	0,0545	0,0649	0,0651	- 4	- 6	0,807	0,765
0,3359	0,0811	0,0811	0,0813	0	- 2	0,752	0,713
0,3832	0,1001	0,0995	0,0997	+ 6	+4	0,697	0,661
0,4305	0,1205	0,1201	0,1202	+ 4	+3	0,649	0,616
0,4735	0,1404	0,1408	0,1405	- 4	- 1	0,610	0,579
0,5252	0,1666	0,1682	0,1678	-16	-12	0,566	0,527

Bununla birlikte, burada bu makaledeki hatalı çıkışların üzerinde durmayacağız ve 1902 yılındaki makalesini ele alacağız. Kaufmann o yıl daha fazla veri yayınladı ve bunları Abraham'ın kütle kuramı cinsinden çözümledi. 1901 yılında yayınlanan makalesindeki formüllerden birinde cebirsel bir hatayı fark etti ve bunu daha sonra yaptığı çözümlemelerde düzeltti. 1901 ve 1902 yıllarındaki iki makalede belirtilen sonuçlar arasındaki farkın önemli bir kısmını bu açıklıyordu. Kaufmann, deney düzeneğinin boyutları için de geometrik düzeltmeler yaptı. Sunumda kolaylık sağlaması açısından burada, bundan sonra gelen tartışmalarda deneysel olarak gözlemlenen nicelikler için $\bar{y}$ ve $\bar{z}$ gösterimini kullanarak devam ediyoruz. Bu veriler Tablo 15.1'de gösteriliyor.[15] Kaufmann, β'yı belirlemekte yapılan küçük bir deneysel hatanın - β'nın bire yakın değerleri için $\psi(\beta)$'nın ((15.12) denklemi) çok hızlı değişmesi nedeniyle - m'de çok büyük bir belirsizliğe yol açacağının farkındaydı, ama bu gerçeğe rağmen yine de şunu ilan etti:

> Becquerel ışınlarını oluşturan elektronların kütlesi hıza bağlıdır. Bu bağlılık, Abraham'ın formülüyle kesin olarak gösterilebilir. Dolayısıyla elektronun kütlesi tamamıyla elektromanyetik bir doğaya sahiptir.[16]

Kaufmann, 1903 yılında yeni veriler yayınladı ve 1905 yılında Abraham'ın, Bucherer'in ve Lorentz'in kuramlarından birinde kesin bir karar kılmaya çalıştı. Bu çalışma en sonunda 1906 yılında çıkan, her şeyi yeniden gözden geçirip anlatan uzun bir makalede özetlendi. Kaufmann'ın verilerinin başka biçimde yorumlanışlarına geçmeden önce, 1905 yılındaki makalesini ele alıyoruz. Bu makalede daha sonrasında Planck'ın çok dikkatle inceleyeceği dokuz noktalık bir veri seti (Tablo 15.2) vardı.[17] Tüm bu veriler yeniydi ve Kaufmann'ın daha önceki ölçümlerinden bağımsızdı. Kaufmann, verilerine getirebildiği en iyi uyumu temel aldığını söyleyerek, en iyi kuramı ayırt edebildiğini öne sürdü. 1905 yılındaki makalesinin sonunda bazı çok geniş etkilere sahip sonuçlar vardır:

> Genel sonuçlar net bir şekilde Einstein'kine olduğu gibi Lorentz'in varsayımının da doğruluğuna karşı çıkıyorlar. Eğer bu sonuca bakarak bu temel varsayımın çürütüldüğü göz önüne alınırsa, elektromanyetik ve optik de dahil olmak üzere, tüm fizik bilimini göreli hareket ilkesini temel alarak kurmaya kalkışmanın bir başarısızlık olarak ele alınması zorunludur. Şu an Abraham'ınkiyle Bucherer'in kuramı arasında bir seçim yapmak olası değil ve böyle bir seçim $\psi(\beta)$'nın değerlerinin büyük oranda sayısal benzerliği nedeniyle yukarıda betimlenen tipte gözlemlerle ulaşılabilir görünmüyor. Bucherer'in olası gözlemlerle incelenebilecek şekilde hareket eden cisimlerin optiği için verdiği formülün Lorentz'inkiyle aynı sonuçları verip veremeyeceği hâlâ kanıtlanmalıdır.[18]

15.3 Planck'ın Kaufmann'ın Çalışmasını Çözümlemesi

Lorentz, daha 1904 yılında Kaufmann'ın kendine ait 1902 yılı verilerini çözümlemesinin gerçekten de Lorentz'in kendi modeli yerine Abraham'ın modelini kesin bir şekilde destekleyip desteklemediğini sorguladı. Lorentz'in yaptığı, Kaufmann'ın çözümleme yöntemini (aslında yukarıdaki (15.3) ve (15.4) denklemlerini) kullanmak, ancak $\psi(\beta)$ fonksiyonu için Abraham'ınki ((15.12) denklemi) yerine, kendi kuramına karşılık gelen ((15.15) denklemini) koymaktı. Verilerle kuramı arasında, neredeyse Kaufmann'ınki kadar iyi bir uyum buldu. Lorentz, her iki kuramın da verilerle kabul edilebilir bir uyum içinde olduğu sonucuna vardı.

Bununla birlikte, Kaufmann'ın verilerinin yorumlanışını göreliliğin yanlışlanmasının tersine, akla yatkın bir tarzda bu kuram için bir desteğe çeviren Planck oldu. Planck'ınki katı mantığın oldukça karışık bir duruma klasik anlamda çok güzel bir uygulamasıydı.[19] 1906 yılındaki önemli bir makalede, sistemin dışında oluşturulmuş E ve B alanları içindeki yüklü bir parçacık için Newton'un ikinci hareket yasasının uygun şekilde değiştirilmesini elde etmek için aslına bakılırsa (Kısım 17.2'de ele alınacak olan tipte) biçimin değişmezliği savlarını kullandı.[20] Bu, yasanın günümüzde hâlâ kullanılan görelilik açısından doğru biçimidir ve Newton'un ikinci yasasında ($\mathrm{d}p/\mathrm{d}t = F$, burada $p = m(v)\mathbf{v}$ momentumdur) kullanılan kütlenin (15.1) denkleminde verilen formda olması gerektiğini gösterir.

Planck, Lorentz'in ve Einstein'ın görelilik ilkesi üzerindeki çalışmalarının büyük değerini ve güzelliğini ve bunun sonuçlarının incelenmesinin önemini vurgularken, Kaufmann'ın (1905 yılındaki) deneylerinin varlığını da kabul etti.

> Emin olmak gerekirse bu soru [görelilik ilkesinin kabul edilebilirliği] W. Kaufmann'ın yeni ve önemli ölçümleri aracılığıyla çoktan yanıtlanmış gibi duruyor; yani, her ne kadar olumsuz yönde olsa da, öyle ki her türlü ek inceleme gereksizmiş gibi görünüyor. Bu arada ben, - bu deneylerin son derece karmaşık kuramını da göz önüne alarak - bu gözlemlerin ayrıntıları daha dikkatli çalışılırsa görelilik ilkesinin bunlarla uzlaştırılabileceğini hâlâ olası diye düşünmek istiyorum.[21]

Planck, daha sonra 1906 yılında Kaufmann'ın sonuçlarının ortaya çıkardığı soruna geri döndü.[22] Planck, beklenen sapmaları Kaufmann'ın kullandığından farklı bir çözümleme yöntemi kullanıp Abraham'in ve Lorentz'in kuramlarını temel alarak hesapladı. O da, Kaufmann'ın zamanında yaptığı gibi, Abraham'ın kuramının Einstein-Lorentz'inkine göre verilerle daha iyi uyum gösterdiği sonucuna varmak zorunda kaldı. Bununla birlikte, Kaufmann tarafından sağlanan (yukarıda Tablo 15.2'deki) deneysel sayılar ve Planck'ın çözümleme yöntemi kullanılırsa, $m(v)$'nin her iki şekli için de veri noktalarından birinin $\beta > 1$ verdiği gerçeğine işaret etti, ki bu rahatsız edici bir durumdu. Bu, her iki kuram için de tutarsızdı. (Yeri gelmişken, Kaufmann'ın kendisi de kendi tablosunda listeye geçirildiği gibi 1903 yılındaki veri noktalarından biri $\beta = 1{,}04$ sonucunu verdiği için bir şeylerden kuşkulanmış olabilir.)

Planck'ın çözümlemesinin matematiksel ayrıntıları epeyce karmaşık[23] olsa da, savlarının mantığını ana hatlarıyla vermek kolaydır. Kaufmann dokuz noktadan oluşan bir veri setine (Tablo 15.2) sahipti. Planck, yalnızca $\bar{z}$ değerini kullanarak, $u = m_0\, c/p$ şeklinde tanımladığı bir u niceliğinin değerini bulabiliyordu.[24] Bu u değerinin doğrudan doğruya verilerden çıktığına ve $m(v)$'nin kesin biçimine bağlı olmadığına dikkat ediniz. Planck'ın bunu izleyen savları için u'yu deneysel verilerden elde etmek için yalnızca $\bar{z}$ değerinin gerekmesi, ama $\bar{y}$ değerinin gerekmemesi temeldi.[25] Planck, e/m_0 için Kaufmann'ın kullandığı değerin aynısını kullandı.[26] Planck, her kuram tarafından kesin ve açık olarak verilen $m(v)$'yi temel alarak, p için kuramsal bir ifade elde edebilmişti. Bunlardan ve u için bulduğu açık ifadeden her kuram için β değerlerini çıkardı. Tüm bunlar o ana dek $\bar{y}$'ın deneysel değerini kullanmaksızın yapılmıştı. β bilindiğinden, her kuram için $\bar{y}$'ın kuramsal değerini öngörebilmişti.[27] Sonuçlar Tablo 15.3'te veriliyor. Ayrıca, Planck'ın $\bar{z}$ ve $\bar{y}$ için bulduğu denklemler öyle özeldiler ki, $(\bar{y}, \bar{z})$ ikilisinin deneysel değerleri verildiğinde - Abraham'ınkiyle Lorentz'in kuramı arasında yapılacak seçimden bağımsız olarak - β'nın sayısal değerini bulmak için de kullanılabilirlerdi.[28] Yukarıda sözü edilen sorunlu β = 1,033 değerinin ortaya çıkması, Kaufmann'ın veri noktalarından (Tablo 15.2) ilki içindi.

Tablo 15.3 Planck'ın 1906 yılında Kaufmann'ın verilerini çözümlemesinin sonuçları

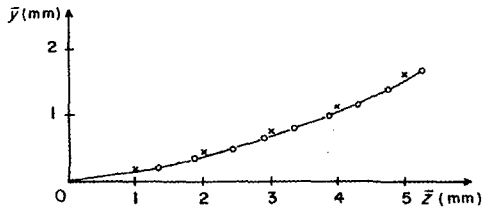
			Abraham		Lorentz	
$\bar{z}$	u	$\bar{y}$	β	$\bar{y}_{kur}$	β	$\bar{y}_{kur}$
0,1354	0,3871	0,0247	0,9747	0,0262	0,9326	0,0273
0,1930	0,5502	0,0378	0,9238	0,0394	0,8762	0,0415
0,2423	0,6883	0,0506	0,8689	0,0526	0,8237	0,0555
0,2930	0,8290	0,0653	0,8096	0,0682	0,7699	0,0717
0,3423	0,9634	0,0825	0,7542	0,0853	0,7202	0,0893
0,3930	1,100	0,1025	0,7013	0,1054	0,6728	0,1099
0,4446	1,236	0,1242	0,6526	0,1280	0,6289	0,1328
0,4926	1,360	0,1457	0,6124	0,1511	0,5924	0,1562
0,5522	1,510	0,1746	0,5685	0,1823	0,5521	0,1878

Planck, elbette ki çözümlemesinde yardımcı olacak bazı varsayımlar bulunduğunun farkındaydı. 1907 yılında yayınladığı bir makalede bunlardan birine odaklandı. Kaufmann'ın deney düzeneğinde kullandığı elektrik alanın büyüklüğünü ne kadar iyi belirleyebildiği ve bu büyüklüğü deneyini

her yineleyişinde ne kadar sabit tutabildiği konusunda bazı sorular vardı. (Örnek olarak, düzenekte iyi bir vakum oluşturulamaz ya da korunamazsa, β ışınları ortamda az da olsa kalan hava moleküllerini iyonize edebilir ve bu nedenle kondansatör plakaları arasında kalan bölgedeki elektrik alanın büyüklüğü azalabilirdi. Kondansatör plakalarından yük sızması da benzer bir etkiye yol açabilirdi.) Planck, Kaufmann'ın verilerinin bu kez, kondansatör plakaları arasında kalan bölgedeki elektrik alanının büyüklüğünün bilindiği öne sürülen E değerinin yerine α konarak bir kere daha çözümlenmesini önerdi; burada α her $(\overline{y}, \overline{z})$ veri çifti için uyum oluşturmakta belirlenecek serbest bir parametredir.[29] Daha önceki çözümlemesinde, α'nın değeri (Kaufmann tarafından verildiği gibi) $E_{maks} = 2{,}013 \times 10^6$ V/m değerinde sabit olarak alınmıştı. Ayrıca daha yeni belirlenmiş bir e/m_0 değeri de kullandı.[30] Sonuçlar Tablo 15.4'te veriliyor. Her iki kuram için de $\alpha < E_{maks}$ olduğu açıktır. α plakalar arasındaki elektrik alanın büyüklüğünü temsil ettiğinden, değeri deney düzeneğinin bir özelliği ve dolayısıyla alınan tüm veriler için aynı olmalıdır. Bu yüzden, Lorentz kuramı için α'nın değişiminin (% 2) Abraham kuramı için olandan (% 5) daha az olduğu gerçeği, Kaufmann'ın verilerinin Einstein-Lorentz'in görelilik kuramını tercih ettiği sonucuna varmamıza izin verir. Planck'ın akıl yürütüşünün ana hatları buydu. Yine de bu, her iki halde de kritik bir karardır (% 2'ye kıyasla % 5) ve göreliliğin lehinde hiç de öyle bozguna uğratıcı bir kanıt değildir. Planck'ın çözümlemesinin önemli sonucu, Kaufmann'ın deneylerinin artık görelilik kuramının kabul edilebilirliğinin önünde engel oluşturmamasıdır.

Tablo 15.4 Planck'ın 1907 yılında Kaufmann'ın verilerini yeniden çözümlemesinin sonuçları

			Abraham		Lorentz	
$\overline{z}$	u	$\overline{y}$	β	α	β	α
0,1354	0,4226	0,0247	0,9655	18,840	0,9211	17,970
0,1930	0,6006	0,0378	0,9045	18,920	0,8572	17,930
0,2423	0,7515	0,0506	0,8424	18,770	0,7994	17,810
0,2930	0,9050	0,0653	0,7779	18,520	0,7414	17,650
0,3423	1,052	0,0825	0,7194	18,580	0,6891	17,800
0,3930	1,200	0,1025	0,6650	18,560	0,6400	17,860
0,4446	1,350	0,1242	0,6157	18,430	0,5953	17,820
0,4926	1,485	0,1457	0,5756	18,240	0,5586	17,710
0,5522	1,649	0,1746	0,5321	18,040	0,5186	17,590



Şekil 15.7 Einstein'in Kaufmann'ın verilerini açıklaması

Einstein, 1907 yılında yayınladığı görelilik üzerine her şeyi yeniden gözden geçirip anlatan makalede Kaufmann'ın verileri için $\bar{y}$'nin $\bar{z}$'ye göre grafiğini (bakınız Şekil 15.7) sundu ve bunu görelilik için olanla karşılaştırdı. Bu grafikte küçük çemberler Kaufmann'ın dokuz veri noktasını temsil ediyorlar. Kesintisiz eğri bu noktaları birleştiren düzgün doğru parçacıklarından oluşmuş gibi gözüküyor. Küçük çarpı işaretleri, Einstein'ın $\bar{z} = 1, 2, \ldots, 5$ mm iken $\bar{y}$ için öngörüleridir. Einstein'ın bu karşılaştırmayı değerlendirmesi şöyleydi:

> Bu inceleme zorluğu göz önüne alındığında özdeşlik yeterli diye görülebilir. Bununla birlikte, şimdiki sapmalar düzenlidirler ve Kaufmann'm araştırması açısından hata payının oldukça dışındadırlar. Bay Kaufmann'ın hesaplamalarının hatasız oldukları gerçeği, Bay Planck'ın başka bir hesaplama yöntemi kullanarak Bay Kaufmann'ınkilerle tamamıyla uyuşan sonuçlara vardığı gerçeğinden çıkarılabilir.[31]

Daha sonra Abraham'ın ve Bucherer'in kuramlarının verilerle daha iyi uyuştukları gerçeğini kabul etti, ancak yapısal açıdan ad hoc (ç.n.: bakınız Kısım 2.4) oldukları ve doğal olmadıkları için doğru olma olasılıklarının küçük olduğu yolundaki görüşünü sundu. Bir başka deyişle, kapsadıkları olayların erimi bakımından (bütün fiziksel olayları ilgilendiren kendi) görelilik kuramına göre daha kısıtlıydılar.

15.4 e/m_0'ın Daha Sonra Yapılan Belirlemeleri

Planck'ın Kaufmann'ın verilerini yeniden çözümlemesinin sonrasında bile sorunun Abraham'ın ya da Lorentz'in kuramı lehinde hâlâ açık bir biçimde kararlaştırılamadığını gördük. Şimdi bütünlüğü sağlamak bakımından, Kaufmann'ın deneylerini izleyen yıllarda

e/m_0 'm belirlenmesinin sonuçlarını göstereceğiz. Adolf Bestelmeyer (1875-1954) 1906 yılında üzerine düşen X ışınları yüzünden bir metalden çıkan ikincil katot ışınlarını kullandı ve önce bir hız seçicisi gibi davranan iç içe geçmiş E ve B alanlarından geçirilen ve sonra da yalnızca manyetik alanla saptırılan bu elektronlar için e/m oranını ölçtü.[32] Bulduğu sonuçlar Tablo 15.5'te veriliyor. (Bu ve bundan sonraki tablolarda tüm e/m değerleri kolaylık olması açısından 10^{-7} ile çarpılmıştır.) e/m_0 'ın değeri kuramların her biri için verilerle en iyi uyumu sağlaması amacıyla ayarlanmıştı. Bu oldukça küçük β değerleri için hiçbir kuramın diğerlerine kıyasla kesin olarak tercih edilmediği açıktır.

Tablo 15.5 Bestelmeyer'in 1907 yılında e/m için ölçtüğü değerler

		Abraham	Lorentz
β	(e/m)	$e/m_0 = 1{,}720$	$e/m_0 = 1{,}733$
0,195	1,697	1,694	1,700
0,247	1,678	1,678	1,679
0,322	1,643	1,647	1,640

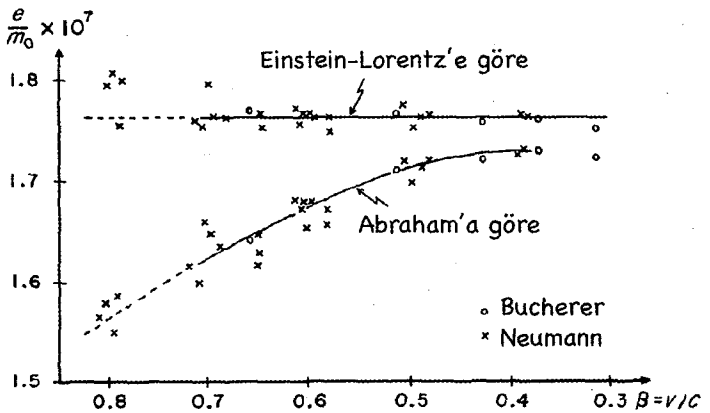
Bucherer, 1908 yılında bir radyum florür (ç.n.: RaF_2) kaynağından çıkan β ışınlarını kullandı ve bunları Bestelmeyer'in yaptığına benzer bir biçimde iç içe geçmiş elektrik ve manyetik alanlara maruz bıraktı.[33] Bucherer, bu verileri indirgerken her ölçüm için e/m_0 değerini çıkardı ve bunları listeledi. β değişirken e/m_0 için neredeyse sabit değerler veren kuram diğerlerine tercih edilecekti. Daha sonra gelen deneyler tarafından bir kuramı bir diğerine göre yargılarken kullanılan ölçüt de bu ölçüttü. Bucherer, makalesinin başında hem klasik elektron (Abraham'ın) kuramının hem de (Lorentz'in) göreliliğin başka deneysel başarıları olmasına rağmen kendisinin sabit hacimli elektron kuramının ayrılım (ç.n.: İngilizcesi 'dispersion', kompleks bir dalganın frekans ya da dalga boyu gibi belirli bir özelliğe göre bileşenlerine ayrılması) olaylarıyla çelişkili olduğunu belirtti. Geriye kalan tek şey, Abraham'ınkiyle Lorentz'in kuramı arasında karar kılmaktı. Tablo 15.6, e/m_0 'ın Lorentz'in kuramı için Abraham'ınkine göre daha sabite yakın olduğunu gösteriyor. Yine de literatürde (ç.n.: fizik alanındaki bilimsel yayınlarda) Bucherer'in

vardığı sonuçların geçerliliği hakkında deneyindeki belirli bazı teknik ayrıntılar nedeniyle hâlâ bir takım anlaşmazlıklar vardı.

Tablo 15.6 Bucherer'in 1909 yılında e/m için çıkardığı değerler

	Lorentz	Abraham
β	e/m_0	e/m_0
0,3173	1,752	1,726
0,3787	1,761	1,733
0,4281	1,760	1,723
0,5154	1,763	1,706
0,6870	1,767	1,642

1914 yılında hangi kuramın sabite en yakın e/m_0 değerleri verdiği sorusu kesin bir biçimde çözüldü.[34] Bucherer'in yönteminin daha da arındırılmış bir biçimi $0{,}39152 \leq \beta \leq 0{,}80730$ için 26 noktalık bir veri seti elde edilmesinde kullanıldı. Lorentz'in kuramının Abraham'ınkine olan üstünlüğü Şekil 15.8'de çok açıktır.[35] Bu sonuçlar daha sonrasında bağımsız bir biçimde 1915 yılında doğrulandı.[36]



Şekil 15.8 Özel göreliliğin lehindeki son ve kesin kanıt

15.5 Sonuçlar

Oldukça açık olan Kaufmann'ın 1905 yılındaki verilerinin ilk başta özel görelilik kuramına değil, tersine klasik kuramlara destek sağlamak için alındıkları sonucu dışında, bu olayın incelenmesi bilimsel bir kuramın gelişiminin ve kabul edilişinin birçok ilginç özelliğini de örnekliyor. Kaufmann deneyi, her ne kadar başlangıçta özel göreliliği çürütmüş gibi görünse de, - bilime katı bir yanlışlamacı bakışın beklediği türde davranılmasına yol açmak anlamında - kesin ve son ('can alıcı') kararın verilmesine neden olan bir deney olarak görülmedi.[37] *Can alıcı bir deney*'in arkasındaki asıl fikir, tek bir gözlemler setinin hiçbir farklı yoruma izin vermeksizin bir kuramı çürütebilmesi ya da birbirine rakip kuramlar arasından birinde karar kılabilmesidir. Bununla birlikte, Kaufmann'ın deneylerinin güzel bir şekilde gösterdiği gibi, tek bir önemli hipotez (burada Abraham'ınkine karşı Lorentz'in modeli) diğerlerinden tamamıyla ayrı bir biçimde değil, yalnızca belirli bir arka planla ya da yardımcı varsayımlarla (burada bir kuram ya da Kaufmann'ın deney düzeneğinin modeli) birlikte test edilir.[38] Ortaya öngörülerle gözlemler arasında (bu durumda olduğu gibi) uyuşmazlık çıktığında, bundan test edilen birincil hipotezin mi yoksa yardımcı varsayımlardan birinin mi sorumlu olduğundan emin olunamaz. (Kısım 1.2'deki varsayılan önermeler tartışmasını hatırlayınız.) İlginç fiziksel durumlarda gerçekten de can alıcı deneylerin var olduğu açık değildir. Bu genel soruna Kısım 24.1'de bilimsel bir kuramın deneysel temelleriyle tam olarak belirlenememesini ele alırken geri döneceğiz.

Özet olarak bilimin her zaman basit

hipotez → öngörü → çürütme → hipotezin reddedilmesi

planına göre işlemediğini söyleyebiliriz. Aslında Planck, Kaufmann'ın sonuçlarının farkında olduğu halde, göreliliğin genelliği ve büyük potansiyeli nedeniyle Newton'un ikinci yasasının kovaryant formülasyonunu (ç.n.: burada anlatılmak istenen, yasanın Lorentz dönüşümleri altında formunu değiştirmeden kalacak şekilde yazılması) geliştirdi. Kaufmann'ın hesaplamalarının doğruluğunu kendisi kontrol ettikten sonra bile göreliliği reddetmedi. Einstein, Kaufmann'ın verilerini görelilikle uyum içinde diye alırken daha da ileri gitti. İki klasik modelin doğru olması olasılığını, bu deneyle da-

ha iyi uyuştuklarının kabul edilmesine rağmen, yapısal olarak ad hoc ve uydurma oldukları gerekçesiyle ciddiye almadı. Özel görelilik kuramı, yeni gözlemler e/m oranı sorusunu 1914 yılında kesin olarak çözene dek çoktan başka birçok başarıları aracılığıyla sağlam bir şekilde kurulmuştu. Görelilik için bu tek alanda kesin desteğin olmaması, artık can alıcı bir deneyde olması gereken bir yön gibi görülmüyordu. Bu soru, daha sonra yapılacak ölçümlerle halledilecek - ve gerçekten de halledilmiş - önemsiz bir çatışma ya da insanı uğraştıran bir ayrıntı konumuna inmişti.

15.A Bazı Teknik Ayrıntılar

Abraham'ın elektron kütlesinin değişimini çeşitli modelleri temel alarak hesaplaması yönteminin ana noktaları aşağıdakilerdir. Klasik mekaniğin ileri düzeydeki formülasyonlarında (ç.n.: anlatılmak istenen, matematiksel olarak daha ileri teknikler kullanılarak çalışılması), hareket denklemlerinin (aslında Newton'un ikinci hareket yasasının, $F = ma$) adına Lagrangian denen bir L fonksiyonundan ($L = T - V$, burada T incelenen sistemin kinetik enerjisi, V de potansiyel enerjisidir) elde edildikleri bir formalizm kullanılır. Bizim burada amaçladıklarımız için, elde bir L olduğunda sistemin p momentumunun

$$p = \left(p_x, p_y, p_z\right) = \left(\frac{\partial L}{\partial v_x}, \frac{\partial L}{\partial v_y}, \frac{\partial L}{\partial v_z}\right)$$

ya da $p_j = \dfrac{\partial L}{\partial v_j}$, $j = 1, 2, 3$ (ya da x, y, z) (15.5)

şeklinde elde edilebileceğinin bilinmesi yeterlidir; burada $\mathbf{v} = \left(v_x, v_y, v_z\right)$ parçacığın hızıdır. Bu durumda parçacığın m kütlesi[39]

$$p = m\mathbf{v} \tag{15.6}$$

olarak belirlenir (gerçekten, tanımlanır) ve Newton'un ikinci yasası

$$\frac{dp}{dt} = F \tag{15.7}$$

şeklini alır. Böylece, elde bir $L = L(v)$ olduğunda, $m = m(v)$ açıkça elde edilebilir.

Abraham'ın elektron modeli, elektronu düzgün yük dağılımına sahip a yarıçaplı, biçim değiştirmez bir küre şeklinde varsayar.[40] Bu model için Lagrangian'ın

$$L_A = -\frac{e^2}{16\pi a}\frac{\left(1-\beta^2\right)}{\beta}\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right); \tag{15.8}$$

olduğunu göstermiştir; burada $\beta = v/c$ 'dir (ve L'nin sağ altındaki A harfi Abraham'ı göstermek için kullanılmıştır). Bu durumda (15.5) denklemi

$$p_A = \frac{\partial L}{\partial v} = \frac{e^2}{8\pi ac}\frac{1}{\beta}\left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\right)\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)-1\right] \tag{15.9}$$

olmasını gerektirir. $\beta << 1$ limitinde, bu

$$p_A \xrightarrow[\beta \to 0]{} \frac{e^2}{6\pi ac^2}v \equiv m_0 v \tag{15.10}$$

ifadesine indirgenir. m_0'ın bu değerinin olması gerektiği gibi (15.2) denklemiyle uyum içinde olduğuna dikkat ediniz. Bu nedenle, p'yi

$$p_A = \frac{3}{4}m_0\frac{c}{\beta}\left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\right)\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)-1\right] \tag{15.11}$$

diye ifade edebiliriz. (15.6) denkleminden

$$\begin{aligned} m_A &= \frac{3}{4}m_0\frac{1}{\beta^2}\left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\right)\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)-1\right] \equiv m_0\psi_A(\beta) \\ &= m_0\left(1+\frac{2}{5}\beta^2+\frac{9}{35}\beta^4+\cdots\right) \end{aligned} \tag{15.12}$$

bulunur; burada $\beta << 1$ için β 'nın kuvvetleri cinsinden bir seri açılımı yapılmıştır.

Lorentz elektronu için (hareketsiz dururken) küresel olan ama (ç.n.: belli bir hızla hareket ederken) bir elipsoid (ç.n.: tüm düzlemsel kesitleri elips ya da daire olan üç boyutlu cisim) şeklinde yassılaşan bir elektron vardır. Bu durumda benzer hesaplamalarla

$$L_L = -m_0c^2\left(1-\beta^2\right)^{1/2} \tag{15.13}$$

$$p_L = m_0c\beta\left(1-\beta^2\right)^{-1/2} \tag{15.14}$$

$$\begin{aligned} m_L &= m_0\left(1-\beta^2\right)^{-1/2} \equiv m_0\psi_L(\beta) \\ &= m_0\left(1+\frac{1}{2}\beta^2+\frac{3}{8}\beta^4+\cdots\right) \end{aligned} \tag{15.15}$$

olduğu bulunur. Bu iki kuram birbirlerinden yalnızca ikinci dereceden kuvvetlerde (bir başka deyişle β^2 terimlerinde) ayrılırlar. Bu nedenle, ikisini birbirinden deneysel olarak ayırt edebilmek için yüksek hızlar gerekliydi.

Yararlı Kaynaklar

Stanley Goldberg'in 'Abraham'ın Elektron Kuramı: Deneyle Kuramın Simbiyozu' adlı makalesi, elektronun klasik bir modelini oluşturmak için harcanan bu çabalarda karşılaşılan sorunların iyi ve kapsamlı bir tartışmasını sunar. Kaufmann deneylerinin çözümlenmesinin teknik ayrıntıları ve karşılaşılan yöntembilimsel (ç.n.: İngilizcesi 'methodological') sorunlar üzerinde birtakım düşünceler James Cushing'in 'Elektromanyetik Kütle, Görelilik ve Kaufmann Deneyleri' adlı çalışmasında bulunabilir. Tarihsel arka planla ilgili birçok bilgi ve bol miktarda teknik ayrıntı, Arthur Miller'ın her bakımdan eksiksiz ve kapsamlı *Albert Einstein'ın Özel Görelilik Kuramı* adlı çalışmasında verilir.

Bölüm VI

Görelilik kuramı

Isının ve ışığın hareketin farklı şekilleri olduğunu ileri süren dinamik kuramın güzelliği ve berraklığı, şimdiki halde iki bulut tarafından karartılıyor. I. Bulutların ilki ışığın dalga kuramıyla var olmaya başlamış, Fresnel ve Dr. Thomas Young tarafından üstesinden gelinmişti; 'Dünya aslında ışığı geçiren eter gibi esnek bir katının içinde nasıl hareket edebilir?' sorusunu içeriyordu. II. İkincisi ise enerjinin bölünmesine ilişkin Maxwell-Boltzman öğretisidir.

Lord Kelvin (William Thomson), *Isının ve Işığın Dinamik Kuramının Üstündeki On Dokuzuncu Yüzyıl Bulutları*

Newton, beni bağışla; çağının en yüksek dereceden düşünce ve yaratıcılık gücüne sahip bir kişi için hemen hemen olanaklı olan tek yolunu buldun. Her ne kadar yakın deneyimler alanından daha uzakta yer alan başkalarınca yerlerinin doldurulması gerekeceğini şimdi bilsek de, yarattığın kavramlar bugün bile hâlâ ilişkileri daha derinden anlamayı hedeflediğimizde fizikte düşünüşümüze yol gösteriyor.

Albert Einstein, *Otobiyografik Notlar*

16
Özel Göreliliğin Temelleri ve Zemini

Albert Einstein, halk arasında görelilik kuramının mimarı ve modern bilimsel dehanın somutlaşmış hali olarak bilinir. Bunun yanında, biraz daha yaşlıca kuşaklar arasında hem büyük insanî kaygılara sahip bir kişi, hem de kuramsal çalışmaları atom bombasının temelini oluşturan bir kimse olarak hatırlanması da olasıdır. İleride kendi yaşam sürecinde bile benzersiz bir efsane olacak birisi için Einstein'ın geçmişi ve çocukluk yılları yeterince uğursuzdu. Aslında, yaşamının sonraki yıllarında kendi kendisinin yeteneğini değerlendirmesi, 'Özel bir yeteneğim yok, yalnızca son derece meraklıyım'[1] olmuştu. Newton gibi, dikkati bir noktada toplama konusunda sıradışı bir yeteneğe sahip olduğu görünüyor. Önce insan olarak Einstein'ın yaşam öyküsünün özetiyle başlayacağız ve sonrasında dikkatimizi görelilik ilkesiyle ilgili savlarına çevireceğiz.

16.1 Albert Einstein

Einstein, Almanya'da Ulm şehrinde hiçbir üyesinin herhangi bir dahilik özelliği göstermediği bir ailede (ç.n.: 1879'da) doğdu. Aile, Albert'in doğumundan bir yıl sonra Münih'e taşındı. Babası, çoğu başarısızlıkla sonuçlanan bir dizi küçük ticari iş yapmıştı. Genç Albert, özellikle iyi bir öğrenci değildi, bunun nedeni büyük ölçüde ezbere öğretime büyük vurgu yapan katı Alman okul düzeninden hoşlanmamasıydı. Sınıftaki tek Yahudi öğrencinin kendisi olduğu bir Katolik ilkokuluna gitti ve sonrasında on yaşındayken Mü-

nih'teki Luitpold Jimnazyum'una (ç.n.: İngilizcesi 'Gymnasium') girdi. O zamanlar Almanya'da jimnazyum (öğrencilerin yaş grupları açısından) Amerikan ortaokul ve lisesinin birleştirilmiş haline denkti. Öğrenciler bu okullara genellikle on yaşından on sekiz yaşına kadar devam ederdi. Einstein, entelektüel atmosferi neredeyse aynı derecede bunaltıcı bulmuştu. Hayatı boyunca baskının hiçbir çeşidinden hiç hoşlanmadı, ama yine de aynı zamanda doğanın yasalarına içten bağlandı. Kişiliğindeki benzer bir paradoks kendisini genel olarak insanlık için duyduğu insanî kaygılarda ve yakın, kişisel arkadaşlıklarının olmamasında açığa çıkardı. Bu konu hakkında kendisini 1930 yılında aşağıdaki gibi anlattı.

> Sosyal adalete ve sosyal sorumluluğa olan tutkulu ilgim, her zaman erkeklerle ve kadınlarla doğrudan doğruya ilişkilerde bulunmaktaki belirgin isteksizliğimle tuhaf bir karşıtlık oluşturdu. Ben, tek bir koşumluk bir atım, çifte sürülmeye ya da takım çalışmasına göre yaratılmamışım. Hiçbir zaman tüm kalbimle bir ülkeye ya da devlete, arkadaş çevreme ya da kendi aileme bile ait olmadım. Bu bağlara her zaman belirsiz bir soğukluk eşlik etti ve kendi içime çekilme isteğim yıllar geçtikçe artıyor. Böylesi bir yalıtım bazen acı oluyor, ancak başka insanların anlayışından ve duygudaşlığından uzakta kalmış olmaktan dolayı üzülmüyorum. Bu yüzden kesinlikle bir şeyler kaybediyorum, ama başkalarının geleneklerinden, görüşlerinden ve önyargılarından bağımsız kılınmakla bu kaybımın bedeli karşılanıyor ve aklımın huzurunu bu türden oynak temeller üzerine dayamaya hiç niyetim yok.[2]

Bilime karşı daha küçük yaşlarda duymaya başladığı ilgi, okul yıllarında olmuş herhangi bir olay nedeniyle değil, ama üzerinde yaşamının geri kalan kısmında da etkisi süren iki olay yüzündendir.

> Bir şaşkınlık... 4 ya da 5 yaşlarında bir çocukken babamın bana gösterdiği bir pusulanın bana hissettirdiği. Bu iğnenin o kadar kararlı bir şekilde davranması, bilincinde olunmayan kavramlar (doğrudan doğruya 'dokunma' ile ilişkili sonuç) dünyasında bir yer bulabilecek olan olayların doğasıyla hiç de uyum içinde değildi. Bu deneyimin üzerimde derin ve devam eden bir etki bıraktığını hâlâ hatırlıyorum - ya da en azından hatırlayabildiğime inanıyorum. Bunların arkasında gerçekten derinlerde saklı bir şey olmalıydı. Daha çocuklukta insanın önünde görülenler bu türden tepkilere yol açarlar; yere düşen cisimlere, rüzgârla ve yağmurla ilgili şeylere, ne ayla ilgili şeylere ya da ayın aşağı düşmediği gerçeğine, ne de yaşayan ve yaşamayan maddeler arasındaki farklarla ilgili şeylere şaşırır.
>
> 12 yaşındayken tamamıyla farklı bir yapıda ikinci bir şaşkınlık yaşadım: Okuldayken bir öğretim yılının başında elime geçen Öklit'in düzlem geometrisiyle ilgili küçük bir kitapta. Burada, örneğin bir üçgenin üç farklı yük-

> sekliğinin bir noktada kesiştiği gibi - hiçbir şekilde açık olmamalarına karşın - yine de herhangi bir kuşkuya yer bırakmaz görünen bir kesinlikle kanıtlanabilen iddialar vardı. Bu açıklık ve kesinlik üzerimde betimlenemez bir etki bıraktı. Aksiyomun kanıtsız olarak kabul edilmek zorunda olunması beni rahatsız etmedi. Her durumda geçerliliği bana şüpheli görünmeyen önermelere kanıtlar uydurabiliyorsam bu benim için tamamen yeterliydi. Örnek olarak bir amcanın bana Pythagoras teoremini kutsal geometri kitapçığı elime geçmeden önce söylediğini hatırlıyorum. Bayağı bir çaba harcadıktan sonra bu teoremi üçgenlerin benzerliğini temel alarak 'kanıtlamayı' başarmıştım; bunu yaparken dik üçgenlerin kenarları arasındaki ilişkilerin tamamıyla dar açılardan biri tarafından belirlenmek zorunda olduğu bana çok 'açık' görünmüştü. Bana yalnızca benzer biçimde 'açık' olduğu gözükmeyen bir şeyin herhangi bir şekilde kanıtlanması gerekirmiş gibi geliyordu. Ayrıca, geometrinin uğraştığı cisimlerin duyularla algılanan, yani 'gözle görülebilen ve dokunulabilen' cisimlerden hiç de farklı türde olmadıkları görünüyordu. 'Önsel (*a priori*) sentetik yargıların' olanaklılığı hakkındaki iyi bilinen Kantçı sorunsalın altında da bulunması olası bu ilkel düşünce, açık olarak geometrik kavramların doğrudan doğruya deneyimlere konu olan cisimlerle (şekil değiştirmeyen çubuk, sonlu aralık, vb.) arasındaki ilişkinin bilinçsizce var olduğu gerçeğine dayanır.[3]

Albert on beş yaşına geldiğinde ailesi İtalya'ya, Milano'ya taşındı; babası burada yeni iş olanaklarında şansını denedi. Einstein, bir yıl kadar Münih'teki jimnazyumda kaldı, ancak sonra diploma almadan okulu bıraktı ve yaklaşık bir yıl kadar seyahat etti. Aynı sıralarda Alman vatandaşlığından çıktı. En sonunda ikincil eğitimini (ç.n.; liseyi) İsviçre'de, Aarau'da tamamladı ve sonrasında Zürih'teki İsviçre Federal Politeknik Okulu'na (Almancası 'Eidgenössische Technische Hochschule' ya da kısaca ETH) girdi. İsviçre sistemindeki daha büyük entelektüel özgürlük, Einstein gibi bağımsız bir düşünce insanına daha çekici gelmişti. Üniversite öğrencisi olarak derslere çok seyrek girer, derslere girmek yerine arkadaşı Marcel Grossman'ın (1878-1936) ders notlarını kullanır ve zamanın büyük kısmını Hermann von Helmholtz'un (1821-1894), Gustav Kirchhoff'un (1824-1887), Ludwig Boltzmann'ın (1844-1906), Maxwell'in ve Heinrich Hertz'in (1857-1894) bilimsel klasiklerini okuyarak geçirirdi. Einstein'ın Zürih'teki öğretmenlerinden biri gününün önde gelen Avrupalı matematikçilerinden olan Hermann Minkowski (1864-1909) idi. Einstein, yaşamının bu döneminde son derece ileri düzeyde matematiğe karşı oldukça ilgisizdi. Matematiğin daha soyut alanlarının fiziksel kuramların daha ileri götürülmesinde oynadığı merkezcil rolün önemine inanır hâle gelmesi, çok sonraları kendi genel görelilik kuramının formülas-yonunu yaptığı sıralardadır. Einstein, üniversiteden mezuniyet diplomasını 1900 yılında aldı, ancak herhangi bir üniversitede bir iş bu-

lamadı. 1901 yılında İsviçre vatandaşlığına geçti ve sonrasında Grossmann'ın yardımıyla İsviçre'de, Bern'deki hükümete ait patent ofisinde patent başvurularını inceleyen bir memur olarak bir iş sahibi oldu. 1903 yılında kendisi de Zürih'te öğrenci olmuş olan Mileva Maric (1875–1948) ile evlendi. Einstein, gününün önde gelen fizikçileriyle herhangi bir ilişki içinde bulunması için desteklenmese de, en yaratıcı çalışmalarından bazılarını Bern'deyken yaptı. Fikirlerini İtalyan bir mühendis olan arkadaşı Michelangelo Besso (1873–1955) ile tartıştı. Einstein, 1905 yılında moleküler boyutların belirlenmesi üzerine olan doktora tezi araştırmasını yayınladı ve aynı yıl kendisine Zürih Üniversitesi tarafından Ph.D. (ç.n.: felsefe doktoru) unvanı verildi. Aynı yıl kendisine ait dört ayrı makale daha (ç.n.: o zamanlar son derece saygın) Alman dergisi *Annalen der Physik*'te yayınlandı. 'Işığın Oluşturulması ve Dönüştürülmesiyle İlgili Höristik (ç.n.: bir problemin çözümünde ya da araştırılmasında rehberlik eden genellikle spekülatif formülasyonla ilgili) Bir Bakış Açısı Üzerine' başlıklı birinci makale, ışık kuantalarını (ç.n.: fizikte bölünemez en küçük enerji birimine sahip paketçik anlamındaki kuantumun çoğulu) temel alarak fotoelektrik (ç.n.: (ışık gibi) ışımanın maddeyle etkileşimi sonucu oluşan çeşitli elektriksel etkiler) etkisinin anlaşılmasını sağlıyordu. 'Hareketi Değişmeyen Bir Sıvıda Asılı Duran Küçük Parçacıkların Isının Moleküler Kinetik Kuramının Gerektirdiği Hareketi Üzerine' adlı çalışması, Brown devinimini açıklıyordu ve atomların var olduklarına ilişkin tamamen doğrudan bir kanıt sağlıyordu. 'Hareket Eden Cisimlerin Elektrodinamiği Üzerine' adlı makalesi özel görelilik kuramını içeriyordu ve 'Bir Cismin Eylemsizliği İçerdiği Enerji Miktarına Bağlı Mıdır?' başlıklı çalışması, 17. Konu'da ele alınan kütleyle enerjinin özdeşliğini kanıtlıyordu. Yeri gelmişken Einstein'a 1921 Nobel Fizik Ödülü verilmesinin gerekçesinde özel görelilik kuramından değil, fotoelektrik etkisi üzerine çalışmalarıyla matematiksel fizikteki çalışmalarından söz edilir. Şaşırtıcı bir başka şey ise, Einstein'ın özel görelilik kuramını formüle ettiği sıralarda özellikle Michelson–Morley deneyinin verdiği sıfır yanıtından haberdar olup olmadığının bile belirsiz olmasıdır. Her durumda, bu nokta üzerinde yakın zamanlarda anlaşmazlık bulunsa da, göreliliğe ulaşmasını sağlayan akıl yürütme dizisinde deneyin hiçbir rol oynamadığı görünüyor.[4] Bununla birlikte etere göre hareketi keşfetmek için yapılan diğer başarısız denemeler vardı ve Einstein bunlardan habersiz değildi.

Özel görelilik kuramına dönmeden önce Einstein'ın yaşam öyküsünün bu kısa özetini tamamlayalım. 1905 yılında yayınladığı makaleler kısa sürede çok büyük dikkat çekti ve 1909 yılında Zürih Üniversitesi'nde fizikte *ekstraordinaryüs* profesör (doçent) olarak atandı. Bu işin, politik

nedenlerden ötürü önce, eskiden Einstein'la birlikte ETH'de öğrenci olarak bulunmuş olan Friedrick Adler'e (1879–1960) önerilmiş olduğundan söz etmek de ilginçtir. Adler, Einstein'ın da bu görev için düşünüldüğünü öğrendiğinde üniversite yetkililerine, Einstein'ın yeteneklerine sahip bir kişinin öğretim üyesi olarak alınması olasıyken, bu göreve kendisinin atanmasının aptalca olacağı yönünde bir mektup yazdı.[5] Birbirini oldukça hızlı izleyen olaylar dizisi içinde Einstein, önce Zürih'teki görevinden (1909'da) ayrılıp Prag'da tam bir profesör olarak çalışmaya (1910) gitti, sonra (1912'de) Zürih'te ETH'ye döndü ve son olarak 1913 yılında Berlin Üniversitesi'yle birlikte aynı zamanda Prusya Bilimler Akademisi üyesi olarak Kayzer Wilhelm Enstitüsü'nde çalışmaya başladı. Einstein, Berlin'deyken 1916 yılında yayınladığı genel görelilik kuramını tamamladı. 1933 yılına kadar burada kaldıktan sonra aynı yıl, (ç.n.: 1955'te) ölümüne dek kalacağı Princeton'daki İleri Çalışmalar Enstitüsü'ne geçti.

Einstein, Birinci Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında kararlı bir barışsever (ya da savaş karşıtı) oldu ve Yahudilerin bağımsızlıklarını kazanmasının aracı olarak Siyonizm (ç.n.: O zamanlar "siyonizm" bugün bu söze yüklenen olumsuz anlamdan çok farklı içeriğe sahip bir ülküydü. Einstein politik açıdan asla tutucu fikirlere sahip birisi olmadı.) ülküsünü de destekledi. Einstein, 1919 yılında genel görelilik kuramının deneysel olarak doğrulanmasıyla halk arasında da çok ünlü biri haline geldi ve bu saygınlığını dünya barışı ve Siyonizm ülkülerinin ilerlemesini sağlamak için kullanmaya çalıştı. 1921'den 1923'e kadar Avrupa'yı, İngiltere'yi, Amerika Birleşik Devletleri'ni, Uzakdoğu'yu, Filistin'i (ç.n.: günümüzde İsrail'in bulunduğu bölgeyi) ve 1925'te Güney Amerika'yı gezdi ve buralarda konferanslar verdi. Almanya'da savaş sonrasındaki huzursuzluk ortamı sırasında amacı Einstein'ı ve düşüncelerini karalamak olan, yaptığı fiziği bile Alman karşıtı ve bilimin gerçek ilerlemesine zararlı olmakla suçlayan bir örgüt kuruldu. Bu grubun hevesli üyelerinden biri de fotoelektrik etkisi üzerine yaptığı deneysel çalışmalarla 1905 yılı Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmış olan Philipp Lenard (1862–1947) idi. Lenard, Hitler'in hareketini destekliyordu ve Nasyonel Sosyalist Partisi'nin ilk üyelerinden biriydi. Lenard, daha sonra 1933 yılında Einstein'a saldırdığı bir yazı yayınladı. Bu yazıda Einstein'ı Almanya üzerindeki sinsi Yahudi nüfuzunun bir örneği olarak öne çıkardı; Einstein'ın görelilik üzerine olan çalışmalarının yanlış öncülleri temel aldığı ve bilim adamlarını hataya yönlendirdiği suçlamalarında bulundu. Lenard'a göre bir Yahudi olan Einstein iyi bir Alman olarak düşünülemezdi. Lenard, yine 1935 yılında yaptığı bir açılış töreni konuşmasında, Einstein'ın Alman bilimi üzerine olan etkisini şiddetle yerdi ve iyi olan hiçbir Alman'ın bir Yahudinin en-

telektüel bir yandaşı olamayacağı suçlamasında bulundu. Bütün bu sözleri 'Heil Hitler' diyerek bitirdi.[6]

Einstein'ın 1924'den 1933'e kadar Berlin'de geçirdiği son on yıla (ya da yaklaşık olarak o kadarlık zaman sürecine) giderek artan politik karışıklıklar damga vurmuştu. Bu zaman süreci ve yaşamının geri kalan kısmı boyunca, ilk biçimini 1929 yılında yayınladığı kütleçekimin ve elektromanyetizmanın birleşik bir alan kuramını formüle etmeye çalıştı. 1950'de bu kurama verdiği son biçimin bile kabul edilemez olduğu ortaya çıktı, böylece Einstein yaşamının son otuz beş yılını bu başarısız arayışa harcamış oldu. Einstein, Hitler yönetimi 1930lu yılların başlarında üniversitelerin öğretim üyeleri kadrolarını yalnızca 'uygun' Alman öğretmenlerin bulunması amacıyla - kendisi ya da karısı Yahudi olan hiçbir öğretim üyesinin bulunmaması anlamında - temizlemeye başladığında, Berlin'i terk etti ve Princeton'daki görevi üstlendi. Eski arkadaşı Planck'ın ve geride kalan diğerlerinin herhangi bir mahcubiyet hissetmelerini ve başlarının derde girmesini önlemek amacıyla Prusya Bilimler Akademisi'nden de istifa etti. Çalışmaları, Berlin'de Devlet Opera Evi'nin önünde halkın gözü önünde yakıldı. Einstein artık niteliksiz bir barışsever değildi ve 1939 yılında Başkan Franklin Roosevelt'e (1882–1945), Almanya'nın böyle bir silahı ilk elde eden olmasından çekindiği için Amerika Birleşik Devletleri'nin atom bombasını geliştirmeye başlaması yönünde harekete geçilmesini isteyen bir mektup yazdı.

16.2 Einstein'ın Klasik Fizikle İlgili Kuşkuculuğu

Şimdi uzay ve zaman kavramlarının tamamıyla yeniden biçimlendirilmesine ve Newtoncu dünya görüşünün baştan aşağı gözden geçirilmesine neden olan Einstein'ın özel görelilik kuramına dönelim. Einstein düşünsel olarak, doğa ötesi önceden varsayılan şeyleri kesin olarak kabul etmediği, tersine kuramının öğelerini gözlemlenmiş gerçekler üzerine dayandırdığı için genellikle mantıksal pozitivizm (ya da olguculuk) ile tanılanır. Bununla birlikte, genel kuramların yalnızca deneysel gerçeklerin doğrudan doğruya incelenmesi yoluyla ulaşılamayacağına, bundan başka insan aklının özgür yaratıcılığının da gerekli olduğuna, sonrasında kuramın doğanın olaylarıyla uyum içinde olup olmadığını görmek için test edilmesi gerektiğine inanıyordu. Kendisinin daha sonraki hatıralarına göre, üzerinde en büyük etkiyi bırakan düşünürler Hume, Mach ve Poincaré idi. Arkadaşı Besso dikkatini Mach'ın *Mekanik Bilimi* (bakınız Kısım 7.5 ve 11.4) adlı çalışmasına çektikten sonra, bu eser Einstein'ın

klasik mekaniğin temellerini yeniden gözden geçirmesini çok büyük oranda etkilemişti. 'Mach'ın ayartılamaz kuşkuculuğundaki ve bağımsızlığındaki büyüklüğü' gördü.[7] Hume ve Mach çalışmasının, kendisine uzay ve zaman kavramlarını gözden geçirmesi için gerekli eleştirel bakış açısını geliştirmesinde yardımcı olduğuna inandı. Kendi bilimsel gelişiminde en büyük öneme sahip en yakın bilimsel önceller Maxwell ve Lorentz idi. Maxwell'in kuramı optiği ve elektromanyetizmayı birleştiriyordu ve Einstein bu çalışmayı kendisininkinden daha büyük olarak gördü. Lorentz kendi kuramını bir uzaklıkta etki üzerine değil, ama yalnızca boş uzayda (ya da eterde) var olan alanlar üzerine ve bu alanları yaratan yükler üzerine dayandırmıştı, öyle ki elektromanyetik alanı madde değil, uzay taşıyordu. Einstein, bir öğrenciyken bile tüm eylemsiz çerçevelerin klasik mekaniksel açıdan denkliğinin ve Maxwell'in denklemlerinin biçiminin değişmeden kalmasının birbiriyle uyum içinde olmamasının önemini kavramıştı. Kendisine ışık hızıyla hareket edilebilse ve dolayısıyla bir ışık dalgasıyla birlikte gidilebilse ne görüleceğini sordu. Böyle bir referans sisteminde elektromanyetik dalga uzayda 'donmuş' gibi görünür ve E ve B alanları yayılma yönünün enine yöndeki bir düzlemde salınmazlar. Genç Einstein bu referans sistemiyle ışık hızından daha düşük hızlarda hareket eden diğerleri arasındaki böylesi bir asimetrinin gerçekçi olmadığını hissetti. Einstein, altmış yedi yaşındayken bunu aşağıdaki gibi hatırladı:

> Daha on altı yaşındayken çoktan [bir paradoksa] çarpmıştım: Eğer bir ışık ışınının peşinden c hızıyla (ışığın boşluktaki hızı) gidersem, böyle bir ışık ışınını uzaysal salınımları hareketsiz duran bir elektromanyetik alan olarak görmem gerekir. Bununla birlikte, böyle hiçbir şeyin ister deneyimler temelinde ister de Maxwell denklemlerine göre olmadığı da görünüyor. En başından beri, böyle bir gözlemci açısından hüküm verildiğinde her şeyin Dünya'ya göre hareketsiz duran bir gözlemci için olanlarla aynı yasalara göre olması gerektiği bana sezgisel olarak açık gözüktü. Çünkü diğer türlü, ilk gözlemci hızlı bir düzgün hareket hali içinde bulunduğunu nasıl bilir ya da bir başka deyişle bunu nasıl belirleyebilir?[8]

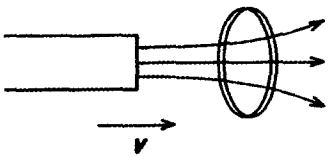
Einstein burada, yalnızca uzaysal olan ama zamansal olmayan değişimi bulunan bu 'donmuş' alanın Maxwell denklemlerinin (ya da buna denk bir biçimde, bir dalganın uzayda nasıl yayıldığını betimleyen (14.16) denklemindeki dalga denkleminin) bir çözümü olmadığına işaret ediyor.[9]

Einstein, 1905 yılındaki görelilik makalesinin başında belirli bazı asimetrilerin neden olduğu can sıkıcı probleme geri döndü. Burada Einstein'ın meşhur ettiği *Gedankenexperiment* (düşünce deneyi) çeşitlerinin bir örneği var:

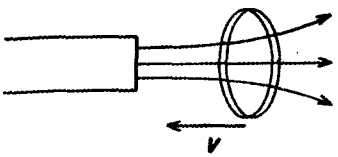
> Maxwell'in elektrodinamiğinin - günümüzde genellikle anlaşıldığı haliyle - hareket eden cisimlere uygulandığında, olguların aslında varmış gibi görünmeyen asimetrilere yol açtığı bilinmektedir. Örnek olarak, bir mıknatısla bir iletkenin birbirleri üzerine karşılıklı etkisini göz önüne alın. Burada gözlemlenen olgu yalnızca mıknatısla iletkenin aralarındaki göreli harekete bağlıdır, oysa geleneksel bakış açısı bu iki cisimden ya birinin ya da ötekinin hareket halinde olması durumları arasında kesin bir ayrım gözetir. Çünkü eğer mıknatıs hareket eder ve iletken hareketsiz durursa, mıknatısın komşuluğunda ortaya kesinlikle belirli bir enerjisi olan ve iletkenin kısımlarının bulunduğu yerlerde bir akım oluşturan bir elektrik alanı çıkar. Oysa eğer mıknatıs hareketsiz durur ve iletken hareket ederse, mıknatısın komşuluğunda hiçbir elektrik alanı oluşmaz. Bununla birlikte, iletkenin içinde bir elektromotor kuvvet olduğunu buluruz; iletkenin kendi içinde bu elektromotor kuvvet için karşılık gelecek enerji yoktur, ancak bu elektromotor kuvvet - ele alınan her iki durumdaki göreli hareketin birbirine özdeş olduğunu varsayarak - bir önceki durumdaki elektrik kuvvetler tarafından oluşturulanlarla aynı şiddette ve aynı yolu izleyen elektrik akımlarının oluşmasına neden olur.
>
> Bu tür örnekler ile birlikte dünyanın 'hafif ortama' göre olan herhangi bir hareketini keşfetmek için yapılan başarısız denemeler, hem elektrodinamik hem de mekanik olguların mutlak hareketsizlik düşüncesine karşı gelecek hiçbir özelliğe sahip olmadıkları izlenimini verir. Bunun yerine, - daha önce küçük niceliklerin birinci kuvvetine kadar hassasiyet içeren hesaplamalarla gösterildiği gibi - elektrodinamiğin ve optiğin aynı yasalarının, mekaniğin denklemlerinin geçerli olduğu tüm referans sistemlerinde geçerli olacağını akla getirir. Bu (anlamına bundan sonra 'Görelilik İlkesi' diyeceğimiz) varsayımı bir aksiyom konumuna yükselteceğiz ve bundan başka bir öncekiyle çok açık bir biçimde uzlaştırılamaz bir aksiyom daha öne süreceğiz; şöyle ki, ışık boş uzayda her zaman ışığı yayan cismin hareket durumundan bağımsız belirli bir *c* hızıyla yayılır. Bu iki aksiyom, hareket eden cisimlerin elektrodinamiğinin - Maxwell'in hareketsiz cisimler için olan kuramını temel alan - yalın ve tutarlı bir kuramına ulaşılabilmesi için yeterlidir. 'Işığı geçiren' bir eterin öne sürülmesinin, burada geliştirilecek olan düşünce ne özel özelliklerle donatılmış 'mutlak hareketsiz bir uzayı' gereksineceğinden ne de içinde elektromanyetik süreçlerin yer aldığı boş uzayın bir noktasına bir hız vektörü atayacağından gereksiz olduğu ortaya çıkacaktır.[10]

Einstein'ın bu makalenin giriş kısmında ele aldığı etki Şekil 16.1 ve 16.2'de gösteriliyor. Eğer mıknatıs Şekil 16.1'deki gibi hareket halindeyse (ki böylece uzayda sabit bir noktadaki *B* alanı zamana bağlı ola-

rak değişir), bu durumda Faraday'ın indüksiyon yasası uzayda o noktada değişen manyetik akıdan dolayı bir elektrik alanın meydana gelmesini gerektirir. Bir başka deyişle, Faraday'ın yasası ((14.13c) denklemi) uzayda bir noktadaki değişen bir $B(r,t)$ manyetik alanının aynı noktada bir E elektrik alanının oluşmasına neden olmasını gerektirir.



Şekil 16.1 Bir mıknatıs ve (ç.n.: manyetik) alanı hareketsiz duran bir metal halkanın içinden geçiyor



Şekil 16.2 Metal bir halka değişmeyen bir manyetik alan içinde hareket ediyor

Bu nedenle, bu değişen alanın içinde bulunan hareketsiz bir iletken halkanın içinde bir akım akar. Öte yanda, mıknatıs hareket etmeden durduğunda (ki böylece uzayda sabit bir noktadaki B alanı zamana bağlı olarak değişmez) ve halka Şekil 16.2'de belirtilen yönde hareket ettiğinde, uzayın hiçbir yerinde herhangi bir elektrik alanı meydana gelmez ancak Lorentz kuvveti ((14.13f) denklemi) nedeniyle halkadaki iletkenlik yükleri harekete geçerler. Her iki durumda da halkada aynı fiziksel akım akar. Bu, klasik elektrodinamiğin denklemlerinden (bakınız Kısım 16.A) kanıtlanabilir. Asıl fiziksel olarak gözlemlenebilen etki, yani halkadan akımın geçişi yalnızca mıknatısla halka arasındaki göreli hıza bağlıdır, oysa klasik elektromanyetik açıklama, ilke olarak, mıknatısın mı yoksa halkanın mı hareket halinde olduğuna bağlı olarak çok farklıdır. Her iki açıklamada da akımlar, yalnızca her iki haldeki v büyüklüğünün aynı olması durumunda tıpa tıp aynıdır.

Einstein, doğru bir kuramın işin içine yalnızca göreli hız katılarak formüle edilmesi gerektiğini ve böylece yalnızca tek bir açıklamanın yukarıda ele alınan her iki durumu da açıklayabileceğini anladı. E ve B alanlarının bir eylemsiz çerçeveden bir diğerine geçerken birbirlerine dönüştüklerini, ayrıca bunu bu indüksiyon olgularının her eylemsiz çerçevede geçerli birleşik bir betimlemesi var olacak biçimde yapacaklarını göreceğiz.

16.3 Aksiyomlar

İki olayın eşzamanlı olmasının anlamının dikkatli bir çözümlemesi, Einstein'ın 1905'teki görelilik üzerine makalesinin başlangıç noktasıydı.

> Eğer uzayın A noktasında bir saat varsa, A'daki bir gözlemci A'nın yakın komşuluğundaki olayların zaman değerlerini saatin kollarının (ç.n.: akrebiyle yelkovanının) bu olaylarla eşzamanlı konumlarını bularak belirleyebilir. Eğer uzayın B noktasında da her bakımdan A'da olana benzer bir başka saat varsa, B'deki bir gözlemci için B'nin yakın komşuluğundaki olayların zaman değerlerini belirlemek olasıdır. Ancak başka varsayımlar olmaksızın A'daki bir olayla B'deki bir olayı zaman açısından karşılaştırmak olası değildir. Şimdiye kadar yalnızca bir 'A zamanı' ve bir de 'B zamanı' tanımladık. Daha A ve B için ortak bir 'zaman' tanımlamadık; ortak bir zaman, ışığın A'dan B'ye kadar gitmesi için gereken 'sürenin' B'den A'ya kadar gitmesi için gereken 'süreye' eşit olduğu *tanım gereği* saptanamadıkça hiçbir şekilde tanımlanamaz. Bir ışık ışını t_A 'A zamanında' A'dan B'ye doğru yola çıkmış olsun, sonra bu ışın t_B 'B zamanında' B'den A yönüne doğru yansıtılsın ve sonra da t'_A 'A zamanında' tekrar A'ya geri dönsün.
>
> Tanımla uyumlu olarak iki saat eğer
>
> $$t_B - t_A = t'_A - t_B$$
>
> ise eşzamanlı hale gelir. Bu eşzamanlılık tanımının çelişkilerden arınmış olduğunu ve herhangi sayıda nokta için olası olduğunu varsayıyoruz.[11]

Bu, Einstein'ın eşzamanlı olma için ölçütünün temelidir ve sonrasında (c'nin sabit olduğunun varsayılmasıyla birlikte) alışılagelen (Kısım 16.5'te ele alınacak olan) Lorentz dönüşümlerine yol açar. Burada ışık hızı, bir noktadan diğerine olan yolculukta ve aynı noktalar arasındaki dönüş yolculuğunda aynı diye (ya da buna denk olarak, ışık hızının ışığın yayılma yönünden bağımsız olduğu şeklinde) tanımlanır. Bununla birlikte, bu eşzamanlı olma ölçütü Einstein'ın kendisinin kabul ettiği bir şeydir ve ışığın tek yöndeki hızının ölçülmesi mümkün olmadığı sürece deneysel olarak kontrol edilemez.[12] Örnek olarak, görelilik ilkesinin kabul

edilmesi yerine yalnızca ışığın gidiş dönüş hızının sabit olduğu ve deneysel olarak gösterilmiş olan zamanın genişlemesi (ç.n.: İngilizcesi 'time dilation') etkisi (bakınız Kısım 16.4) varsayılırsa, Lorentz dönüşümleri değil daha da genel bir dönüşüm seti elde edilir.[13] Einstein'ınkinden farklı diğer olası kabuller içinde eylemsiz çerçeveler arasında mutlak bir eşzamanlı olma haline yol açan, ancak özel göreliliğin alışılagelmiş Lorentz dönüşümlerince verilen öngörülerinden hiçbir gözlemlenebilir farka yol açmayan bir tanesi vardır.[14] Bu, diğer seçimlerin tercih edilen bir referans sistemine yol açtıkları gerçeğine karşın doğrudur. Bu seçeneklerin peşine burada düşmesek ve bir sonraki kısımda bunun yerine Einstein'ın eşzamanlı olma hali için yaptığı kabulü ve Lorentz dönüşümlerini benimsesek de, okurun özel göreliliğin bu programındaki kabul (ya da gelenek) öğesinin farkında olmasını istiyoruz.

Eşzamanlı olma ile ilgili az önce ele aldığımız türde düşünceler, Einstein'ın ortaya özel görelilik kuramını çıkartan iki tane varsayımda bulunmasına yol açtı:

1. Fiziğin yasalarının biçimi tüm eylemsiz çerçevelerde aynıdır. (Bu, fiziğin yasalarının mutlak bir hızı ölçmek için kullanılamayacağını gerektirir.)
2. Işığın hızı tüm eylemsiz gözlemciler için aynı sabit değerdedir.

Einstein'ın söylediklerinin kelimesi kelimesine ifadesi şöyledir:

> 1. Fiziksel sistemlerin bulundukları durumların değişime uğrayışını betimleyen yasalar, bu durum değişiklikleri düzgün tek yönlü hareket halindeki iki koordinat sisteminden, ister birine ister diğerine bakılarak olsun, etkilenmez.
> 2. Her ışık ışını, ışın ister 'durağan' ister hareket eden bir cisimden yayılıyor olsun 'durağan' koordinat sisteminde belirlenmiş bir c hızıyla hareket eder.[15]

İkinci aksiyom, Michelson-Morley deneyinin sonucunun sıfır çıkmasını onun yanlış sorulmuş bir soru olduğunu tanımlayarak elbette ki 'açıklar'.

Bununla birlikte, bir şeylerin ikinci aksiyomun birinci aksiyomla bağdaşmasını sağlamak için klasik mekaniği bırakması gerektiği de açıktır. Einstein'ın öncesinde ikilemin mantıksal özü, (i) Newton'un hareket yasaları artı (ii) Maxwell'in denklemleri artı (iii) klasik uzay-zaman kavramlarının birlikte bir gözlemcinin ışık ortamına göre hızını belirlemenin ola-

sı olmasını gerektirmeleridir. Bir başka deyişle, (i)-(iii)'ten en azından biri yanlış olmalıdır. Maxwell'in denklemleri tam olarak doğruyken, (i) ve (iii)'ün v c'ye yaklaşırken hatalı oldukları ortaya çıkar.

Einstein'ın Maxwell denklemlerini Newton'un yasasına tercih etmesi nedensiz bir seçim ya da yalnızca şanslı bir tahmin değildi. Elektromanyetik olguları mekaniksel modeller aracılığıyla açıklamaya çalışmak için yapılan tüm denemelerin başarısız olduğunun farkındaydı. (Elektromanyetik eterin mekaniksel resimleriyle ilgili 13. Konu'daki tartışmayı hatırlayınız.) Lorentz'in mekaniği elektrodinamiğe indirgemeyi denemesi de yine aynı neden yüzündendi.[16] Örneğin, Michelson-Morley deneyinin (ya da Einstein'ın durumunda belki de diğer eter-sürüklenmesi deneylerinin) sonucunun sıfır çıkması, dünyanın etere göre hareket etmediğini gerektirdi. Bu yüzden Einstein, eterin var olduğunu varsaymak için hiçbir neden olmadığı ve mutlak bir hızı belirlemek için hiçbir aracın bulunmadığı sonucuna varabilmişti. Buradan hızları toplamak için kullandığımız 'bilinen duyu' yasasının doğru olamayacağı çıkar. Burada ve sonraki konuda bunu ve birinci ve ikinci aksiyomların diğer sonuçlarını geliştireceğiz.

Asıl konumuz dışındaki ilginç bir nokta da, Einstein'ın - fizik tarihindeki belki de sözcüğün tam anlamıyla devrimsel nitelikteki tek makale olan - 1905'teki görelilik üzerine makalesinin ne zamanının çağdaş kuramsal ya da deneysel araştırmalarına ne de o günlerdeki önde gelen fizikçilerle yapılmış fikir alışverişlerine açık bir referans içermemesidir. Tek teşekkür, makalenin son cümlesindedir.

> Sonuç olarak burada ele alınan problem üzerinde çalışırken dostum ve çalışma arkadaşım M. Besso'nun vefalı yardımlarını aldığımı ve kendisine değerli birçok önerileri için borçlu olduğumu belirtmek isterim.[17]

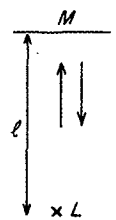
Einstein bir keresinde otuz yaşına gelene dek asla gerçek bir fizikçiyle karşılaşmadığı yorumunda bulunmuştur.

(Kısım 14.5'te ele aldığımız) Lorentz'in elektron kuramıyla Einstein'ın özel görelilik kuramı arasındaki kavramsal yaklaşımlardaki dikkate değer bir fark, bize daha sonraki konularda (özellikle Kısım 23.5'te) geri döneceğimiz önemli bir düşünsel noktaya vurgu yapma fırsatı veriyor. Einstein (termodinamik ya da özel görelilik gibi) ilke kuramlarından ve (gazların kinetik kuramı ya da Lorentz'in eter temelli elektron kuramı gibi) yapıcı kuramlardan söz eder. Ona göre ilk gruptakilerin erdemi (bir kez temel ilkeler kabul edildikten sonra bunlardan çıkarılan sonuçların)

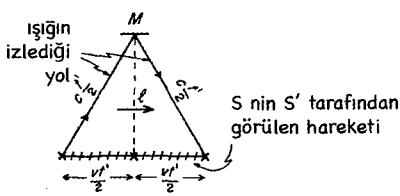
epistemik (ç.n.: bilgiye, kavramaya dair) güvenliği ve uygulanabilirlikteki genelliğiyken, ikinci gruptakiler kavramada (ya da anlamada) açıklık sağlama üstünlüğüne sahiptirler. Einstein bu iki kuram türünü aşağıdaki gibi nitelendirmiştir:

> Fizikte değişik çeşitlerde kuramlar ayırt edebiliriz. Büyük çoğunluğu yapıcıdırlar. Başlangıç noktası olarak aldıkları görece daha basit bir biçimsel taslağın malzemelerinden daha karmaşık olguların bir resmini yapmaya çalışırlar... Bir grup doğal oluşumu anlamayı başardığımızı söylerken, değişmez bir biçimde sözü edilen oluşumları karşılayan yapıcı bir kuramın bulunduğunu söylemek isteriz.
>
> Bu en önemli kuramlar sınıfının yanında 'ilke kuramları' adını vereceğim ikinci bir sınıf daha vardır. Bunlar sentetik değil analitik (ç.n.: çözümlemeci) yöntemi kullanır.
>
> . . .
>
> Yapıcı kuramın üstünlükleri bütünlük, uyarlanabilirlik ve açıklıktır; ilke kuramının üstünlükleriyse mantıksal kusursuzluk ve temellerin güvenliğidir.[18]

Einstein'ın Kaufmann deneylerinin önemini tartışırken (Kısım 15.3'ün sonuna bakınız) kendi (geniş alanlarda uygulanabilir) kuramına karşı - yalnızca sınırlı bir olgu sınıfı için yararlı olan - Abraham'ın ve Bucherer'in modellerine karşı açık ve dürüst bir biçimde yönelttiği yöntembilimsel eleştirinin temelini oluşturan bu ayırımdı.



Şekil 16.3 Bir ışık ışınının kaynakla aynanın hareketsiz durduğu çerçeveden görüldüğü haliyle gidiş dönüş yolculuğu



Şekil 16.4 Bir ışık ışınının hareket eden bir gözlemci tarafından görüldüğü haliyle gidiş dönüş yolculuğu

16.4 Zamanın Genişlemesi ve Uzunluğun Kısalması

Einstein'ın bu iki özlü varsayımından geniş bir öngörü dizisini sökmeye başlamak için, önce basit bir düşünce deneyini temel alan fiziksel bir sava bakalım. Belirli bir çerçevede uzaydaki sabit bir noktadan iki olay arasında ölçülen zamanı öz *zaman* (ç.n.: İngilizcesi 'proper time') aralığı diye tanımlarız. Bir başka deyişle, öz zaman iki olayın ortak hareketsiz çerçevesinde - bu olaylar bu çerçevede aynı yerde meydana gelirlerken - olaylar arasındaki zaman aralığıdır.

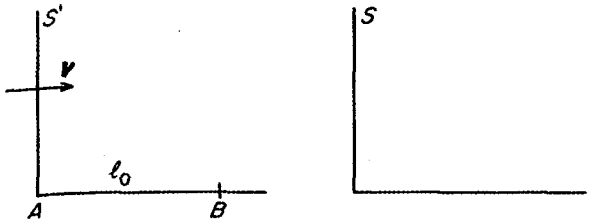
Şimdi bir ışık sinyalinin Şekil 16.3'te gösterildiği gibi bir (L) kaynağından ℓ uzaklığında bir (M) aynasına ve oradan geriye kaynağa yollandığını düşünün. Deney düzeneği öyle yapılmış olsun ki, düzeneğin kendisinin bir v hızıyla (Şekil 16.3'te sağa doğru) düzgün hareket ettiğini varsaysak bile L ve M arasındaki uzaklık hiç değişmeden ℓ olarak kalsın. Bu şekilde deney düzeneğinin hareketsiz durduğu (S) çerçevesindeki bir gözlemcinin bakış açısına sahip oluruz. S'deki bu gözlemci için ışık sinyalinin gidiş dönüş yolculuğunun toplam süresi olarak çok kolayca $\Delta t = 2\ell/c$ buluruz. Bu, S'de geçen öz zamandır. Bunun yanında, S''de gözlemlenen bu oluşum, S S''ye göre (bir v hızıyla) hareket ettiğinden Şekil 16.4'te gösterildiği gibi görünür. Pythagoras teoreminin şekildeki dik üçgene uygulanmasından S''deki bir gözlemci tarafından ölçülen $\Delta t'$ gidiş dönüş yolculuğu süresinin S'deki Δt'ye[19]

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \tag{16.1}$$

şeklinde bağlı olduğu sonucu çıkarılır. Bu nedenle öz zamanlar genişler. Bu, hareket eden bir saatin daha yavaş işlediğini söylemeye denktir.

Öz *uzunluk*, (ç.n.: İngilizcesi 'proper length') o uzunluğa göre hareketsiz duran bir gözlemci tarafından ölçülen uzunluktur. Bir çubuğun hareketsiz durduğu (S') çerçevesindeki uzunluğu (burada A ve B arasındaki uzaklık) ℓ_0 olsun, ayrıca Şekil 16.5'te gösterilen oluşumu göz önüne alınız. B S'nin başlangıç noktasını (orijinini) geçerken $t = t_1$, A S'nin başlangıç noktasını geçerken $t = t_2$ olsun ve

bu zamanlar S'de ölçülsün. Bu yüzden, $\Delta t = (t_2 - t_1)$ öz bir zaman aralığıdır. S'de A ve B arasındaki uzaklık için (tanım gereği)



Şekil 16.5 Uzunluğun kısalması için bir düşünce deneyi savı

$\ell = v\,\Delta t$ buluruz. S''de buna karşılık gelen (A'dan B'ye olan) uzaklık ℓ_0 ve karşılık gelen zaman aralığı da $\Delta t' = (t_2' - t_1')$ olduğundan $\ell_0 = v\,\Delta t'$ bulunur, burada $\Delta t'$ öz bir zaman değildir. Sonrasında (16.1) denklemini kullanarak

$$\ell = \ell_0 \frac{\Delta t}{\Delta t'} = \ell_0 \sqrt{1 - (v/c)^2} \tag{16.2}$$

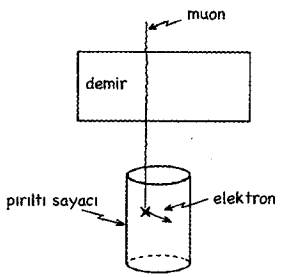
elde ederiz. Kısım 14.5'te ((14.8) denklemi), etere göre hareketi bulmak için Michelson ve Morley tarafından yapılan denemenin sonucunun sıfır çıkmasından sonra, FitzGerald'ın böyle bir sonucun ölçmede kullanılan deney düzeneğinin eter içindeki hareketinin yönünde (16.2) denklemindeki ilişkiye göre kısalması koşuluyla beklenebileceğini gösterdiğini görmüştük. Benzer bir sonuç, Lorentz'in elektromanyetik kuvvetler için kuramından da çıkıyordu. (16.2) denkleminin Lorentz-FitzGerald kısalma hipotezi formülüyle aynı olmasına karşın, fiziksel önemi çok farklıdır. (16.2) denklemi iki çerçevedeki ölçülmüş uzunluklar arasındaki bir ilişkidir, bir uzunluğun gerçekten de kısalmasıyla ilgili bir ifade değildir.[20]

Şimdi zamanın genişlemesi etkisinin dolaysızca deneysel olarak doğrulanmasını tartışacağız. Kozmik ışınlar olarak bilinen yüksek enerjili parçacıklar, dünyaya dış uzaydan her yönden gelirler. Bu kozmik ışınlar, atmosferin yüksek kesimlerindeki nükleer tepkimeler aracılığıyla μ mezon (ya da muon) olarak anılan kararsız parçacıkların sağanaklarını oluştururlar. Burada amaçladıklarımız açısından muonların ya artı ya da eksi yüklü parçacıklar olduklarını, elektronlara çok benzediklerini (yalnız $m_\mu = 207\, m_e$ olduğundan kütle olarak onlardan çok daha büyük

olduklarını) ve yarı ömür olarak bilinen tipik bir süre sonrasında başka parçacıklara bozunduklarını bilmek yeterlidir. Bir başka deyişle, bir masanın üzerine daha yeni oluşturulmuş muonlardan hareketsiz duran büyük bir yığın koyabilseydik ve onları o halde gözlemleyebilseydik, yaklaşık $1{,}5\times10^{-6}$ s sonra ortalama olarak yarısı, her biri

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \qquad (16.3)$$

tepkimesine göre iki nötrinoya (ν) - aslında, bir ν nötrinoya ve bir de $\bar{\nu}$ antinötrinoya (ama bu ayırım burada bizim için önemli değil) - ve bir elektrona (e^-) bozunmuş olurdu. İçinde bulunduğumuz halde enerji ve momentum taşıyan yüksüz ve kütlesiz parçacıklar olan nötrinoları boş verebiliriz. Yarı ömrün tanımı gereği, ilk başta 1000 muon varsa $1{,}5\times10^{-6}$s sonra elde yalnızca 500 muon kalacağı, bir $1{,}5\times10^{-6}$ s sonrasında 250, sonra 125 ve bunun böyle gideceği ortaya çıkar. Bu yarı ömür süresi muonun dışındaki kuvvetlerden etkilenmez, böylece bozunan bu parçacıklar kendi hareketsiz durdukları çerçevelerdeki bozunma oranı değişmez bir nitelik olan bağımsız saatler gibi davranırlar.



Şekil 16.6 Zaman genişlemesini bulmak için yapılan bir deney

Deneyin ana fikri, hareket eden bir muonun dünyada hareket etmeden duran bir gözlemci tarafından görüldüğü haliyle yaşarmış göründüğü zaman uzunluğunu belirlemektir. Hareket eden muonlar ortalama olarak $1{,}5\times10^{-6}$ s'den çok daha uzun süre dayanırlarsa, bu durum zamanın genişlemesi için bir belirti sayılır. Bu etki, (16.1) denkleminden de görüldüğü gibi, muonların v hızı yalnızca ışık hızına yakın olduğu zaman büyük olur. Gerçekte incelenen muonların hızları 0,9950 c ile 0,9954 c arasındaydı. Çok yüksek hızlardaki radyoaktif parçacıklar için zamanın genişlemesi etkisinin ilk kez deneysel olarak doğrulanması,

1941 yılında Bruno Rossi (1905–1993) tarafından yapıldı. Deneyin burada sunduğumuz biçimi, 1962 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde bir gösteri olarak gerçekleştirildi.[21]

İlk veri seti, deniz seviyesinden 6300 ayak [1,92 km] yükseklikteki bir dağın zirvesinde alındı. 5/2 ayak [0,76 m] kalınlığındaki bir demir levha, atmosferden dünyaya yağan muonların bazılarını durdurmakta ve yavaşlatmakta kullanıldı. Deneysel düzenleme Şekil 16.6'daki çizimde belirtilmiştir. Bir muonun içine girebileceği demir kalınlığı miktarı muonun hızına bağlıdır. Yalnızca belirli bir dar aralıktaki hızlara (burada ışık hızının yaklaşık olarak 0,995'i) sahip olanlar durdurulur ve pırıltı sayacının içinde hareketsiz hale getirilirler. Çok yavaş hareket edenler demirin içinde durdurulurlar ve çok hızlı hareket edenler hareketsiz hale getirilemeden sayacın içinden geçip giderler. Bir pırıltı sayacının özelliği, yüksek hıza sahip yüklü bir parçacık içine girdiğinde ya da içinden geçtiğinde sayacın tek bir ışık pırıltısı saçmasıdır. Aslında, parçacık sayaç içinde hareket ederken ayrı ayrı birçok ışıltı oluşur, ama bu ışıltılar birbirlerine o kadar yakın oluşurlar ki, tek bir ince pırıltı olarak görülürler. Bu ışık sinyali o kadar cılızdır ki, onu görebilmemiz için elektronik olarak yükseltilmesi gerekir. Burada bu yükseltme işleminin ayrıntılarının bizi ilgilendirmesi gerekmez. Bu sayaç–yükselteç sisteminin çıktısı, sayaca giren ilk muon tarafından oluşturulan bir parıltıyla sonrasında (16.3) denklemindeki bozunma işlemi sırasında elektron tarafından oluşturulan ikinci bir pırıltıdan oluşur. Sonuç olarak, sayaçta bir saat içinde kaç muonun bozunduğunun ve her birinin bozunma öncesinde sayaçta ne kadar süre dayandığının kaydı elde edilir. Örnek olarak, dağın tepesindeki bir saat süren denemelerden birinde, bozunmadan önceki dayanma sürelerinin dağılımıyla birlikte 568 bozunma olayı kaydedilmişti.

Şimdi aşağıdaki soruyu soruyoruz. Hareket etmeyen muonların dayanma sürelerinin dağılımı verildiğinde ve bu dağılımın bizim yanımızdan 0,995 c hızıyla geçip giden muonlar için de geçerli olarak kaldığı varsayıldığında, bu örnekteki 568 muondan kaçı bu gözlemlerin yapıldığı noktadan 6300 ayak [1,92 km] aşağıdaki deniz seviyesine ulaşabilecek kadar uzun dayanabilir? 0,995 c hızıyla giden bir muonun 6300 ayak [1,92 km] uzunluğundaki bir yolu alması için gereken süre miktarı ($c = 3{,}0\times10^5$ km/s için) $6{,}4\times10^{-6}$ s ya da 4,27 yarı ömür kadardır. Asıl deneyden elde edilen veriler, yalnızca 27 muonun deniz seviyesine ulaşabilecek ve sonrasında burada bir pırıltı sayacı içinde bozunabilecek kadar uzun süre dayanacağını gösterir. Bununla

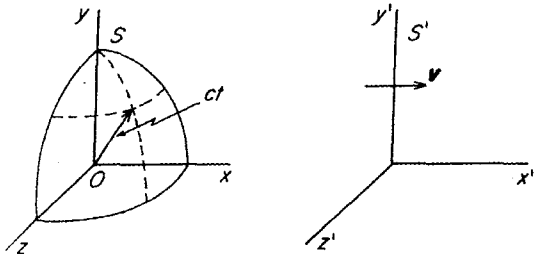
birlikte, deney gerçekte deniz seviyesinde tekrarlandığında, pırıltı sayacında saatte 412 muonun bozunduğu bulunmuştur.

Kendi hareketsiz durdukları çerçevelerindeki yaşam sürelerinin içinden geçip gittikleri Dünya'nın çerçevesinde olanla aynı olması durumunda dayanması gerekenden çok daha fazla sayıda muon dayandığından, zaman genişlemesinin gerçekten de meydana geldiği sonucuna varabiliriz. Dahası, bir muonun kendi hareketsiz durduğu çerçevedeki yarı ömrü $1{,}5\times10^{-6}$ s olduğundan ve 6300 ayaklık [1,92 km] yolculuk sırasında örnekteki sayı 568'den 412'ye düştüğünden, muonların kendi hareketsiz durdukları çerçevede geçen n yarı ömür sayısı $(1/2)^n = 412/568 = 0{,}725$ olarak verilir, böylece n'in 0,464 olduğu bulunur. Bu, muonların laboratuvardaki 4,27 yarı ömür süresi yerine kendi hareketsiz durdukları çerçevede bir yarı ömrün yalnızca 0,464'ünün geçtiği anlamına gelir. (16.1) denkleminden zaman genişlemesi faktörü için $(v/c) = 0{,}995$ değerinin bu deneyle makul ölçüler içinde uyumlu bir değer verdiğini görürüz. Bu yüzden, zaman genişlemesi etkisi için doğrudan doğruya deneysel bir desteğe gerçekten de sahibiz.

16.5 Lorentz Dönüşümleri

İki eylemsiz çerçevedeki olayların betimlemesini birleştiren genel dönüşüm kümesini elde etmek için Kısım 16.3'te verilen aksiyomları ve (16.1) denkleminde ifade edilen sonucu kullanabiliriz. Şekil 16.7 birbirlerine göre ortak x ve x' eksenleri boyunca bir $\mathbf{v}$ hızıyla düzgün hareket eden iki S ve S' eylemsiz çerçevesini gösteriyor. Uygun olması bakımından O ve O' başlangıç noktalarının $t = t' = 0$ anında aynı noktada olduklarını kabul ediyoruz. Uzayın homojen (tercih edilen bir başlangıç noktası olmayan) ve izotropik (tercih edilen bir yönü olmayan) olduğu varsayımlarını kullanarak dönüşüm denklemlerinin değişkenlerde doğrusal olmak zorunda oldukları ve ortak x ve x' eksenleri boyunca hareket için aşağıdaki basit biçimi almaları gerektiği öne sürülebilir.[22]

$$\begin{aligned} x' &= a\,x + b\,t \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= d\,x + f\,t \end{aligned} \qquad (16.4)$$



Şekil 16.7 Küresel olarak yayılan bir ışık dalgası

Burada $a(v)$, $b(v)$, $d(v)$ ve $f(v)$ v hızına bağlı bilinmeyen fonksiyonlardır. Bunları belirlemek için, yalnızca birkaç özel durumu göz önüne almamız gerekir. Başlangıçta S ve S''nü aynı olacak şekilde seçtiğimizden ($t = t' = 0$ iken $x = x' = 0$), S''deki S'nin O başlangıç noktasını ($x = 0$ noktasını) seyreden bir gözlemci için S''de görüldüğü haliyle O'nun konumu $x' = -vt'$ olur. Bunu (16.4) denklemlerine koyunca $b = -vf$ olduğunu çıkarırız. Benzer bir biçimde, S''deki bir gözlemci S''nün O' başlangıç noktasını ($x' = 0$ noktasını) seyrederse, bu nokta için $x = vt$ olur ki böylece (16.4) denklemleri $a = f$ olmasını gerektirir. Sonra, ışığın tüm eylemsiz çerçevelerde (tek yöndeki) hızı c olacağından (Kısım 16.3'te ikinci aksiyom), Şekil 16.7'deki S ve S' çerçevelerindeki gözlemciler, ilerleyen dalga cephesinin koordinatlarının betimlenmesi için sırasıyla $x = ct$ ve $x' = ct'$ derler. Bu nedenle (16.4) denklemlerinden $d = -av/c^2$ olduğu çıkar. Son olarak, S çerçevesinde $x = y = z = 0$ noktasında bir ışığın t_1 anında açıldığını ve sonra t_2 anında da kapatıldığını varsayın, ki böylece $\Delta t = (t_2 - t_1)$ öz zaman aralığı kadar geçmiş olur. (16.4)'teki son denklemden bunlara karşılık gelen t_1' ve t_2' zamanlarını ve bunların farkından da $\Delta t'$'ı hesaplayabiliriz. Bu sonuç, (16.1) denkleminin sonucuna eşitlenirse, $a(v)$'nın değerini elde ederiz. Tüm bu sonuçlar bir araya getirildiğinde,

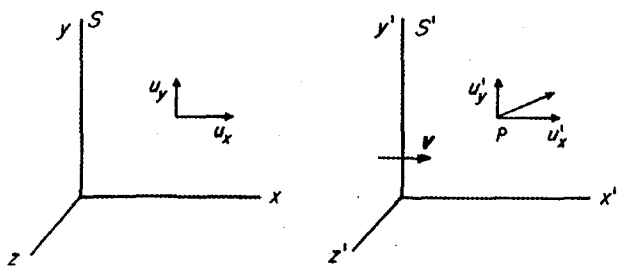
$$
\begin{aligned}
x' &= \gamma (x - v t) \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= \gamma \left(t - \frac{v x}{c^2} \right)
\end{aligned}
\qquad (16.5)
$$

*Lorentz dönüşümleri*ne ulaşılır, burada

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

biçiminde tanımlıdır.

Bu ilişkiler, asıl olarak, (S) eylemsiz çerçevesindeki bir *olay*ın (bununla basitçe uzay-zaman koordinatlarının kendilerini kastediyoruz) (x, y, z, t) betimlemesini alıp bunu aynı olayın bir başka (S') eylemsiz çerçevesinde karşılık gelen (x', y', z', t') betimlemesine uyarlamak için gerekli kuralı ya da 'sözlüğü' oluştururlar. Matematiksel işlemler içinde göz önünden kaçırılmaması gereken önemli mantıksal nokta, (16.5) denklemlerinin doğrudan doğruya Einstein'ın iki aksiyomundan (ve onun eşzamanlı olmak üzerine yaptığı kabulden) çıkmalarıdır. $(v/c) << 1$ iken (ya da en azından biçimsel olarak $c \to \infty$ iken), (16.5) denklemleriyle verilen Lorentz dönüşümlerinin bu durumda eylemsiz çerçeveler arasındaki bilinen Newton dönüşümlerine indirgendiklerine dikkat ediniz: $x' = x - vt$, $t' = t$ (ki böylece 'mutlak' zaman yeniden elde edilir).



Şekil 16.8 Hızların göreliliğe uygun bileşimi

Bir sonraki konuda Einstein'ın iki aksiyomunun biçimsel olarak gerektirdiklerini tartışmamızı tamamlayabilmek için, hızların toplanması için gerekli göreliliğe uyarlanmış (ç.n.: ışık hızlarına yakın hızlarda geçerli) yasayı elde hazır bulundurmalıyız. Bunu; biri S'de biri de S''de olan iki gözlemciyi ve uzay içinde hareket eden üçüncü bir (P) cismini göz önüne alarak doğrudan doğruya Lorentz dönüşümlerinden kolayca elde edebiliriz. Şekil 16.8'de belirtildiği gibi bu cismin S'ye göre hızı $\boldsymbol{u}$ ve S''ne göre hızı da $\boldsymbol{u}'$ olsun. Kolaylık olma-

sı bakımından P'nin hareketini x–y (ya da x'– y') düzlemine sınırlıyoruz, böylece hızın herhangi bir z bileşeni olmaz. Tanımı gereği u''nün x' bileşeni tam olarak x''nün t''ne göre değişim oranı (ve benzer şekilde u'nun diğer bileşenleri için karşılık gelen oranlar) olduğundan,[23]

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$
$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma\left(1 - \frac{vu_x}{c^2}\right)} \qquad (16.6)$$

çıkarmak için (16.5) denklemlerini kullanabiliriz. $(v/c) << 1$ iken (ya da bir kez daha $c \to \infty$ iken), (16.6) denklemlerinin bilinen Newtoncu biçimlerine $u'_x \to (u_x - v)$ ve $u'_y \to u_y$ indirgendiklerine dikkat ediniz.

16.A Einstein'ın Düşünce Deneyi Üzerine Teknik Bir Ayrıntı

Faraday'ın indüksiyon yasasını ((14.13c) denklemini) integral halinde bir kere daha yazarsak

$$\mathcal{E}\,(\text{elektromotor kuvvet}) = \int_{\text{halka}} E \cdot d\ell = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_{\text{yüzey}} B \cdot dA\,, \qquad (16.7)$$

Şekil 16.1 ve 16.2'de gösterilen dizilişlerle oluşturulan fiziksel akımların birbirlerine denk olduğunu doğrudan doğruya görebiliriz. İlk durumda mıknatıs ve dolayısıyla oluşturduğu B alanı hareket ederken (Şekil 16.1), (16.7) denkleminin sağ tarafındaki integral[24]

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{\text{yüzey}} [B(r - \mathbf{v}\,\Delta t) - B(r)] \cdot dA \qquad (16.8)$$

olur. Bir başka deyişle, t anında r $-\mathbf{v}\,\Delta t$'de bulunan B alanı $t + \Delta t$ anında r 'de olur. Benzer bir biçimde, ikinci durumda halka bir $-\mathbf{v}$ hızıyla hareketsiz bir B alanı içinde hareket ederken (Şekil 16.2),

(16.7) denklemindeki integralin zamana göre değişim oranı halka tarafından kapatılan hareketli yüzey alanının hareketinden dolayı (ç.n.: Σ burada yüzeyi belirtiyor)

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t}\left[\int_{\Sigma(t+\Delta t)} B \cdot dA - \int_{\Sigma(t)} B \cdot dA\right] = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t}\int_{\Sigma}[B(r - \mathbf{v}\,\Delta t) - B(r)] \cdot dA$$

olarak bulunur, ki bu (16.8) denkleminin sağ tarafıyla özdeştir.

Yararlı Kaynaklar

Philipp Frank'ın *Einstein* adlı eseri, Einstein'ın çok uzun süre dostu ve çalışma arkadaşı olmuş bir kişi tarafından yazılmış mükemmel bir biyografidir. Ronald Clark'ın *Einstein*'ı çoğunlukla bir roman tarzında yazılmış halkın seveceği türde bir biyografidir. Jeremy Bernstein'ın *Einstein*'ı Einstein'ın fizikte başardıklarıyla ilgili belirli kavramsal sorunlar üzerinde yoğunlaşan kısa ve teknik olmayan bir çalışmadır. Abraham Pais'in *Subtle is the Lord (Tanrı'yı Anlaması Güçtür)* adlı kitabı, Einstein'ın yaşamı ve görelilik üzerine çalışmalarının başarılı bir kuramsal fizikçi tarafından biyografi tarzında yazılmış son derece ayrıntılı ve güvenilir bir öyküsüdür. Paul Schilpp'in *Albert Einstein*'ı Einstein'ın kendi otobiyografik notlarıyla başlar, sonrasında Einstein'ın düşünceleri üzerine çağının kuramsal fizikte ve matematikte en önde gelen kişilerince yazılmış denemeler derlemesiyle devam eder ve son olarak Einstein'ın bu denemelere verdiği yanıtlarla sona erer. Arthur Miller'ın *Albert Einstein'ın Özel Görelilik Kuramı* Einstein'ın göreliliği formüle ederken yaptığı düşünce deneylerini anlaşılabilir teknik ayrıntılar eşliğinde tartışır. Edwin Taylor ve John Wheeler'ın *Uzay-Zaman Fiziği* adlı eseri, özel göreliliğin canlı, okumaya değer ve düşünmeye zorlayan temel ama ayrıntılı bir sunumudur.

17

Einstein'in Aksiyomlarının Oluşturduğu Başka Mantıksal Sonuçlar

Bu Konu'da Einstein'ın iki aksiyomunun sonucu doğru olan deneysel çıkarımların birkaçını ele alacağız ve bunların özel göreliliğin deneysel testleriyle ilgilerini kuracağız. Bu yapısal olarak kuşku uyandırmayacak kadar kolay ve niceliksel iki sözel ifadeden ne kadar çok sayıda değişik niteliksel öngörünün çıktığına vurgu yapılacak. Tıpkı Newton'un klasik mekanik sisteminin ve kütleçekim kuramının çok sayıdaki niteliksel başarısı nedeniyle evrensel kabul görmesi ve görünüşte birbirleriyle ilişkisiz çok geniş alanlara uygulanabilirliği (11. Konu'yu hatırlayınız) gibi, Einstein'ın özel görelilik kuramı da, çok kısa sürede başardıklarının kapladığı geniş alan nedeniyle, egemen kuram haline geldi.

17.1 Göreli Doppler Etkisi

Göreli hareketin ışığın ölçülen frekansı üzerine olan etkisini düşünerek başlıyoruz. Bu, klasik - ya da göreliliğe uyarlanmamış - bağlamda özgün olarak 1842'de Christian Doppler (1803-1853) tarafından ele alınmıştı. Göreliliğe uyarlanmış biçimi ilk kez Einstein tarafından 1905 yılındaki 'görelilik' makalesinde incelenmişti. Şekil 17.1'de - tümü A gözlemcisi tarafından görüldüğü biçimde olmak üzere - B gözlemcisi dalga cephesinin yayılmasıyla aynı yönde ve ona paralel olarak hareket etsin. Kendisine göre dalga boyu (ya da birbirini izleyen dalga cepheleri arasındaki uzaklık) λ olan A'nın bakış açısına göre, birbirini izleyen iki dalga cephesinin hareket eden B gözlemcisini geçmesi için gereken t süresi $t = (\lambda + vt)/c$ kadardır.[1]

B'nin bu iki dalga cephesinin geçişleri arasında ölçtüğü süreyi (B'yi geçmelerinden sonra) t' (bir öz zaman) ile gösterin. Tanım gereği ν' frekansı tam olarak $\nu' = 1/t'$'dir. t ve t' süreleri birbirlerine zamanın genişlemesi denklemiyle ((16.1) denklemi) bağlı olduklarından, gözlemlenen ν' ve ν frekansları arasındaki ilişkiyi[2]

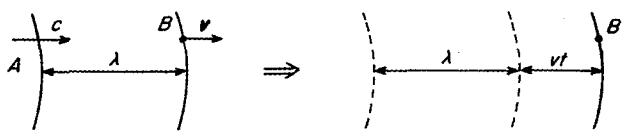
$$\nu'_{\text{kırmızı}} = \sqrt{\frac{1-(v/c)}{1+(v/c)}}\,\nu \tag{17.1}$$

şeklinde buluruz. Bu, göreliliğe uyarlanmış Doppler kayması formülüdür. Burada soldaki değişkenin sağ alt tarafına 'kırmızı' yazdık, çünkü bir ışık kaynağından uzaklaşıldığında (gerçekten de dalga katarıyla aynı yönde gidildiğinde) ışığın daha düşük frekanslara doğru kaydığı gözlemlenir (bir başka deyişle, görülebilen ışık tayfının kırmızı ucuna doğru kayar).

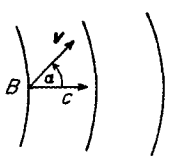
Bunun yanında, B gözlemcisinin $\mathbf{v}$ hızıyla dalga cephesinin yayılma yönü arasındaki açı α olduğunda (bakınız Şekil 17.2), (17.1) denkleminin[3]

$$\nu' = \frac{\left(1-\dfrac{v}{c}\cos\alpha\right)}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\,\nu \tag{17.2}$$

olduğunu görürüz. B gözlemcisinin doğruca A'ya doğru gitmesi durumunda ((17.2) denkleminde $\alpha = 180°$), Doppler kaymasının ifadesi



Şekil 17.1 Göreliliğe uyarlanmış Doppler kayması etkisinin kökeni



Şekil 17.2 Gözlemcinin hareketinin ışığın yayılma yönü doğrultusunda olmadığı durum

$$\nu'_{\text{mavi}} = \sqrt{\frac{1+(v/c)}{1-(v/c)}}\,\nu \qquad (17.3)$$

halini alır. Bu, açık nedenlerden ötürü sık sık *maviye kayma* (ç.n.: İngilizcesi 'blueshift') olarak anılır.

Klasik olarak zaman genişlemesi diye bir şey olmadığından, eter modeli temel alındığında Doppler kayması için beklenen ifade şudur:

$$\nu' = \left(1 - \frac{v}{c}\cos\alpha\right)\nu \qquad (17.4)$$

(17.2) ve (17.4) denklemlerinden Doppler kayması için göreliliğe uyarlanmış düzeltmenin, tıpkı Michelson-Morley deneyinde aranan etki gibi $(v/c)^2$ derecesinde olduğunu görüyoruz. Doppler etkisi için göreliliğe uyarlanmış ve uyarlanmamış ifadeler arasındaki fark asıl olarak zaman genişlemesi yüzündendir.[4]

17.2 Kütle–Enerji Özdeşliği

Şimdi, Einstein'ın özel göreliliğin en ünlü ve önemli formüllerinden birisini elde etmesini sağlayan savın mantığının önemli noktalarını özetliyoruz.

1. Einstein özel görelilik kuramı için öne sürdüğü iki temel aksiyomdan (Kısım 16.3) - S çerçevesindeki bir olayın (x, y, z, t) betimlemesini ya da nitelendirilişini (burada x ekseni boyunca diye kabul edilmiş) düzgün ve değişmeyen (ya da sabit) bir v hızıyla hareket eden S' çerçevesindeki (x', y', z', t') ile bağlayan (ya da 'ilkini ikinciye çeviren') - Lorentz dönüşümlerini ((16.5) denklemleri) çıkarmayı başarmıştı. (16.1) denkleminde verilen zamanın genişlemesi formülü bu dönüşümlerin sonucudur.[5] Sonrasında (17.1) ve (17.3) denklemlerinde verilen Doppler kayması formülleri bundan elde edilir.

2. Pozitif x ekseni doğrultusunda yayılan, düzlemsel-kutuplanmış bir elektromanyetik dalganın (14.1 ve 14.2 Şekillerini anımsayınız) özel durumunu (burada amaçladıklarımız bakımından yeterli olacak)

göz önüne alırsak, Maxwell denklemlerinin Lorentz dönüşümleri altında biçimsel olarak değişmeden kalmaları koşulu E ve B alanlarının[6]

$$E' = \gamma\left(1 - \frac{v}{c}\right)E \tag{17.5a}$$

$$B' = \gamma\left(1 - \frac{v}{c}\right)B \tag{17.5b}$$

gibi dönüşmelerini gerektirir. (Burada da göreli **v** hızını x eksenine paralel olarak aldık.) Bir dalga tarafından taşınan enerji, salınım genliğinin karesiyle orantılı olduğundan, elektromanyetik dalga tarafından taşınan birim hacimdeki U enerjisinin (E^2+B^2)'ye orantılı olması şaşırtıcı değildir.[7] Bunun, klasik elektromanyetik kuramında doğru olduğu biliniyordu.[8] Bu nedenle, S tarafından görülen U enerji yoğunluğu ile S' tarafından görülen U' arasındaki ilişki kolayca

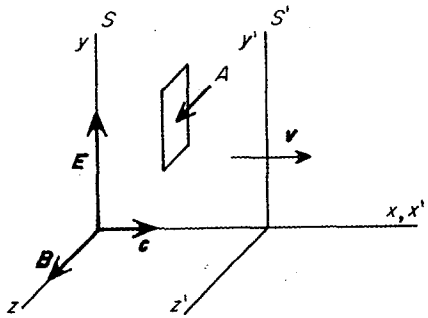
$$U' = \gamma^2\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2 U = \left(\frac{1-(v/c)}{1+(v/c)}\right)U \tag{17.6}$$

olur. Şimdi, birbirini izleyen (aralarındaki uzaklık tanım gereği λ (dalga boyu) kadar olan) iki dalga cephesi ile sınırlı bir bölgeyi ve (Şekil 17.3'te belirtildiği gibi) yüzey alanı A olan bir kesiti göz önüne alırsak, bu bölgenin S tarafından görülen hacmi yalnızca $V = \lambda A$ olurken, aynı bölgenin hacmi S' tarafından $V' = \lambda' A$ olarak görülür. (A alanının, S ve S' çerçevelerinin birbiriyle ilişkisini kuran **v** göreli hızına dik olarak seçilmesi nedeniyle Lorentz-kısalmasından etkilenmediğine dikkat ediniz.) Bu nedenle, (17.1) denkleminde verilen (ν ve ν' - ya da denk bir biçimde - λ ve λ' arasındaki ilişkiyi kuran) Doppler kayması formülünden $V' = \sqrt{(1+(v/c))/(1-(v/c))}\,V$ olduğunu buluruz. Bu, bu ışık atımının (ç.n.: İngilizcesi 'light pulse') içerdiği $(E = UV)$ enerjinin iki çerçevedeki değerleri arasında

$$E' = E\gamma\left(1 - \frac{v}{c}\right) \tag{17.7}$$

ilişkisi olmasını gerektirir. (Burada E'nin elektrik alanının şiddetini değil enerjisini gösterdiğinin farkında olunuz.) Benzer bir biçimde, S' çerçevesini x ekseni boyunca ($v \to -v$ alarak) sola doğru hareket ediyor diye düşünürsek,

$$E' = E\gamma\left(1 + \frac{v}{c}\right) \tag{17.8}$$



Şekil 17.3 Bir ışık dalgasının içerdiği enerjinin farklı eylemsiz çerçevelerde hesaplanması için gerekli geometri

olduğunu buluruz. Einstein, 1905 makalesinde şu gözlemi yapar:

> Bir ışık kompleksinin (ç.n.: 'birden fazla parçadan oluşmuş' anlamında; ışığı anlatmak için 'iki serbestlik derecesi' gerektiğinden böyle diyor) frekansıyla enerjisinin gözlemcinin hareketinin haliyle aynı yasaya uygun olarak değişmesi dikkate değer bir şeydir.[9]

Einstein'ın burada sözünü ettiği şey, Planck'ın bir fotonun enerjisini veren $\varepsilon = h\nu$ ifadesi (Kısım 19.2'ye bakınız) alınır ve ν için Doppler kayması formülü ((17.1) ve (17.3) denklemleri) kullanılırsa E ve E' arasındaki yukarıda (aslında klasik) elektrodinamikten çıkarılan ilişkinin hemen elde edilmesidir.

3. Bir elektromanyetik alan içinde Lorentz kuvvetinin ((14.13f) denklemi) etkisi altında hareket eden e yüküne sahip bir parçacık için[10]

$$F = \frac{\mathrm{d}\,p}{\mathrm{d}\,t} = e\,(E + \mathbf{v} \times B) \tag{17.9}$$

elektrodinamiğin ve klasik mekaniğin birleşik yasalarının biçimsel değişmezliğini bir kez daha şart koşarız, böylece bu yasa S' çerçevesinde

$$\frac{\mathrm{d}\,p'}{\mathrm{d}\,t'} = e\,(E' + \mathbf{v}' \times B') \tag{17.10}$$

biçimini alır. E', B' ve E, B çiftleri arasındaki ilişkinin ((17.5) denklemleri) Maxwell denklemlerinin Lorentz dönüşümleri altında biçim değiştirmeden kalmaları nedeniyle daha önceden bilindiğinin farkında olunuz. Bu yüzden, (Planck'ın 1907'de işaret ettiği gibi; Kısım 15.3'ü hatırlayınız) p momentumu için olan (göreliliğe uyarlanmış) ifadeyi

$$p = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \tag{17.11}$$

şeklinde değiştirmeye yönlendiririz. Burada m_0 parçacığın durgun kütlesidir (parçacığın kendisinin hareket etmeden durduğu çerçevesinde belirlenen kütlesidir).

4. Sonrasında iş-enerji teoreminden (ayrıntılar için Kısım 17.A'ya bakınız) K kinetik enerjisi için göreliliğe uyarlanmış ifadenin ($v = 0$ için $K = 0$ olduğunda)

$$K = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right] = m_0 c^2 (\gamma - 1) \tag{17.12}$$

olduğu ortaya çıkar.

5. Einstein, S çerçevesinde hareketsiz duran, biri artı x yönü diğeri ise eksi x yönü doğrultusunda olmak üzere her biri $L/2$ kadar enerji içeren iki ışık atımı yayan bir kaynağı göz önüne alarak aşağıdakileri öne sürdü.[11] Eğer kaynağın iki atım yayılmadan önce içerdiği enerji E_1 ve ışık atımları yayıldıktan sonra içerdiği enerji de E_2 ise, enerjinin korunumu

$$S \text{ çerçevesinde: } E_1 = E_2 + \frac{1}{2}L + \frac{1}{2}L = E_2 + L$$

S' çerçevesinde: $E_1' = E_2' + \frac{1}{2}L\gamma\left(1-\frac{v}{c}\right)+\frac{1}{2}L\gamma\left(1+\frac{v}{c}\right) = E_2' + L\gamma$

olmasını gerektirir. Burada S' çerçevesindeki ilişkileri yazarken (17.7) ve (17.8) denklemlerini kullandık. Bu iki denklemden birini diğerinden çıkarırsak,

$$(E_1' - E_1) = (E_2' - E_2) + L(\gamma - 1)$$

buluruz. Fakat Einstein, $E' - E$'nin yalnızca aynı cismin göreli hareket halinde olan iki farklı çerçeveden gözlemlenen enerjisi olduğunu ve bu nedenle bu enerjinin K kinetik enerjisi olması gerektiğini söyler. Bu yüzden

$$K_1 = K_2 + L(\gamma - 1) \tag{17.13}$$

olduğunu görürüz, ki böylece

$$\Delta K = L(\gamma - 1) \approx \frac{1}{2}\left(\frac{L}{c^2}\right)v^2$$

olur; burada en sağdaki biçim $(v/c)^2 << 1$ olduğunda (klasik rejimde) geçerlidir. Einstein'ın ulaştığı sonuç şudur:

Bir cisim L kadar bir enerjiyi ışıma olarak yayarsa, kütlesi L/c^2 kadar azalır.[12]

Böylece, modern fizikteki en ünlü formüllerden birine ulaşırız:

$$E = mc^2 \tag{17.14}$$

Einstein'ın bu dramatik sonucu elde etmek amacıyla kinetik enerji için asıl göreliliğe uyarlanmış ifadeyi (ç.n.: (17.12) denklemi kastediliyor) kullanmadığına dikkat ediniz. Öte yandan, (17.12) denklemini (17.13) denkleminin içinde kullanırsak,

$$m_1c^2(\gamma - 1) = m_2c^2(\gamma - 1) + L(\gamma - 1)$$

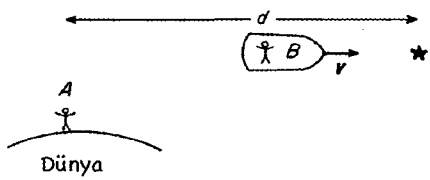
olduğunu buluruz, böylece

$$m_1c^2 = m_2c^2 + L$$

olur. Bunu

$$(m_1 - m_2) = \frac{L}{c^2}$$

şeklinde tekrar yazarsak, enerjiyle kütle arasındaki özdeşliği özellikle açık bir biçimde görürüz.



Şekil 17.4 İkizler paradoksunu açıklamak için bir yolculuk

17.3 İkizler Paradoksu

Özel görelilik kuramının aksiyomları ve gerektirdiklerinin birçoğu, (günlük hayattaki klasik mekanik temelli 'genel kanı'ya göre) sezgilerimize o kadar karşı görünürler ki, sık sık kuramın gerçekten de doğru ya da kendi içinde tutarlı olamayacağı yönünde tedirgin edici, neredeyse derin bir his uyandırırlar. Kuramın çelişkilere yol açtığını savlayan birçok girişimde bulunulmuştur. Bu girişimlerin tarihsel olarak en ünlü olanlarından ve hâlâ da geniş bir kesimin hayal dünyasını esir alanlarından biri, ikizler paradoksu olarak anılanıdır. Bu kısımda problemi açıklayacağız ve çözümünü tartışacağız.[13]

'İkizler paradoksu'nda ikizlerden biri Şekil 17.4'te gösterildiği gibi bir uzay gemisiyle Dünya'dan belirli bir uzaklığa gider, sonra yönünü değiştirir ve Dünya'ya geri döner. Giden ikize göre Dünya ve ikizi ters yönde gidip gelmiş gibi görünür. İki kardeş de aynı miktarda mı yaşlanmışlardır? Her biri, diğerinin zamanın genişlemesi nedeniyle kendisinden daha az yaşlandığını mı iddia edecektir? Yoksa biri diğerinden daha mı az yaşlanacaktır?

Ortaya bir paradoks çıkar; çünkü ilk bakışta ikizlerin her ikisi de zamanın genişlemesi formülünü ((16.1) denklemini)

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_{\text{öz}}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \tag{17.15}$$

diğer ikizin yolculuk sonrasında kendisinden daha genç olduğunu göstermek için kullanabilirmiş gibi görünür. Böylesi bir savda, $\Delta t_{\text{öz}}$ ikizlerden birinin kendi çerçevesinde (tümü bu çerçevede sabit bir konumda olmak üzere) yaşlandığı süre olarak alınır. Öte yandan, her ikisi de yolculuk sonrasında ötekinden daha genç olamaz. Kendi 'genel kanı'mız bizi bu sonuç hakkında ne kadar rahatsız hissettirirse hissettirsin, ya birinin ya da ötekinin yolculuk hiç yapılmamış olsaydı olacağından (diğerine göre) daha az yaşlı olabileceği mantıksal olarak olasıdır. Paradoksun kaynağı problemin kolaylıkla görülebilen simetrisinde yatar. İkizlerden birincisi Dünya'da kalırken diğerinin roketle gidip dönmesi ya da ikinci ikiz uzay gemisinde hareketsiz kalırken Dünya'nın hızla gidip gelmesi hallerini eşit olarak göz önüne alabilir miyiz? Bir eylemsiz çerçeve bir diğeri kadar iyidir.

Paradoksun çözümü, uzay gemisi dururken, yönünü geriye çevirirken ve sonrasında Dünya'ya dönerken ivmelendiğinden her iki çerçevenin de eylemsiz çerçeve olmaması gerçeğinde yatar. Bu çerçevedeki bir gözlemci bu ivmeyi (örneğin, artı ve eksi ivmelenme anları sırasında bir çekülün düşey yönden uzaklaşmasını seyrederek) ortaya çıkarabilir. Dünya üzerinde hareketsiz duran gözlemcinin her zaman eylemsiz bir çerçevede kaldığını biliyoruz. Bu nedenle, eğer $\Delta t_{\text{öz}}$ uzay gemisindeki ikiz için yolculuk süresinde (aslında, her biri B ikizi için gerçek zamanlar olmak üzere $\Delta t_{\text{öz}}/2$ kadarı gidişte ve $\Delta t_{\text{öz}}/2$ kadarı da dönüşte) geçen zaman ise, (17.15) denklemi ikizlerin yolculuk sonunda birbirleriyle karşılaştıklarında uzay gemisinde olanın Dünya'da kalana oranla daha az yaşlanacağını söyler. Bir başka deyişle, (bir düşünce deneyi olarak) B'nin yolculukta izlediği yol boyunca, her birinde bir diğerindekiyle senkronize olmuş bir saat olan ve hepsi de A'nın çerçevesinde A'ya göre hareketsiz duran çok sayıda gözlemciyi konuşlandırabilirdik.[14] Bu gözlemciler, B yanlarından geçip giderken saatlerinin kaçı gösterdiğini (hepsi de A'nın çerçevesine göre) okuyabilir, bunları kaydedebilir ve (sonrasında) kaydettiklerini A'ya iletebilirdi. Bu şekilde, (17.15) denklemi-

nin sol tarafındaki $\Delta t'$ ölçülebilirdi. (*A*'nın çerçevesinden ölçüldüğü haliyle *B*'nin birbirini izleyen konumları arasında geçen zaman farklarının geçen öz zamanlar olmadıklarının farkında olunuz.) Bu savın bir eylemsiz çerçevede (*A*'nınkinde) yapılması nedeniyle, *B* geriye dönüş noktasında eylemsiz çerçeveleri değiştiriyor olsa bile (17.15) denkleminin kullanılması geçerlidir. Bu nedenle, yolculuğa çıkan ikizin dünyada kalan ikizden daha az yaşlandığı sonucuna varırız.[15] Hiçbiri daha gençleşmiş değildir. Yalnızca biri diğerinden daha az yaşlanmıştır.

Bunu görmeye denk bir yol da asimetrik yaşlanmanın etkilerini göstermek için üç Lorentz çerçevesini göz önüne almaktır. *A* gözlemcisi daha önce olduğu gibi Dünya'da kalsın, *B* uzay gemisiyle uzaktaki yıldıza gitsin ve $-v$ hızıyla yolculuk eden *C* de *B*'yi tam *B* yıldıza varmak üzereyken geçsin. Yan yana geldiklerinde *C*, *B*'nin saatinde okunan geçen zaman süresini ('yaşı') kaydedebilir ve sonrasında (*C* için) yıldızdan geriye Dünya'daki *A*'ya dönüş yolculuğunda geçen ek süreyi tutabilir. *C* tarafından rapor edilen toplam geçen zaman süresi, iki öz zamanın toplamı ve *A* için geçen zaman süresine ($\Delta t'$) (17.15) denklemiyle bağlı olur.

Öte yandan, akıl yürütmemizde dikkatli olursak bu yolculuğa herhangi bir çerçeveden bakabilmeli ve tutarlı sonuçlar elde edebilmeliyiz. Şekil 17.4'te gösterildiği gibi, *A* ikizinin Dünya'da kalırken *B* ikizinin Dünya'yı bir v hızıyla terk ettiğini ve Dünya'nın çerçevesinden ölçüldüğü haliyle bir d uzaklığı kadar yol aldığını varsayın. Sonrasında *B* aniden dursun ve yine bir v hızıyla Dünya'ya geri dönsün. Tüm yolculuk boyunca kalp atışlarını telsizle birbirlerine yollasınlar. Tamamıyla benzer ikizler olduklarından kalpleri Dünya'dayken aynı ν frekansıyla atar. Bu noktadan sonra gelen kısımlarda çıkış, yönünü geriye çevirme ve duruş anlarındaki ivmelerin *B*'nin kalp atışları üzerine etkilerini ihmal edeceğiz. 1913 kadar erken bir zamanda Alman fizikçisi Max von Laue (1879–1960), ivmelenme süresi boyunca saate (ya da ikize) olacak herhangi bir etkinin ikizlerin asimetrik yaşlanmasını açıklayamayacağını göstermişti, çünkü çok basit bir şekilde yolculuğun aralıksız düzgün hareket olarak sürdüğü kısımları, ivmelenmenin yer aldığı yönünü geriye çevirme sürecine kıyasla istediğimiz kadar uzun tutabiliriz.[16] Bu nedenle, ivmelenmeye neredeyse hiç zaman harcanmadığını varsayarız, böylece *B* tamamı v hızıyla olmak üzere, aslında yolculuğun yarısında Dünya'dan yıldıza, geri kalan yarısında da yıldızdan Dünya'ya doğru hareket eder.

A'nın çerçevesinde Dünya'dan yıldıza ve yıldızdan Dünya'ya yolculukların her biri $t = d/v$ kadar sürer. *B*'ye göre uzaklık Lorentz kısalmasına uğrar ve $d\sqrt{1-(v/c)^2}$ imiş gibi görünür. Bundan dolayı her yolculuk ona (ç.n.: *B* kastediliyor) (kendi çerçevesinde ölçüldüğü haliyle) yalnızca $t' = (d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ kadar sürmüş gibi gelir. Toplam yolculuk *A* için $2\,d/v$ kadar sürer, bu sırada kendi kalbinin $\nu(2\,d/v)$ kez attığını sayar. *B* için toplam yolculuk $(2d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ kadar sürer, bu sürede kendi kalbinin $\nu(2d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ kez attığını sayar. Bu durumda, yolculuk sırasında *A A* için, *B*'nin *B* için saydığından daha fazla sayıda kalp atışı saymış ve böylece yolculuk sonunda *B A*'dan daha az yaşlanmış olur. (Bu, konunun sonundaki Kısım 17.A'da daha da ayrıntılı olarak ele alınıyor, burada yolculuğun tamamı boyunca her ikizin diğerinin kalp atış sayısını nasıl kaydettiğini hesaplıyoruz.) Ortada aslında bir paradoks değil, yalnızca ilk bakışta şaşırtıcı gelip insanı çarpan bir sonuç söz konusudur.

Özel görelilik kuramının çatısı altında artı ve eksi ivmelenme süreçlerinin ('yıldız'ın etrafında geminin yönünü geriye çevirme sırasında) *B* ikizi üzerine olan etkisini hesaplayamadığımızı vurgulamıştık. Öte yandan, genel görelilik kuramı içerisinde *B* ikizinin ölçülen süresi üzerine olan etki hesaplanabilir. *B*, yönü geriye çevirme sırasında kütleçekim alanının neden olduğu düzgün bir *g* ivmesinin etkisinde kalırsa, bu durumda ikizler için geçen Δt_A ve Δt_B süreleri ya da 'yaşları' birbirlerine[17]

$$\sqrt{1-(v/c)^2}\;\Delta t_A = \Delta t_B + \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right]\frac{4}{3}t^* \qquad (17.16)$$

şeklinde bağlı olur. Bu, $(v/c)^2 << 1$ için

$$\Delta t_A - \Delta t_B \approx \left(\frac{v}{c}\right)^2\left(\frac{1}{2}\Delta t_B - \frac{2}{3}t^*\right) \qquad (17.17)$$

olmasını gerektirir. Burada $t^* = 2v/g$ yönü geriye çevirme süresidir. $t = 0$ için (17.16) denklemi (17.15) denklemine indirgenir. Bu nedenle, yolculuğun (Δt_B) süresinin yönü geriye çevirme (t^*) süresine

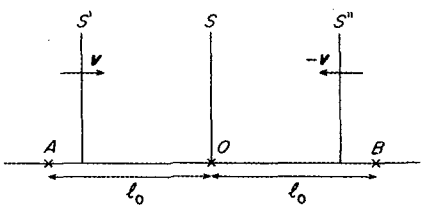
göre büyüklüğüne bağlı olarak, B A'dan daha genç ya da daha yaşlı olarak dönebilir. Öte yandan, yeterince uzun bir (Δt_B) yolculuk ve sabit bir yönü geriye çevirme (t^*) süresi için, B geriye döndüğü sırada her zaman A'dan daha genç olur. Von Laue'nin daha önce sözü edilen tezinin özü budur.

Çeşitli eylemsiz çerçevelerdeki diferansiyel zaman hızları sorusu deneysel testlerin de konusu olmuştur. Ekim 1971'de, (zamanı son derece büyük hassaslıkla ölçebilen) atom saatleri ticari uçuş yapan uçaklarla (bir kez batı, bir kez de doğu yönünde) Dünya etrafında uçuruldu. Geçen süreler, Dünya yüzeyinde tutulan diğer atom saatlerinde okunanlarla karşılaştırıldı. Öngörülen ve gözlemlenen süreler genel uyum içindeydi.[18]

17.4 Eşzamanlılık ve Aynı Anda Var Olma

İkizler paradoksuna olan büyük ilgi, olasılıkla onun doğal yorumu olarak görünenin sezgilere aykırı doğasından kaynaklanmaktadır: Bir yaşlanma sürecinin hızı kadar temel (ve bize göre, o kadar mutlak) bir şey, görünüşe göre bir gözlemcinin göreli hareket halinin etkisinde kalabilir. Bu, olguların belli bir rejimindeki deneyimleri temel alan sezgilerimizin, çok farklı bir rejimde yer alan olguları kapsamak için tasarlanmış bir kuramın öngörüleriyle karşı karşıya kaldıklarında (bu durumda ışık hızı c ile karşılaştırıldığında küçük v hızlarını temel alan sezgilerimizle, c ile kıyaslanabilir büyüklükteki hızlar için tasarlanmış özel göreliliğin öngörüleri arasında) ortaya çıkan çelişkilerin tek örneği değildir. Bu durum bizi, bazı temel kavramlarımızı gözden geçirmeye zorlayabilir. Burada bunlardan ikisini ele alacağız: eşzamanlılık ve aynı anda var olma.

Eşzamanlılık sorusunu, 'aynı anda var olmanın' anlamı üzerine olan tartışmaya geçmemizi sağlayan bir giriş olacak özel bir örnek bağlamında incelemek öğreticidir. Şekil 17.5'te



Şekil 17.5 Eşzamanlılığın göreliliği

gösterilen son derece simetrik durum buradaki amaçlarımız için yeterlidir. O, S eylemsizlik çerçevesinin başlangıç noktası olsun ve S'ye göre sırasıyla $\mathbf{v}$ ve $-\mathbf{v}$ hızlarında hareket eden başka iki S' ve S'' eylemsiz çerçevesini daha göz önüne getirin. Şekilde gösterildiği gibi her biri O'dan ℓ_0 uzaklığında konuşlandırılmış iki A ve B istasyonu bulunsun. Işık sinyalleri (S çerçevesine göre) $t = 0$ anında A ve B'den O'ya doğru yola çıksın. Bir başka deyişle, birinci olay A konumunda $t = 0$ anında meydana gelir, ki böylece bunu $(-\ell_0, 0)$ şeklinde gösterirken B'deki ikinci olayı $(\ell_0, 0)$ olarak gösteririz. Birinci ve ikinci olayların S çerçevesinde eşzamanlı oldukları düzenleme gereği çok açıktır, böylece $\Delta t = 0$ olur. Zaman koordinatları için Lorentz dönüşümünü ((16.5) denklemlerinin sonuncusunu) kullanarak, S' çerçevesindeki bir gözlemci tarafından görüldüğü haliyle bu iki olay arasındaki zaman farkını

$$\Delta t' \equiv t_2' - t_1' = \gamma\left(-\frac{v\ell_0}{c^2} - \frac{v\ell_0}{c^2}\right) = -2\gamma\frac{v\ell_0}{c^2} < 0$$

şeklinde buluruz. Bir başka deyişle, S' çerçevesindeki bir gözlemci için (A'daki) birinci olay (B'deki) ikinci olaydan sonra meydana gelir. S'' çerçevesi için benzer bir hesaplama (yani $v \to -v$ için)

$$\Delta t'' \equiv t_2'' - t_1'' = 2\gamma\frac{v\ell_0}{c^2} > 0$$

sonucunu verir, böylece bu çerçevede (A'daki) birinci olay (B'deki) ikinci olaydan önce meydana gelir. Bunu daha canlı - ama yanlış yönlendirme potansiyeli yüksek bir biçimde - belirtmenin bir yolu, S'' için geleceğin S için şimdi ve S' için geçmiş (ve önermeyi uygun biçimde değiştirerek tam tersi) olduğudur.

Yine Şekil 17.5'i kullanarak, bu kez işin içinde üç olayın olduğu bir duruma bakalım. S çerçevesinde bunlar (B'de) birinci olay $(\ell_0, 0)$, O'da ikinci olay $(0, \tau)$ ve (yine B'de olan) üçüncü olay $(\ell_0, 2\tau)$ olsun. Bir başka deyişle, S çerçevesinde olayların (diyelim, bir ışık pırıltısı yayılmasının) sırası, her biri bir τ zaman aralığıyla ayrılmak üzere, önce 1, sonra 2 ve sonra da 3'tür. Sırasıyla S' ve S'' çerçeveleri için, (yine (16.5) denklemlerinin sonuncusundan)

$$\Delta t' \equiv t'_3 - t'_2 = \gamma\left(\tau - \frac{v\ell_0}{c^2}\right)$$

ve

$$\Delta t'' \equiv t''_2 - t''_1 = \gamma\left(\tau - \frac{v\ell_0}{c^2}\right)$$

buluruz. Bu,

$$v = \frac{\tau c^2}{\ell_0} = \left(\frac{\tau}{\ell_0/c}\right)c$$

olan bir v hızı seçersek, bu durumda $\Delta t' = \Delta t'' = 0$ olacağı anlamına gelir. Bu, ikinci ve üçüncü olayların S' çerçevesinde eşzamanlı olmasını gerektirir, aynı zamanda birinci ve ikinci olaylar da S'' çerçevesinde eşzamanlı olur. Şimdi ikinci ve üçüncü olayların (S''da) *aynı anda var olduğunu* ve birinci ve ikinci olayların da (S'''da) aynı anda var olduğunu söyleyecek olursak, bu durumda içimizden birinci ve üçüncü olayların aynı anda var olduklarını söylemek geçebilir. Bu, birinci ve üçüncü olayın içinde eşzamanlı oldukları bir çerçeve bulunmadığından, gerçekten de tuhaf olur. Bu, basit bir şekilde birinci ve üçüncü olayların 2τ kadar bir öz zamanla (ikisi de B'de meydana geldiklerinden) birbirlerinden ayrıldıkları gerçeğinden çıkar. Var olmayı ve aynı anda var olmayı, - olmak ya da olmamak anlamında - belirli bir gözlemciden ya da çerçeveden bağımsız bir biçimde mutlak bir şey olarak düşünme eğilimi gösteririz. Burada yarattığımız güçlük, sonuç olarak aynı anda var olma ile eşzamanlılığı birbirine eşitmiş gibi almamız yüzünden ortaya çıktı. Eşzamanlılık, öz bir biçimde tanımlanmış matematiksel bir koşulken, aynı anda var olma bizim için dolaylı bir biçimde çok daha geniş yan anlamlarla yüklüdür. Elbette ki, özel görelilik kuramındaki eşzamanlılık ölçütünün geleneksel yanıyla ilgili daha önce yaptığımız yorumlar ışığında, eşzamanlılıkla aynı anda var olma arasındaki gerilimi bu geleneğin bir sonucu olarak ortaya çıkmış olarak da görebiliriz.[19]

Öte yandan, özel göreliliğin verdiği ileti geçmişle gelecek arasında herhangi bir mutlak ayrımın olmadığı şeklinde alınırsa, varoluşun belirlenimci olarak görüldüğü 'blok evren' modeli olarak anılan modele de ulaşılabilir (ama bu zorunlu değildir).[20] Böyle bir bakış

açısı, klasik fiziğin Laplaceçı belirlenimciliğinden (12. Konu'yu hatırlayınız) özünde çok da farklı değilmiş gibi görünür. Böylesi bir 'ilke olarak' belirlenimciliğin kuantum mekaniğiyle tutarlı olup olamayacağını 23. ve 24. konularda ele alacağız.

17.A Bazı Matematiksel Hesap Ayrıntıları

Mekanikteki iş-enerji teoremi, bir sistem üzerine yapılan net (W) işin tam olarak sistemin kinetik enerjisindeki değişime eşit olduğunu belirtir. Bu teoremi, kinetik enerji için göreliliğe uyarlanmış ifadeyi ((17.12) denklemini)

$$\Delta K = W = \int F \cdot \mathrm{d}r = \int F \cdot \mathbf{v}\mathrm{d}t = m_0 \int_0^v \mathbf{v} \cdot \mathrm{d}\left(\frac{\mathbf{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right) = m_0 c^2 \int_0^v \mathrm{d}\left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right)$$

$$= m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1\right] = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

olarak elde etmek amacıyla uygulayabiliriz.

Burada, ikizler paradoksunun çözümünü, her ikizin yolculuk boyunca birbirine bilgi yollaması ve alması yöntemiyle daha da ayrıntılı bir şekilde sürdüreceğiz. Önce kalp atışlarının telsizle yayınlanması sonucu her birinin diğeri için kaç kalp atışı saydığı sorusunu sorarak işe koyulalım. Doppler etkisi nedeniyle alınan frekansın yollanan frekanstan farklı olduğunun farkında olmalıyız. Eğer kaynakla gözlemci birbirinden uzaklaşırsa, görünen (alınan) frekans asıl (yollanan) frekanstan daha düşük olur; eğer birbirlerine yaklaşırlarsa, görünen (alınan) frekans daha yüksek olur ((17.1) ve (17.3) denklemlerine bakınız). Yıldıza doğru yapılan yolculuk sırasında B, $t'_{\text{kırmızı}} = (d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ A'dan $t'_{\text{mavi}} = (d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ kadar bir süre boyunca kırmızıya doğru kaymış bir sinyal alır. Yönünü geriye çevirdiği andan itibaren, kırmızıya doğru kayma maviye doğru kaymaya dönüşür. Dünyaya doğru olan yolculuk sırasında B, kadar bir süre boyunca maviye doğru kaymış bir sinyal alır.

İkizlerden A da yıldıza doğru yapılan yolculuk sırasında B'den kırmızıya doğru kaymış bir sinyal alır. B yönünü geriye çevirdiği anda A, kır-

mızıya doğru kaymış sinyali fazladan d/c kadar bir süre daha almaya devam eder, bu fazla süre sinyallerin ona B ondan en uzak noktadayken ulaşması için gereken süre kadardır. Böylece A toplam $t_{\text{kırmızı}} = (d/v + d/c) = (d/v)(1 + v/c)$ kadar bir süre boyunca kırmızıya doğru kaymış ve geriye kalan $t_{\text{mavi}} = (d/v - d/c) = (d/v)(1 - v/c)$ kadar bir süre boyunca maviye doğru kaymış bir sinyal alacaktır. Problemdeki temel asimetri zamandaki bu gecikmedir. A tarafından sayıldığı haliyle B'nin kalp atışlarının toplam sayısı $(\nu_{\text{kırmızı}}\, t_{\text{kırmızı}} + \nu_{\text{mavi}}\, t_{\text{mavi}}) = \nu(2d/v)\sqrt{1-(v/c)^2}$ olur. Bu, tam olarak B'nin kendisi için saydığı kalp atışlarının sayısı kadardır (Kısım 17.3'e bakınız). B tarafındans sayılan A'nın kalp atışlarının toplam sayısı $(\nu_{\text{kırmızı}}\, t'_{\text{kırmızı}} + \nu_{\text{mavi}}\, t'_{\text{mavi}}) = \nu(2d/v)$ kadardır. Bu, tam olarak A'nın kendisi için saydığı kalp atışlarının sayısı kadardır. Bir kere daha, herhangi bir paradoksun olmadığını görüyoruz.

Yararlı Kaynaklar

Bu Konu'da işlenen teknik hesaplarla ilgili olarak daha fazla ayrıntı için Edwin Taylor ve John Wheeler'ın *Uzay-Zaman Fiziği* adlı eserine başvurulabilir. Hasok Chang'in 'Yanlış Anlaşılmış Bir Baş Kaldırı: İkizler Paradoksu Anlaşmazlığı ve Herbert Dingle'ın Bilime Bakışı' adlı makalesi, ikizler paradoksunun tarihinin ve ona verilen tepkilerin bazılarının öyküsünü sürükleyici bir dille anlatır. Talal Debs ve Michael Redhead'in 'İkizler "Paradoksu" ve Eşzamanlılığın Geleneksel Niteliği' adlı makalesi bu çok uzun bir süre boyunca ortalıkta dolaşan bilmecenin olağanüstü derecede açık ve ayrıntılı bir tartışmasını sunar.

18
Genel Görelilik ve Genişleyen Evren

Özel görelilik kuramı asıl olarak elektromanyetik olgularla ve bunların meydana geldiği uzay-zaman arka planı ile uğraşmak için geliştirildi. Genel görelilik kuramı, Einstein tarafından kütleçekimsel olguların betimlemesini vermek için formüle edildi. Einstein, bir cismin kütleçekim kütlesiyle eylemsizlik kütlesinin her zaman birbirlerine tam olarak eşit olmaları gerçeğinden rahatsız oluyordu. Daha önce 8. Konu'da Newton fiziğinde eylemsizlik kütlesi (m_i) ile kütleçekim kütlesi (m_g)[1]

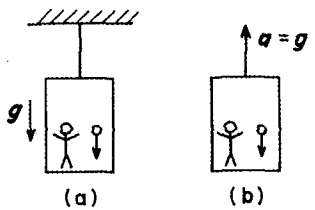
$$F = m_i a = \frac{GM}{r^2} m_g$$

arasında yapılabilecek kavramsal bir ayrımın bulunduğuna işaret etmiştik. Bu ikisinin aslında deneysel olarak birbirine eşit olduğu bulunmuş olsa da, bunun niçin böyle olması gerektiğini sorabiliriz. Birazdan göreceğimiz gibi, genel görelilik kuramı kütleçekim ve eylemsizlik kütlelerinin birbirine tam olarak eşit oldukları varsayımını temel alır. Einstein, klasik fizikte bir kaza ya da yalnızca bir rastlantı olarak düşünülen bu durumu doğanın temel bir yasası olarak kabul etti. Bu, hem kendisinin hem de Poincaré'nin etere göre herhangi bir hareketin bulunmasının olanaksızlığını, eter diye bir şeyin olmadığı ve fiziksel olarak yalnızca göreli hareketlerin anlamlı oldukları anlamında yorumlarken yaptıklarına benziyordu.

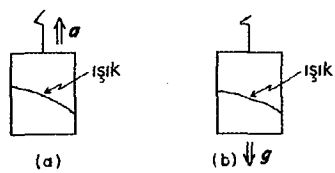
18.1 Temel İlkeler

Einstein'ın ilk kez 1907 yılındaki bir 'gözden geçirme' makalesinde öne çıkardığı (ama bu isim altında sunmadığı) *eşdeğerlik ilkesi*

ile başlıyoruz.[2] İlke, temel olarak uzay-zamanın küçük bir bölgesinde (*yerel olarak*) düzgün bir kütleçekim alanında 'hareketsiz duran' bir çerçeveyi, boş uzay içinde düzgün olarak ivmelendirilen bir çerçeveden işlevsel olarak ayırt etmenin olası olmadığını belirtir. Ünlü bir düşünce deneyi, Şekil 18.1'de gösterildiği gibi, asansörler içindeki iki gözlemciyle ilgilidir. (a)'da bir gözlemci Dünya'nın düzgün kütleçekim alanı içinde hareketsiz durur.[3] Bir top serbest bırakıldığında, asansörün zeminine doğru $a = g$ ivmesiyle düşer, burada g yalnızca yerçekimi nedeniyle oluşan ivmedir. (b)'de asansör boş uzayda konuşlanmıştır, ancak bu kez yukarıya doğru bir $a = g$ ile ivmelenmektedir. Burada da bir top serbest bırakılırsa, topun asansörün zeminine 'düştüğü' görülecektir. Her iki asansörde de pencere bulunmazsa, asansördeki bir gözlemci asansör içindeki nesnelerin ivmesini ölçerek (a) durumunu (b)'den ayırt edemez.



Şekil 18.1 Eşdeğerlik ilkesi



Şekil 18.2 Işığın bir kütleçekim alanında 'düşmesi'

Şimdi, Einstein'ın yaptığı gibi asansörün içinde yapılacak hiçbir deneyin (a)'daki gibi bir düzgün kütleçekim alanını (b)'deki gibi boş uzayda düzgün bir ivmelenmeden ayırt edemeyeceğini varsayarsak, iki önemli sonuca varabiliriz. İlk olarak, Şekil 18.1'in (b)'sindeki ortak bir g ivmesi tüm cisimler için (a) durumundan fiziksel olarak ayırt edilemezse, bu durumda m_i ile m_g eşit olmalıdır. Diğer türlü, tüm cisimler (a) durumundaki asansöre göre değil, (b) durumunda-

kine göre ortak bir g ivmesiyle ivmelenecektir. Bunu açık olarak aşağıdaki gibi görebiliriz. Şekil 18.1'de (a) durumundaki hareketin betimlemesi yalnızca $m_i a = m_g g$ ya da $a=(m_g/m_i)g$ 'dir. Öte yanda, (b) durumundaki tüm cisimlerin gözlemlenen ivmesi mutlaka $a = g$ olur. Buradan da öne sürüldüğü gibi $m_i = m_g$ olduğu çıkar.

İkincisi, ışığın bir kütleçekim alanı içindeki davranışı için de şaşırtıcı bir öngörü elde edebiliriz. Şekil 18.2(a)'da asansörün gözlem çerçevesi boş uzay içerisinde yukarıya doğru düzgün olarak ivmelenirken gösteriliyor. Asansörün dışında uzayda hareketsiz olarak duran bir gözlemci bir ışık ışınını asansörün bir kenarından öteki kenarına doğru yol alırken seyredecek olsaydı, ışığı düzgün yatay bir doğru boyunca hareket ederken görecekti, ancak aynı sırada asansörün yukarı yöndeki ivmesi nedeniyle asansörün zemini ışık ışınının geçişi sırasında yukarı doğru hareket edecekti. Asansörün zemininde ayakta duran bir gözlemci bu nedenle ışık ışınını Şekil 18.2(a)'da belirtildiği gibi 'düşerken' görecektir. Eğer eşdeğerlik ilkesi doğruysa, bu durumda bir ışık ışını da Şekil 18.2(b)'de gösterildiği gibi düzgün bir kütleçekim alanı içinden geçerken 'düşmeli' ya da bükülmelidir. Einstein 1907 yılındaki aynı makalede eşdeğerlik ilkesini, - Güneş'in ya da bir yıldızın yüzeyinde olduğu gibi - güçlü bir kütleçekim alanından çıkan ışığın kütleçekim alanının zayıf olduğu uzak bir noktada gözlemlendiğinde daha düşük bir frekansa (ya da daha büyük bir dalga boyuna) sahip olacağı sonucuna varmak için ışığın Doppler kaymasını veren formülle birlikte kullandı. Bu etkiye aşağıda tekrar döneceğiz.

Einstein, 1911 yılındaki 'Kütleçekimin Işığın Yayılması Üzerine Olan Etkisi Üstüne' adlı bir makalede, kendi eşdeğerlik ilkesini, bir ışık ışınının Güneş'in yüzeyi yakınından geçerken hangi miktarda bükülüceğinin niceliksel bir öngörüsünde bulunmak için Newton'un klasik kütleçekim kuramıyla birleştirdi.[4] 1916 yılında bir klasik olan 'Genel Görelilik Kuramının Kuruluşu'nu yayınladı. Bu makalede kütleçekim kuramının yeni baştan tam bir formülasyonunu sundu ve kuramının Newton tarafından geliştirilmiş öncelinden ayırt edilmesine yarayacak üç öngörüde bulundu. Burada Einstein'ın genel görelilik kuramını matematiksel formülasyonu epey gelişmiş ve karmaşık olduğundan yalnızca genel ifadelerle tartışabiliyor olsak da, kuramın bütünü - bazıları için insanı ikna etme gücünü kendinde taşıyan - iç yapısındaki matematiksel ve mantıksal zarafetin güzel bir örneğidir. Einstein 1914'te arkadaşı Besso'ya şunları yazdı:

> Şimdi tam olarak tatmin oldum ve artık tutulmanın gözlemlenmesi (ç.n.: aşağıda Şekil 18.6'yla ilgili tartışma burada sözü geçen tutulmayı açıklamaktadır) başarılı olsa da olmasa da, tüm sistemin doğruluğundan kuşkulanmıyorum.... Olayın anlamı çok açık.[5]

1915'in sonunda kuramsal bir fizikçi olan Arnold Sommerfeld'e (1868-1951) şöyle yazdı:

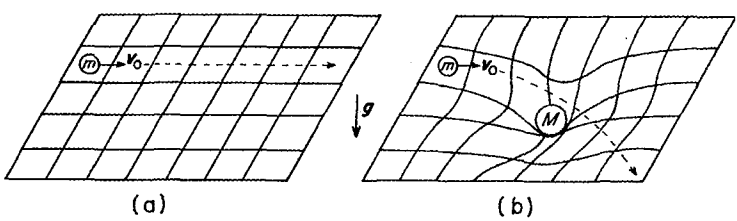
> Genel Görelilik Kuramı'nı çalışır çalışmaz doğru olduğuna ikna olacaksın. Bu nedenle onu savunmak için tek kelime söz etmeyeceğim.[6]

Tekrar Şekil 18.1'e dönersek, eşdeğerlik ikesinin bir başka önemli gizli anlamını da görebiliriz. Bu şeklin (a) kısmında gösterilen durumda asansörü taşıyan kablonun birdenbire koptuğunu ve böylece asansörle içindekilerin aşağıya doğru serbest düşmeye başladığını varsayın. Asansörün içinde bir gözlemci tarafından yapılabilecek deneyler göz önüne alındığında, bu çerçeve her bakımdan bir eylemsiz çerçeve olarak görünecektir. Eşdeğerlik ilkesi yerel olarak düzgün bir ivmeyle düzgün bir kütleçekim alanının eşdeğer olduğunu belirttiğinden, her zaman için eylemsiz bir çerçeve olan serbest düşmekte olan bir çerçeveye (yerel olarak) geçmenin olası olduğu sonucuna varırız. Eşdeğerlik ilkesine göre kütleçekim etkileriyle ivmeler nedeniyle oluşan etkiler birbirlerinden herhangi bir belirsizliğe meydan vermeksizin ayrılamayacağı için, mutlak eylemsiz bir çerçeve bulunamaz.

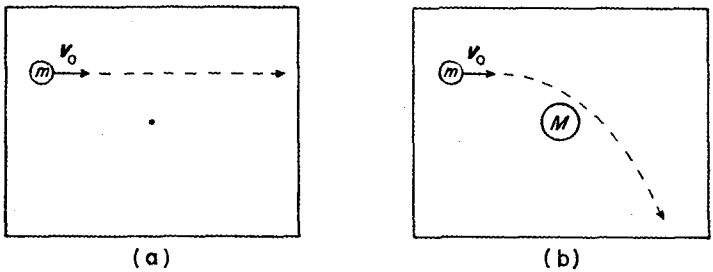
Mach'ın evrenin eylemsiz çerçevesinin sabit yıldızların kütlesine başvurularak belirlendiği yönündeki düşüncesi ve Riemann'ın maddenin uzayın geometrisini ve bunun da karşılıklı olarak uzayda meydana gelen fiziği etkilediğine (bakınız Kısım 11.4) olan inancı, Einstein'ın genel görelilik kuramına ulaşmasını sağlayan düşünme dizisinde etkili olmuştu. Einstein genel görelilik kuramının özgün halini matematiksel olarak ortaya koyarken, uzayın özelliklerinin tamamıyla evrendeki madde dağılımı tarafından belirlenmesi gerektiği düşüncesini köşe taşı olarak almıştı. Einstein'ın genel göreliliğinin alan denklemlerinin, Mach'ın ilkesinin bu halini içermesi bekleniyordu.[7] Bununla birlikte, 1917'de Hollandalı bir gökbilimci, matematikçi ve evrenbilimci (ç.n.: İngilizcesi 'cosmologist') olan Willem de Sitter (1872-1934), Einstein alan denklemlerinin üç uzayın düz olduğu ancak genişleyen bir zaman ölçüsü bulunan - ve tüm bunların uzay-zamanda herhangi bir madde yokken olduğu - bir 'boşluk' çözümünü keşfetti. Çok sonraları 1949'da, bir matema-

tikçi olan Kurt Gödel bu alan denklemlerine (kütlesi olan) evrenin bir bütün olarak keşfedilebilir (mutlak) bir dönme hareketine uğradığı başka bir çözüm kurdu. Böyle bir çözüm 'sabit yıldızlar' çerçevesinin (bir bütün olarak evrenin) bu tür bir dönme hareketinin keşfedilemeyeceğini beklememize yol açacak olan özgün görelilik ilkesiyle pek uyuşmaz. Hem de Sitter hem de Gödel çözümleri Mach'ın ilkesinin genel göreliliğin temel bir parçası olmadığını gösterir.[8]

Einstein'ın genel kuramı kütleçekim olgusunu geometrinin yöntemlerinin uygulanabileceği bir biçime dönüştürür; çünkü uzayın yapısı ya da 'şekli', cisimlerin uzayın içindeki hareketini etkiler ve uzay da buna karşılık içinde bulunan kütleler tarafından etkilenir. Maddesel parçacıklar ve ışık ışınları bu durumda her zaman fiziksel uzayın yapısı içinde iki nokta arasındaki en kısa yolu izlerler. Bu yollar *jeodezikler* (ç.n.: İngilizcesi 'geodesics', bir yüzey üzerindeki iki noktayı en kısa yoldan birleştiren eğri) diye bilinirler. Uzayın bu eğriliğini aşağıdaki benzerlik yardımıyla açıklamaya çalışalım (bakınız Şekil 18.3). Şeklin (a) kısmında olduğu gibi, üzerinde birbirine dik doğruların çizili olduğu düz bir yatay lastik çarşafımız olduğunu varsayın. m (ihmal edilebilir) kütlesindeki (küçük) bir top herhangi bir sürtünme olmaksızın bu çarşafın üzerinde yuvarlanabilseydi, bu durumda - bir kez bir $\mathbf{v}_0$ ilk hızıyla hareket etmesine yol açıldığında - şekilde kesik çizgiyle belirtildiği gibi düzgün bir doğru boyunca yuvarlanmayı sürdürürdü. Bunu topun üzerine net hiçbir kuvvet etki etmediğinden eylemsizliğe mal ederdik. Şimdi, şeklin (b) kısmındaki gibi lastik çarşafın üzerine daha büyük bir M küresi yerleştirin. Kürenin ağırlığı çarşafın aşağıya doğru sarkmasına neden olacaktır ve birbirine dik doğrular sistemin şeklinin bozulmasına yol açacaktır.[9] Bu durumda m topu artık düzgün bir doğru boyunca yuvarlanmayacaktır, bunun yerine kesik çizgilerle belirtilen yörünge boyunca aşağıya doğru yönelecektir.



Şekil 18.3 Kütleçekime 'geometrik' bir açıklama getiren 'eğri' bir uzaydaki jeodezik hareket



Şekil 18.4 Kütleçekime düz bir uzaydaki kuvvetler açısından eşdeğer, klasik bir açıklama

Şimdi bu iki duruma hiçbir derinlik algımızın olmadığını varsayarak - ki bu durumda hareket düz bir yüzey üzerinde meydana geliyormuş gibi görünür - tam olarak yukarıdan bakalım. Bu halde görünen iki boyutlu resim Şekil 18.4'te gösterilen gibi olurdu. Bunu (a)'daki durumda *m* üzerine bir kuvvet uygulayabilecek başka kütlelerin bulunmamasıyla açıklayabilirdik, böylece top düzgün bir doğruda hareket etmeyi sürdürür. (b)'deki durumda *M* kütlesi *m* üzerine tıpkı Güneş'in bir gezegenin düzgün bir doğru yerine yörüngesini izleyecek biçimde yönünü değiştirmesi gibi 'kütleçekimsel' bir çekim uygular.

Kütleçekim geometrinin yöntemlerinin uygulanabileceği bir biçime dönüşünce, Einstein aynısını elektrodinamik için de yapmaya çabaladı, ancak hem kütleçekimin hem de elektrodinamiğin bu türden bir birleşik alan kuramı, ömrünün sonuna kadar - ondan sonra başkalarına da olduğu gibi - ondan kaçtı. Einstein, bu (ç.n.: bir şövalyenin romantik bir nedenle atılacağı bir macera gibi olan) araştırması için nedenini bir çalışma arkadaşına anlattı.

> Başarı şansının çok küçük olduğunu kabul ediyordu, ancak bunun denenmesi gerektiğine de inanıyordu. Kendisi çok saygın bir isim (ç.n.: ya da marka) olmuştu; bulunduğu konum sağlamdı ve bu nedenle gücü başarısızlık riskini göze almaya yetiyordu. Dünya'da onun izlemeye koyulduğu yolu izleyecek genç birinin gücü bu yol nedeniyle kaybedilecek başarılı bir kariyeri göze almaya yetmezdi, böylece Einstein bu mesele konusunda bir görevi olduğunu hissediyordu.[10]



Şekil 18.5 Yıldız ışığının Güneş tarafından bükülmesi

18.2 Deneysel Testler

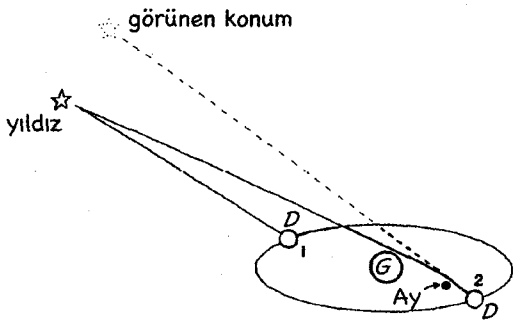
Şimdi genel kuramın ve eşdeğerlik ilkesinin deneysel testlerinden üçünü kısaca tartışıyoruz.

1. *Işık ışınlarının bir kütleçekim alanı tarafından bükülmesi*

$E = mc^2$ formülü alınır ve yalnızca klasik kavramlar kullanılarak düşünülürse, (enerji taşıyan) ışığın bir kütleçekim alanı içinde bir $m = E/c^2$ etkin 'kütlesi'ne sahip olması beklenebilir. Bu nedenle, Şekil 18.5'de belirtildiği gibi, diyelim bir X yıldızından çıkmış bir ışık ışını, örneğin Güneş gibi kütlesi büyük bir cismin yakınından geçerken, normalde izleyeceği düzgün doğru şeklindeki yolundan saptırılmalıdır ve sanki X' gibi başka bir konumdan geliyormuş gibi görünür. Einstein genel görelilik kuramını tam olarak olgunlaştırmadan önce, 1911'deki makalesinde, Güneş'in oluşturması beklenen bükülme miktarını öngörmek için bu temelde klasik fikirleri kullandı ve 0,83″ (yayın saniyesi) gibi bir değer elde etti.[11] Daha sonra uzayın eğriliğinden kaynaklanan etkileri uygun bir şekilde katabildiğinde, bunun neredeyse iki katı büyüklüğünde bir değer 1,7″ öngördü.[12] 1,7″'lik sapmanın genel göreliliğin klasik fiziğe tamamen yabancı bir özelliği olan 'uzayın eğriliği' etkisi tarafından oluşturulurken, 0,83″'lik sapmanın hâlâ Newton'un kütleçekim kuramı çerçevesinde olmak üzere ışığın 'ağırlığını' temsil ettiği söylenebilir. Bu, gökbilimsel açıdan araması son derece küçük bir etkidir. Şimdi bu gözlemlerin nasıl yapıldığını betimleyeceğiz.

Olayları kolaylaştırmak bakımından, Dünya'yı Güneş etrafındaki yörüngesinde altı ay arayla bulunacağı iki farklı konumda göz önüne getiriniz. Şekil 18.6'da belirtildiği gibi, birinci konumda sabit bir

yıldıza olan yön, arka planda gökyüzünün gece aldığı hale göre belirlenir. Daha sonra, ikinci konumda aynı yıldızdan çıkan bir ışık ışını Dünya'ya gelişi sırasında tam Güneş'in kenarını sıyırdığında, yıldıza olan yön yine ölçülür. Eğer şekilde daha yukarıdaki kesiksiz çizgiyle belirtildiği gibi ışık ışını bükülürse, bu durumda teleskopa yıldızdan Dünya'ya doğru düz bir doğruyu izlemiş olduğunda geleceğinden daha dik bir açıyla gelecektir. Yıldıza olan yön ya da yıldızın konumu, ışıkları Güneş'in yakınından geçmeyen diğer yıldızlara göre (şekilde noktalı çizgiyle belirtildiği gibi) kaymış gibi görünecektir. Birinci ve ikinci konumlarda fotoğraf levhalarıyla alınan görüntüler, oluşan kayma için daha sonra karşılaştırılabilir. Doğal olarak, normal koşullar altında Güneş'in parlaklığı cılız yıldız ışığını bastırıp gizleyeceğinden, ikinci konumdan yıldızların gözlemlenmesi olanaksızdır. İkinci gözlemin Güneş'in Ay tarafından tamamen tutulması sırasında yapılmak zorunda olması bu nedenledir.



Şekil 18.6 Yıldızların konumlarındaki kayma

Einstein'ın genel görelilik kuramı 1916'da yayınlandığı halde, Dünya'nın tam bir Güneş tutulmasının yaşanacağı bölgelerine hiçbir bilimsel yolculuk düzenlenmemişti; çünkü Dünya'nın önde gelen ülkeleri I. Dünya Savaşı'yla meşguldüler. Yine de, İngiltere Kraliyet Gökbilimcisi (ç.n.: İngilizcesi 'Astronomer Royal of England'), olur da o zamana dek savaş biterse diye, 1919'un baharında meydana gelecek Güneş tutulması sırasında gözlemler yapmak amaçlı bilimsel bir yolculuğu planlamakla görevli bir komite atadı. Ateşkes 1918 Kasım ayının başlarında imzalandı ve Kraliyet Derneği (Royal Society) Brezilya'nın kuzeyindeki Sobral'a ve Batı Afrika'nın karşı-

sında Gine Körfezi'ndeki Principe Adası'na birer yolculuk düzenledi. Dünya yüzeyi üzerinde Güneş tutulmasının görülebileceği birbirinden çok uzakta iki ayrı noktaya iki ayrı yolculuk düzenlenmesi, bu iki yerden birinde gözlem yapılmasını olanaksız kılabilecek kötü hava koşullarına karşı bir önlemdi. Her iki yolculuğa çıkanların da Londra'ya dönmesi, fotoğraf levhalarının dikkatle karşılaştırılması ve olası hata kaynaklarının göz önüne alınması aylar sürdü. Kraliyet Derneği ve Kraliyet Gökbilim Derneği 1919 Kasım ayının başlarında her iki yolculuğun çarpıcı ve olumlu sonuçlarını ilan etti.[13] Einstein'ın gösterdiği tepki şaşkınlık değil, büyük bir mutluluktu. 1919'da Einstein için çalışan bir öğrenci olayları şöyle anlattı.

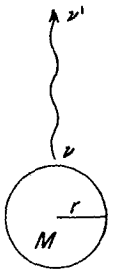
> Bir keresinde kuramına karşı bir sürü itiraz içeren bir çalışmayı beraber okumak amacıyla Einstein'la birlikteydim... birdenbire kitabın tartışılmasını yarıda kesti, pencere kenarında durmakta olan bir telgrafa uzandı ve bunu bana verirken 'Al, bu belki ilgini çeker' dedi. Eddington'un [1919'daki] Güneş tutulması yolculuklarının ölçüm sonuçlarını içeren bir telgrafıydı. Sonuçların onun hesaplarıyla aynı olması nedeniyle mutluluğumu ifade ederken, O tamamıyla sakin bir biçimde, 'Ama kuramın doğru olduğunu biliyordum' dedi, bunun üzerine 'Ya öngörünüz doğrulanmamış olsaydı?' diye sorduğumda 'O zaman sevgili Tanrı için üzülürdüm - kuram doğru' diye yanıtladı. ((ç.n.: Sözün Almanca aslı şöyledir:) 'Da könnt' mir halt der liebe Gott leid tun, die Theorie stimmt doch.')[14]

O zamandan beri benzer gözlemler defalarca tekrar edilmiştir ve hepsi de genel göreliliğin öngörüsüyle temel olarak uyum içinde sonuçlar vermiştir.

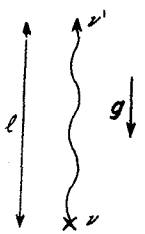
2. *Işığın kütleçekim nedeniyle kırmızıya kayması*

Daha sonra daha ayrıntılı olarak göreceğimiz gibi, kuantum kuramına göre bir ışık ışınının (aslında tek bir fotonun) ε enerjisi $\varepsilon = h\nu$ olarak verilir, burada ν ışığın frekansı ve h da şimdilik sayısal değeri gerekmeyen Planck sabitidir. Yine klasik fizik terimleriyle düşünerek ve bir kütleçekim alanındaki Newton potansiyel enerjisinin $V = -GMm/r$ olduğunu hatırlayarak, bir ışık ışınının - ışın bir cismin (diyelim Dünya'nın ya da Güneş'in) yüzeyinden sonsuza doğru giderken (bakınız Şekil 18.7) - ('kinetik') enerjisindeki değişimini hesaplayabiliriz. Planck'ın $\varepsilon = h\nu$ denkleminden ve özel göreliliğin $E = mc^2$ ifadesinden fotonun etkin kütlesini (daha önce oldu-

ğu gibi) $m \sim h\nu/c^2$ şeklinde alabiliriz. Foton tarafından yapılan işi kütleçekim potansiyel enerjisindeki değişime eşitlersek,[15]



Şekil 18.7 Bir yıldızdan ya da gezegenden çok uzakta kütleçekim nedeniyle kırmızıya kayma



Şekil 18.8 Dünya yüzeyine yakın noktalarda kütleçekim nedeniyle kırmızıya kayma

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{GM}{rc^2} \tag{18.1}$$

elde ederiz, burada $\Delta\nu = \nu - \nu'$'dür. g yerçekimi ivmesinin neredeyse sabit olduğu Dünya yüzeyinin yakınında bir ℓ yüksekliği boyunca frekansta oluşan kayma (bakınız Şekil 18.8)

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{g\ell}{c^2} \tag{18.2}$$

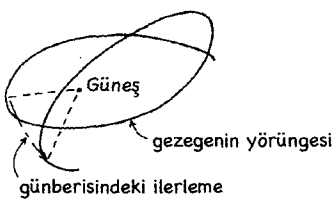
olur. Bu etki deneysel gözlemlerle doğrulanmıştır.[16]

3. *Merkür'ün günberisinin (perihelyon) ileri gitmesi*

Newton'un evrensel kütleçekim yasasına ve hareket yasalarına göre, gezegenler Güneş etrafında elips biçimindeki yörüngelerde döner-

ler. Öte yandan Einstein'ın denklemleri bu elipslerin kendilerinin yalpaladıklarını (ya da döndüklerini) öngörür. Günberisi - ya da gezegenin Güneş'e en çok yaklaştığı nokta - Şekil 18.9'da belirtildiği gibi her turda az da olsa ileri gider. Kısım 11.2'de gördüğümüz gibi Merkür gezegeni için genel görelilik tarafından öngörülen değer her yüzyılda 43″'dir. Bu, diğer gezegenlerin etkisi tarafından oluşturulan ve Newton'un kütleçekim yasası tarafından uygun bir biçimde açıklanan tüm küçük sapmaların toplamından daha fazladır.

Gerçekte yapılan gözlemler karmaşıktır; çünkü Dünya'nın çerçevesinden yapılmaktadırlar. Dünya'dan göründüğü haliyle Merkür'ün yörüngesinin günberisi her yüzyılda yayın yaklaşık 5600″'si kadar ilerler.[17] Bunun büyük kısmı (yüzyılda 5026″'si) Dünya'nın dönme ekseninin Güneş'in ve Ay'ın kütleçekimi nedeniyle oluşan yalpalaması (ya da sallanması) tarafından açıklanabilir. Bu yalpalamanın periyodu yaklaşık 26 000 yıldır. Bu durumda, Merkür'ün yörüngesinin günberisinin yalpalamasının açıklanacak her yüzyılda 574″'lik bir kısmı kalır. Newton'un kütleçekim kuramı temel olarak alındığında Merkür'ün yörüngesinde Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenler tarafından oluşturulan küçük sapmalar hesaplanabilir ve bu



Şekil 18.9 Merkür'ün günberisinin yalpalaması

her yüzyılda 531″'lik bir miktara karşılık gelir. Bu durumda klasik olarak açıklanamamış her yüzyılda 43″'lik bir miktar kalır. Bu tam olarak genel görelilik tarafından öngörülen miktardır. Diğer gezegenler için de buna benzer (örneğin Venüs için her yüzyılda 8,6″'lik ve Dünya için her yüzyılda 3,8″'lik) ilerlemeler öngörülmüştür, ancak bunlar son derece küçüktür ve deneysel olarak bulunmaları çok daha zordur.

Bu kendi içinde tutarlı ve güzel kuram - yani genel görelilik - bu birkaç şaşırtıcı olguya açıklama getirmekten daha fazlasını yapmadığı halde, modern fizikte son derece saygıdeğer bir konum edinecek-

ti. Birkaç on yıl boyunca, 1960ların başında önemli ve yeni gökbilimsel veriler elde edilinceye kadar genel görelilik, birçokları tarafından yalnızca gizemli bir tuhaflık olarak görüldü. O günden bu yana uygulama alanının şimdi klasikleşmiş olan bu üç öngörünün çok daha ötesinde bir erime sahip olduğunu öğrendik. Genel görelilik, evreni anlamamızda merkezi bir öğedir. Bunun önemini kavrayabilmek için şimdi, günümüzde bilinen evrenin modern gökbilimsel gözlemleri ve evrenbilim kuramlarını temel alan bir betimlemesine dönüyoruz. Bu kısa özette tarihsel olayların zaman içinde oluş sıralarına her zaman tam anlamıyla sadık kalmayacağız.

18.3 Klasik Evrenin Kararlılığı

11. Konu'da gördüğümüz gibi Newton fiziksel uzayın yapı olarak Öklit uzayı olduğunu ve sonsuz büyüklükte olduğuna inanıyordu. Ayrıca, Kısım 12.2'de Newton'un *Optics*'inin Sorular'ının bazılarından söz etmiştik, Newton bunlarda evrenin Tanrı'nın (evreni oluşturan kısımların karşılıklı kütleçekimi altında kendi üzerine çökmesini engelleyecek bir) müdahalesi olmaksızın uzun dönemde kararlılığını sorguluyordu.[18] Newton daha genç yaşlardayken evrendeki tüm maddenin bu sonsuz uzayın hacminin yalnızca sonlu bir kısmına dağıtıldığını ve maddesel evrenin temel olarak durgun olduğuna (zaman içinde ne büyüdüğüne ne de küçüldüğüne) inanıyordu.[19] Evrende yalnızca sınırlı miktarda bir maddenin bulunmasının getirdiği sorunlardan biri, kendi başına bırakılmış sonlu nicelikte durgun maddenin onu oluşturan kütlenin karşılıklı kütleçekimi altında çökmek zorunda olmasıdır. Newton'un evrende Tanrı'nın yeri konusunda yazıştığı İngiliz klasikçisi (ç.n.: klasikler üzerinde uzman bilgin) ve din adamı Richard Bentley, yeterince tuhaf bir şekilde - ilk olarak kütleçekimin evrendeki tüm cisim çiftleri arasında işlemesi gerçeğinde ve ikincisi de Tanrı'nın evrenin çökmesini engellemek için sabit yıldızlar küresinde kütleçekim yasasını fiilen askıya almasında - Tanrı'nın var olduğu yönünde kanıt bulmuştu.[20] Newton'un kendi, *Optics*'inin 28. Soru'sunda aşağıdaki soruyu sordu:

> Sabit yıldızların birbirleri üzerine düşmelerini ne engelliyor?[21]

Newton, *Principia*'nın III. Kitap'ının sonundaki Genel *Scholium*'da sanki girdiği bahiste kaybetme olasılığına karşı kendini güvenceye alan biri gibi

> Tanrı, olur da sabit yıldızlar sistemleri kütleçekimleri nedeniyle birbirlerinin üzerine düşer diye, bu sistemleri birbirlerinden uçsuz bucaksız uzaklıklara yerleştirmiştir.[22]

diye bir ifadede bulunmuştu. Newton'un görüşünü sonlu bir maddesel evrenden sonsuz uzay boyunca düzgün olarak dağıtılmış madde bulunan bir evren resmine doğru değiştirmesi 1692-3 yılının kışında Bentley'le olan yazışmasının sonucuydu. Öte yanda maddi evren kaba yapı olarak fiilen hâlâ durgundu. Newton, ortada bir kararlılık sorununun kaldığının farkındaydı:

> Ve sonsuz uzaydaki tüm parçacıkların her birinin diğerlerine göre mükemmel bir denge içinde hareket etmeden duracak kadar kesin bir biçimde yerleştiklerini varsaymak o kadar zordur ki... Çünkü bunun sonsuz sayıda (sonsuz uzaydaki parçacıklar kadar çok sayıda olan) [iğnenin] bu noktalar üzerinde o kadar doğru bir şekilde iliştirilmelerini sağlamak... bunu yapmak kadar zor olduğunu tahmin ediyorum.[23]

Principia'nın daha sonraki bir baskısında aşağıdakileri belirterek bu zorluktan (ancak tamamıyla inandırıcı olamayan bir şekilde) kurtulmaya çalıştı:

> Gökte her yere düzensiz bir dağınıklıkla yayılmış olan sabit yıldızlar, karşıt çekimleri aracılığıyla karşılıklı etkilerini yok ederler....[24]

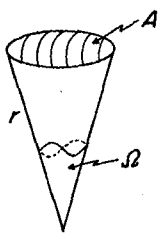
Newton,

> Şimdi, maddelerin ilk başta tüm gök boyunca düzgün bir biçimde yayılmış olduğu hipotezinin, - bana göre - aralarını bulacak doğa üstü bir güç olmaksızın yaratılışta var olan kütleçekim hipoteziyle çelişki içinde olduğunu ve bu yüzden bir Tanrı'nın var olduğu sonucunun çıkacağını da eklerim.[25]

diye belirtirken, evrenimizin gerçek kararlılığını Tanrı'nın dünyadaki etkisinin bir kanıtı olarak gördü. Leibniz de her yerine maddenin yerleşmiş olduğu sonsuz bir evrene inanıyordu.

Ne yazık ki, içinde yıldızların düzgün olarak dağıtılmış olarak bulunduğu sonsuz bir uzay, on sekizinci yüzyılda yaşamış bir

Alman gökbilimcisi olan Heinrich Olbers'in (1758–1840) adıyla anılan Olbers paradoksu adındaki bir bilmece sunuyordu. Böyle bir uzayda gökyüzü her yerde, kendi Güneş'imizin tipik bir örneği olduğu yıldızlarla doluymuş gibi görünür. Bu yüzden, Dünya'yı merkez olarak kabul eden herhangi bir kürenin yüzey alanı yarıçapının karesiyle arttığından ve bu da uzaktaki yıldızlardan gelen ışığın şiddetinin tam olarak uzaklığın bir ters kare kuvvetiyle azalması sonucu karşılandığından, gökyüzü hem gece hem de gündüz boyunca öğle saatinde Güneş'in etrafı aydınlatmasında olduğu gibi aydınlık olarak görülmelidir. Bunu Şekil 18.10'a başvurarak biraz daha ayrıntılı olarak görebiliriz. Bu şekilde belirtildiği gibi sonsuz uzaya bir Ω katı açısı olan bir koniden baktığımızı varsayın. Bir r uzaklığındaki A yüzey alanı üzerindeki yıldızların sayısı (tıpkı bütün bir kürenin yüzey alanının $A_{\text{küre}} = 4\pi r^2$ olması gibi $A = r^2\Omega$ olduğundan) r^2 ile doğru orantılıdır, bu arada her yıldızın ışığının bu yüzey üzerindeki şiddeti $1/r^2$ ile azalır. Bu yüzden, r uzaklığındaki bir yüzey parçacığından bize ulaşan net ışık şiddeti r'den bağımsızdır. Doğal olarak belirli bir yıldız, bakış doğrultumuzu 'engellediği' zaman, artık o yıldızın arkasında kalan yıldızlardan ışık alamayız. Bu nedenle, bakış doğrultumuzdaki (sonlu sayıdaki) yıldızdan sonlu (ve sabit) miktarda ışık almamız gerekir. Ancak, gökyüzü gece olduğunda öğle saatinde olduğu kadar aydınlık değildir. Böylece, sonsuz, durgun, homojen bir evren ve her zaman aydınlık olmayan bir gökyüzü, bir yüzyıldan fazla bir süre çözülmeden kalan bir çelişki sundular. Bu, sonlu bir evren modelinin aranmasını teşvik etti.



Şekil 18.10 Olbers paradoksunun geometrisi

Böyle sonlu ve durgun bir evrenin kütleçekimsel çökme süresini, r_0 yarıçapındaki düzgün olarak dağılmış küresel bir M kütlesini göz önüne alarak tahmin edebiliriz. (Kendisi çökecek olan) Bu kürenin

merkezinden r_0 uzaklığında başlangıçta hareketsiz duran bir m kütlesi alır, enerjinin korunumunu kullanır ve elde edilen denklemi integre edersek, [26]

$$t_{\text{çökme}} = \frac{\pi\, r_0^{3/2}}{\sqrt{8GM}} \qquad (18.3)$$

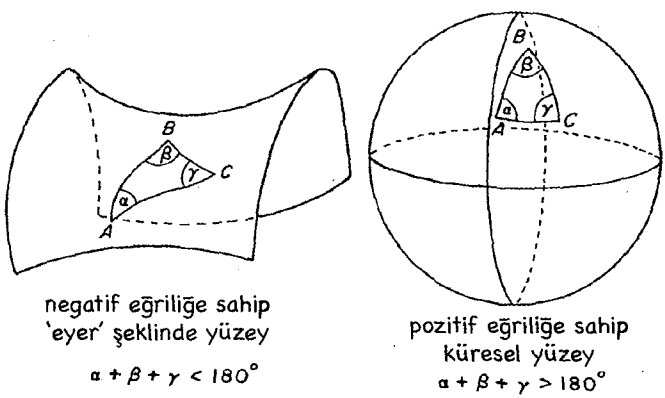
buluruz. r_0'ı en yakınımızdaki yıldız olan, yani Dünya'dan 4,3 ışık yılı uzaklığındaki Alpha Centauri'ye olan uzaklık olarak $r_0 = R_\alpha$ alalım. Bu durumda, bizim Güneş'imiz bu küre içindeki tek 'yıldız' olduğundan, kolayca $t_{\text{çökme}} = 7{,}89 \times 10^{14}$ s = 25 milyon yıl olarak hesaplarız. (Bir ışık yılı, ışığın bir yılda aldığı yolun uzunluğu kadardır. (ç.n.: Işık yılı bir 'uzunluk' ölçüsüdür.)) Bundan daha kolay ve doğrudan doğruya sonuç verecek bir yol, Kepler'in üçüncü yasasını ((5.4) denklemini) kullanmak ve yüksek derecede eliptik bir yörüngede olan uzak bir yıldızı göz önüne almaktır. Sonra, böyle bir yıldızın $r_0 = R_\alpha$ uzaklığındaki günöte (aphelyon) noktasından (son derece düzleşmiş bir eliptik yörünge için Güneş'e çok yakın bir noktada bulunacak olan) günberi noktasına hareket etmesi için geçen süreyi hesaplayabiliriz. Kepler'in üçüncü yasasında Güneş etrafındaki bir yörüngede dönen diğer cisim olarak Dünya'yı alırsak, çökme süresi olarak 70 milyon yıl tahmininde bulunuruz. Bu nedenle, çökme süresi için verilen bu iki tahmin aynı büyüklük seviyesindedirler. Newton, en yakın yıldızlara olan uzaklığın (günümüzde kullanılan terminolojiyle) üç ışık yılı seviyesinde olduğunu biliyordu. Böylece, çökme süresini yaklaşık olarak on beş milyon yıl olarak tahmin edebilirdi. Doğal olarak bu, evrenin ('Eski Ahit'e göre') kabul edilen birkaç bin yıllık yaşına göre dikkate değer bir sorun oluşturmazdı.

18.4 Einstein ve Friedmann Evrenleri

Einstein, Kısım 18.1'de gördüğümüz gibi, genel görelilik kuramını eğri bir uzay-zamanı temel alarak formüle etmişti. 11. Konu'da on dokuzuncu yüzyılın ortalarından önce akla yatkın tek üç boyutlu uzayın (düz, eğriliği sıfır olan) Öklit uzayı olduğuna inanıldığına işaret etmiştik. Bundan sonra matematikçiler başka olasılıklar keşfettiler. Rus

Nicholai Lobachevski (1792-1856) ve Macar János Bolyai (1802-1860) Riemann'ın Kısım 11.5'te sözünü ettiğimiz pozitif eğriliğe sahip uzayına ek olarak negatif eğriliğe sahip bir uzay geometrisi buldular. Şekil 18.11'de her iki eğri uzay tipinin iki boyutlu örnekleri gösteriliyor. Bir jeodezik, verilen bir yüzey üzerindeki (ya da verilen bir uzaydaki) iki nokta arasındaki en kısa uzunluğa sahip olan eğridir. Şekil 18.11'de her yüzey üzerinde üç kenarı olan şekiller ('üçgenler') çizilmiştir. Bu üçgenlerin kenarları *A*, *B* ve *C* noktaları arasındaki jeodeziklerdir. Negatif eğriliğe sahip olan yüzey üzerinde böyle bir üçgenin iç açılarının toplamı 180°'den az iken pozitif eğriliğe sahip yüzey üzerinde bunların toplamı 180°'den daha fazladır. Bir düzlem Öklit uzayının eğriliği sıfırdır ve bir üçgenin iç açılarının toplamı tam olarak 180°'dir. Kısım 11.5'te belirttiğimiz gibi bu üç açının toplamının 180°'den hangi miktarda farklı olduğu yüzeyin (ya da uzayın) eğriliğinin bir ölçüsüdür.

Einstein kendi özgün genel görelilik denklemlerinin uzaysal büyüklüğü sonlu bir evren içinde sonlu (ancak sıfırdan farklı) bir madde miktarı olan statik (ya da zamandan bağımsız) bir çözüme izin vermediğini gördü. Bu yüzden, 1917'de denklemlerini o tarihten sonra evrenbilimsel sabit (ç.n.: kozmolojik sabiti kastediyor, İngilizcesi 'cosmological constant') olarak anılan bir terimi de içerecek biçimde değiştirdi.[27] Bu ek terimin etkisi parçacıklar arasındaki karşılıklı kütleçekime statik dengeyi oluşturmaya yetecek bir itici kuvvet eklemekti. Einstein bu çalışmayı yaparken eldeki gökbilimsel veriler, içinde evrenin



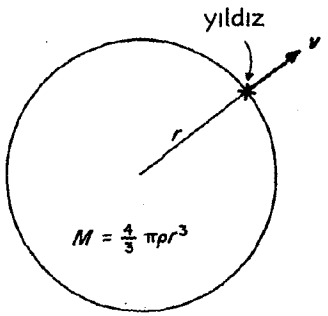
Şekil 18.11 Negatif ve pozitif eğriliğe sahip geometriler

topyekûn bir genişlemesinin ya da büzülmesinin bulunmadığı statik bir evren ile tutarlı görünüyordu. Doğal olarak, örneğin gezegenlerin Güneş etrafında yaptıkları gibi yerel hareketlere izin veriliyordu. Bu, *Einstein evreni* olarak bilinir oldu. Hemen evrenbilimsel sabitin fiziksel olarak akla uygunluğu konusunda bir tartışma başladı. 1922'de Rus matematikçisi Alexander Friedmann (1888-1925) Einstein denklemlerinin - ister özgün hali ister de evrenbilimsel sabiti içeren hali alınsın - sabit eğriliği olan genişleyen (ya da büzülen) bir çözüme (bir *Friedmann evreni*ne) izin verdiğini gösterdi. Olayların bu evresinde evren negatif (ya da sıfır) eğriliğe sahip ve uzaysal büyüklüğü de sonsuz olabilirdi ya da pozitif eğriliğe sahip ve (zamanla artan ya da azalabilen) sonlu bir toplam hacimde olabilirdi.

1927'de - Cambridge Üniversitesi'nde öğrenci olarak okumuş ve sonrasında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden doktora derecesini almış olan - Belçikalı papaz ve kuramsal gökbilimci Abbé Georges Lemaître (1894-1966) sonlu Einstein evreninin kararsız olduğunu kanıtladı. Bu, böyle bir uzayın denge halinden çok küçük bir miktarda bile uzaklaştırılsa geriye dönüşü olmayan bir biçimde sabit uzaysal eğriliği olan boş bir evrene doğru genişleyeceği anlamına geliyordu. Lemaître, evrenin kökeni için zamanın öncesinde bulunan (daha sonra büyük patlama kuramı olan) bir ateş topu kuramı önerdi. Bu kuramda evren elektromanyetik ışıma ve maddenin çok yoğun bir hali olarak başlıyordu, tıpkı bir gazın yapacağı gibi genişler ve sıcaklığı azalıp soğurken, - kütleçekimi etkisi altında - gökadalar ve yıldızlar evrenin çok erken zamanlarında evreni dolduran çok hafif maddelerin yoğunlaşmasından oluşuyorlardı. Böyle bir Friedmann evreninde - pozitif eğriliğe sahip, kapalı, sonlu hacimde, zaman içinde genişleyip büzülen; ya da negatif (ya da sıfır) eğriliğe sahip, açık, sonsuz hacimde, genişleyen - iki olası model, kritik değeri yaklaşık olarak[28] $\rho_c \approx 5\times10^{-27}$ kg/m^3 olan evrendeki ortalama madde yoğunluğu tarafından ayırt edilir. Bu kabaca her metreküpte bir hidrojen atomuna karşılık gelir. Şu an gözlemsel durum hâlâ belirsizdir. Evrenin yoğunluğu, görülebilen gökadaların sayılmasıyla tahmin edilirse, $\rho_{\text{görünür}} \approx 0{,}10\ \rho_c$ olduğu[29] bulunur. Ancak bir sonraki kısımda da göreceğimiz gibi, ρ'nun başka bir yöntem tarafından yapılan tahmini $\rho \cong \rho_c$ olduğunu gösteriyor.

Eninde sonunda genişlemesini durduracak ve sonrasında kütleçekimin etkisi altında büzülecek olan sonlu bir evrenle, giderek azalan bir hızda sonsuza dek genişleyecek bir sonsuz evren arasındaki

farkın maddenin ortalama yoğunluğuna bağlı olmak zorunda olması, aşağıdaki (sonucunun genel görelilik kuramında bile geçerli olmayı sürdürdüğü gösterilebilen) klasik tez temel alınarak da görülebileceği gibi, akla uygundur. 8. Konu'da belirttiğimiz gibi, küresel olarak simetrik bir kütle kendi dışında sanki tüm kütlesi kürenin merkezinde toplanmış gibi



Şekil 18.12 Kaçış hızı

aynı kütleçekim kuvveti alanını oluşturur. Ayrıca, düzgün bir küresel kütle kabuğunun içindeyken de bu kütle içeride hiçbir kütleçekim kuvveti oluşturamaz. Bu yüzden, evrenin merkezi olarak almayı seçtiğimiz herhangi bir noktadan r kadar uzakta konuşlanmış bir kütle (ya da yıldız) göz önüne alındığında (bakınız Şekil 18.12), bu durumda yıldızın kaçış hızına (küresel kütlenin kütleçekim alanından kaçıp kurtulmak için gerekli en düşük hız) sahip olup olmadığı bu r yarıçapındaki kürenin kütlesine bağlı olacaktır.[30] Eğer evrendeki maddenin kütle yoğunluğu ρ ise, bu durumda[31]

$$v_{\text{kaçış}} = \left(\sqrt{\frac{8\pi G}{3}\rho}\right) r \qquad (18.4)$$

olur. Bu bize, herhangi bir sabit r uzaklığı için kaçış hızının beklendiği gibi yalnızca ρ yoğunluğuna bağlı olduğunu anlatır.

Doğal olarak, evrenin bu imgesel 'merkezinden' olan r uzaklığına ne tür bir önem iliştirmemiz gerektiği ilk bakışta açık değildir. Fiili olarak herhangi bir noktayı evrenin merkezi olarak alabileceğimiz ortaya çıkar. Bu şaşırtıcı sonuç (bir sonraki kısımda geri döneceği-

miz) evrenin genişlemesi yasasıyla ve - ilk kez Einstein tarafından gelişmeye açık bir biçimde 1931'de öne sürülen ve 1933'te Edward Milne (1896-1950) tarafından bu ismin konduğu - *Evrenbilimsel İlke* diye anılan bir hipotezle ilişkilidir. Bu ilke - ki bu ilkeye göre evrenin (büyük ölçekli yapısında) homojen ve izotropik olduğu varsayılır - evrenin modern evrenbilimde geçerli olduğu kabul edilen genel bir ayırt edici özelliğidir. Burada 'homojen' evrenin her yerde aynı olduğu (tercih edilen bir başlangıç noktasının olmadığı) anlamına gelir ve 'izotropik' de tercih edilen bir yönü olmadığını anlatır. Böyle bir ilke gökbilimsel gözlemlerle tutarlıdır, çünkü hem uzayın genişlemesi izotropiktir hem de gökküre üzerinde gökadaların dağılımı bir hayli düzgün gibi görünür.[32] Böyle evrenlerde, genişleyenin uzayın kendisi olduğunun farkında olmak önemlidir.[33] Bir benzerlik kurarak düz bir lastik çarşafı (ya da belki de daha iyisi bir balonun yüzeyini) uzayı simgeliyor diye düşünebiliriz. Çarşaf gerildiğinde (ç.n.: ya da balon şişirildiğinde), bu yüzeye (ya da 'uzaya') göre hareketsiz durumdaki noktalar bile zaman geçtikçe daha büyük uzaklıklarla birbirlerinden ayrılırlar.

18.5 Hubble Yasası

Vesto Slipher (1875-1969) 1912'den 1925'e dek Dünya'ya uzak gökadalardan gelen ışığın spektrum çizgilerini ölçtü ve bunların kırmızıya doğru kaymış olduklarını buldu. Her elementin ısıtıldığı zaman yaydığı kendine özgü bir renk (ya da ışığın frekansları) kümesi olduğundan, bunu belirlemek olasıdır. O zamanlar bu kırmızıya doğru kaymanın 17. Konu'da ele aldığımız Doppler etkisinin bir sonucu olduğu varsayılmıştı. Bu özel spektrum çizgilerindeki kayma daha sonra bu ışığı yayan (bu gökadalardaki) yıldızların (ç.n.: genişleyen evrende arka plandaki) uzaklaşma hızlarının çıkarılmasında kullanılabiliyordu. Varılan şaşırtıcı sonuç Slipher'ın gözlemlediği uzak gökadaların büyük çoğunluğunun bizden geriye doğru çekildikleriydi. (Hareketlerin gelişigüzel bir dağılımı için kırmızıya doğru kaymanın gözlendiği gökada sayısının yaklaşık olarak maviye doğru kaymanın gözlendiği gökada sayısına eşit olması beklenirdi.) Edwin Hubble (1889-1953) Harlow Shapley'in (1885-1972) (yaklaşık 300 ışık yılı uzaklığına kadar güvenilir olan) doğrudan doğruya yıldız paralaksı (bakınız Kısım 4.4) gözlemlerinin ve (yaklaşık 80 milyon ışık yılı uzaklığına kadar olan) parlaklık ölçümlerinin yerini alan

tekniklerini daha da geliştirerek, çok uzaklardaki gökadalara olan uzaklıkları bağımsız bir biçimde belirleyebilmişti. Hubble bu yolla 1929 yılında tartışmaları sonlandırarak, evrendeki tüm gökadaların Dünya'dan olan uzaklıklarıyla doğru orantılı

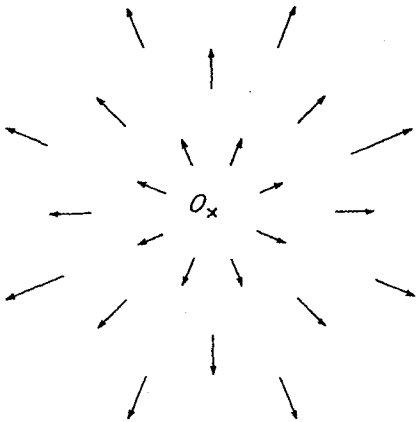
$$v_{\text{uzaklaşma}} \propto \textit{Dünya'ya olan uzaklık}$$

bir uzaklaşma hızına sahip olduklarını kanıtladığında, gözlemsel gökbilimde çok büyük bir ilerleme sağlanmıştı. Şimdi buna çoğunlukla *Hubble yasası* denir.

Öte yandan, Doppler kayması formülü arka planındaki uzaya göre hareket eden bir yıldızın v hızına uygulanır. Yalnızca çok yakındaki yıldızların (bu durumda da ya kırmızıya ya da maviye doğru olabilen) dalga boyundaki kayma yıldızların uzay içindeki yerel hareketi yüzündendir. Kırmızıya doğru kaymanın büyük kısmı uzayın kendisi genişlerken dalga katarının 'gerilmesi' yüzündendir. Uzaklardaki gökadaların (toplam) uzaklaşma hızı (yıldızların uzayın içindeki hareketinden değil) uzayın genişlemesinden gelir. Bir başka deyişle, kırmızıya doğru kaymaların ölçülen uzaklıkla orantılı olduğu gözlemsel olarak

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \propto \textit{uzaklık} \tag{18.6}$$

şeklinde bulunmuştu. Bunun küçük v/c değerleri için Doppler etkisi ((17.1) denklemi) yüzünden olduğu varsayımı altında (18.5) denklemi türünde bir yasaya ulaşılabilir.[34] Ancak şimdiye kadar olan tartışmamızda, hıza karşı uzaklık yasasının ve kırmızıya doğru kaymaya karşı uzaklık yasasının konumları çok farklıdır: İlki gözlemlerin ve Doppler kayması formülünün uygulanmasının sonucuyken, ikincisi doğrudan doğruya deneysel bir kuraldır. (Genişleyen bir evren modelinin bu iki yasayı nasıl birleştirdiğini Kısım 18.A'da gösteriyoruz.) Uzayın genişlemesi nedeniyle uzaklaşma hızının herhangi bir sınırının (c'nin bile) olmadığının da farkında olunuz. Uzaklaşma hızının gözlemciden olan uzaklıkla doğru orantılı olduğu böyle bir genişleyen evrende, Şekil 18.13'te belirtildiği gibi, her gözlemci kendisini evrenin merkezinde diye düşünür. Bu şekilde O'daki gözlemci tüm maddeleri kendisinden



Şekil 18.13 Uzayın genişlemesi

uzaklaşıyormuş gibi görür.[35] Bu konunun sonundaki Kısım 18.A'da, (18.5) denkleminde betimlendiği haliyle, Hubble yasasının temeli hakkında daha fazla ayrıntı vereceğiz.

Bir önceki kısımda söz ettiğimiz klasik benzerliğe geri dönersek (18.4) ve (18.5) denklemlerinin aynı biçimde olduklarına dikkat ediniz. Bu nedenle, eğer ρ yeterince büyükse, bu durumda (18.5) denklemindeki Hubble hızı gereken kaçış hızından daha küçük olabilir ve parçacık sonunda durur, sonrasında da kürenin merkezindeki noktaya doğru geriye düşer. Ayrıca evrene büyük bir ölçekte bakıldığında herhangi bir anda hem izotropik hem de homojen olduğu görülür. Yalnızca çok uzaklardaki (diyelim yaklaşık 10^9 ışık yılı uzaklığındaki) gökadalarda uzaklaşma hızı Hubble yasasının ((18.5) denklemi) öngördüğünden biraz daha büyüktür. Işık sonlu bir hızla yol aldığından, uzaktaki bir gökadaya bakmak (bir başka deyişle, gökadayı çok uzun süre önce terk etmiş ışığı şimdi almak) evrenin geçmişteki tarihinde çok geride kalmış bir ana bakmaya denktir. Doğal olarak herhangi bir anda yalnızca (sonuç olarak) uzaklaşma hızı $v_{\text{uzaklaşma}} < c$ olan gökadalardan ışık alabiliriz. $v_{\text{uzaklaşma}} = c$'ye karşılık gelen uzaklık *Hubble yarıçapı* diye bilinir. Genişleme hızı sürekli olarak azaldığından Hubble yarıçapı sürekli olarak artar. (Bu nokta üzerinde daha fazla açıklama için Kısım 18.A'ya bakınız.)

Arthur Eddington (1882-1944) 1930'da Einstein'ın ve Lemaître'ın genişleyen bir evren üzerine olan çalışmalarının Hubble yasası için doğal bir açıklama sağladığını fark etti. Einstein 1930'un sonlarında

ve 1931'in başlarında Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nü (ç.n.: İngilizcesi 'California Institute of Technology', kısaca 'Caltech' denir ve bir üniversitedir.) ziyaret ederken oradaki bilim adamlarıyla en yeni gökbilimsel gözlemleri ele aldı. (Hubble Pasadena'daki Wilson Dağı Gözlemevi'nde (ç.n.: İngilizcesi 'Mount Wilson Observatory', üniversiteyle gözlemevi birbirine çok yakındır) çalışıyordu.) Einstein 1931'de evrenbilimsel sabiti bir kenara bıraktı ve genişleyen bir evren kuramını benimsedi. Sonradan evrenbilimsel sabitin yaşamındaki en büyük hata olduğunu söyledi.

Evrenin genişlediği ve uzak geçmişte gökadaların (çok uzaklardaki gökadaların (18.5) denkleminden beklenenden daha hızlı bir şekilde uzaklaştıkları yönündeki gözlemle de kanıtlandığı gibi) daha hızlı uzaklaşıyor oldukları gerçeği, geçmişte evrendeki yıldızların birbirlerine daha yakın oldukları ve bundan çok zaman önce her şeyin yüksek yoğunlukta bir arada olduğu kuramıyla doğal bir biçimde uyuşuyor. Bir başka deyişle, evren 'büyük bir patlama'yla başladı ve o andan beri de - genişleme hızı evrendeki maddenin karşılıklı kütleçekimi nedeniyle durmadan azalmış olsa da - sürekli olarak genişledi. Büyük patlama kuramı ve Hubble yasası temel alındığında evrenin yaşının sekiz ile yirmi milyar yıl arasında (ç.n.: Günümüzde bu sayı 13,7 ± 0,2 milyar yıldır.) olduğu tahmin ediliyor. Büyük patlama kuramı kabul edilse bile, evrenin açık mı yoksa kapalı mı olduğu sorusu hâlâ ortada durmaktadır. Günümüzde görülebilir evrenin ortalama yoğunluğu üzerine olan tahminler - hâlâ kesin bir sonuca ulaşılamamış olsa da - genişleyen evrenin açık ve sonsuz olduğunu ve böylece genişlemenin asla durmayacağını ancak sürekli olarak yavaşlayacağını göstermektedir. Öte yandan, bu açık bir evren öngörüsüyle çelişen başka kanıtlar da vardır. Evrenin genişlemesinin yavaşlamasını anlatan ivmenin ρ/ρ_c oranına bağlı olduğu sonucu çıkar ve veriler ρ'nun büyük olasılıkla ρ_c'den biraz daha büyük olduğunu göstermektedir.[36] Bu, evrendeki maddenin büyük bir kısmının doğrudan doğruya göremediğimiz ama yalnızca kütleçekim etkileşimleri aracılığıyla ortaya çıkarabildiğimiz 'karanlık madde' olduğu varsayımına yol açtı. Bu türden karanlık maddenin büyük miktarda toplandığı yönündeki bağımsız kanıtlar, gökadaların evrende belirli konumlara doğru olan toplam hareketi tarafından sağlanmaktadır.[37] Böylece evrenin açık mı yoksa kapalı konumda mı olduğu sorunu günümüzde hâlâ belirsizliğini korumaktadır.

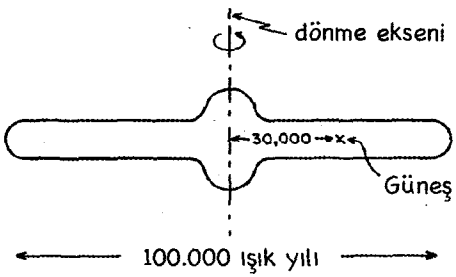
Olbers paradoksu (Şekil 18.10'un kullanıldığı tartışmaya bakınız) genişleyen evrenle ve ışığın kırmızıya doğru kaymasıyla mı çözüle-

cek? Uzaklardaki yıldızların uzaklaşmasının aşağıdaki iki şeye kesinlikle yol açtığının kabul edilmesiyle, ilk bakışta bunun böyle olduğu sanılabilir. İlk olarak, ışık Dünya'ya ulaşmak için her an giderek daha fazla yol almak zorunda olduğundan, Dünya'ya birim zaman içinde statik bir evrende olacağından daha az ışık varır. İkincisi, ışık kırmızıya doğru kayar ve bu yüzden Kısım 18.2'de belirttiğimiz gibi daha az enerjiye sahip olur; çünkü fotonun enerjisi $\varepsilon = h\nu$ 'dür. Oysa aydınlık gökyüzü savındaki asıl kusur, bu savın her zaman var olan sonsuz bir uzayı varsaymasıdır, böylece rasgele seçilmiş uzaklıklardaki yıldızlardan çıkan ışık bize herhangi bir anda ulaşabilir. Ancak eğer evrenin bir başlangıcı varsa (ya da en azından yıldızlar geçmişte yalnızca - tipik olarak birkaç milyar yıl diye alınan - sonlu bir zaman öncesinde oluşmuşlarsa), bu durumda çok büyük uzaklıklarda (bir başka deyişle, yeterince uzun zaman önce) gece göğünün 'karanlık' bölgelerinin tümünü doldurmaya yetecek kadar çok sayıda yıldız olmamıştır. Yalnızca bu etki evrenimizde gece göğünün kesinlikle aydınlık olmak zorunda olduğu iddiasını engeller.[38] Böylece, karanlık bir gökyüzünün bir çelişki oluşturması gerekmez. Bir evrendeki yıldızların o evrene özgü dağılımına, ortalama parlaklığına ve ortalama yaşına bağlı olarak o evren 'gece' vakti aydınlık ya da karanlık olabilir. Bizim kendi gerçek evrenimizde genişleme etkileri basitçe zaten karanlık olan gece göğünü diğer türlü olacağından daha da karanlık yapmaktadır.

18.6 Evrenimizin Modern Bir Modeli

Evrenimizin bugün onu anladığımız halinin - tıpkı Kopernik evreninin Ptolemaios evreninin yerini alması gibi, modern insanın Newton evrenine verdiği yanıtın - kısa bir betimlemesiyle bu tartışmayı sonlandıralım. Dünya ve Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenler, gökyüzünde kendi halinde bir yıldız olan Güneş'in etrafındaki yörüngelerinde dönerler. Güneş, kendi gökadamızdaki çok büyük sayıdaki yıldızdan yalnızca biridir. Gökadamız disk şeklindeki bir yıldızlar yığınıdır. Bu diskin çapı yaklaşık olarak 100 000 ışık yılıdır ve merkezinin yakınında Şekil 18.14'teki yandan görünüşte de belirtildiği gibi bir şişkinlik vardır. Gökadanın bütünü diske dik olan ve merkezi şişkinlikten geçen bir eksenin etrafında döner. Güneş'imiz bu eksenden yaklaşık olarak 30 000 ışık yılı uzaktadır ve bu eksenin etrafındaki tam bir turu tamamlaması yaklaşık olarak 200

milyon yıl sürer. Gökadamızdaki bize en yakın yıldızlardan biri yaklaşık 4,3 ışık yılı uzaklıktaki Alpha Centauri'dir. Samanyolu'nda gördüğümüz yıldızlar gökadamızın 'krep'inin (ç.n.: İngilizcesi 'pancake', burada Şekil 18.14'teki uzun ince kısım anlatılmak isteniyor.) düzlemi içinde kalan yıldızlardır. Gökadamız içinde yaklaşık olarak 20 tane gökada barındıran Yerel Grup adıyla bilinen bir gökada kümesinin üyesidir. Bunlar içinde kütlesi bizimkiyle karşılaştırılabilecek kadar büyük olan tek gökada bizden yaklaşık olarak 2×10^6 ışık yılı uzaklıktaki Andromeda Bulutsusu'dur. Evrende aralarında $7{,}8\times10^7$ ışık yılı uzaklıktaki Virgo'nun (Başak), $3{,}96\times10^9$ ışık yılı uzaklıktaki Hydra II'nin (Suyılanı) ve bundan daha da ötedeki başkalarının da bulunduğu birçok gökada kümesi vardır.[39]



Şekil 18.14 Gökadamızın içindeki her şeyle geometrisi

Arno Penzias (1933–) ve Robert Wilson (1936–) 1965'te sonradan evrensel art alan ışıması (ç.n.: İngilizcesi 'cosmic background radiation') diye bilinen şeyi keşfettiler. Dalga boyu spektrumu, mutlak sıcaklığı T = 2,7 K olan ışıyan kara bir cisminki gibidir. (ç.n.: Burada sözü edilen 'evrensel art alan ışıması' ve 'kara cisim ışıması' kavramlarıyla ilgili daha ayrıntılı bilgi için başka kaynaklara başvurunuz.) Bu çalışmalarıyla 1978'de Nobel Fizik Ödülü'nü kazandılar. Çevresiyle ısı alışverişi dengesindeki sıcak bir cisim bu olaya özgü özel bir spektruma sahip (Kısım 19.1'e bakınız) - adına *kara cisim ışıması* denen - elektromanyetik bir ışıma yayar. Büyük patlama kuramı, gözlemlenen bu kara cisim ışımasını kolayca açıklamakla kalmaz, ayrıca bunun beklenmesine de yol açar. Evrenin erken evrelerinde elektromanyetik ışımanın yoğunluğu maddenin yoğunluğundan çok daha fazlaydı. Bu, evrenin ışımanın egemen olduğu çağıydı.

Kara cisim spektrumu bu yoğun, zamanın öncesindeki 'ateş topu' maddeyle ışımanın çok yüksek sıcaklıktaki ısı alışverişi dengesinin sonucu oluştu. Evren genişledikçe ve madde egemen hale geldikçe bu ışıma 'gazı' soğudu. Günümüzde bu ışıma 2,7 K'lik bir sıcaklığa düştü ve evrenimizin daha erken döneminin bir kalıntısıdır. Bunun yerine evrenin sonsuz, her yerde homojen olduğu ve zaman içinde değişmeden kaldığı, böylece maddenin düzgün bir şekilde genişlemeyle oluşturulan uzayı doldurmak için sürekli olarak ve anında yaratıldığı bir başka model - durağan hal kuramı (ç.n.: İngilizcesi 'steady state theory') - de önerildi. Durağan hal kuramında böyle bir kara cisim art alan ışıması için ne bir neden ne de bir gerek vardır. Bu nedenle evrensel art alan ışıması anında güçlü bir şekilde büyük patlama kuramının lehinde ve durağan hal kuramının aleyhinde sayılır.

1963-1965 arasında bizden çok büyük hızlarda uzaklaşan aşırı derecede parlak kaynaklar keşfedildi. Bu kuasarların - bu isimle anılırlar ve 'yıldızımsı radyo dalgaları kaynağı' için bir kısaltmadır (ç.n.: İngilizcesi 'quasar', 'quasi-stellar radio source' isminin kısaltması) - aşırı derecede (bizden 10^9 - 10^{10} ışık yılı kadar) uzaklarda oldukları Hubble yasasından açıktır. Yakınlarımızda olandan çok daha fazla sayıda son derece parlak (gökadalardan yüzlerce kat daha parlak) kaynakların çok uzaklardaki varlığı, evrenin bundan çok zaman önce şimdi olduğu halinden son derece farklı olduğunun belirtisidir. Bu bir kez daha durağan hal kuramıyla değil, büyük patlama kuramıyla tutarlı bir kanıt olarak kabul edilir.

Son olarak kara delikler olarak bilinen oldukça sıra dışı cisimlerin varlığından söz edelim. Newton'un klasik kütleçekim kuramında bile Dünya'nın (kütlesini değişmeden tutarken) yarıçapı 9×10^{-3} m'ye düşürülebilseydi, bir cismin kaçış hızı 3×10^8 m/s - ışık hızı - olurdu. Bu durum tamamen genel görelilik kullanılarak incelendiğinde bu yarıçap için - yeterince şaşırtıcı bir biçimde - aynı sayısal değer bulunur. Işık bile Dünya'nın kütleçekim alanından kaçamazdı, böylece Dünya'dan evrenin başka herhangi bir kısmına bir işaret yollamak olanaksız olurdu. Laplace da bundan bir buçuk yüzyıl önce benzer bir gözlem yapmıştı:

> Dünya'yla aynı yoğunlukta ve çapı Güneş'in çapından iki yüz elli kez daha büyük olan parlak bir yıldız çekiminin bir sonucu olarak yaydığı ışık ışınlarının hiçbirinin bize ulaşmasına izin vermezdi; bu yüzden evrendeki en büyük parlak cisimlerin bu etki nedeniyle görünemez olması olasıdır.[40]

Böyle kara delikler genel görelilik kuramına göre kütlesi olan bir cisim kütleçekimsel bir çökmeye uğradığında oluşabilir. Bir kara deliğe çok fazla yaklaşan herhangi bir cisim ya da ışık kara deliğin içine emilir ve asla kaçamaz. Böyle bir kara delik 'görülemez' olsa da kütleçekim alanı aracılığıyla çevresindeki evren üzerinde bir etki uygulamayı sürdürür. Gökyüzünde bir yıldız çiftinin yalnızca bir tek görülebilir üyesi varmış gibi görünen Cyngus X-1 (Kuğu) diye bir yıldız sistemi vardır. Bu çiftin görülemeyen diğer kütle sahibi üyesinin bir kara delik olduğuna inanılmaktadır. Bir kara deliğin kütlesi maddeleri kendi içine doğru çektikçe, kuantum mekaniksel etkilerin bir kara deliğin enerji ve parçacıklar ışımasını gerektirmesi nedeniyle basitçe artmayı sürdürmez. Işıma hızının kütle azaldıkça arttığı sonucu çıkar, böylece yalıtılmış bir kara delik en sonunda yok olur.[41]

18.A Hubble Yasasının Çıkarılması

Kırmızıya doğru kayma ile uzayın genişlemesi arasındaki ilişki, koordinat uzaklığı ile ışığın aldığı yolla belirlenen uzaklığın genişleyen bir uzayda aynı olmadığını fark ettiğimiz zaman açık hale gelir. Uzayda hareketsiz duran (gökadalar gibi) cisimler için, (genişleyen bir uzayda - diyelim - 'işaretlerle' (ç.n.: kilometre taşları gibi düzenli aralıklarla sıralanmış) ya da genişleyen uzayın içinde sabitleştirilmiş ya da 'boyanmış' boyu belli, birbirine özdeş karelerin yan yana getirilmesiyle oluşturulan desenle ölçülen) r koordinat uzaklığı sabit kalır. (Bir ışık ışınının uzayda (aslında uzayın anlık bir fotoğrafı çekilerek dondurulmuş halinde) sabit iki nokta arasında yol alması için geçen süreyle ölçülen) 'gerçek' ya da 'evrensel' ℓ uzaklığı değişir; çünkü $\ell = R(t)r$ 'dir[42]. (Burada $R(t)$ bu iki uzaklık ölçümlerini birbiriyle ilişkilendiren bir 'ölçek çarpanıdır'.) Eğer bunun t zamanına göre türevini alır ve sonra da bir $t = t_0$ anı etrafında seri olarak açarsak, bir yaklaşım olarak Hubble yasasının bilinen biçimini[43]

$$\dot{\ell} \equiv v_{\text{uzaklaşma}} = H\,\ell \approx H_0\,\ell \qquad (18.7)$$

elde ederiz. Bu (18.5) denkleminin ta kendisidir. Burada $\dot{\ell}$ genişleyen uzayın içinde ya da genişleyen uzaya göre hareket eden bir cismin hızı *değil*, aksine (uzaklaşan yıldızdan, gökadadan, vs. gözlemciye - bize - yollanan) bir ışık işaretinin yol alma süresince belirle-

nen uzaklaşma hızıdır. Ayrıca bir dalga boyunun uçları arasındaki 'işaretleyici' uzaklığın da ('lastik çarşafta') sabit kalması gerektiğini gerçeklersek, bu durumda $\lambda_0/R(t_0) = \lambda/R(t)$ olur. $R(t)$ yine t_0 etrafında seri olarak açılırsa,[44]

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \approx H_0 \frac{\ell}{c} \qquad (18.8)$$

bulunur. Bu (18.6) denkleminde belirtilen sonuçtur. Doppler kayması için göreliliğe uyarlanmamış ifade (18.8) denklemiyle birleştirilirse, Hubble yasasının bilinen $v_{\text{uzaklaşma}} = H_0\,\ell$ biçimi elde edilir. Böylece, Doppler kaymasının, evrenin genişlemesinin etkilerinin ve Hubble yasasının çok uzaklarda olmayan gökadalar için hep bir arada nasıl uygun düştüğünü anlayabiliriz.

ℓ_0 Hubble yarıçapı $\dot{\ell} = c \equiv \ell_0 H_0$ ilişkisiyle tanımlanır. Hubble küresinin ucu bir bakıma gözlemleyebileceğimiz şeylerin ufkudur. Genişleme hızı sabit olsaydı (ya da H_0 gerçekten de sabit olsaydı), bu Hubble uzaklığının ötesindeki herhangi bir yıldızdan ya da gökadadan gelen ışık asla bize ulaşamazdı ve biz de onları hiçbir zaman göremezdik. Öte yandan, eğer genişleme hızı azalırsa, artık bizden ışık hızından daha büyük hızlarda uzaklaşmakta olan bazı yıldızlar eninde sonunda bize göre ışık hızından daha düşük hızlarda hareket edeceklerdir ve onlardan çıkan ışık sonunda bize ulaşabilir. Böyle bir evrende Hubble yarıçapı durmadan artar.[45]

Yararlı Kaynaklar

Michael Crowe'un *Modern Evren Kuramları* modern çağdaki evrenbilimsel kuramların okumaya oldukça değer bir tarihidir. Edward Harrison'un *Evrenin Maskeleri*, önde gelen bir gökbilimci tarafından evrenbilimsel kuramların oluşturulmasına ve bunların bize evrenimiz hakkında aslında ne anlattıkları konusunda anlayışımızı geliştirecek bir çözümlemeyken, yine aynı yazarın 'Newton ve Sonsuz Evren' adlı makalesi Newton'un klasik evrenin kararlılık problemini çözmek için çabalamasını anlatır. Owen Gingerich'in *Evrenbilim + 1*'i modern evrenbilim üzerine *Scientific American* dergisinde yayınlanmış bir makaleler kümesinin derlenerek yeniden basılmış halidir.

Harry Shipman'ın *Kara Delikler, Kuasarlar ve Evren*'i modern evrenbilimsel kuramların ve bunlar için gözlemsel temellerin matematiksel olmayan bir incelemesini sunar. Edward Harrison'un *Evrenbilim*'i evrenbilim üzerine üniversitelerde lisans düzeyinde kullanılan harika bir ders kitabıdır. Günümüzün önde gelen kuramsal fizikçilerinden biri olan Steven Weinberg, *İlk Üç Dakika*'da evrenin kökeniyle ilgili geniş kesimlerce kabul edilen modern düşünceyi genel bir okurun kolayca ulaşabileceği bir halde anlatır. George Ellis ve Ruth Williams'ın *Düz ve Eğri Uzay-Zamanlar*'ı uzay-zamanın Öklit olmayan geometrilerinin orta zorluk derecesinde matematikle betimlemesini ve çözümlemesini sunar. Samir Bose'un *Genel Göreliliğe Giriş*'i genel görelilik ve evrenbilimsel modeller üzerine ileri seviyede, özlü ve açık bir metindir.

Bölüm VII

Kuantum dünyası ve kuantum mekaniğinin tamlığı

O kuramda [kuantum mekaniğinde] beni ilke olarak tatmin etmeyen, bana tüm fiziğin ayrıntılı bir planı izlermiş gibi görünen amacına, yani (herhangi bir gözlem ya da doğrulama işleminin yapılmasına bakmaksızın var olduğu varsayılan) herhangi bir (özel) gerçek durumun tamamıyla betimlenmesine, karşı tavrıdır.

Albert Einstein, *Eleştirilere Yanıt*

Bu, *atomik cisimlerin davranışıyla, olguların içinde oluştukları koşulların tanımlanması işine yarayan ölçüm aletlerinin etkileşimi arasında kesin bir ayrım yapmanın olanaksız olmasını* gerektirir. Aslında tipik kuantum etkilerinin özelliği, kendini tam olarak, olguları alt parçalara ayırmaya ilişkin herhangi bir çabanın deneysel düzenlemede cisimlerle ölçüm aletleri arasında ilke olarak kontrol edilemez yeni etkileşim olanakları ortaya çıkaran bir değişimi gerektirmesi durumunda ifade eder. Sonuç olarak, farklı deneysel koşullar altında elde edilen kanıtlar, tek bir resmin içinde kavranamaz, tersine yalnızca olguların toplamının cisimler hakkındaki olası bilgiyi tüketmesi anlamında *tamamlayıcı* olarak kabul edilmelidirler.

. . .

Gerçekten de etkinin kuantumunun varlığının kendisiyle düzenlenmiş *cisimle ölçme aracı arasındaki sonlu etkileşim* - cismin ölçme aletleri (eğer bunlar asıl amaçlarına hizmet edeceklerse) üzerine tepkisini kontrol etmenin olanaksızlığı nedeniyle - klasik nedensellik düşüncesinden kesinlikle vazgeçilmesi ve fiziksel gerçeklik problemine karşı tavrımızın yeniden köklü bir biçimde gözden geçirilmesi gereksinimini zorunlu kılar. Aslında, göreceğimiz gibi [Einstein] tarafından önerilen bir gerçeklik ölçütü - her ne kadar dikkatlice ve açık bir şekilde ortaya konmuş olursa olsun - temel bir belirsizlik içerir...

Niels Bohr, *Einstein'la Atom Fiziğinin Epistemolojik Sorunları Üzerine Tartışma*

Deneysel sonuçlar açık bir şekilde düşünsel açıdan ürkütücü sonuçları gerektirir: Ya çalışan bilim adamlarının çoğunun gerçekçi felsefesini tümüyle terk etmeli ya da uzay-zaman kavramını dramatik bir biçimde gözden geçirip değiştirmeliyiz.

John Clauser ve Abner Shimony, *Bell Teoremi: Deneysel Testler ve Anlamları*

19
Kuantum Mekaniğine Giden Yol

Görelilik kuramı aslında klasik fiziğin ulaştığı zirvedir. Uzay ve zaman kavramlarımızın yeniden gözden geçirilmesi, hem özel hem de genel görelilik kuramları tarafından gerekli kılındığı halde, bir nedenin etkisinden önce gelmesi anlamında nedensellik düşüncesi elektrodinamiğin, mekaniğin ve kütleçekimin göreliliğe uyarlanmış formülasyonlarında bozulmadan kalır. Cisimlerin ve enerjinin yayılma hızı üzerinde bir üst sınır konmuştur ve fiziksel nicelikler çoğunlukla işlevsel olarak tanımlanırlar, ancak bir kez kendimizi bu kurallara uyarlarsak, fiziksel süreçlerin betimlemeleri neredeyse klasik fizikte olduğu gibi gider. Öte yandan kuantum kuramı düşünce kalıplarımızın çok daha derin bir şekilde düşünsel olarak yeniden gözden geçirilmesini gerekli kılar. Bir olayla bir başkası arasındaki nedensel bağlantının her zamanki anlamının varlığını sürdürmesi bile kuantum mekaniğinde sorguya alınır.

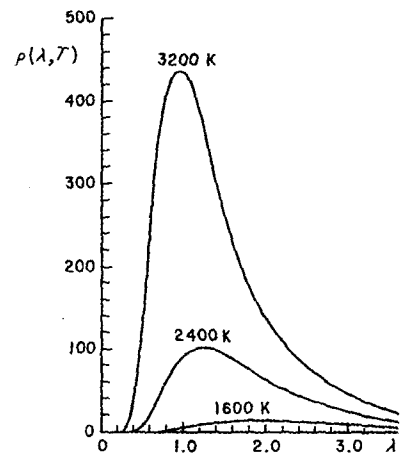
19.1 Tarihsel Arka Plan

Kuantum kuramının ortaya çıkmasındaki kavramsal zemini oluşturan deneysel ve kuramsal problemlerin kısa ve son derece seçilmiş bir özetiyle başlıyoruz. Dikkatimizi önce kuantum mekaniğinin formülasyonunda aracı olan önemli bir olgu üzerine - kara cisim ışımasına - odaklıyoruz. Kara cisim, üzerine düşen tüm elektromanyetik ışımayı soğuran bir yüzey olarak tanımlanır. Böyle bir cisim, üzerine düşen her türlü ışık soğurulup onun (en azından çevremizdeki tipik sıcaklıklarda) kara görünmesine neden olacağından, renkli bir şekilde bu isimle adlandırılmıştır. Bir kara cisim ortaya ışıma da çıkarır.[1] Kara cisim ışıması büyük bir kovuğun (ç.n.: İngilizcesi 'cavity') sabit bir T sıcaklığına ısıtılmasıyla oluşturulabilir, böylece bir ısı alış veriş dengesinin kurulması olası hale gelir ve sonra da bu kovuğun

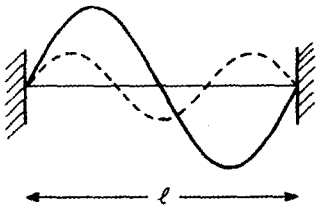
kenarındaki küçük bir delikten kaçan elektromanyetik ışıma gözlemlenir. Eğer $\rho(\lambda,T)$ enerji yoğunluğu içindeki çeşitli dalga boyu (λ) bileşenlerine çözümlenirse, Şekil 9.1'de gösterilen türde deneysel eğriler elde edilir.[2] Benzer deneysel eğriler ilk kez 1899'da Otto Lummer (1860-1925) ve Ernst Pringsheim (1859-1917) tarafından ve 1900'de Heinrich Rubens (1865-1922) ve Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) tarafından elde edilmişti.

Klasik fizik, Şekil 19.1'deki eğrilerin şeklini açıklayamıyordu. Temelde klasik olarak bu zorluğun kaynağı, (ısı alış veriş dengesine ulaşmış) bir sistemdeki her özgürlük derecesinin (ç.n.: İngilizcesi 'degree of freedom') sistemin mevcut enerjisini eşit olarak paylaşmak zorunda olduğunu belirten eşbölüşüm teoremidir. İncelemeyi kolaylaştırmak için kara cisim ışımasını oluşturan kovuğun boyutunun ℓ olduğunu düşünelim. Duran dalgalar (bakınız Şekil 19.2) yalnızca $\lambda_n = 2\ell/n \quad (n = 1,2,3,\ldots)$ ile verilen belirli dalga boyları için olasıdır.[3] Bunların her biri mevcut enerjiyi eşit olarak paylaşması gereken bir özgürlük derecesidir ve daha da kısa dalga boyu olan sonsuz sayıda dalga bulunabileceğinden, neredeyse tüm ışığın spektrumun kısa dalga boylarına karşılık gelen uç kısmında bulunması gerekir. Özenli bir klasik düşünme ortaya Rayleigh-Jeans formülünü çıkarır;

$$\rho(\lambda,T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} \tag{19.1}$$



Şekil 19.1 ρ enerji yoğunluğu için kara cisim ışıma eğrileri

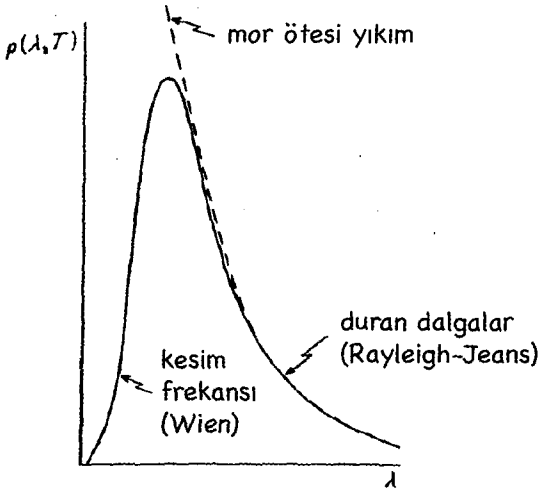


Şekil 19.2 Bir sicimdeki duran dalgalar

burada k Boltzmann sabitidir. Bu formül Şekil 19.1'le yalnızca uzun dalga boylarında uyumludur. Bu, kısa dalga boylarında $(\lambda \to 0)$ Şekil 19.3'te belirtildiği gibi (genellikle buna *mor ötesi yıkım* (ç.n.: İngilizcesi 'ultraviolet catastrophe') denir) sonsuza gider. (19.1) denkleminin deneysel verilere uymadığı açıktır. (19.1) denkleminin kökleri 1900'de Lord Rayleigh'in yazdığı bir makaleye gider, ancak bu denklemin sonucu tam anlamıyla ilk kez Lord Rayleigh'in kendisiyle Sir James Jeans (1877-1946) tarafından 1905'te çıkarılmıştır. Bu yasanın başarısız olması çok ciddi bir durumdu; çünkü klasik istatistiksel mekaniğin, doğruluğu sağlam bir şekilde kanıtlanmış yasalarından birinin, enerjinin eşbölüşümünün bir sonucuydu. VI. Bölüm'ün (*Görelilik kuramı*) başındaki alıntılarda Lord Kelvin'in 1900'de Kraliyet Derneği'nde (Royal Institution) verdiği bir konferansta yaptığı durum değerlendirmesini görmüştük. Maxwell-Boltzman'ın enerjinin eşbölüşümü öğretisi on dokuzuncu yüzyılın sonunda fiziğin ufkundaki iki buluttan birini oluşturuyordu.[4]

Özellikle kuantum mekaniğiyle ilgili diğer bir genel olgular sınıfı, bir element tarafından ortaya çıkarılan spektrum çizgilerinin oluşturduğu desendir. Hidrojen gibi bir gaz ya da buhar örneğinin içinden bir elektrik atlaması (ç.n.: kaynak makinelerinde olduğu gibi iki elektrot arasında yüksek akımda sürekli bir yük boşalmasını sağlayan düzenek) geçirildiğinde gaz kendine özel bir renkte ışık saçar. Örneğin hidrojenin rengi turuncu, sodyumunki ise sarıdır. Daha yakından incelendiğinde yalnızca belirli frekanslardaki ışığın bulunduğu görülür. Işığın frekansları bir kırınım ağı (ç.n.: İngilizcesi 'refraction grating') aracılığıyla parçalarına ayrıştırıldığında ya da çözüldüğünde - ya da bir prizma aracılığıyla ayrıldığında -, spektrum çizgilerinin fotoğrafları, ortaya dalga boyları bu spektrumu çıkaran maddeye ya da elemente özgü olan bir parlak çizgiler kümesi çıkarır. Bu türden kesikli spektrum tüm elementlerin bir özelliğidir ve bilinmeyen bir maddenin

ne olduğunu bulmakta 'parmak izi' işlevi görür. Bu kesikli spektrum şaşırtıcı olmuştu; çünkü klasik kurama göre ivmelenen yükler ortaya



Şekil 19.3 Kara cisim ışımasının klasik kuramındaki mor ötesi yıkım

elektromanyetik ışıma çıkarmalıydılar. Maddenin içindeki yükler rastgele hareket ediyor olsaydı, elektromanyetik ışımanın tüm frekanslarda ortaya çıkarılmasını beklerdik. Bu, sürekli bir spektrumun oluşmasına neden olurdu. Elementlerin saçtıkları ışığın spektrumundaki kesikli frekanslar bu yüklerin belirli kararlı yörüngeleriyle ya da kendine özgü titreşimleriyle ilişkilendirildiler. 1885'te aynı zamanda Basel'de bir lisede öğretmen olan İsviçreli bir matematikçi - Johann Balmer (1825-1898) - deneme yanılma yöntemiyle hidrojenin gözlenen spektrum çizgileri setlerinden biriyle uyum içinde olan bir deneysel formül keşfetti. 1890'da Lund'da Johannes Rydberg (1854-1919) Balmer'in sonucunun bir genellemesini buldu. Bu çizgilerin ν frekansı için olan bu formülü uygun bir biçimde[5]

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{19.2}$$

şeklinde özetleyebiliriz. Burada R (Rydberg sabiti) evrensel bir sabittir, m bakılan özel seriyi ayırt eden sabit bir tamsayı ve (m'den

büyük olan) n de verilen bir serideki belirli bir çizgiyi tanımlayan başka bir tamsayıdır.

Bu kesikli spektrumu açıklamak için yapılan başarısız denemelerde Cambridge Üniversitesi'ndeki Cavendish Laboratuvarı'nda çalışan Kelvin ve J. Thomson, artı yükün atomun hacmi içerisinde düzgün bir şekilde dağıldığını varsayan çeşitli (Thomson modeli diye anılan) klasik atom modelleri kurdular. Öte yanda, bundan bağımsız ve gerçek anlamda bir ilerleme heyecan uyandıran daha başka deneysel sonuçları beklemek zorundaydı. Hans Geiger (1882-1945) ve Ernest Marsden (1889-1970) 1909'da İngiltere'deki Manchester Üniversitesi'nde yüklü bir parçacık demetinin ince bir altın yapraktan saçılmasını inceledi. Bu deney, Manchester'da bir profesör olan, atom fiziği ve çekirdek (nükleer) fiziğinin gelişiminde merkezi bir rol oynayan, son derece büyük bir yeteneğe ve kavrama gücüne sahip bir deneysel fizikçi olan Ernest Rutherford (1871-1937) tarafından önerilmişti. Rutherford'dan çekirdek fiziğinin Faraday'ı diye söz edilir. Temel düşünce, saçılan parçacıkların oluşturduğu desenin atomun yapısını ve içindeki kuvvetleri yansıtmak zorunda olduğuydu. Geiger ve Marsden yaklaşık 400 atom kalınlığında bir altın ($_{79}Au^{197}$) yaprağı ve bunu 'bombardımana tutan mermiler' olarak da alfa (α) parçacıklarını (He^{++}) kullanmışlardı. α parçacıklarının çoğu herhangi bir sapmaya uğramaksızın yaprağın içinden geçip gitmişlerdi. α parçacıklarının kütlesi çok büyük (bir elektronun kütlesinden yaklaşık olarak 7500 kat daha büyük) olduğundan, aslında elektronlar tarafından hiçbir sapmaya uğratılmazlar. Altın çekirdeğinin tamamının kütlesi bir α parçacığının kütlesinden yaklaşık olarak 50 kat daha büyüktür. Bu kadarı, kütle ve artı yük örneğin hacmi boyunca düzgün olarak yayılmış olarak resmedildiğinden, Thomson modeli temel alınarak beklenen sonuçlarla tutarlıydı. Bu modele göre, tek tek kütlesi büyük cisimlerle değil, aksine altın atomlarının çok hafif kırıntılarıyla karşılaşmalar gerçekleşmeliydi. Öte yanda, arada sırada bazı α parçacıklarının 90°'den büyük açılarla geriye doğru saçıldıkları gözlemlenmişti. Bu davranış Thomson modeliyle tamamen tutarsızdı ve Rutherford'a altın atomunun kütlesinin önemli bir kısmının artı yüküyle birlikte aslında bir noktada yoğunlaştığını işaret etti.

Rutherford, *Türlerin Kökeni*'nin yazarı olan Darwin'in torunlarından biri olan genç kuramsal fizikçi Charles Darwin'den (1887-1962) böylesi çekirdekli (ç.n.: kütlesi çekirdeğinde yoğunlaşmış) bir atom tarafından oluşturulan saçılmayı tam olarak hesaplamasını istedi. Sonuçlar

Rutherford'un beklentilerini doğruladı ve deneyle de uyuştu. Bu nedenle, fizikçiler kendilerini Güneş etrafındaki yörüngesinde dönen bir gezegeninken çok da farklı olmayan bir çekirdekli atom modelini çalışmak zorunda buldular. Böyle bir düzenleme biçimi mekaniksel açıdan kararlı bir yörünge oluştursa da, merkezcil bir şekilde ivmelenen bu tür bir elektron elektromanyetik enerji ışımalıdır. Bu, elektronun çekirdeğe doğru bir sarmal üzerinde dönerek inerken atomun bütününün neredeyse anında yok olmasına neden olurdu. Yalnızca bu olmakla kalmazdı, bu durumda ortaya çıkan elektromanyetik ışımanın spektrumu da kesikli değil aksine sürekli olurdu.

İki bilim adamının - Max Planck ve Niels Bohr'un (1885-1962) - bu bilmecelerle nasıl başa çıktıkları ve bu süreçte üzerine modern kuantum kuramının kurulduğu temelleri nasıl attıkları bilinen bir öyküdür. Öte yanda, buluşlarına giden asıl tarihi yol, fen bilimleri üzerine olan ders kitaplarında büyük bir sıklıkla anlatılagelen klasik buluş öykülerinden son derece farklıdır. Şimdi, Planck'la Bohr'un nasıl yol aldıklarını görelim.

19.2 Planck Hipotezi

Planck 1900'de kara cisim ışıması problemine yeni bir yaklaşımla baktı. Planck, Gustav Kirchhoff 1859'da ısı alış verişi dengesine ulaşmış her tarafı kapalı bir kovuktaki ışıma enerjisi dağılımının, kovuğun duvarlarının kendine özgü özelliklerinden bağımsız olduğunu kanıtladığından ve daha önce bir çift kutuplu salınıcının (ç.n.: İngilizcesi 'dipole oscillator', birbirinden küçük bir uzaklıkla ayrılmış iki zıt elektrik yükünün belli bir zaman periyodu içinde belirli iki uç arasında (genellikle) düzenli olarak salındığı düzenleme) ortaya çıkardığı elektromanyetik ışıma problemi tüm ayrıntılarıyla çalışıldığından, kara cisim (ya da kovuk) ışımasına neden olan sistem olarak ısı alış veriş dengesinde bulunan ışıyan bir harmonik salınıcı derlemesini kullanmaya karar verdi. Dahası, ilk denemesinde doğrudan doğruya klasik elektrodinamik yaklaşımı başarısız olunca, denge konumunda ısı enerjisi dağılımı için bir ifade elde edebilmek için termodinamiğe yöneldi. Genellikle kara cisim ışıması spektrumuyla uyumlu deneysel bir eğri elde etme - ve bunu ışıma alanını temsil etmek için kullanılan bir dizi harmonik salınıcıyı kuantumlayarak (ç.n.: fizikte bir büyüklüğün ya da niceliğin olası değerlerini kuantüm mekaniğinin kurallarına uygun olarak kesikli değerlere sınırlamak) yapma - başarısı Planck'a atfedilir. Planck'ın

kuantumlama meselesi üzerine asıl konumu hakkındaki tartışmalara yol açan soruyu bir kenara bıraksak da[6], gerçek başlangıçta deneysel eğriyle uyum içinde iki-değişkenli bir formülü ad hoc bir termodinamik tez aracılığıyla çıkarmış olduğudur. Işımanın (sistemdeki kullanılamaz durumdaki enerjinin bir ölçüsü olan) entropisiyle ilgili klasik ilişkileri, uzun dalga boylarında (klasik olarak beklenen Rayleigh-Jeans yasasına özdeş) gözlemlenen davranışla - 1896'da Wilhelm Wien (1864-1928) tarafından öne sürülen - kısa dalga boylarındaki verilerle uyum sağlamak için spektrumu kesen (bakınız Şekil 19.3) ad hoc yasa arasında olan bitenleri kestirebilmek için değiştirdi. Yaptığı hesaplamaların ayrıntıları burada sunmak için fazlasıyla teknik olsa da[7], asıl olan, Planck'ın özgün tezinin temel olarak olguların bilimsel bir şekilde eğrilere uydurulmasından oluştuğudur. Bu iki uç arasında uzlaşma arayan çözüm bulma sürecinden şanslı bir kestirim diye söz etmiştir. Öte yandan, bulduğu formül Rubens'in Planck'ın yeni formülünü Alman Fizik Derneği'nin bir toplantısında sunduğu günün akşamında gösterdiği gibi, tüm dalga boylarında deneysel verilerle tam olarak uyum içindeydi. Bu aşamada Planck'ın elinde verilerle mükemmel bir uyum içinde olan, ancak doğruluğunu kuramsal olarak gösterecek hiçbir şey olmayan bir formül vardı. Durumu kendi sözleriyle şöyle anlatır:

> Işıma formülünün mutlak bir biçimde kesin doğruluğu gerçekten geçerli olarak alınsa da - kaldı ki bir yasa konumunda açığa çıkması da yalnızca şanslı bir önseziyle olası olmuştur - biçimsel bir önemden daha fazlasını taşıması beklenemezdi. Bu nedenle, işe daha bu yasayı kesin bir biçimde ortaya çıkardığım gün kendime onun gerçek bir fiziksel anlamı olup olmadığını inceleme görevini vermekle başladım. Bu soru beni otomatik olarak entropiyle olasılık arasındaki iç içe geçmiş ilişkiyi çalışmaya - bir başka deyişle, ilk kez Boltzman tarafından başlatılan düşünce çizgisini izlemeye - götürdü... Yaşamımdaki birkaç hafta süren en yorucu çalışmadan sonra karanlık kalktı ve uzakta hiç umulmadık bir manzara görülmeye başladı.[8]

Planck daha sonrasında ısı alış veriş dengesindeki ışıyan harmonik salınıcılar problemine geri döndü ve sistemin toplam enerjisini kesikli miktarlarda bölüştürdüğü istatistiksel-mekanik teknikleri kullandı.[9] Bu salınıcıların yalnızca - (özgün olarak Planck tarafından bu isim kullanılmamış olsa da) günümüzde *kuanta* (ç.n.: 'kuantum'un çoğulu) diye adlandırılan - ayrık ε miktarlarındaki enerjiyi alabilmesi ve verebilmesi durumunda uygun ışıma dağılım

yasasını elde ettiğini buldu. Bu kuantanın enerjisi, verilen ya da alınan ışımanın frekansına

$$\varepsilon = h\nu \tag{19.3}$$

şeklinde bağlıdır. Burada h günümüzde Planck sabiti olarak bilinen bir orantı sabitidir. Planck enerjinin verilmesinin ve alınmasının kuantumlamasını gerekli bulduğu halde, enerjinin kuantumlaması kavramını elektromanyetik ışımanın kendisine de uygulayacak kadar genişletmekten kaçındı. Bunun için nedeni, olağanüstü bir şekilde başarılı olan Maxwell elektrodinamiğinin sürekli olarak değişen miktarda enerji taşıyabilen bir elektromanyetik alanı temel alarak kurulmuş olmasıydı. Günümüzde elektromanyetik alanı kuantumlayabiliyoruz ve bu alanın kuantumlarına *foton* diyoruz. Olağan (ya da her zaman rastlanan) koşullarda bir ışık ışını çok büyük sayılarda kuantadan oluşur ve aslında bir dalga olgusu gibi davranır. (19.3) denklemi klasik olarak tamamıyla beklenmedik bir şeydir. Planck, her bakımdan öne sürdüğü tezin devrimci yapısının farkındaydı. Berlin'de Grunewald Ormanı'nda bir yürüyüş sırasında küçük oğluna şöyle dedi: 'Bugün Newton'unki kadar önemli bir keşifte bulundum.'[10] Planck, 10 Aralık 1900'de kuramını Alman Fizik Derneği'nin önünde sundu. Yıllar boyunca bu yeni yaklaşımı klasik fizik çerçevesine uydurmaya çabaladı, ancak en sonunda kuantanın gerçekliğini kabul etti. Ona göre bu yıllar boşa harcanmamıştı; çünkü sonunda boşa giden bu çabalar ona bir etkinin temel kuantumunun asıl önemini ve atoma ilişkin olgulara yeni bir yaklaşım getirmenin gereğini öğretmişti.[11]

(19.3) denklemindeki varsayımın klasik fizik tarafından kovuk ışıması için oluşturulan problemlerden neden uzak durduğunu niteliksel olarak görmek oldukça kolaydır. (19.3) denklemi dalga boyu cinsinden $\varepsilon = hc/\lambda$ halini alır. Bu nedenle, kovukta içerilen sonlu miktardaki toplam enerji için etkinleştirilebilecek bir en kısa dalga boyu vardır. Bu ve Şekil 19.2'de ima edilen en uzun dalga boyu sınırlamasıyla metin içerisinde buna eşlik eden tartışma bir arada, az sayıda kuantanın ya çok küçük ya da çok büyük λ ile kovuktan çıkacağı anlamına gelir. Alman herhangi bir T sıcaklığında her eğri belirli bir en olası frekansta ya da dalga boyunda en üst noktaya ulaşır.

19.3 Bohr'un Yarı Klasik Modeli

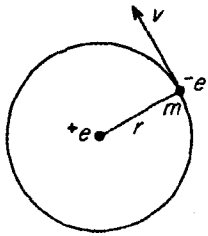
Niels Bohr da tıpkı Einstein'ın görelilik kuramıyla bir tutulması gibi, klasik fizikten tamamen ayrı bir fizik dalı olarak kuantum kuramının kurucusu ve düşünsel lideri olarak görülmelidir. Görelilik neredeyse yalnızca Einstein'ın bir kuramı ve kuantum kuramındaki önemli evrim de Bohr'un bir eseri iken, Bohr yine de kuramın gelişmesinde yol gösteren bir 'ruh' olarak (ç.n.: Kızılderililerin kültürüyle bir benzerlik kuruluyor.) yarım yüzyıl kadar merkezi rol oynadı. Bohr, 1911'de Kopenhag Üniversitesi'nden doktora derecesini aldıktan sonra ilk olarak J. Thomson'la çalışmak için Cavendish Laboratuvarı'na gitti, ancak Thomson'ı genel olarak Bohr'un doktora tez konusuyla ilgisiz buldu. Bohr 1912'de Cambridge'ten ayrılarak daha önce ele aldığımız gibi Rutherford'ın atom için kendi çekirdek modelini geliştirmekte olduğu Manchester'a gitti. Bohr'un kendi atomik geçişler kuramını geliştirmesi Manchester'da geçirdiği dört aylık bir süre içerisinde olmuştur.

Şimdi Bohr'un hidrojenin kesikli çizgi spektrumunun açıklamasına ulaşmasını sağlayan özgün savını özetliyoruz.[12] Eğer Rutherford'un (Şekil 19.4'te belirtildiği gibi) $-e$ yüklü ve m kütlesindeki elektronun r yarıçapındaki bir dairesel yörünge üzerinde $+e$ yükündeki bir büyük kütleli çekirdek etrafında döndüğü çekirdek atomunu ele alırsak, bu durumda kararlı bir dairesel yörünge için koşul elektrostatik çekim kuvvetinin gerekli merkezcil kuvveti sağlamasıdır. Bu artı enerjinin korunumu, Bohr'un elektronun dönme frekansını enerjisi cinsinden[13]

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{\sqrt{2}(-E)^{3/2}}{\pi e^2 \sqrt{m}} \tag{19.4}$$

şeklinde ifade etmesine olanak verdi. Klasik elektrodinamik bu tür ivmelenen bir elektronun, (19.4) denkleminde verilen elektronun dönme frekansına eşit bir frekansla ışıma yapmasını gerektirir. Öte yanda, E klasik olarak herhangi bir (eksi) değeri alabileceğinden, atom tüm frekanslarda ışır, böylece ortaya - deneyle çelişen bir biçimde - sürekli bir spektrum çıkarır. Bohr, kesikli bir kararlı yörüngeler kümesi (bir başka deyişle, yalnızca belirli r değerleri) elde edebilmek için, basitçe elektronun yalnızca izin verilen bu yörüngelerden birindeyken hiç ışık ışımayacağını ve dinamik olarak kararlı ka-

lacağını varsaydı. Bunun için klasik hiçbir açıklama yoktu ve o da herhangi bir açıklama sunmadı. Ayrıca bir elektronun yalnızca izin



Şekil 19.4 Bohr'un atom modeli

verilen bir yörüngeden bir diğerine sürekli olmayan bir geçiş yaparken ışıma yaptığını ya da soğurduğunu varsaydı.[14] Bohr, Planck'ın bir harmonik salınıcı tarafından verilen ya da alınan enerjiyi $h\nu$ 'nün katları biçiminde kuantumlamasıyla uyum içinde, izin verilen bir yörüngeye doğru düşen başlangıçta hareketsiz duran serbest bir elektronu (bir başka deyişle, çekirdekten sonsuz uzaklıkta bir elektronu) göz önüne aldı ve fotonun $h\nu$ enerjisini son yörüngesindeki elektronun enerjisi cinsinden

$$-E = \frac{n}{2} h\nu \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (19.5)$$

olarak kuantumladı. (19.5) denklemindeki 1/2 katsayısı çok önemlidir, aynı zamanda da tuhaftır. Bohr sonuç olarak elektronun dönme frekansının başlangıçta hareketsiz dururken sıfır ve sonrasında son yörüngesinde (19.4) denklemindeki klasik ν değerini aldığını öne sürdü, böylece elektronun ortalama frekansı tam olarak $\nu/2$ 'dir. Verilen ışımanın frekansını bu niceliğin bir tam katı olarak aldı. Bohr ν 'yü elemek için (19.4) ve (19.5) denklemlerini birleştirirdi ve hidrojen atomundaki elektronun izin verilen enerji değerleri olarak

$$E_n = \frac{-2\pi^2 me^4}{h^2 n^2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (19.6)$$

elde etti.

(19.6) denklemi - (i) başlangıç seviyesinden (f) bitiş seviyesine yapılan bir geçiş için enerjinin korunumu $(E_i - E_f) = h\nu$ biçiminde alma-

nın yanında - hidrojenin spektrum çizgileri için Balmer formülünün ((19.2) denklemi) elde edilmesine izin verir.[15] Burada, tıpkı Planck'ın kara cisim ışıması formülünü elde ederken kullandığı özgün ad hoc yönteminde olduğu gibi, yeni bir kuramı el yordamıyla arama sürecinin başında bir hayli fazla miktarda (ancak her zaman kendi içinde tutarlı olmayan) 'kestirimlerde' bulunulduğunu gösterebilmek için Bohr'un - ders kitaplarının genellikle Bohr'un çıkarımını verdiklerinden farklı bir yoldaki - özgün düşünce yolunu sunduk. Bu, yeni çığırlar açan ilerlemeler yapılırken oldukça sık rastlanan bir durumdur. Büyük çoğunlukla sonradan yapılan incelemeler daha derli topludur ve çok hoşa gitmeyen ayrıntılardan arındırılmış olurlar. Aslında Bohr'un durumunda Bohr'un 1912-13'te (19.5) denklemindeki çarpım katsayısının tam olarak (½, 1, 2, ?) ne olması gerektiği konusunda emin olmadığı ve Bohr'un yalnızca bir çalışma arkadaşı ona Balmer'ın formülünü işaret ettikten sonra gözlemlerle sayısal uyumun ancak bu katsayı için 1/2 kullanıldığında olası olduğunu fark ettiği açık olarak görünmektedir. Böylece, elektronun ortalama frekansının 0'la ν 'nün aritmetik ortası olduğu yolundaki öneri, olan bitenin doğruluğunu kanıtlama çabası sonrasında çıkmış bir düşünce olarak görünür. 'Balmer'ın formülünü görür görmez herşey bana açık göründü.'[16] Bohr ancak, *Philosophical Magazine* ile olan yazışmaları kendisi adına Rutherford tarafından yapılan ve 'Atomların ve Moleküllerin Yapısı Üzerine' başlığını taşıyan aynı 1913 makalesinin sonraki kısımlarında, (19.5) denklemindeki kuantumlama koşulunun ℓ *açısal momentumu* olarak bilinen mvr çarpımının kuantumlamasına denk olduğunu belirtti.

> Bu makalede verilen hesaplamalar için mekaniksel bir temelin bulunup bulunmadığı sorusundan söz edilemeyeceği çok açık olmakla birlikte, [(19.5) denklemindeki] hesaplamanın sonucunun anlamını bildiğimiz mekanikten ödünç alınmış sembollerin yardımıyla çok basit bir şekilde açıklamak olasıdır. Elektronun çekirdek etrafındaki açısal momentumunu ℓ ile göstererek, ... hesaplamanın sonucu şu basit koşulla ifade edilebilir: Durağan hale ulaşmış bir sistemdeki elektronun çekirdek etrafındaki açısal momentumu, çekirdekte bulunan yükten bağımsız olan evrensel bir değerin tam bir katına $\left[\ell = nh/2\pi\right]$ eşittir.[17]

Bunu, Bohr'un önemli varsayımlarını kullanan geleneksel ders kitabı çıkarımlarıyla karşılaştırmak öğreticidir. Bunlar genellikle, bir çekirdek etrafında dairesel bir yörüngedeki bir elektron için şunların gerçek olduğunu kabul ederek ilerler: (i) yalnızca belirli yörüngelere izin verilir;

(ii) bu yörüngelerdeki elektronlar ışımaz; (iii) izin verilen bir yörüngeden bir diğerine yapılan geçiş süresince elektronlar ortaya homojen ışıma (belli bir frekanstaki ışıma) saçarlar ve (iv) açısal momentum

$$\ell = mvr = n\frac{h}{2\pi} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (19.7)$$

biçiminde kuantumlanır. Balmer formülü bundan hemen çıkarılır.[18] Tüm bunlar çok verimli bir şekilde ilerler, ancak (19.7) denklemini neyin harekete geçirdiği hakkında hiçbir fikir yoktur.

Genellikle yarı klasik model olarak adlandırılan Bohr modelinin özgün biçimi, niceliksel olarak yalnızca nötr hidrojen atomu (H), tek bir elektronu iyonlaşmış helyum (He^+), çifte iyonlaşmış lityum (Li^{++}), vb. gibi tek elektronlu atomlar için çalışır. Bohr'un çalışmasının güçlü etkisi, köktenci varsayımları tartışılır olarak kalsa da, çok çabuk ve çok geniş oldu. Bu olağanüstü Balmer formülünü ve Rydberg sabitinin sayısal değerini bilinen temel sabitler cinsinden elde etme başarıları, genel olarak mükemmel olarak görüldü ve dikkati hak etti. (Bu ve sonrasında atomun yapısı ve ışıma üzerine yaptığı çalışmalar 1922 yılında Nobel Fizik Ödülü almasına yol açtı.) Bohr'un 1913 makalesinin yayınlanmasından neredeyse hemen sonra, bu çalışmayı genelleme ve arındırma çabalarına girişildi. Atomları incelemek için evrilen kurallar kümesinden günümüzde 'eski kuantum mekaniği' diye söz edilir ve bunlar klasik betimlemeden kuantum olanına geçmek için asıl olarak üç basamak içerirler. Sistemin olası hareketlerini belirlemek için klasik mekanik kullanılırdı; gerçekte izin verilen yörüngeleri seçmek için kuantum koşulları konur; son olarak, elektronun izin verilen (ya da kararlı) bir yörüngeden bir diğerine geçişleri sırasında verilen ya da alınan kuantanın frekanslarını sabitlemek için enerjinin korunumu kullanılırdı. Münih Üniversitesi'nde kuramsal fizik profesörü olan Arnold Sommerfeld çok kısa sürede bu tekniğin tanınmış bir uzmanı haline geldi. Hidrojen atomunu çekirdeğin yakınından geçen bir eliptik yörüngedeki elektronun kütle değişimine izin vererek özel görelilik kuramına göre ele aldı. Bununla, tek başınaymış gibi görünen spektrum çizgilerinin her birinin daha yakından incelendiğinde birbirine çok yakın konuşlanmış farklı çizgiler içerdiklerinin bulunmasıyla keşfedilen bazı ince deneysel ayrıntıları açıklayabilmişti. Öte yanda, Bohr'un yalnızca tek elektronlu atomlar için çalışan özgün modeli gibi, Sommerfeld'in göreliliğe uyarlanmış hesaplamaları da hepsi için değil yalnızca be-

lirli spektrum çizgileri için doğru sonuçlar veriyordu. Bu ince yapının asıl kökeni göreliliğe uyarlanmış kütle değişiminden oldukça farklı bir şeydir. (Günümüzde, elektron spini kavramı bu tür bir ince yapının açıklanmasında temel bir taştır.)

19.4 Gerçek Buluşlarla Bulgulardan Akla Uygun Yapılar Kurma Karşı Karşıya

Bü büyük buluşların (Planck yasası ve Bohr modeli) bir kere yapılmış olduktan sonra, tam olarak nasıl yapıldıklarının neden gerçekten önemli olduğu sorulabilir. Bilim gerçeğe ulaşıyorsa, bu gerçeğe (herkes tarafından bilinen 'dağın zirvesine') ulaşmak için kullanılan asıl yolun yasaların ya da kuramların kendileri göz önüne alındığında nasıl bir önemi olabilir ki? Ortada tarihsel kesinlik sorunu var tamam, ancak bu yalnızca bilim tarihçileri için önemli olabilir. 24. Konu'da kuantum kuramının içeriğinin ta kendisinin asıl buluş sürecine ve kurucularından bazılarının özel düşünsel tutkularına bir şeyler borçlu olabileceğini göreceğiz. Öte yanda, - daha az tartışmaya yol açan bir not olarak da - bir buluş sürecinin bilinmesi genellikle buluşun kendisini daha anlaşılır kılabilir.

Planck'ın kara cisim ışıması yasası için savunduğu tez durumunda, önce başarılı bir şekilde deneyle uyumlu bir eğri bulmasını haklı göstermesini sağlayacak bir tez - herhangi bir tez - uydurmak için yapılmış ad hoc bir çaba, sonra da - neredeyse kendi (klasik olarak düşünmeye yatkın) iradesine karşı gelerek - kuantumlama hipotezini kabul etmeye zorlanmış bir bilim adamı görüyoruz. Bu, Planck'ın enerji kuantumlamasının kısa dalga boylarında kara cisim ışıması eğrisi üzerine gerekli sınırlamayı (bir başka deyişle, mor ötesi yıkımdan kurtulmayı) sağlayacağını tahmin etmesiyle aniden yapılan bir buluş ('bir dehanın birden bire parlaması') değildi.

Bohr atomu durumunda verilerle (burada, Balmer formülü) uyum elde edebilmek için bu türden ad hoc hareketleri çok daha fazla görüyoruz. Bohr'un kuantumlayacak bir enerji bulmak için umutsuz çabası (bir başka deyişle, (19.5) denklemi), 1913'e gelindiğinde Planck'ın enerjiyi kuantumlamasının çoktan kabul görmüş ve artık tartışılmaz olduğunun farkında olduğumuz zaman daha anlaşılır hale gelir. Genellikle iyi bilim - çalıştıkları bilim alanında iyi olan bilim adamları gibi - 'var olmaya başlayan bir kuramsal tasarıya henüz çözülememiş bir problemde ilerle-

me sağlamak için gereken ne kadar az sayıda yeni ve tartışmaya yol açan öğe konursa o kadarı yeterlidir' anlamında tutucudur. Bohr bu nedenle (o sıralarda kabul edilen kuramda hiçbir temeli bulunmayacak olan) bir açısal momentumu değil, bir enerjiyi kuantumlamaya çabaladı. O durumda elektromanyetizmanın yasalarını (yörüngesinde ivmelenen bir elektronun ışımaması) çoktan askıya almıştı ve bu bile kendi başına yeterince köktenciydi. Eğer çok fazla sayıda yeni 'ilke' doğru diye kabul edilirse, çıkartılmaya ya da kanıtlanmaya çabalanan sonucun arsızca varsayıldığı suçlamasıyla karşı karşıya kalınabilir. Burada Bohr kendi kuantumlama koşulunu ((19.5) denklemini) kabul edilen bir düşünceler matrisi içine yerleştirdi. (Maxwell de Kısım 14.2'de gördüğümüz gibi kendi yer değiştirme akımını genel bir elektromanyetik eter çerçevesi içinde kabul ettirmeye çalışırken benzer bir şey yapmıştı.) Bu nedenle, Maxwell'in, Planck'ın ve Bohr'un durumlarında önemli bilimsel kuramların buluş (ya da belki de daha uygun bir şekilde söylersek, yaratılma) sürecinin değerini daha iyi kavrayabiliriz.

Bu üç örnek buluşta yalnızca saf mantık ve deneysel kanıttan daha fazlası rol oynamıştı. Benzer biçimde, kuramların kurulması ve kuram seçimi konularında genellikle başka etkenler de ilgili olur. Bu tür ölçütlerin örnekleri verimlilik, güzellik ve kolay anlaşılırlıktır. Bunlar önemli olabilirken, eğer başarılı, utkulu ya da kabul edilen kuram cinsinden tanımlanmışlar ve sonrasında bu konuda yarışan bir kurama uygulanmışlarsa, aynı zamanda küçük düşürücü bir şekilde önyargılı da olabilirler. 23. Konu'da bu tür ölçütleri kuantum mekaniğinin çeşitli yorumlarına uygulandıklarında ele alıyoruz. Öte yanda, önce kuantum mekaniğinin gelişiminde şans eseri olan tarihsel olayların etkisi sorusunu ele alalım. Örnek olarak, kuantum mekaniğinin utkulu (Kopenhag) yorumunun yaratıcılarının yetiştirilişleri ve düşünsel bakış açıları önemli etkenler olabilir mi?

Bu işte gerekli sahneyi oluşturmak için, karşıt konumlara - dalga mekaniğine karşı matris mekaniği - nasıl ulaşıldığının ve her görüş için öne sürülen tezlerin bazılarının ne olduğunun kaba bir taslağını çizeceğiz. Biri (ç.n.: dalga mekaniği) köklerinin izini elektromanyetik olguların doğasına, diğeri (ç.n.: matris mekaniği) kesikli spektrum çizgilerinin çalışılmasına dek sürer. Hem bu iki grupta anahtar konumundaki oyuncuların genel düşünsel bakış açılarının tamamıyla farklı olduğunu, hem de her grubun çok farklı fiziksel olgu sınıflarıyla başladığını göreceğiz. Bu süreksizlik - süreklilik ikiliği, şans eseri olarak düşünsel bağlılıklarda ve çalışılan fiziksel olgulardan köklenmiş gibi görülebilir.

19.5 Kuantum Mekaniğine Giden İki Yol[19]

1920'lerin başlarında atomlarla ilgili alanda klasik fizik için bir krizin ortaya çıktığını daha önce gördük. Bu krizin çözümü fiziksel dünyaya olan bakış açımızda temel değişiklikler gerçekleştirecekti. Belirlenemezcilik (ç.n. 12. Konu'da incelenenen 'belirlenimcilik' kavramının tam tersi) bunda önemli bir rol oynayacaktı. Yine de, belirlenemezciliğin doğanın temel bir özelliği olduğu olasılığının yirminci yüzyılın ilk kısımlarının da öncesinde ciddi olarak göz önüne alınmış olduğu vurgulanmaya değerdir. On dokuzuncu yüzyılın sonlarına gelindiğinde çoktan, genellikle klasik fizikle ilişkilendirilen anlaşılması kolay belirlenimciliğe karşıt olarak doğadaki (eşyanın doğası gereği şans olasılığını da içeren) belirlenemezcilik kavramı için ezici olmasa da, önemli geçmiş düşünsel örnekler vardı. Bu düşünceler, bilim felsefesi üzerine yazdıkları yeni bir kuantum mekaniğini biçimlendirecek olan genç bilim adamlarının kavramsal yetiştirilişlerinin bir parçası haline gelen Poincaré'yi etkiledi.[20] Benzer bir düşünce çizgisindeki Søren Kierkegaard (1813-1855) nesnel belirsizliğin insanı bilinmeyene doğru bir sıçrama yapmaya zorlayabileceğine, böylece verilen kararların her zaman sürekli bir mantık zincirini (ilke olarak bile) temel alamayacağına inanıyordu. Bu düşünsel bakış açılarından bazılarının Bohr üzerinde Harald Høffding'in (1843-1931) öğretileri aracılığıyla bir iz bıraktığı iyi bir şekilde belgelenmiştir.[21] Örnek olarak, Høffding'in inançlarından biri yaşamdaki kesin sonuçlara yol açan olayların ani 'sıçramalar' ya da kesiklikler yoluyla ilerlediğiydi; bu düşünce Bohr'un atom olgularına bakış açısına katılmıştı.

Bizim için önemli olan nokta, yalnızca bu türden özel düşünsel tutkuların kuantum mekaniğinin yirminci yüzyılın ilk kısımlarında izlediği yolu belirlediği değil, aksine bu kavramların kuantum kuramının yaratıcılarının ulaşabilecekleri bir halde - ve zihinlerinde - olduğu, kuantum kuramının son, 'kabul edilen' biçiminin seçimi üzerinde olasılıkla bir etki uyguladığıdır. Ve doğal olarak bu zeminin bir kısmı da daha sonraları - bilimsel kuramlarda ortaya çıkan kavramların deneysel olarak belirlenmesinin ya da tanımlanmasının temel rolü üzerine vurgu yapan - mantıksal pozitivizm olarak düzenlenecek olan özdü. Bu on dokuzuncu yüzyılın sonu ve yirminci yüzyılın başındaki düşünsel fikirlerin kalıtı, terimlerin tanımlanmasına ve kuantum kuramının oluşumunda önemli olduğu ortaya çıkan tartışmaların izlediği yolun biçimlendirilmesine yardımcı oldu.

Şimdi her biri kuantum mekaniğinin kendi formülasyonuna yol açan tamamıyla farklı iki tarihsel rotaya dönüyoruz. Önce matris mekaniğiyle başlayalım. Kuantum kuramının bu yorumuna yol açan programda yer alan ana oyuncuların (Bohr, Heisenberg, Wolfgang Pauli (1900-1958), Pascual Jordan (1902-1980) ve Max Born (1882-1970)) sayısının azlığı, bunun kapalı bir grup olduğuna işaret eder. Bu, hem Pauli hem de Heisenberg'in Münih'te Sommerfeld'in doktora öğrencileri olduğunu, her birinin sonrasında biri diğerinin yerini almak üzere Göttingen'de Born'un yardımcılığını yaptığını ve daha sonra da Kopenhag'da Bohr'la birlikte çalıştıklarını fark ettiğimiz zaman akla çok daha yatkın hale gelir. Bu iki genç adam 1922'de Göttingen'de Bohr tarafından verilen bir konferanstan çok etkilenmişlerdi. Jordan da bu sıralarda Göttingen'de bir öğrenciydi. Bohr'un kendi yetiştirilişindeki onu doğada en temel seviyede kesintili bir yapı olduğu düşüncesine - ya da en azından onu bu düşünceye açık yapan - ve en sonunda da karşıtlar arasındaki tamamlayıcılık öğretisine yatkın hale getiren düşünsel etkenleri az önce belirtmiştik. Bu sürekli olmayan geçişler öğesi onun 1913'teki hidrojen atomunun (Kısım 19.3) yarı klasik modelinin temel bir özelliğidir. Sommerfeld'in ekolünde atoma ilişkin olguları tartışmak için geçerli dil olduğu kesindir. Kesiklikler kuantum mekaniğinin bu formülasyonunda ana meseleydi.[22] Her haliyle nedensellik başlangıçta bu programın gelişimindeki merkezi soru değildi.

Ana oyuncular, büyük oranda belirli klasik yaklaşımların başarısızlığı nedeniyle ilkesel olarak neyin olası olup neyin olamayacağı konusunda değişik düşünsel konumlar almışlardı. Bunlar mantıksal ya da ilke-olarak çürütmeler değil, aksine sonradan inak (dogma) haline gelmiş güçlü, pratik inançlardı. Bu nedenle, Bohr'un kendi doktora tez çalışması metallerin klasik elektron kuramının başarısızlığının klasik ilkelerin kendilerindeki temel bir yetersizliğe bağlanabileceğini öne sürüyordu. Pauli, genel görelilik ve ilgili alan kuramı genellemeleri üzerine olan çalışmalarında kendisini (yine bir başarısızlık yüzünden) parçacıkların tekillikler olduğu bir sürem alanı (ç.n.: gerçel sayıların çokluğuna sahip bir küme üzerinde tanımlı alan) kuramının olası olmadığına inandırdı. Pauli, ünlü 1921 tarihli *Görelilik Kuramı* adlı kitabında çoktan deneysel açıdan - ilke olarak - gözlemlenemez nicelikleri tartışmanın anlamsız olduğu görüşüne sahipti.[23] Bu inancın kendisinde kesinlikle güçlü bir operasyonalist (işlemselci) (ç.n.: felsefede 'bilimdeki tüm kuramsal terimlerin yalnızca izlenmesi gerekli yordamları ya da yapılması gereken işleri aracılığıyla tanımlanması

gerektiği' yönündeki görüşe sahip kişi) hava vardır. Pauli 1923'e gelindiğinde fizikte kullanılan herhangi bir şeyin işlemsel tanımını[24] ve sürekli kavramların kesikli olanlarla yer değiştirmesini istiyordu. Her şey göz önüne alındığında, gözlemler asıl olarak belirli bir yerde sınırlandırılmışlardır ve anlık olarak yapılırlar, ölçümler de kesikli olurlar; Pauli bu yapının bu tür gözlemleri ve ölçümleri açıklayan her kuramın temeline taşınması gerektiğini hissetti. Bunun önemli kavramsal yeniden ele almaları gerektireceğine inandı. Hem Pauli hem de Heisenberg Born'un orbitalleriyle (ç.n.: 'orbital': elektronun bir atomdaki ya da moleküldeki olası konumunu ya da 'yörüngesini' veren dalga fonksiyonu) eski kuantum kuramını moleküler sistemlere uygulama çabasındaki programında yer aldılar ve bu yaklaşımın tamamıyla başarısız olması onları elektron orbitallerinin anlamsız olduğuna inandırdı. Bu köktenci bir kavramsal devrime olan güçlü istek, o sıralarda genel olarak kültürel çevrelerde ve Pauli'nin ve Heisenberg'in kuantum kuramı hakkındaki beklentilerinde de yaygındı. (Kısım 3.A'daki alıntıdan Popper'ın I. Dünya Savaşı sonrasındaki benzer gözlemini hatırlayınız: 'Ortam devrimci sloganlarla ve fikirlerle, yeni ve genellikle çılgın kuramlarla doluydu.').

Kuantum süreçlerinin ilk derin ve tutarlı mekaniği Heisenberg tarafından 1925'te formüle edildi. Heisenberg, 1924-1927 yılları arasında Kopenhag'da Bohr Enstitüsü'nde geçirdiği süre içinde, kendi kuantum mekaniği yorumunu oluşturmadaki en yaratıcı çalışmalarından bazılarını yaptı. 1932'de bu çalışmalarıyla Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Kendi yeni kuramındaki fiziksel niceliklerle birlikte düşündüğü (sonradan 'işlemciler' adını alan) matematiksel nesneler açık olarak şu tuhaf özelliğe sahipti: Bunlardan iki tanesini çarpınca elde edilen yanıt çarpımın hangi sırada yapıldığına bağlıydı. Bir başka deyişle, çarpma işleminin değişme özelliği yoktu, böylece $AB \neq BA$.[25] Heisenberg'in yeni mekaniği o zamanlar çoğu fizikçinin alışkın olmadığı bu matematiksel özellik nedeniyle gizemli olarak görüldü ve hemen kabul edilmedi. Ancak, tam ve tutarlı bir yeni mekanik verme ve deneylerle ilgili soruları yanıtlama umudunu taşıdığından peşine düşüldü - ayrıca tam o sıralarda başka uygulanabilir seçenekler de yok gibi görünüyordu. Heisenberg'in 1925 yılı makalesindeki bu değişme özelliğine sahip olmayan niceliklerin, matematikçiler tarafından zaten çok iyi bilinen bir nesneler (matrisler) sınıfı olduğunu fark eden Max Born'du. Heisenberg'in kuramının bu (sürekli olmak yerine) kesikli matematiği, doğanın Kopenhag ekolünün temel olarak aldığı sürekli olmayan, kesintili (nedensel olma-

yan) yapısını temsil etmek için çok uygundu. Neyse ki, kuantum mekaniğinin bazı kavramlarını anlamak amacıyla bu yeni matematiksel konunun peşinden gitmek zorunda değiliz, çünkü Erwin Schrödinger (1887-1961) Heisenberg'in çalışmasından kısa bir süre sonra ve ondan tamamen bağımsız bir biçimde, çok farklı bir bakış açısıyla yola koyularak kuantum mekaniğinin başka, ama sonuç olarak denk bir formülasyonunu (bu kez sürekli matematik cinsinden) verdi. Schrödinger'in kuramı bildik kavramlar cinsinden daha kolay ele alındığından, şimdi yönümüzü ona çeviriyoruz (ve 20. Konu'da bu kuram hakkında daha fazla ayrıntı veriyoruz).

Kuantum mekaniğine giden bu ikinci yol Einstein'ın, Louis de Broglie'nin (1892-1987) ve Schrödinger'in çalışmalarını merkez olarak aldığı için, işe önce Einstein'ın düşünsel açıdan bağlılıklarının köklerine bakarak koyulalım. Einstein'ın fizikteki temel sorular - görelilik, kuantum kuramına olan bakış açısı ve çok uzun bir süre boyunca değişmeksizin birleşik bir alan kuramına olan bağlılığı - üzerine olan genel konumu, bir fizikçinin nedensel bir uzay-zaman kuramında yakalamaya çalıştığı dış fiziksel dünyanın akla uygun yapısı için bir arayış olarak görülebilir. Bir başka deyişle, Einstein'ın temel bakış açısı, nesnel bir gerçeklik cinsinden kavranabilir akla yatkın, nedensel[26] bir dünya görüşüydü. Bu nedensellik kavramı temel fiziksel süreçlerin sürekliliğine işaret ediyordu. Doğal olarak, bunun gibi genel tutkuların fiziksel olgularca sunulan bilmecelerle kesişimi belirli bir kuramla ya da araştırma programıyla sonuçlanıyordu.

Einstein, 1909'da Planck'ın kara cisim ışıma yasasını ve Planck'ın enerjinin kuantumlanması koşulunu, bu yasalar tarafından kontrol edilen ışımanın ortaya hem dalga hem de parçacık özellikleri koyduğunu matematiksel olarak göstermekte kullandı. 1909'da Salzburg'da yapılan bir konferansta aşağıdakileri belirtti:

> Bu nedenle, kuramsal fiziğin gelişimindeki bir sonraki aşamanın dalga ve yayılma kuramları arasında bir çeşit kaynaşma olarak yorumlanabilecek yeni bir ışık kuramı getireceği görüşündeyim.[27]

Geriye dönüp bakıldığında bunu, (daha sonra ayrıntılı olarak ele alınacak olan) dalga-parçacık ikiliği kavramıyla (oldukça tarihsel olmayan bir biçimde) erken bir flört olarak görme eğilimi gösteririz. Einstein, 1917'de ışımanın kuantum kuramı üzerine yayınlanan bir makalede moleküllerin dış kaynaklı bir ışıma alanının etkisi altında ışıma alıp verirken hem momentumun hem de enerjinin korunması

gerektiğini gösterdi, böylece bu tür ışımaya 'iğne ışıması' adı verildi. Arthur Compton'un (1892-1962) elektronlar tarafından yapılan ışımanın saçılması üzerine yaptığı sonraki deneysel çalışmalar serbest durumda elektromanyetik kuanta hipotezine destek verdi. Einstein, 1917'deki bu aynı makalede ışıma yayan bir molekülün geri çekilme yönünün '... kuramın şu andaki durumuna göre yalnızca "şans" ile belirlendiğini' ve 'kuramın zayıflığının temel oluşumun süresini ve yönünü "şansa" bırakmakta olduğu ... gerçeğinde ... yattığını' belirtti.[28] Einstein burada bunu, daha sonrasında da olduğu gibi, kuramın bir yetersizliği, gelecekte üstesinden gelinecek geçici bir başarısızlık olarak aldı.

Bu 'süreklilik' ekolündeki diğer anahtar kişi de Broglie'ydi. 1923'te Einstein'ın fotonunun ikili (dalga-parçacık) doğasını anlama çabası içerisinde dalga mekaniği kuramını başlattı. De Broglie gençliğinde dalga optiği ile klasik parçacık mekaniği arasındaki iyi bilinen biçimsel matematiksel benzerlikten etkilenmişti. De Broglie, bu benzerliğin ve Einstein'ın ışık kuantası üzerine kendi geçmiş çalışmalarının bazılarının üzerine yapı kurarak, kendisiyle birlikte düşünülen dalga tarafından belirlenen bir yol izleyen bir parçacık modeli öne sürdü. Einstein'la de Broglie arasında bakış açıları bakımından çok büyük bir yakınlık vardı. Einstein, 1925'te de Broglie'nin fikirlerinin 'yalnızca bir benzerlikten daha fazlasını içerdiği' görüşünde olduğunu belirtti.[29] Einstein tarafından yapılan bu duyuru, dikkati de Broglie'nin çalışmalarına çekti. Gerçekten de, Schrödinger bunu 'Kuramım de Broglie'nin tezi ve Einstein tarafından açıklanan kısa ama son derece uzak görüşlü düşüncelerle özendirilip ortaya çıktı.'[30] diyerek anmıştır. Schrödinger, Einstein'ın gaz kuramı üzerine olan bir makalede fotonların eter salınımlarının enerji seviyeleri olarak görülebileceği, kovuk ışımasının 'en uçtaki ışık-kuantum temsiline karşılık gelmesinin' gerekmediği ve

> Bu, parçacıkların dalga zemini üzerindeki bir çeşit 'dalga tepesi' olmaktan başka bir şey olmadığını söyleyen, hareket eden parçacıkların de Broglie-Einstein dalga kuramının ciddiye alınmasından başka bir anlama gelmez.[31]

sonucuna vardı. Schrödinger aynı yıl (1926) kendi dalga denkleminin akla yatkın olduğu yönünde bir savda bulunmak için Hamilton'un mekanikle optik arasındaki benzerliğini kullandı. Kuantumlama sürekli bir dalga fonksiyonu üzerine şart koşulan sınır

koşulları aracılığıyla yerine getiriliyordu. Schrödinger kuantum mekaniğinin formülasyonu için 1933 Nobel Fizik Ödülü'nü (Paul Dirac (1902-1984) ile) paylaştı.

Bu kaba taslak gösterim, bu küçük grubun (Einstein, de Broglie ve Schrödinger) nedensel bir betimlemeye konu olan temel bir fiziksel varlık olarak sürekli bir dalgaya karşı (en azından az önce ele alınan gelişimin başlangıç aşaması sırasında) bir bağlılık paylaştığını belirtme amacındadır. Göz önünde canlandırılabilirlik ve kendi içinde tutarlılık, klasik fiziksel kuramların kabul edilegelen ayırt edici özellikleri olmuştu. En azından belirli, klasik tipte bir dalga ontolojisiyle (ç.n.: var olmanın doğasıyla ilgili metafizik dalı) kusursuz olmasa da daha anlaşılabilir bir kurama sahip olarak, bir dalga-parçacık ikiliği kavramını temel alan kavramsal olarak anlaşılması güç bir ontolojisi olan soyut bir kuramsal çerçeveden daha iyi sayılabilirdi.[32] Dalga mekaniği ekolü tarafından alınan konum, o zamanlarda kabul edilmiş olan klasik fizik kavramlarına göre daha 'doğal' (kesinlikle de daha tutucu) olanıydı (bir başka deyişle, daha az köktenci bir ayrılışı temsil ediyordu).

19.6 Kopenhag Yorumunun Biçimlendirilmesi

Kuantum mekaniğinin tutarlı bir yorumunun oluşturulması için gerekli enerji, matris mekaniği ile dalga mekaniği arasındaki 'çarpışma' tarafından sağlandı. Bu anlaşmazlıkta önde gelen bazı kahramanlar kuantum mekaniğinin yalnızca tek bir doğru yorumunun olabileceğini hissettiğinden ortada bir kriz kanısı vardı. Bilim adamlarının tek bir yasa ya da kuram olduğu inancında olmaları seyrek olarak görülmese de, Bohr daha bir çocukken bile doğa yasalarının tekliğine ve gerekliliğine inanırdı.[33] Böyle bir inanç, kuantum mekaniğinin olası tek doğru yorumunu aramayı ya da bunu formüle etmeye çalışmayı haklı gösterirdi. Heisenberg'in kuantum mekaniğinin sonluğuna olan inancı, Kopenhag yorumunu (Kısım 20.4'te ele alacağımız) kendi belirsizlik bağıntıları aracılığıyla biçimlendirme uğraşı için temeldi.[34] Şimdi, Kopenhag yorumunun Schrödinger'in dalga mekaniğinin Göttingen-Kopenhag matris mekaniği programına sunduğu meydan okumanın altında formüle edilişinin nasıl gerçekleştiğini ve Kopenhag yorumunun egemenliğini (ya da üstünlüğünü) nasıl kabul ettirdiğini oldukça kısa bir şekilde özetlemeye çalışalım.

Bu tarihi gelişmelerle ilişkili bir etken, düşünsel bakış açılarında kuşaklar arasındaki çizgiler boyunca oluşan ayrılıktı: Einstein,

Schrödinger ve de Broglie gibi kişilerin temelde klasik, 'daha eski' dünya görüşüne karşı, genel olarak Heisenberg, Pauli, Jordan ve grubun yeni bir üyesi olarak Cambridge Üniversitesi'nden Dirac da katılmak üzere, daha genç kuşak (burada Bohr ve Born ayrı olmak üzere) tarafından var edilen köktenci bir şekilde farklı, sonuç olarak belirlenemezci fiziksel süreçler kavramı. Heisenberg, Pauli ve Bohr arasında ampirist-operasyonalist bir düşünsel eğilimin yaygınlaşmasının izi kısmen Einstein'ın 1905'teki görelilik makalelerine (Einstein'ın daha sonraki düşünceleri göz önüne alındığında biraz alaycı bir şekilde) dek sürülebilir. Bir yanı bir kuramdaki gözlemlenemez varlıklardan kaçınma olan bu operasyonalist yaklaşım, genç Alman fizikçileri üzerinde büyük bir izlenim oluşturmuş ve derin bir etki uygulamış gibi görünmektedir. Şimdi bu tür etkenlerin Kopenhag ekolünün Schrödinger'in dalga mekaniğine verdiği tepkinin şiddetini anlamamızda nasıl yardımcı olduğunu görelim.

Matris mekaniği asıl olarak hiçbir fiziksel yorumu olmayan soyut bir matematiksel formalizm (ç.n.: felsefede mantıksal ya da matematiksel ifadelerinin anlamı olmayan ancak (fiziksel varlıklar olarak kabul edilen) sembollerinin yararlı uygulamaları olan bir biçim sergilediği düşünsel kuram) olarak Heisenberg tarafından açık bir şekilde ortaya çıkarılmış ve Kopenhag ekolünün diğer üyeleri tarafından geliştirilmişti. Heisenberg, klasik mekanik gibi başarılı bir formalizmin tek bir parçadan oluştuğuna ya da bir bütün olduğuna ve tüm yapısını yıkmaksızın temel bir şekilde değiştirilemeyeceğine inanıyordu. (Bu, Kısım 11.1'de kendisinden söz ettiğimiz evrenin Aristocu 'yapısının' birliğiyle bazı bakımlardan benzerlikler taşımaktadır.) Bir formalizmin kendi uygun yorumunu tek bir şekilde belirlediği yönündeki dikkate değer düşünceye de sahipti. Heisenberg, Schrödinger'in sürekli, nedensel, büyük oranda göz önüne getirilebilir fiziksel süreçler cinsinden bir yorumla güçlendirilmiş açık bir şekilde çok farklı olan formalizminin ortaya çıkmasından oldukça rahatsız olmuştu. Durum, Schrödinger'in yine 1926'da matris mekaniği ile dalga mekaniği formalizmlerinin temelde matematiksel olarak denk olduklarını göstermesiyle Heisenberg'in açısından bir bakıma daha da kötü hale geldi. Matris mekaniğinin doğru yorumunun mümkün olduğunca hızlı bir şekilde bulunması gerekli olarak kalıyordu. Bu, Kopenhag'da Bohr, Heisenberg ve Pauli ile önemli bir girişimdi. Heisenberg ve çalışma arkadaşları için daha da kötüsü matris mekaniği formalizminin çok fazla başarılı uygulamasının bulunmamasıydı. Aslında, Schrödinger'in dalga mekaniği kuramsal fizikçilerin hoş bir şekilde geniş bir çeşitlilikte başarılı biçimde doğrulanmış

hesaplamalar yapmalarına izin vermeden önce matematiksel bir bataklıkta batıp yitmiş gibi görünüyordu.[35] Çoğu kuramsal fizikçi tarafından kullanılan formalizm matris mekaniği değil dalga mekaniğiydi. Hesaplama cephesindeki bu savaşı kaybetme tehlikesi daha başka sonuçları da tehdit ediyordu. Heisenberg'in işinde ilerleme konusunda kişisel hırsları vardı ve Almanya'da kuramsal fizik alanında birçok profesörlük makamı açılıyordu. Kopenhag ekolünün üyeleri, kuramsal fiziğin gelecekte alacağı yönün kontrolünün tehlike altında olduğunun bilinçli bir şekilde farkındaydılar. Bu Kopenhag grubu, Kopenhag bakış açısının egemenliğini kurmak açısından utku kazanmak için gerekli yeteneğe, örgütlenmeye ve dürtüye sahipti. Heisenberg'in belirsizlik bağıntısı makalesi (20. Konu) bunu başarmak yönünde önemli bir adımdı. Rakiplerinin (Einstein, Schrödinger, de Broglie) her biri kendi bildiği yöne giderken onlar uyum içinde çalıştılar. Kopenhag'daki Bohr Enstitüsü'nün (Birleşik Devletler'de kuramsal fiziğin kurulmasında egemen roller oynayanların birçoğunu da dahil) oradan geçen önde gelen kuramsal fizikçilerin tüm bir kuşağı üzerindeki etkisi son derece büyüktü.

1927'deki Solvay Konferansı'nda önemli bir karşılaşma gerçekleşti. O yıl de Broglie, içinde maddenin dalga ve parçacık doğasının bir sentezini önerdiği 'bir çift çözüm ilkesi' öne sürmüştü. Bu Beşinci Solvay Konferansı'nda bu fikirlerin bazılarını adına pilot-dalga kuramı dediği bir biçimde sunmuştu. Burada fiziksel bir parçacık pilot dalgası tarafından yönlendiriliyormuş gibi resmedilmişti. Bu Toplantı'daki tartışma sırasında Pauli de Broglie'nin kuramını belirli bir örneği temel alarak eleştirdi ve pilot-dalga kuramının Kopenhag yorumuyla aynı sonuçları vermeyeceğini öne sürdü. De Broglie Pauli'nin itirazına verilecek uygun bir yanıtın genel çizgilerini anladığına inanıyor olsa da, kendisi sonraki yıllarda o zaman yapabileceği kadar ikna edici bir biçimde yanıt veremediğini hissetti.[36] Bunun yanında ne Einstein ne de Schrödinger de Broglie'nin düşüncelerine - Einstein kuramın yerel olmayan (açık bir şekilde anlık 'bir uzaklıkta etki') doğasını sevmediği için ve Schrödinger de (dalgaları ve parçacıkları değil) yalnızca dalgaları temel alan bir kuram istediği için - olumlu biçimde destek olmadılar. (Burada ve sonrasında 'yerel olmama' ile anlık, uzun erimli 'bir uzaklıkta etki' etkilerini demek istiyoruz. 22. ve 23. konularda mikro alanın bu görünür özelliğine geri döneceğiz.) Melez bir dalga mekaniği/matris mekaniği formalizmi ile spin kavramını içeren problemler için sonuçlar çıkaran (1927 Solvay Konferansı'nda kendileri de konuşmuş olan Heisenberg ve Born da dahil) kişiler, şiddetli bir şekilde belirlene-

mezci ya da nedensel olmayan resmi destekliyordu. Bohr, uzun bir süredir (de Broglie'nin ilk çalışmalarının bazılarının temel aldığı) foton kavramına karşıydı, böylece de Broglie'nin fikirleri hiçbir zaman Kopenhag ekolünde hızlı bir şekilde yayılmamıştı. Kopenhag'daki Enstitü çok kapalı bir topluluktu ve oraya davet edilenler 'saygıdeğer' kuramsal fizikçiler olarak tanınırlardı. De Broglie asla bu grubun bir üyesi olmadı. 1930'a gelindiğinde de Broglie çok standart bir kuantum mekaniği kitabı yazdığında, kendisi pilot-dalga kuramı hakkındaki fikrini değiştirdi. 1932'de ünlü matematikçi John von Neumann (1903-1957) *gizli değişkenlere* sahip kuramların (bir başka deyişle, değerleri standart kuantum mekaniği tarafından yasaklanmış iyi tanımlı fiziksel özelliklerin evrimini belirleyecek olan, o an için bilinmeyen ya da 'gizli' parametreler içeren deneysel olarak yeterli kuramlar) olası olmadığı yönünde bir ispat teklif etti. Bu, de Broglie'nin kendi geçmiş kuramına karşı olan konumunu daha da pekiştirdi. John Bell'in (1928-1990) von Neumann'ın teoreminin kuantum mekaniğindeki gizli değişkenler sorusuyla büyük oranda ilgisiz olduğunu kesin olarak göstermesi 1960ların başından önce değildi. (Bu sorulara 22. ve 23. konularda geri döneceğiz.)

Bu meselelerle ilgili olarak, Kopenhag yorumuna tam olarak alınma ve hem nedensel olan hem de sürekli bir uzay-zamanda resmedilen mikro olguların bir betimlemesinin ilkesel olarak da olsa mümkün olmasını yasaklamakta son söz olarak kabul edilme hakkını tanıyanın ne olduğu sorulabilir.[37] Buna verilen bir yanıt, şimdiye kadar deneyimlerin Kopenhag yorumunun tutarlılığını göstermesi ve bu yorumun temel gerekliliğine olan inancın, ölçümlerin sonuçlarını betimlemek için klasik kavramlara olan gereksinimin öznel epistemolojik ölçütüne ve temel atom olgularının bölünemezliğine (ve dolayısıyla sürekli olmamalarına) dayanmasıdır. Bir başka şekilde söylersek, basitçe Bohr'un inancı doğru olarak kabul edilir. (ç.n.: Bu cümledeki anlam 'dinde peygamberin sözüne inanıp peşinden gitme' ile bir benzerlik taşımaktadır.) Bohr'un konumu '[fiziksel] gerçeklik kuantum mekaniği neyi betimleyebiliyorsa odur'[38] diye özetlenmiştir. Böylesi bir temsilde Kopenhag yorumu kendisini doğru olarak tanımladı ve tarihi yeniden yazarak - ki böylece Einstein, de Broglie ve Schrödinger büyük ölçüde gözden kayboldu - fizik üzerindeki egemenliğini güçlendirdi, sonuçta Kopenhag kuantum mekaniğinin tek anlaşılabilir yorumu olarak kaldı.[39]

Şimdiye dek 'Kopenhag' terimini kaba bir şekilde Bohr'la birlikte çalışmış fizikçiler grubu tarafından paylaşılan bazı ortak ilkeler ve

bağlılıklar kümesinden söz etmek için kullandık. Bunlarla Einstein, de Broglie ve Schrödinger arasındaki farklılıklara vurgu yapıldı. Öte yanda, Kopenhag ekolünün kendi üyeleri arasında yorumlamanın önemli noktaları üzerinde anlamlı ayrılıklar vardı. Bir sonraki konuda Bohr ve Heisenberg'in dalga fonksiyonunun anlamı konusunda yollarını ayırdıklarını göreceğiz. Hem Bohr'un konumu hem de Heisenberg tarafından kabul edilen daha aşırı bakış açısı genellikle kayıtsızca Kopenhag yorumu olarak tanımlanır. Dahası, çoğu fizikçi Born'un ve Heisenberg'in konumları arasındaki herhangi bir gerçek ayrılıktan habersizmiş gibi görünür. Bir sonraki konuda kuantum mekaniğinin bu her zaman kesin olarak tanımlanmamış olan Kopenhag yorumunun bir incelemesi üzerinde çalışmaya başlayacağız.

Yararlı Kaynaklar

Kuantum kuramının ortaya çıkışının tarihi bir öyküsü için en iyi tek başvuru kaynağı olarak Max Jammer'in klasik *Kuantum Mekaniğinin Kavramsal Gelişimi* adlı eseri hâlâ başı çekmektedir. Jim Baggott'un *Kuantum Kuramının Anlamı*'nın 1. Konu'su kuantum mekaniğine giden yolun resmi olmayan bir sunumunu verir. Olivier Darrigol'ün *c-Sayılarından q-Sayılarına*'sı klasik mekanikten kuantum mekaniğine geçişi son derece tarihi ve teknik ayrıntılarla aktaran dikkate değer bir çalışmadır. Michel Bitbol ve Olivier Darrigol'ün *Erwin Schrödinger*'i kuantum mekaniğine giden bir yol üzerine olan denemelerin bir derlemesinden oluşur. John Heilbron'un 'Kopenhag Ruhunun İlk Misyonerleri' kuantum kuramı üzerine Kopenhag öğretisinin doğuşu ve yayılması hakkında müthiş bir denemedir. Mara Beller'in 'Schrödinger'den Önce Matris Kuramı' ve 'Bohr'un Tamamlayıcılığının Doğuşu: Bağlam ve Söyleşi' adlı makaleleri Kopenhag programının nasıl olup da egemen hale geldiğinin karmaşık öyküsünün birazını okura açıklar. James Cushing'in *Kuantum Mekaniği* kuantum mekaniğinin anlamı üzerine 'standart' bakış açısına nasıl ulaştığımızı ele alır.

20
Kopenhag Kuantum Mekaniği

Fiziksel bir kuramda, bir sistemi tipik olarak sistemin *durumu* cinsinden betimleriz. İlgili fiziksel nicelikleri ya da değişkenleri açıkça belirtir ve sonra da bu değişkenlerin zaman içinde nasıl evrildiklerini bulmak için, gelecekte alacakları değerleri öngörmek için dinamik yasalar kullanırız. Örneğin klasik parçacık fiziğinde, bir sistemin durumu sistemdeki tüm parçacıkların konumları ve hızları (ya da bizim için buna denk olarak momentumları) ile (bir başka deyişle her parçacık için $\mathbf{r}(t)$ ve $\mathbf{v}(t)$ ile) belirlenir. Sonra, Newton'un ikinci yasası $F = ma$ sistemin değişkenlerinin zaman içinde evrilmelerini ya da sistemin durumunu saptar. Elektrodinamik için durum değişkenleri E elektrik ve B manyetik alanlarıdır ve Maxwell denklemleri bunların zaman içinde evrilmelerini belirler. Klasik fizikte (burada görelilik de buna dahildir) dinamik denklemlerinin ana varlıkları olan durum değişkenleri (tipik olarak parçacıkların konumları ve momentumları), aynı zamanda doğrudan doğruya da gözlemlenebilen fiziksel niceliklerdir. Bir başka deyişle, durumun kendisi kuramdaki gözlemlenebilenler cinsinden açıkça saptanır. Klasik (görelilik tarafından değiştirilmiş haliyle) dünya görüşünün temel özellikleri, sistemin içinde bulunulan andaki durumunun ilke olarak (bir beyzbol topunun yerçekimi etkisinde uçuşundaki gibi) gelecekteki durumu belirlediği ve bu olay olay giden nedensel yapıdan sorumlu etmenin, nedenden sonuca doğru ışık hızından daha büyük olmayan bir hızda yayılmak zorunda olduğudur.

Bu sözü edilenlerin tersine, kuantum mekaniksel bir sistemin durumu (ya da durum vektörü ya da ψ dalga fonksiyonu) daha soyut bir nesnedir ve kendi başına doğrudan doğruya gözlemlenebilir değildir.

Kuantum mekaniğinin temel dinamik denklemi olan Schrödinger denklemi (Newton'un ikinci yasasının kuantum mekaniğindeki eşi), sistemin durum vektörünün zaman içinde evrilmesini belirler, ancak durum vektörü kendi başına sistemin parçalarının konumları ve momentumları için kesin değerler vermez. Daha doğrusu, kuramdaki ana varlık olan durum vektörü ya da ψ dalga fonksiyonu, yalnızca bir deneyin ya da gözlemin izin verilen çeşitli (*özdeğer*ler adı verilen) sonuçlarının olasılıklarını he-saplamamıza olanak verir. Bir sistemin, diyelim ki izin verilen çeşitli son durumlarıyla ilgili olası enerjilerini öngörebilirken, (genellikle) bir deneyde gerçekte hangisinin gözlemleneceğini ya da oluşacağını değil, bu izin verilen sonuçların yalnızca olasılıklarını öngörebiliriz. Kuantum mekaniğinin standart - ya da Kopenhag diye anılan - yorumunda artık olay olay nedensellik yoktur ve parçacıklar uzay-zaman zemininde iyi bir şekilde tanımlı yörüngeler izlemezler. Kuram genel olarak belirli olayları değil, olasılıkları öngörür. Bu konuda kuantum sistemlerinin davranışlarının bu tür genel özelliklerini göstermek için bazı basit örnekleri kullanacağız.

Schrödinger denklemini tüm genelliğiyle ele almak için gerekli geniş matematiksel araçları geliştirmeyeceğimiz için, bazı basit kuantum sistemlerini ele alışımızda bir benzerlikten yararlanacağız. Durağan durumlardaki (elektronu izin verilen yörüngelerden birinde olan bir hidrojen atomu gibi) sistemleri belirleyen zamandan bağımsız Schrödinger denkleminin, basit bir şekilde klasik fizikteki tanıdık zamandan bağımsız dalga denklemi olduğu bulunur. Bu nedenle, dalga olgularını temel alan klasik önsezilerimizi bazı paradigma içeren haller için (ç.n.: model ya da örnek olarak kullanılan sorular için) matematiksel çözümler yazmakta kullanacağız. Doğal olarak, izlenen bu yordamın haklılığını gösteren en iyi neden aslında ilgili Schrödinger denklemini çözmekten (burada yapmadığımız bir şeyden) gelir. Schrödinger'in kendisi ünlü denklemine çeşitli klasik dalga denklemleriyle çalışarak ve bunları uygun bir şekilde değiştirerek yöneldiğinden, bu türden biçimsel benzerliklerin var olması bir kaza değildir.

20.1 Bazı Basit Kuantum Mekaniksel Sistemler

İşe önce Schrödinger'in buluşuyla ilişkili birkaç teknik ayrıntıyla ilgili temel bilgileri sağlayarak başlayalım. Kısım 19.2'de

gördüğümüz gibi, Planck'ın kara cisim ışıması spektrumu üzerine yaptığı çalışmalar en sonunda elektromanyetik ışımanın kuantumlanmasını (daha sonraki terminolojide 'fotonları') varsaymasına (postüle etmesine) yol açtı. Planck'ın fotonun E enerjisi ile ν frekansı arasındaki $E = h\nu$ ilişkisini ((19.3) denklemi) enerjiyi[1] p momentumu cinsinden veren $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$ göreliliğe uyarlanmış ifadeyle birleştirirsek, bu durumda $m_0 = 0$ (foton gibi 'kütlesiz bir parçacık') için $E = pc$ olduğunu buluruz. E için bu iki ifadeden ($\lambda\nu = c$ olduğundan)

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{20.1}$$

sonucuna ulaşırız. Şimdiye dek yalnızca (20.1) denkleminin ışık için (bir başka deyişle, fotonlar için) geçerli olacağının beklenmesi gerektiğini biliyoruz. Bununla birlikte, de Broglie 1920'lerin başlarında dalgalarla tüm maddeler arasında en azından biçimsel bir ikilik bulunduğunu postüle etti; buna göre her p momentumuyla ((20.1) denklemi aracılığıyla) bir λ dalga boyu birlikte düşünülmelidir. Bu hipotez doğrudan doğruya deneysel olarak doğrulanmıştır, ancak burada buna girmeyeceğiz. De Broglie, maddenin dalga özellikleriyle ilgili buluşlarından dolayı 1929'da Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.

Schrödinger 1926'da, parçacığın üzerine kuvvetler tarafından etki edilse bile, dalgayı - ya da aslında parçacıkla bir arada düşünülen $\psi(x, y, z, t)$ dalga fonksiyonunu - öngören bir denklem elde etti. Denklemi, büyük bir problem sınıfı için niceliksel hesaplamaların yapılmasına izin vermesi bakımından Newton'un $F = ma$ ikinci yasasına çok benzer bir rol oynayacaktı. Galileo'nun düzgün hareketi inceleyerek Newton'dan önce gelmiş olması gibi, de Broglie'nin de serbest bir parçacığın dalga boyu için bir formül vererek Schrödinger'den önce geldiği söylenebilir. Schrödinger'in dalga denklemine ulaşmak için kullandığı kesin savlarla denklemin kendisi burada sunmak için matematiksel olarak çok karmaşıktır. Üst üste gelme (ç.n.: İngilizcesi 'superposition') ilkesi tıpkı ışık dalgaları için olduğu gibi ψ dalga fonksiyonu için de geçerlidir, böylece iki dalga arasında girişim etkileri olasıdır. Bu ilkeleri bazı basit fiziksel durumlarla göstereceğiz.

(Hiçbir kuvvetin etkisi altında olmayan) serbest (göreliliğin gerekmediği) klasik bir parçacık, tamamıyla (K) kinetik olan ve herhangi bir pozitif değeri alabilen bir (E) toplam enerjiye sahiptir. Daha genel olarak, $E=(K+V)$ toplam enerjisi pozitif olan (bir çekirdeğin çekiminden kaçabilen ve böylece açık, sınırsız bir yörünge boyunca ilerleyebilen bir elektron gibi) klasik bir parçacık, E'nin herhangi bir pozitif değeri için izin verilen yörüngelere de sahiptir. Bu tür sistemler kuantum mekaniksel olarak incelendiğinde, ilgili dalga bariyerlerle ya da engellerle karşılaşabilir, böylece yansıma, geçirme ve soğurma (ya da kırınım) meydana gelir, ancak Schrödinger denkleminin enerjinin herhangi bir pozitif değeri için çözümleri vardır. Böylece, klasik ve kuantum mekaniksel sistemler toplam enerjinin herhangi bir pozitif değerine izin verilmesi bakımından niteliksel olarak benzerdir.

Öte yandan, bir hidrojen atomunun negatif enerji durumları gibi sınırlı sistemler için ayrı bir kuantum mekaniksel özellik ortaya çıkar: Yalnızca belirli kesikli enerjilere izin verilir. Klasik olarak bir kutunun içine kapatılmış bir parçacık herhangi bir enerjiye ve momentuma sahip olabilir. Kuantum mekaniksel olarak, dalga boyu sınırlar arasına sığabilmelidir ve duran dalgalar oluşturmak için uygun sınır koşulları sağlamalıdır. (Bu, dairesel Bohr yörüngeleri için izin verilen dalga boylarına benzer.) Bir-boyutlu, duvarları esnek olmayan, dalgaların duvarların içine hiç giremediği (Şekil 20.1'de gösterilen) bir kutu için, olası en uzun dalga boyu $\lambda_{\text{maksimum}}/2=\ell$ ve genel olarak da $\lambda_n=2\ell/n$ olur. (Şekil 19.2'yi ve Kısım 19.1'de bununla ilgili tartışmayı hatırlayınız.) De Broglie'nin (20.1) denklemiyle verilen hipotezine göre izin verilen momentum değerleri

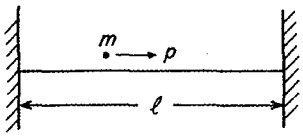
$$p_n=\frac{h}{\lambda_n}=\frac{nh}{2\ell} \tag{20.2}$$

olur. Bu durumda kapatılmış 'parçacık' için toplam enerjinin[2]

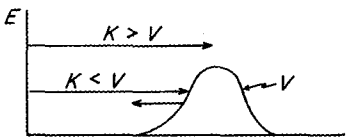
$$E_n=\frac{p_n{}^2}{2m}=\frac{1}{2m}\left(\frac{nh}{2\ell}\right)^2=\frac{h^2}{8m\ell^2}n^2, \qquad n=1,2,3,\ldots \tag{20.3}$$

olduğu bulunur. Bu enerji seviyeleri tıpkı hidrojen atomundakilerde olduğu gibi kuantumlanmıştır. Bu izin verilen ya da olası enerji

değerleri bu sistem için özdeğerlerdir. (20.3) denklemindeki izin verilen enerji değerleri dalga fonksiyonu üzerine koşulan sınır koşulları (burada duran dalgaların Şekil 20.1'de ℓ uzunluğundaki 'sicimin' uçlarında boğumlara sahip olması gereği) tarafından seçilmiştir. Kuantumlamanın Schrödinger denkleminin kabul edilebilir çözümleri tarafından sağlanması gereken sınır koşullarıyla gerçekleştirildiği sözüyle anlatılmak istenen budur.



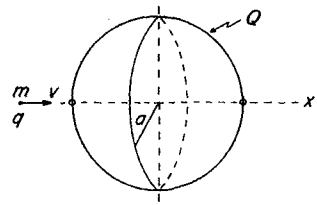
Şekil 20.1 Bir doğru parçası ile sınırlandırılmış bir kütle



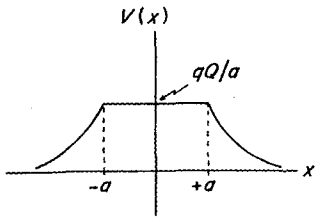
Şekil 20.2 Bir parçacığın klasik olarak bir engelle karşı karşıya kalması

Şimdi atom fiziğinde çok önemli olan bir diğer deneyler ya da gözlemler sınıfını göz önüne alalım. Bir parçacık - diyelim bir elektron - klasik olarak bir potansiyel engeli yalnızca Şekil 20.2'de gösterildiği gibi, başlangıçtaki kinetik enerjisi engelin yüksekliğini aşıyorsa geçebilir. Bu tür bir potansiyel engele örnek olarak, Şekil 20.3'te gösterildiği gibi a yarıçapında ve Q artı yükünde, birbirlerine bir çap doğrultusunda karşı gelen iki küçük deliğe sahip, içi boş bir metal küre alın. q artı yüküne ve m kütlesine sahip bir nokta parçacık bu iki delikten geçen bir doğru boyunca fırlatılmış olsun, bu durumda 'göreceği' $V(x)$ potansiyeli Şekil 20.4'te gösterilmiştir. Klasik olarak, başlangıçtaki $K_0 = \frac{1}{2}mv^2$ kinetik enerjisi engelin en yüksek V_{maksimum} potansiyel enerjisini aşarsa, bu durumda parçacık kürenin içinden geçer ve karşı taraftan çıkar. Eğer tam tersine $K_0 < V_{\text{maksimum}}$ ise, bu durumda parçacık kürenin dışında bir yerde durdurulacaktır ve sonrasında da geriye doğru itilecektir. Asla potansiyel engelin içine giremeyecektir. Öte yandan, böyle bir durum için Schrödinger denkleminin çözümü, Şekil 20.5'te

belirtildiği gibi dalga fonksiyonunun bir kısmının engelin içine girmesine izin verir.[3]



Şekil 20.3 Bir elektron yüklü bir küresel kabukla karşı karşıya kalıyor



Şekil 20.4 Elektrostatik bir potansiyel engel

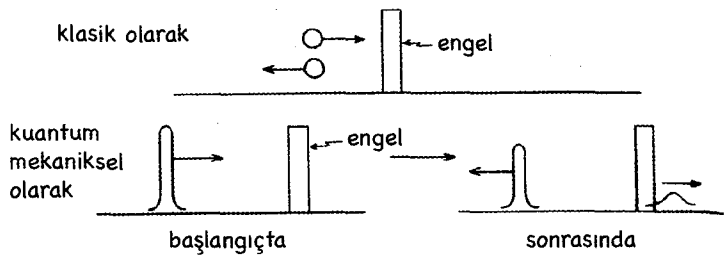
Şimdi, dalga fonksiyonunun bu davranışının fiziksel önemini açıklamak için yapılan bazı denemeleri ele alacağız.

20.2 Dalga Fonksiyonunun Yorumları

ψ dalga fonksiyonu için Schrödinger tarafından önerilen ilk yorumlardan biri, $|\psi|^2$ büyüklüğünün karesinin parçacığın madde yoğunluğunu (ya da olası olarak yük yoğunluğunu) temsil ettiği şeklindeydi. Şekil 20.5'in alt kısmı bu yorumdaki bir zorluğu gösteriyor. Dalga fonksiyonunun bir kısmı engelde yansıyıp bir kısmı da iletildiğinden, bir elektron engelde bir kısmı yansıyıp bir kısmı da iletilerek bölünmek zorunda kalmalıdır. Öte yanda, deneysel olarak ya her zaman bütün bir elektron ya da hiçbir şey algılanır, asla bir elektronun parçası algılanmaz.

Born'a[4] atfedilen ve günümüzde geniş olarak kabul gören bir diğer yorum da $|\psi(x,y,z,t)|^2$'nin bir t anında (x,y,z) konumunda bir

parçacık bulma olasılığını'yi $P(x,y,z,t)$ temsil ettiği şeklindedir. $P(x)$ olasılığı asla negatif olamaz. Bu $P(x)$, $|\psi|$'in karesi olarak tanımlandığından güvence altındadır.[5] Şekil 20.5'te gösterilen durum cinsinden, elektronun çok büyük bir olasılıkla engelden yansıyacağını, ancak yine de engelin içinden geçmesi için sonlu bir şansın da bulunduğunu söyleriz. Burada, bir kez daha bir kuramın bir deneyin ya da gözlemin izin verilen ya da olası sonuçlarını öngörebilmesinin, ancak daha sonra herhangi bir denemede ya da bir deneyin gerçekleştirilmesi durumunda aslında gözlemlenecek bir sonuca yalnızca bir olasılık atayabilmesinin bir örneğini görüyoruz. Bunu biraz daha genel bir şekilde anlatmanın bir yolu, özdeş olarak hazırlanmış bir sistemler grubu (bu grubun herhangi bir ψ dalga



Şekil 20.5 Kuantum mekaniksel olarak bir engelin içinden geçilmesi

fonksiyonu ile temsil edildiği durum) için, bu grup için elde edilecek ölçülen (ya da izin verilen) değerlerin yalnızca istatistiksel dağılımını öngörebildiğimizdir. Burada grubun her üyesi için tek tek belirli bir ölçüm yolu izlenir. Kuantum mekaniği, bu ('birbirine özdeş') deneylerin uzun süre boyunca gerçekleştirilmesi durumunda sonuçların dağılımının öngörülmesine izin verir. Örnek olarak, (Şekil 20.5'in alt yarısında gösterildiği gibi) engele doğru bir elektron fırlatıyor ve bu işlemi defalarca tekrar ediyor olsak, bu durumda elektronların belli bir kesrinin yansıyacağını ve geri kalanların geçeceğini, ancak göz önünde tutulan herhangi bir deneyde elektronun ya yansıyacağını ya da engelin içinden geçip gideceğini bulurduk. Kuantum mekaniğine getirdiği bu istatistiksel yorum Born'un 1954'te Nobel Fizik Ödülü'nü almasını sağladı.

Bu olasılık yorumunu Şekil 20.1'deki basit örneğimizde $n = 1$ durumu için uygulayalım. ℓ uzunluğundaki sicimin üzerinde duran

dalgalarla ilgili benzerliği kullanmaya devam ederek, duran dalganın (ya da bu durumda dalga fonksiyonunun)

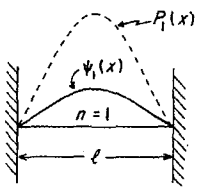
$$\psi_1(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = A \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \tag{20.4}$$

ve olasılık fonksiyonunun da

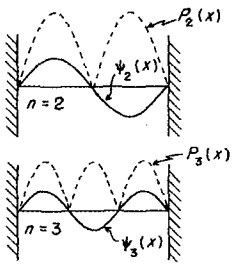
$$P_1(x) = |\psi_1(x)|^2 = A^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \tag{20.5}$$

olarak verilmesi (bakınız Şekil 20.6) beklenir. 'Parçacığı' ℓ uzunluğundaki doğru parçasının üzerinde bir yerde bulma olasılığının toplamı bir olmak zorunda olduğundan, $P(x)$ eğrisinin altındaki toplam alanın bir olması gerekir. Bunun (burada yapmıyor olsak da) (20.4) denklemindeki A'nın değerini belirlediği gösterilebilir, böylece

$$\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \tag{20.6}$$

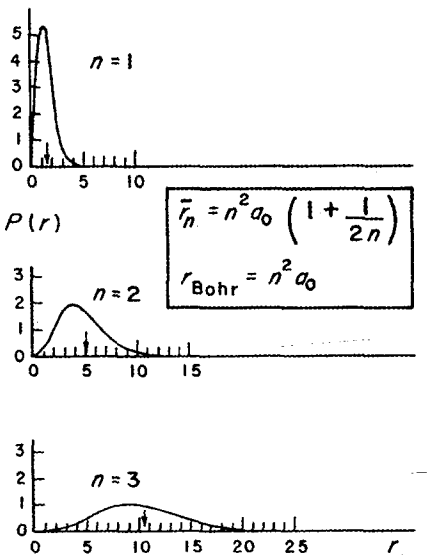


Şekil 20.6 Kapatılmış bir parçacık için taban durumu olasılık dağılımı ($P_1(x)$)



Şekil 20.7 Daha yüksek seviyeler için olasılık dağılımları ($P_2(x)$ ve $P_3(x)$)

olur. Parçacığı $0 < x < \ell$ üzerinde, aralığın uçları ($x = 0$ ve $x = \ell$) dışında bir yerde bulmak için sonlu bir olasılık bulunsa da, parçacığın taban durumunda ($n = 1$) bulunacağı en olası yerin $x = \ell/2$ olduğuna dikkat ediniz. $n = 2$ ve $n = 3$ durumlarına karşılık gelen eğriler Şekil 20.7'de gösteriliyor. Benzer şekilde, hidrojen atomunun Schrödinger denklemi kullanılarak yapılan kesin bir kuantum mekaniksel incelemesi Şekil 20.8'de gösterilen olasılık fonksiyonlarını verir.[6] Kuantum mekaniksel olarak elektronun en olası konumunun, izin verilen yörüngeler için yarı klasik Bohr modeli tarafından verilen $r_{\text{Bohr}} = n^2 a_0$ değerine çok yakın olduğu ortaya çıkar, burada a_0 Bohr yarıçapıdır. Böylece, kuantum mekaniğinin olasılıkçı öngörüleriyle klasik olarak beklenen kesin değerler arasında bir çeşit ilişki olduğunu görürüz.



Şekil 20.8 Hidrojen atomu için olasılık dağılımları: oklar $\bar{r}_n$ değerlerini gösteriyor

Kuantum mekaniğinin Schrödinger formülasyonunun büyük üstünlükleri, birçok problem için belirli çözümlerin hesaplanmasına izin vermesi ve ψ dalga fonksiyonunun -ya da tam olarak $|\psi|^2$ 'nin- kuantum mekaniğinin bir yorumunu sağlamakta önemli bir yardımcı

olmasıdır. Schrödinger kendi kuramıyla Heisenberg'inki arasındaki biçimsel özdeşliği 1926'da kanıtlayalı beri, kuantum mekaniğinin bu iki formülasyonu genellikle basit bir biçimde aynı fiziksel kuramı ifade etmenin iki farklı matematiksel yolu olarak alınagelmiştir.

20.3 Büyükle Küçük Arasındaki Temel Bir Fark

Kuantum mekaniğinin standart yorumunu ortaya çıkarmaya devam edelim ve dünyaya bakışımızda genellikle bu kuramın zorunlu kıldığı düşünülen önemli gözden geçirmelerin bazılarını ele alarak başlayalım. Bu iş için bir araç olarak, kuantum mekaniğinin olasılıkçı yorumunu foton ya da elektron ışınlarının kendi kendileriyle giriştikleri (girişim yaptıkları) bir deneye uygulayalım. Tartışmanın merkezine Dirac'ın bilimsel gelişmelere temel oluşturmuş olan *Kuantum Mekaniğinin İlkeleri* adlı kitabından alıntıları koyalım. Bu kitap on yıllar boyunca etkili bir metin olmakla kalmamış, aynı zamanda kuantum mekaniğinin ilkelerini kesin ve öz bir biçimde sunduğu genel olarak kabul görmüştür. Daha sonraki konularda bu açıklayıcı kısıtlamaların bazılarını sorgulayacak olduğumuzdan, önce (Bohr, Born, Dirac ve Heisenberg gibi) önemli bazı kişilerin kuantum mekaniğinin bu standart yorumu üzerine düşüncelerini sunmak istiyoruz. Bu nedenle, bu ilk ustaların notlarından doğrudan doğruya yapılan alıntılara, bu bilim adamlarının iddia ettiğimiz - zaman zaman aşırı - düşüncelere gerçekten de inandıklarını belgelemek için oldukça sık olarak başvuracağız.

Dirac, kitabına atom fiziğinin klasik fizik tarafından sunulan resminin doğasında var olan sınırlamanın bir çözümlemesiyle başlar.

> Tüm maddi parçacıklar uygun koşullar altında ortaya konabilecek dalga özelliklerine sahiptir. Burada klasik fiziğin çöküşünün çok çarpıcı ve genel bir örneği ile - klasik fiziğin yalnızca hareket yasalarındaki bir hatayla değil, ama *kavramlarının atomik olayların bir betimlemesini sağlamakta kaldıkları yetersizlikle* de - karşılaşıyoruz.
>
> Maddenin temel yapısı açıklanmak istendiğinde klasik fikirlerden ayrılmak gereği, yalnızca deneysel olarak kanıtlanan gerçeklerden değil, aynı zamanda genel felsefi nedenlerden de görülebilir. Maddenin yapısının klasik bir açıklamasında, onun çok büyük sayılardaki küçük bütünü oluşturan parçalardan yapıldığı varsayılır ve bu parçaların

> davranışı için yasalar postüle edilir, ki bu yasalardan asıl madde için yasalar ortaya çıkarılabilir. Bununla birlikte bütünü oluşturulan parçaların kararlılığı ve yapısı sorusu hiç dokunulmadan bırakıldığından bu, açıklamayı tamamlamaz. Bu soruyu ele almak için, bütünü oluşturan her parçanın kendisinin daha küçük parçalardan yapılmış olduğunu varsaymak gerekir, ki bu daha küçük parçalar cinsinden davranışı açıklanır. İzlenen bu yolun bir sonunun olmadığı açıktır, böylece bu doğrultuda gidilerek maddenin temel yapısına asla ulaşılamaz. *Büyük* ve *küçük* yalnızca göreli kavramlar olduklarından, büyük olanı küçüğün cinsinden açıklamak yardımcı olmaz. Bu nedenle, klasik fikirleri büyüklüğe mutlak bir anlam verecek biçimde değiştirmek gereklidir.[7]

Dirac maddenin klasik betimlemesinin çöküşünü ele alırken burada, deneysel gerçeklerin yeni kavramları gerektirdiklerini, büyükle küçük arasında temel bir fark olmaksızın maddenin yapısını incelemek için harcanacak her çabanın, basit bir şekilde maddenin bütünlüğünü oluşturan parçaları git gide daha küçük bir ölçekte sınırsızca çoğaltacağı yönündeki düşünsel nokta kadar fazla vurgulamıyor. Bu, akıl yürütmede sonuçtan nedene doğru sonsuz bir gerilemeye yol açar. Maddenin en küçük parçacıkları hakkındaki sorunun kendisi asla gerçekten yanıtlanamaz. Soru, klasik, her gün kullandığımız kavramlar cinsinden yanıtlanamaz hale gelir.

Dirac klasik alanla kuantum alanı arasındaki sınırları çizmekte mutlak bir ölçüt olarak, bu nesneleri gözlemlemekteki yeteneğimizin sınırlılığını temel alan bir ayrım önerir.

> Tam bu aşamada bilimin yalnızca gözlemlenebilir şeylerle ilgili olduğunu ve bir cismi yalnızca dışarıdan bir etkiyle etkileşmesine izin vererek gözlemleyebileceğimizi hatırlamak önemli hale gelir. Bu nedenle, bir gözlem davranışına mutlaka gözlemlenen cismin bir çeşit 'rahatsız edilişi' de eşlik eder. Bir cismi, onu gözlememize eşlik eden 'rahatsızlık' ihmal edilebildiği zaman büyük ve 'rahatsızlık' ihmal edilemediği zaman da küçük olarak tanımlayabiliriz. Bu tanım, büyük ve küçüğün genel anlamlarıyla yakın bir uyum içindedir.[8]

Dirac büyükle küçük arasında doğal olarak var olan ayrımın bir cismin gözlendiği sırada üzerinde oluşturulan etkilerle ilgili olduğunu öne sürüyor. Bir sistemi ancak onunla etkileşim içine girersek gözlemleyebiliriz. Bir gözlemin gözlemlenen sistemi 'rahatsız' etmesine basit ve düşsel bir örnek olarak, içinde bir hamster (ç.n.: doğal yaşam alanı Avrasya olan, genellikle evde beslenen ya da laboratuvarlarda deney hayvanı olarak da kullanılan, yanaklarında büyükçe kesesi olan, kısa kuyruklu küçük bir çeşit kemirgen) olan

mühürlenmiş bir kutuyu göz önüne getirin. Kutu, temasa geçildiğinde anında öldürücü olan son derece zehirli bir gazla çevrilmiş olsun. Hamsterin ölü mü yoksa diri mi olduğunu belirlemek istiyoruz ve bunu yapabilmemizin tek yolunun da kutuyu açıp içine bakmak olduğu verilmiş olsun. Kuşku yok ki, kutu açılmazdan önce hayvanın durumu ne olursa olsun, açılmış bir kutuya baktığımız her seferde ölü bir hamster bulacağız. Sistemi (burada hamsteri) gözlemleme davranışı sistemi belli bir duruma geçmeye zorladı.

Dirac, atom ölçeğinde bu 'rahatsızlığın' yalnızca pratik olarak değil, ilke olarak işin doğasında var olan bir sınırlama oluşturduğunun üstüne başarak devam eder.

> Genellikle dikkatli olarak gözlemimize eşlik eden 'rahatsızlığı' istenen herhangi bir seviyeye indirebileceğimiz varsayılır. Bu durumda büyük ve küçük kavramları tamamıyla görelidir ve gözlem yöntemimizin yumuşaklığıyla olduğu gibi betimlenen cisimle de ilgili olur. Maddenin temel yapısının herhangi bir kuramı için gerektiğinde olduğu gibi, büyüklüğe mutlak bir anlam vermek için *gözlem gücümüzün hassaslığının ve eşlik eden 'rahatsızlığın' küçüklüğünün bir sınırı - ki bu sınır eşyaların doğasında vardır ve asla gözlemci tarafında kullanılan tekniğin geliştirilmesiyle ya da becerilerin arttırılmasıyla önüne geçilemez* - olduğunu varsaymalıyız. Gözlem altındaki cisim kaçınılmaz kısıtlayıcı 'rahatsızlığın' ihmal edilebildiği bir halde ise, bu durumda cisim mutlak anlamda büyüktür ve ona klasik mekaniği uygulayabiliriz. Öte yanda, kısıtlayıcı 'rahatsızlık' ihmal edilemez ise, bu kez cisim mutlak anlamda küçüktür ve onunla uğraşabilmek için yeni bir kurama gerek vardır.[9]

Burada bize gözlemin kesinliğinin ya da gücünün doğal olarak var olan bir sınırının bulunduğu anlatılıyor. Bir sonraki kısımda bunu nicel olarak Heisenberg belirsizlik ilkesi cinsinden formüle edeceğiz.

Şimdi kuantum mekaniğinin yorumundaki en derin sorunlardan birine - (tek başına her sonuç için belirli, tanımlanabilir bir neden olması anlamında) nedensellik sorununa - geliyoruz. Bu soruya 23. Konu'da (ancak orada çok farklı bir bakış açısından) yine dönecek olsak da, burada okura bu noktada bir kez daha genellikle kuantum mekaniğinin önemli ve gerekli derslerinden biri olarak kabul edileni yalnızca ortaya koyduğumuzu hatırlatırız. Dirac, bu standart akıl yürütme çizgisine bir örnek olarak şu gözlemlerde bulunur:

> Bundan önce yapılan tartışmanın bir sonucu da nedensellikle ilgili fikirlerimizi yeniden gözden geçirmek zorunda olduğumuzdur.

> Nedensellik yalnızca 'rahatsız edilmeden' bırakılan bir sistem için geçerlidir. Bir sistem eğer küçükse, onu ciddi bir 'rahatsızlık' oluşturmaksızın gözlemleyemeyiz ve bu nedenle gözlemlerimizin sonuçları arasında herhangi bir nedensel bağlantı bulmayı bekleyemeyiz. Nedenselliğin 'rahatsız edilmeyen' sistemler için geçerli olduğu hâlâ varsayılacaktır ve 'rahatsız edilmeyen' bir sistemi betimlemek için kurulacak denklemler belirli bir andaki koşullarla daha sonraki bir andaki koşullar arasında nedensel bir bağlantıyı ifade eden diferansiyel denklemler olacaklardır. Bu denklemler klasik mekaniğin denklemleriyle yakın bir benzerlik içinde, ancak gözlemlerin sonuçlarıyla yalnızca dolaylı bir biçimde ilgili olacaklardır. Gözlemlenen sonuçların hesaplanmasında kaçınılmaz bir belirlenemezlik bulunur, kuram genel olarak yalnızca bir gözlem yapıldığı zaman belirli bir sonucun elde edilmesi olasılığının hesaplanabilmesini olanaklı kılar.[10]

Bu, klasik belirlenimci neden ve sonuç etkisi anlamında nedensellik kavramının değiştirilmek zorunda olduğu anlamına gelir.

Planck, *Fizikte Nedensellik Kavramı* adlı kitabında benzer bir noktaya parmak basar.[11] Burada bize, ψ dalga fonksiyonu için içinde bulunulan andaki değere ait bilginin - Schrödinger denkleminin dinamikleri aracılığıyla - ψ'nin gelecekte bir andaki değerini tek bir şekilde belirlemesi anlamında, (ψ) dalga fonksiyonunun kendisi için nedenselliğin ya da matematiksel olarak belirlenimci evrilmenin sürdüğünü anlatır. Öte yandan, ψ için olan bu belirlenimcilik, parçacığın - diyelim - konumunun ve momentumunun bir belirlenimciliğine çevrilmez. Bir başka deyişle, bu konunun başında da vurguladığımız gibi, kuantum mekaniksel bir sistemin durumu ($r(t)$ ve $\mathbf{v}(t)$) klasik durum değişkenleri tarafından değil, ψ tarafından belirtilir. Doğal olarak güçlük, (yaklaşık olarak) doğrudan gözlemlerimiz tarafından elde edilebilir olanların yalnızca klasik durum değişkenleri olmasındadır. ψ'yi doğrudan doğruya gözlemleyemeyiz. Planck, ψ'nin kesin bir bilgisinin bu ($r(t)$ ve $\mathbf{v}(t)$ gibi) ulaşılabilir gözlemlenebilirler için ($P = |\psi|^2$ olasılık dağılımı aracılığıyla) yalnızca istatistiksel (ya da olasılıkçı) öngörüler çıkarttığının üzerinde durur. Bu nedenle, akıl yürütme 'kuantum mekaniği, elektron gibi tek bir parçacığın - diyelim - konumunun ve hızının evrilişinin belirlenimci bir betimlemesine izin vermez' diye devam eder.

20.4 Belirsizlik Bağıntısı

Heisenberg de aynı tutum içinde, kuantum mekaniğinin matematiksel yapısının klasik mekaniğinkinden o kadar farklı olması nedeniyle, kuantum mekaniğini klasik nedensellikle birlikte genel olarak anlaşılan uzay ve zaman kavramları cinsinden yorumlamanın olası olmadığını düşündü. Heisenberg 1927'de (durumu verilen bir ψ dalga fonksiyonu tarafından temsil edilen bir parçacıklar grubunun üyeleri için konum ve momentum gibi) belirli değişken çiftlerinin - kuantum mekaniğinin öngörülerine göre - ikisinin de (bir başka deyişle, birlikte ya da 'eş zamanlı olarak') yüksek ve rastgele bir kesinlik derecesinde belirlenip çıkartılamayacağı yönünde bir matematiksel tez öne sürdü. Bu, grubun belirli bir üyesi üzerinde yapılan tek bir ölçümün sonucuyla ilgili bir ifade değil, grup üzerinde yapılan bir özdeş ölçümler dizisinde elde edilen istatistikle ilgili bir ifadedir. (Born ya da olasılıkçı yorum üzerinde, kuantum mekaniğinin tek tek sonuç öngörüleri değil, yalnızca - çok sayıda gözlemler için ortalama değerler gibi - istatistiksel öngörülerde bulunabildiğini hatırlayınız.) Bunun hemen sonrasında ışığın ve maddenin dalga-parçacık ikiliğinin, atom ve çekirdek sistemleri üzerindeki gözlemlerimizde ortak belirsizlikler meydana getirdiğini akla yatkın hale getirebilmek için basit düşünce deneyleri kullanmayı denedi. Aşağıda böyle bir düşünce deneyinin ele alınışını betimliyoruz.

Ama önce bir grup için bir ölçüm sonuçları $A_j \; (j = 1, 2, 3, \ldots, N)$ kümesini ele alalım. Bu $\{A_j\}$'lerin ortalama değerini her zamanki yolla

$$\langle A \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} A_j \tag{20.7}$$

biçiminde ve $\{A_j^2\}$ karelerinin ortalama değerini de

$$\langle A^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} A_j^2 \tag{20.8}$$

olarak tanımlarız. Bu değerlerin 'yayılışının' ya da 'saçılmasının' tipik bir ölçüsü

$$\Delta A = \sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2} \tag{20.9}$$

diye tanımlanan standart sapma (ç.n.: İngilizcesi 'root mean square deviation', karelerin ortalamasındaki sapmanın karekökü) tarafından verilir. A_j değerlerinde hiçbir dağılma olmamış (bir başka deyişle, A_j'lerin tümü tam olarak aynı değere, diyelim A_0, sahip) olsaydı, bu durumda ΔA sıfır olurdu.

Kısım 19.5'te de belirttiğimiz gibi, farklı gözlemlenebilirlere karşılık gelen kuantum mekaniksel işlemcilerin değişme özelliğine sahip olmaları gerekmez (bir başka deyişle, gözlemlerin yapılış sırası gerçekte gözlemlenen değerlerde farklılıklara yol açabilir). Değişme özelliğine sahip olmayan[12] iki A ve B gözleniri için, bu değişkenlerin bir dizi ölçümünde ΔA ve ΔB'nin eş zamanlı olarak ne kadar küçük olabileceği konusunda kuantum mekaniğinde genel bir sınırlama ya da alt sınır vardır. Bu, Heisenberg belirsizlik bağıntısıdır ve tipik olarak[13]

$$\Delta A \, \Delta B \geq b\hbar \tag{20.10}$$

biçimini alır; burada b (A ve B işlemcilerinin seçimine bağlı) negatif olmayan bir sabit ve $\hbar = h/2\pi$'dir. Bu, (x) konumu ve (p_x) momentumu için

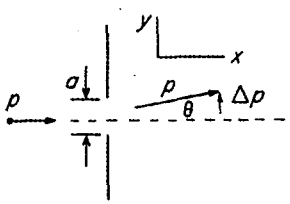
$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \tag{20.11}$$

halini alır. (20.10) ve (20.11) denklemlerindeki belirsizlik bağıntılarının istatistiksel bağıntılar olduğunu bir kere daha vurguluyoruz. Bu, kendisine göre ψ dalga fonksiyonunun grubun herhangi tek bir üyesini değil, birbirine özdeş sistemler grubunu temsil ettiği dalga fonksiyonunun Born yorumu ile tutarlıdır.

Bu noktada (20.11) denkleminin bu değişme özelliğine sahip olmayan gözlenirlerin tek başlarına eş zamanlı ölçümleri üzerine tam olarak ne tür bir sınırlama koyduğu açık değildir. Heisenberg,

1927'deki ünlü 'belirsizlik' makalesinde bu istatistiksel yayılışların ((20.11) denklemindeki Δx ve Δp_x'in) tek tek ölçümler seviyesinde elenemez 'rahatsızlıklar' tarafından oluşturulduğunu öne sürdü. Bu, sonuç olarak ψ'nin gruptaki her bir üye için ayrı ayrı dalga fonksiyonu olduğunu varsayar. Böyle bir yorum Born'un istatistiksel yorumundan farklıdır ve bu yorumun çok ötesine geçer.[14] ψ'yi tek bir sistemin durumu olarak almaya kalkışmak, Kısım 21.4'te Schrödinger'in 'kedisi' paradoksunu ele aldığımızda göstereceğimiz gibi ciddi sorunlara yol açabilir.

Heisenberg'inkine benzer savlar fizik ders kitaplarında tipik olarak verilir.[15] Bu düşünce deneylerinin bir temsilcisini inceleyelim. Şekil 20.9'da gösterildiği gibi, küçük bir parçacığı (diyelim bir elektronu) dar bir yarıktan geçirdiğimizi düşündüğümüzü varsayalım.[16] Parçacığın y-koordinatındaki belirsizlik bu durumda $\Delta y = a$ olur. Öte yandan, parçacık kendisine eşlik eden bir dalga



Şekil 20.9 Ölçüm üzerine oluşan ortak konum-momentum belirsizlikleri

özelliğine de sahip olduğundan, bu dalga kırınıma uğrar ve ilk minimum (tıpkı bir ışık dalgasının bir yarıktan geçerken optik kırınıma uğramasında olduğu gibi) $\sin\theta = \lambda/a$'da meydana gelir. Bu, elektronu belirli bir konumda bulma olasılığı kırınıma uğramış dalga fonksiyonunun karesiyle orantılı olduğundan, parçacık için olasılık dağılımının θ yarı-açısının V şeklindeki bölgeye sınırlandırılması anlamına gelir. (20.1) denkleminde verilen de Broglie bağlantısı momentumu $p = h/\lambda$ diye verir. Şekil 20.9'dan parçacığın momentumunun y-bileşenindeki belirsizliğin - (20.1) denkleminin yardımıyla - $\Delta p_y \approx p \sin\theta = p\,\lambda/a$ şeklinde ifade edilebileceğini görürüz, böylece (20.11) denklemiyle tutarlı bir şekilde $\Delta p_y\, \Delta y \cong h$ olur. Bu ilişkide Δp_y ve Δy ölçüm süreci tarafından oluşturulan

belirsizliklerin büyüklüklerini gösterir. Doğal olarak bu genel bir ispat değil, yalnızca kaba bir akıl yürütmedir.

$\lambda/\ell << 1$ olduğunda, ki burada λ bir cismin de Broglie dalga boyu ve ℓ de cismin içinde bulunduğu çevrenin tipik bir boyudur, artık (kırınım etkileri ihmal edilebileceğinden) klasik yasaların bölgesindeyizdir ve Newton mekaniği geçerli olur. Planck sabiti $h = 6{,}67 \times 10^{-34}$ Js'dir, böylece günlük olguların doğası ortaya kuantum mekaniksel olarak çıkmaz. Öte yandan, eğer $h = 1$ Js olmuş olsaydı, yaşam çok daha farklı olurdu. Örneğin, kütlesi 10^{-3} kg olan bir cismi 10^{-2} m'lik bir doğru parçasına sınırlandırmış olsaydık, izin verilen minimum enerjisi (20.3) denkleminde $n = 1$ alınarak bulunabilirdi ve bu da yaklaşık $v \approx 50$ km/s'lik bir hıza karşılık gelirdi. Böyle dalgalanmalar güçlü olgular olurdu ve dünyayı algılayışımızı doğrudan doğruya etkilerdi.

Heisenberg belirsizlik bağıntısının bir başka biçimi de

$$\Delta E \, \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \tag{20.12}$$

enerjinin çözünürlüğünü gözlemin meydana geldiği zaman süresine bağlar. Örnek olarak, eğer bir parçacık yalnızca çok kısa bir süre yaşarsa, bu durumda enerjisi (ya da kütlesi) büyük bir kesinlikle bilinemez.

Heisenberg'in *belirsizlik ilkesi* belirsizlik bağıntılarının bu (ve diğer) biçimlerinin tümünü birden toplu olarak kapsar. Bunlar, bir ölçümler dizisinde kendilerini kullanarak belirli gözlenir çiftlerini belirleyebileceğimiz doğal olarak var olan ve azaltılamaz kesinsizliğin biçimsel ifadeleridir.

20.5 Foton Girişimi – Çift Yarık

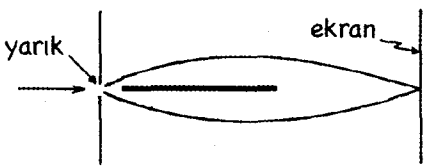
Şimdi bir gözlemin mikroskobik sistemler üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak incelemek için Dirac'ın metnine dönüyoruz. Bu tartışmanın aracı temel olarak çift yarıklı girişim deneyidir.

> Kuantum mekaniğinin fotonların girişimi için sağladığı betimlemeyi ele alacağız. Girişimi gösteren açık bir deney alalım. Bir çeşit girişimölçerden geçirilen bir ışık ışınımız olduğunu varsayın, böylece ışık ışını iki bileşene ayrışmış olur ve iki bileşen de daha sonra

birbirleriyle girişime uğratılır. Yalnızca tek bir foton içeren bir gelen ışın alabilir ve deney aracından geçerken bu ışına ne olacağını araştırabiliriz. Bu bize ışığın dalga ve parçacık kuramları arasındaki çelişkinin zorluğunu en kesin biçimiyle sunacaktır.

. . .

Şimdi gelen ışının ayrıştığı iki bileşenin her birine de kısmen dağılan fotonu betimleyelim. Bu durumda foton - diyebileceğimiz gibi - iki bileşene eşlik eden iki ötelenme durumunun üst üste gelme tarafından belirlenen bir ötelenme durumundadır... Bir fotonun belirli bir ötelenme durumunda olması için yalnızca tek bir ışık ışını tarafından eşlik ediliyor olması gerekmez, ancak bir özgün ışınının ayrışmış olduğu bileşenler olan iki ya da daha fazla sayıda ışık ışını tarafından eşlik ediliyor olabilir. Kesin matematiksel kuramda her ötelenme durumuna bildik dalga optiğinin dalga fonksiyonlarından biri eşlik eder, eşlik eden dalga fonksiyonu ya tek bir ışını ya da bir özgün ışının ayrışmış olduğu iki ya da daha fazla sayıda ışını betimleyebilir. Bu nedenle benzer bir şekilde ötelenme durumlarının dalga fonksiyonlarıyla üst üste gelmesi alınabilir.[17]



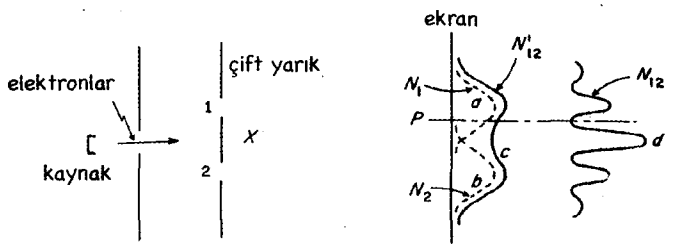
Şekil 20.10 Ayrıştırılmış bir foton ışını için bir girişim deneyi

Burada Dirac'ın aklında olan durum türü, girişim etkilerinin Şekil 20.10'da belirtildiği gibi önce ayrıştırılan ve sonra da tekrar birleştirilen bir foton ışını tarafından oluşturulduğu bir durumdur.[18] Bununla birlikte, - deneylerin de öyle olduğunu gösterdiği gibi - yarıktan her seferinde yalnızca tek bir fotonun geçtiğinin farkında olmak çok önemlidir. Örnek olarak, bir çift yarığı aydınlatmak için çok zayıf bir ışık kaynağı kullanılabilir ve sonra da bu tek fotonların ekrana ulaşırken algılanmaları için bir ışıl çoğaltıcı (ç.n.: İngilizcesi 'photomultiplier') tüp kullanılabilir. Gözlemlenen fotonların dağılımı ekranda belirli bir yerde her seferinde yalnızca tek bir foton algılanmasına karşın, aşağıda daha ayrıntılı olarak ele aldığımız gibi hâlâ optikten beklenen çift yarık için kırınım desenine uyar.

Dirac şöyle devam eder:

> Şimdi bileşenlerden birindeki enerjiyi belirlediğimiz zaman ne olacağını ele alalım. Bu tür bir belirlemenin sonucu ya fotonun bütünü olmalı ya da hiçbir şey olmamalıdır. Bu nedenle foton durumunu aniden kısmen bir ışında ve kısmen de ötekinde olma durumundan tamamıyla bir ışında olma durumuna değiştirmelidir. Bu ani değişiklik gözlemin fotonun ötelenme durumunda mutlaka oluşturduğu rahatsızlık yüzündendir. Fotonun iki ışından hangisinde bulunacağını öngörmek olası değildir. Fotonun iki ışın üzerinde olan daha önceki dağılımından yalnızca her iki sonucun olasılığı hesaplanabilir.[19]

Burada bize bu ayrıştırılmış ışınların biri üzerinde yapılan bir enerji gözleminin fotonu ışınlardan (ya da izlenen yollardan) ya birine ya da ötekine zorladığı anlatılıyor. Kuram, fotonun hangi ışında görüneceğine yalnızca bir olasılık atayabilir (bir başka deyişle, istatistiksel bir yoruma sahibiz). Bu kuantum mekaniksel bir sistemin (ψ) durumunda gözlem ya da ölçüm sonucu olan ani ve sürekli olmayan değişim, standart yorumun temel ve çok uzun süredir var olan kavramsal zorluklarının bir örneğidir. Buna 'ölçüm problemi' adı verilir ve bunu Kısım 21.3'te ayrıca ele alacağız.



Şekil 20.11 Çift yarık için girişim desenleri

Dirac'ın yukarıda alıntı yapılan bölümlerde aklında olan durum tipine somut bir örnek olarak, Şekil 20.11'de gösterildiği gibi yapabileceğimiz aşağıdaki deneyler dizisini göz önüne aldığımızı varsayın.[20] Şeklin sol tarafında gösterilen açıklıktan bir parçacıklar demeti yollayalım. Bu açıklıktan geçtikten sonra, ikinci levhadaki ya 1. ya da 2. yarıktan geçerler. Son olarak, sağ tarafta yer alan 'ekranın' üzerinde çeşitli konumlara ulaşan parçacıkların (diyelim, elektronların) sayısını sayalım ya da bulalım. Klasik parçacık fiziğini

temel alarak bekleneceği gibi, ekrana ulaşmayı başarabilen parçacıkların neredeyse tümü, ortadaki levhada ya 1. ya da 2. yarığın doğrudan doğruya tam karşısına denk gelen noktalara çarpar. Aslında, 2. yarığın üstünü kaparsak, bu durumda N_1 diye işaretlenmiş olan kesikli dağılım eğrisini elde ederiz. Benzer bir biçimde, eğer 1. yarığı kaparsak, N_2'yi elde ederiz, ama hem 1. hem de 2. yarık açık olursa, N'_{12}'yi buluruz. Bunun yanında, N'_{12}'nin parçacıklar için klasik olarak bekleneceği gibi yalnızca N_1 ve N_2 eğrilerinin toplamı ($N'_{12} = N_1 + N_2$) olduğu ortaya çıkar. Hiç girişim etkisi yoktur.

Bundan sonra deneyimizi tekrar edelim, ancak bu kez parçacıklar yerine dalgalar kullanalım. İki yarık da açık olduğunda, bu durumda - tıpkı klasik optikten bekleneceği gibi - çift yarık için (biraz sonra açıklığa kavuşacak nedenlerden ötürü şekilde N_{12} ile tanımlanan) I_{12} girişim desenini gözlemleriz. 2. yarık kapatıldığında, tek bir yarık için (şekilde N_1 ile tanımlanan eğriyle aynı şekilde olan) I_1 kırınım desenini ve 1. yarık kapatıldığında da I_2 desenini elde ederiz. Klasik parçacıklar için olan durumun tersine, bu şiddetlerin (yeğinliklerin) basit bir şekilde toplanmadığına dikkat ediniz. Daha doğrusu, $I_{12} \neq I_1 + I_2$ ki böylece dalga olgularında tipik olarak görüldüğü gibi girişim etkileri vardır. I_1 ve I_2 şiddetleri basit herhangi bir biçimde I_{12}'yi oluşturmak için toplanmadıkları halde, her yarık tarafından oluşturulan dalga 'düzensizliklerinin' genlikleri üst üste gelme ilkesine $A_{12} = A_1 + A_2$ uyar, burada ışığın ya da dalga olgusunun şiddeti (yeğinliği) $I_{12} \propto |A_{12}|^2$ olarak verilir. Bu iki deneyi karşılaştırdığımızda, I_1 ile N_1'in - I_2 ile N_2 için de olduğu gibi - birbirlerine benzediğini, ancak I_{12} (ya da N_{12}) ile N'_{12}'nin çok farklı olduklarını görürüz.

Şimdi bir sistemin kuantum mekaniksel özelliklerini ortaya çıkaracak bir durumu ele alalım. Yine Şekil 20.11'deki düzenlemeyi göz önüne alalım, ancak bu kez yarıklardan oluşan düzenlemenin üzerine gelen bir elektron ışını ya da demeti kullanalım. 'Ekranın' olduğu yerde herhangi bir elektronun ekrandaki belli bir yere ulaşıp ulaşmadığını görmek için yukarı ya da aşağıya hareket ettirebileceğimiz bir algılayıcı (detektör) olsun. Çift yarıktan oluşan deney düzeneğinden birbiri ardı sıra elektronlar yollayalım ve ekranda çeşitli konumlara ulaşan elektronların göreli sayısını

sayalım. Deneysel olarak bulunacak olan N_{12} dağılım eğrisinin çift yarık için olan girişim desenine uyacağıdır. Ekrandaki her konumda her zaman ya bütün bir elektron ya da hiçbir şey algılanır ve düzenekten yollanan her elektron ekranda bir ve yalnızca tek bir noktada görünür. Elektronlar bu anlamda parçacıklar gibi davranır. Ancak, ekranda belirli bir yerde bir elektron algılanması olasılığını belirten eğri bir dalga için girişim desenine uyar. Bu nedenle, burada elektronun bir dalga niteliği de vardır. Bundan sonra, eğer 2. yarık kapatılırsa, bu durumda algılanan elektronların dağılımı N_1 (ya da eğer 1. yarık kapatılmışsa N_2) halini alır. Bir kez daha, tıpkı dalga girişimi durumunda olduğu gibi $N_{12} \neq N_1 + N_2$ olduğuna dikkat ediniz. Elektron algılayıcısı Şekil 20.11'deki P noktasına yerleştirildiğinde, bu durumda her iki yarık da açıkken burada neredeyse asla bir elektronun bulunmaması, oysa 2. yarığın üzeri kapalıyken burada birçok elektronun algılanması da tuhaf görünür.

Elektron 'gerçekten' bir dalga mıdır yoksa bir parçacık mıdır? Belirli bir elektronun çift yarık düzeneğinden geçerken hangi yarıktan gittiğini ortaya çıkarmaya çalışalım. Aygıt (ç.n.: Şekilde X ile gösterilen noktaya yerleştirilen şiddeti ayarlanabilen ışık kaynağı kastediliyor) çalıştırılmazdan önce, her iki yarık da açıkken Şekil 20.11'deki d eğrisi algılanır. Işık açıldığında (ç.n.: X'deki aygıt çalıştırıldığında) - ki böylece her elektronu çift yarık düzeneğinden geçerken görürüz - desen şekilde $N'_{12} = N_1 + N_2$ olan c eğrisine döner. Bir başka deyişle, elektronlar bir kez parçacıklar gibi davranmaya 'zorlandıklarında' ve yarıklardan kesin olarak ya birinden ya da ötekinden geçtiklerinde, olasılık eğrisi parçacıklar için olan halini alır. Şu halde eğer X'deki ışığın şiddetini azaltırsak - ki böylece çift yarık düzeneğinden geçen elektronların bazılarını kaçırmaya başlarız - algılama deseni değişmeye başlar. Işığın şiddeti sıfır olana dek azaltılmaya devam edilince, eğri sürekli bir biçimde c'den ilk hali olan d'ye doğru değişir.[21]

Belirli bir elektronun ekranda nereye düşeceğini öngörmenin bir yolu yoktur. Kuantum mekaniksel olarak yalnızca ekranda belirli bir konumda bir elektronun algılanması olasılığını verebiliriz. Bunun genellikle tek bir elektronun - kaynağı terk ederken yalnızca başlangıç koşulları verildiğinde - yörüngesini belirleyecek bir hareket yasasının bulunmadığını gerektirdiği kabul edilir. (Bu soruna 23. Konu'da tekrar geri döneceğiz.) Her durumda, elektronun yarıklardan birinden geçerken gözlemlenip gözlemlenmediği

ekranda ortaya çıkan girişim desenini etkiler. Bu, kuantum mekaniğinin standart yorumunun 'atom fiziğinde başlangıç koşullarından olayların uzayda belirli bir noktada, gelecekte alacakları kesin konumlarının öngörülebilmesini sağlayacak yasaların olmadığı' biçimindeki genel sonucunun bir örneğidir. Mutlak bir öngörebilme gücü yoktur.

Bundan sonraki birkaç konuda fiziksel mikro-dünyaya kuantum mekaniğinin bu standart - ya da Kopenhag - yorumu tarafından sağlanan bakış açısından daha tam ve daha anlaşılabilir bir bakış açısına sahip olmanın olası olup olamayacağı sorusunu ele alacağız.

Yararlı Kaynaklar

Jim Baggott'un *Kuantum Kuramının Anlamı* adlı kitabının 2. Konu'su, temel kuantum mekaniğinde kullanılan matematiğin bir kısmının açık olmayan fiziksel anlamlarının okumaya oldukça değer, orta zorluk derecesinde bir açıklamasını sunar. Sandro Petruccioli'nin *Atomlar, Eğretilemeler (Metaforlar) ve Paradokslar* adlı kitabı Bohr'un yeni fiziği kavramsal olarak geliştirmesini çözümleyerek yeniden kurar. Richard Feynman'ın *Fiziksel Yasanın Karakteri* 'nin 6. Konu'su, kuantum mekaniksel çift yarık deneyinin şimdi bir klasik haline gelmiş bir tartışmasını içerir.

21
Kuantum Mekaniği Tam mıdır?

Bize kuantum mekaniği tarafından yönetilen mikrosistemlerin açık bir biçimde tuhaf özellikleri (bir önceki konuda çift yarık deneyini ele alışımızda olduğu gibi) tanıtıldığında, doğal olarak acaba başka bir kuramın bulunmasının ya da en azından bize denklemlerle birlikte anlatılacak ve daha anlamlı gelecek başka bir öykünün olası olup olamayacağını sorgularız. Temel fiziksel süreçlere klasik temelli, günlük genel kanılarımızla daha fazla uyuma sahip bir bakış açısı ya da bir kuram arayabiliriz. Bu tipik olarak atomik süreçlerin dalga denklemiyle sağlanandan (bir başka deyişle, bir önceki konudaki Kopenhag yorumuyla verilenden) daha ayrıntılı bir betimlemesinin var olma olasılığı sorusu biçimini alır. Bu konuda kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun temel yorumlanış problemlerinden bazılarını ele alacağız. Sonra, bundan sonraki iki konuda kuantum mekaniğinin bu tür herhangi bir tamamlaması üzerine konulan katı, genel sınırlamalara ve kuantum mekaniğinin özel bir genişlemesine bakacağız. Ama burada önce, kuantum kuramında nedenselliğin konumu üzerine ortaya çıkan savaşımla başlıyoruz.

21.1 Kuantum Mekaniğinin Tamlığı

Heisenberg belirsizlik ilkesi (Kısım 20.4) ve mutlak bir öngörebilme gücünden yoksunluk kuantum mekaniğinin doğasında var olan özellikler olsa da, fizik için ilke olarak tamamıyla belirlenimci bir yapıyı korumak için girişimlerde bulunulmuştu. Klasik olarak bile, makroskopik (büyük ölçekli) bir gaz örneğinde o kadar çok sayıda molekül bulunur ki, tüm bu

moleküllerin gelecekte bulunacakları konumları Newton'un hareket yasalarından öngörmek bir uygulama sorunu olarak ümitsizdir. Yine de, temel olan yapı tamamıyla belirlenimci bir yapıdır. (12. Konu'da klasik belirlenimci kaos için buna benzer bir durum görmüştük.) Kuantum mekaniğinin standart yorumuna göre, olaylar çok farklıdır. İlke olarak, bir elektronun gelecekte izleyeceği yörüngeyi tam olarak öngörmek için belirlenimci hiçbir tasarı yoktur. Yine de, kuantum mekaniğiyle aynı öngörülerde bulunacak ya da sonuçları verecek bir çeşit tamamıyla belirlenimci bir kuramın kurulabilip kurulamayacağı sorusu doğal olarak ortaya çıkar. Parçacıkların şimdiye dek keşfedilmemiş (genellikle gizli değişkenler diye anılan) ve değerleri bu parçacıkların gelecekteki davranışlarını belirleyen özellikleri olabilir mi? Gözlemlediğimiz belirlenemezlik basit bir biçimde bu tür gizli değişkenlerin değerleri için bilgisizliğimizin bir sonucu olabilir mi? (Böyle bir kurama 23. Konu'da geri döneceğiz.)

Bu soru üzerine çalışan iki farklı düşünce ekolü genellikle Bohr'a ve Einstein'a giden kökenleriyle tanımlanırlar. Bohr, kuantum mekaniğinin tarihinin başlarında olgularla gözlemci arasında tam bir ayrımın olamayacağına olan inancını belirtti. Uluslararası Fizik Kurultayı 1927'de İtalya'da (ç.n.: Milano yakınlarında) Como şehrinde, bu şehrin en ünlü bilim adamı olan Alessandro Volta'nın (1745–1827) ölümünden tam yüz yıl sonra yapıldı. Bohr tamamlayıcılık (ç.n.: İngilizcesi 'complementarity') üzerine olan düşüncelerini tam olarak ilk kez orada sundu ve sonrasında kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumu olarak bilinen fikirleri açık bir biçimde orada ortaya koydu. (Daha sonra konunun içinde terimin anlamını gösteren daha başka örnekler verecek olsak da, burada 'tamamlayıcılık' ile Bohr'un fiziksel bir sistemin tam bir betimlemesi için karşılıklı olarak (fiziksel açıdan eş zamanlı olarak gerçeklenemez anlamında) dışarlayan (ç.n.: ya da aynı anda gözlemlenemeyen) özelliklere (örnek olarak dalga-parçacık ya da konum-hız gibi) gerek olduğu yönündeki öğretisini anlatmak istiyoruz.) Bu yorumda, fiziksel bir sürecin uzay-zaman betimlemesi katı bir neden-sonuç betimlemesini dışarlar (içine almaz) ve böyle bir betimlemeyi tamamlayıcıdır.

> Bir yanda, alışıldığı şekilde anlaşıldığı haliyle fiziksel bir sistemin durumunun tanımı tüm dışsal rahatsızlıkların elendiğini öne sürer. Ancak bu durumda, kuantum aksiyomuna göre, herhangi bir gözlem olanaksız olacaktır ve hepsinden öte uzay ve zaman kavramları hali hazırdaki anlamlarını kaybeder. Öte taraftan, eğer gözlemi olası kılmak için – sisteme ait olmayan – bazı uygun ölçüm etmenleri ile belirli etkileşimlere izin verirsek, sistemin durumunun anlam belirsizliği içermeyen bir tanımı doğal olarak artık olası değildir ve ortada sözcüğün alışılmış anlamında bir nedensellik sorusu da

> kalamaz. Bu nedenle, kuantum kuramının doğasının ta kendisi bizi, – birliktelikleri klasik kuramları tanımlayan – uzay-zaman eşgüdümü ile nedensellik hakkını betimlemenin birbirini tamamlayıcı ama dışarlayan – sırasıyla, gözlemin ve tanımın düşüncede mükemmel hale getirilişinin simgesi olan – özellikleri olarak ele almaya zorlar.[1]

Bohr, 'kuantum aksiyomu' ile bir sistem bir diğeriyle etkileşirken neden olunan indirgenemez, elenemez ve kontrol edilemez minimum (ama mutlaka sıfırdan farklı) rahatsızlığı anlatmak istemektedir. VII. Bölüm'ün (*Kuantum dünyası ve kuantum mekaniğinin tamlığı*) başındaki ikinci alıntıda Bohr'un bunu nasıl dile getirdiğini görmüştük. Gözlemciyle olgular arasındaki ilişkinin temel önemi Bohr tarafından daha da ayrıntılandırılmıştı. Günümüzde bir ölçümün sonucunun onu gerçekleştirmek için kullanılan araçlara bağlı olmasından *bağlamsallık* (ç.n.: İngilizcesi 'contextuality') diye söz ediyoruz.

'Gerçekten bir elektronun eş zamanlı x ve p_x değerleri nedir?' ya da 'Şekil 20.11'de gösterilen türde bir deneysel düzenlemede elektron kaynaktan algılayıcıya giderken aslında hangi yarıktan geçti?' gibi sorular sorduğumuzda ortaya zorlukların ve paradoksların çıktığı görülür. 20. Konu'da belirttiğimiz gibi, bu son soruyu yanıtlamaya çalıştığımızda deneysel sonuçlar yüzünden her zaman düş kırıklığına uğrarız. Kuantum mekaniğinin Kopenhag ekolü bize bu tür soruları asla yanıtlayamayacağımızı söyler. Yine de, verilen ilk tepki, yanıtın içinde bulunduğumuz anda (ya da belki de sonsuza dek) bu yanıtı bulmaya gücümüz yetmese de var olmak zorunda olduğudur. 'İlke olarak bir elektronun *ya* momentumunu *ya da* konumunu bilebiliriz' biçimindeki bir demeçten hoşnut olmayız; ya da görünüşe göre gün gibi ortada olan 'elektron ya birinci yarıktan ya da ikinci yarıktan geçmek zorundaydı' önermesi işlevsel olarak anlamsızdır. Elektronu Şekil 20.11'deki kaynağı terk ederken ve sonrasında sağ taraftaki ekrana ulaşırken gözlemleyebiliriz, ancak bu iki gözlem arasındaki konumunda ya da davranışında onu orada gözlemlemek için deneysel düzenlemeyi değiştirmedikçe – ki bu durumda deneyin sonucunu da değiştirmiş oluruz – hiçbir gerçeklik belirleyemeyiz. Bu, Kopenhag yorumunun bize anlattığıdır. Bu bakış açısını açıklarken Werner Heisenberg şu gözlemlerde bulunur:

> Klasik fizikte bilim ... kendimize hiçbir başvuruda bulunmadan ... dünyayı betimleyebiliriz ... inancından başladı... Başarısı genel bir dünyanın nesnel bir betimlemesi ülküsüne yol açtı... Kuantum kuramının Kopenhag yorumu hâlâ bu ülküye uymakta mıdır? Belki de kuantum kuramının bu ülküye mümkün olabildiğince karşılık geldiği söylenebilir.... Dünyanın

> 'nesne' ve dünyanın geri kalanı diye ayrılmasından ve en azından dünyanın geri kalanı için betimlememizde klasik kavramları kullandığımız gerçeğinden başlar. Bu ayırım keyfidir ve tarihsel olarak bilimsel yöntemimizin kesin bir sonucudur; klasik kavramların kullanılması sonuç olarak insanoğlunun genel düşünme yolunun bir sonucudur.[2]

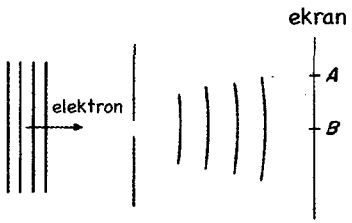
Albert Einstein kuantum mekaniğini son derece başarılı bir geçici kuramdan daha fazla bir şey olarak kabul etmeye istekli değildi; çünkü nesnel bir fiziksel gerçekliğin, herhangi biri tarafından gözlenip gözlenmese ya da onunla etkileşip etkileşmese de, var olduğuna inanıyordu. Einstein, 1926 yılında ömrü boyunca arkadaşı olmuş ve kuantum mekaniği üzerine kendisinden çok farklı düşüncelere sahip olan Born'a yazdığı bir mektupta, kuantum kuramındaki bu temel olarak rastlantısal öğeye karşı duygularını şöyle dile getirdi:

> Kuantum mekaniği kesinlikle görkemli. Ancak içimden bir ses bana daha gerçek şey olmadığını söylüyor. Kuram çok şey söylüyor, ancak aslında bizi 'eskisinin' gizemine daha fazla yaklaştırmıyor. Ben, her ne olursa olsun O'*nun* zarla oynamadığına eminim.[3]

21.2 Einstein ve Bohr Karşı Karşıya

Bohr ve Einstein bu sorunla ilgili olarak hem Beşinci (1927) hem de Altıncı (1930) Solvay Toplantısı'nda karşı karşıya geldiler. Einstein bu toplantılar sırasında kuantum mekaniğinin kendi içinde tutarsızlıklar içerdiğini göstermeye çalıştı. 1927'deki toplantının genel tartışma oturumunun başlangıç kısmında, Şekil 21.1'de gösterildiği gibi küçük bir delikten geçen ve bir ekran üzerinde algılanan bir elektronu göz önüne aldı. Herhangi bir gözlem yapılmadan önce, kuantum mekaniğine göre ekranın üzerindeki neredeyse her noktada bir elektronun algılanması için sıfırdan farklı bir olasılık vardır. Öte yandan, elektron - diyelim - A noktasında algılandığı zaman, bu durumda elektronu bir başka B noktasında bulmanın olasılığı mutlak olarak sıfır olacaktır. Einstein, elektronun gözlemden önce ekranın kayda değer bir kısmı üzerinde neredeyse her yerde bulunduğu, ancak B'de olma olasılığının A'da yapılan bir gözlemden anında etkilendiği söylenecek olursa, bu durumda bunun (bir etkinin birbirlerinden uzamsal olarak ayrılmış iki noktanın arasında anında iletilmemesi gerektiğinden) göreliliğin genellikle düşünülemez olarak ilan ettiği kabul edilen bir uzaklıkta etkiye gereksineceği şeklinde akıl yürüttü. Öte taraftan, elektronun yarıktan geçerek ekrandaki A noktasına ilerlediği

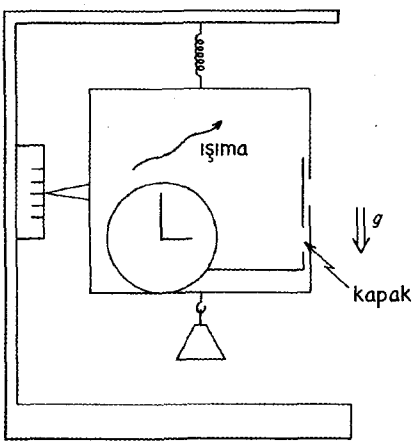
gerçek bir yörünge gerçekten de varsa ve eğer kuantum mekaniği bu bilgiyi ortaya çıkaramıyorsa, bu durumda kuantum mekaniğinin eksik bir kuram olacağını öne sürdü. Kuantum mekaniğinin eksik olduğu yönündeki bu tema, Einstein'ın ömrü boyunca sık sık geri döndüğü bir konuydu. Bohr'un, Born'un, Dirac'ın, Heisenberg'in ve kuantum kuramcılarının neredeyse tamamının düşüncesine göre, Einstein'ın tezi işin özünü gözden kaçırıyordu, çünkü onların görüşüne göre dalga fonksiyonu uzay-zaman zemininde yayılan olağan bir dalgaya benzer herhangi bir şeyi temsil etmiyordu. Bohr, Einstein ve diğer katılımcılar arasındaki tartışmanın akışı içerisinde, 20. Konu'da incelediğimize benzer bir çift yarıklı deney düzenlemesi salona getirildi. Bu tamlık sorunu üzerine olan tartışmanın bütünü, her iki taraf da mevzilerini değiştirmeden kaldığından ve karşı yöndeki güçlü tezlerle yerinden edilemediğinden, aslında taraflar arasında beraberlikle sonuçlanmıştı.



Şekil 21.1 Einstein'ın dalga fonksiyonunun kırınımı için düşünce deneyi

1927'deki aynı toplantıda Einstein, Heisenberg'in belirsizlik bağıntılarından kaçınılabileceğini kanıtlayacak bir düşünce deneyi kurmayı da denedi. Bununla birlikte, Bohr akıl yürütmede bir kusur bulmayı başardı ve belirsizlik ilkesinin geçerliliğini korudu. Aynı türde bir tartışma 1930'daki bir sonraki Solvay Toplantısı'nda kaldığı yerden devam etti. Einstein bu kez belirsizlik ilişkisinin enerji-zaman için olan biçimini ((20.12) denklemi) çığneyecek zekice bir düşünce deneyi hazırlamıştı. Temel olarak önerdiği, Şekil 21.2'de gösterildiği gibi, düşük yoğunlukta elektromanyetik ışıma ile doldurulmuş bir kutu almak ve bu kutuyu içindeki bir saat tarafından çalıştırılacak (ç.n.: kameraların objektif kapağı gibi) bir kapakla donatmaktı. Saat kapağı çok hızlı bir biçimde Δt kadar bir sürede açıp kapayacak şekilde ayarlanacaktı, böylece yalnızca tek bir foton kutudan dışarı kaçabilecekti. Bu Δt zaman aralığı istendiği kadar kesin bir şekilde ayarlanabilecekti. $E = mc^2$ olduğundan, ışımayla dolu kutunun ağırlığının

foton dışarı çıkmazdan önce ve sonra kolayca yapılacak çok hassas ölçümleri, dışarı atılan fotonun enerjisi olacak olan ΔE enerji farkını belirleyecekti. Δt ve ΔE 'nin her biri birbirlerinden bağımsız bir şekilde herhangi bir kesinlik derecesinde belirlenebileceğinden, ΔE ve Δt 'nin aynı andaki değerleri Heisenberg'in belirsizlik bağıntısıyla çelişki içinde $\Delta E\, \Delta t < \hbar/2$ olacak biçimde çok küçük hale getirilebilirdi. Bohr, bu meydan okumaya etkili bir yanıt arayarak uykusuz bir gece geçirdi ve sonunda da böyle bir yanıt buldu. Ortadaki paradoksun çözümü Einstein'ın kendi genel görelilik kuramında yatıyordu; bu kurama göre foton kutudan kaçtığında kütleçekim alanında $\Delta m = \Delta E/c^2$ kütlesinin kaybıyla oluşacak olan değişiklik, saatin zamanı tutma hızını etkiler.[4] Bohr, bu etkinin belirsizlik ilişkisini tam olarak eski yerine koyduğunu nicel olarak gösterebilmişti. Einstein, o andan sonra kuantum mekaniğinin tutarsız olduğunu bir daha öne sürmedi, ancak tam olmama sorusuna odaklandı.



Şekil 21.2 Einstein'ın belirsizlik ilkesinden kaçınma denemesi

21.3 Ölçme Problemi

Standart kuantum mekaniğinin dalga fonksiyonunun çöküşünün ya da ölçüm probleminin ne olduğunu tam olarak belirtebilmek için, kuantum kuramının biçimsel yapısında kullanılan birkaç terimin tanımıyla başlıyoruz. Fiziksel gözlenirleri temsil eden A işlemcileri vardır. Bu işlemcilerin ψ_j *özdurum*ları (ç.n.: İngilizcesi 'eigenstate'),

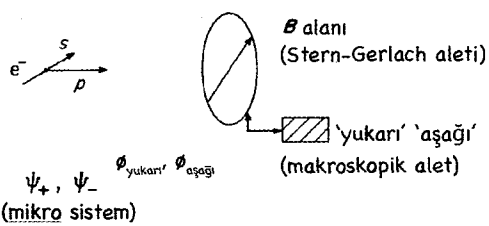
gözlenir izin verilen λ_j özdeğerlerinden biriyken ele alınan fiziksel sistemin durumlarıdır (ya da dalga fonksiyonlarıdır). Bu A işlemcilerinin,[5] ψ_j özdurumlarının ve λ_j özdeğerlerinin arasında[6]

$$A\psi_j = \lambda_j \psi_j \tag{21.1}$$

ilişkisi vardır. Şimdi bu biçimsel mekanizmayı bir ölçümü kuantum mekaniksel olarak betimlemekte kullanacağız.

Şekil 21.3'te belirtildiği gibi, biraz ayrıntılı bir şekilde göz önüne alacağımız özel ölçüm süreci, bir elektronun spinini (diyelim, bir Stern-Gerlach aletinde) ölçmek için kullanılan bir B manyetik alanını içerir.[7] Tipik bir ölçümde olduğu gibi bunda da ana fikir, bir mikrosistemi (burada, elektronu) bir makrosistemle (burada, deney aletiyle) eşleştirmek ve deney düzeneğini iki sistem etkileştikten sonra makrosistemin durumunu inceleyerek mikrosistemin bir değişkeninin (burada, bir spin bileşeninin) değeri hakkında bir şey öğrenebilecek şekilde düzenlemektir. Genellikle bir deney aletinin 'çıktısından' ya da 'okumasından' söz ederiz. Eğer ölçüm güvenilir olacaksa, makrosistemin son durumunun mikrosistemin son durumuyla karşılıklı olarak güçlü bir biçimde (ideal olarak %100) ilişkili olmasını isteriz. Eğer mikrosistem üzerindeki ölçüm mikrosistemin durumunu 'rahatsız etmemesi' anlamında 'sadık' olursa da güzel olur. Doğal olarak, makrosistemin durumunun etkileşim tarafından etkilenmesini isteriz. Şekil 21.3'te olduğu gibi, ψ'yi mikrosistemin (burada, elektronun) ve ϕ'yi de makrosistemin dalga fonksiyonunu göstermekte kullanıyoruz. Birbirleriyle etkileşmeyen iki alt sistem için, sistemin bütününün toplam dalga fonksiyonu[8]

$$\Psi(\text{toplam dalga fonksiyonu}) = \psi\phi \tag{21.2}$$



Şekil 21.3 Ölçüm sürecinin bir resmi

çarpımı ile gösterilir. Ele alınan bu durumda, (burada B manyetik alanının doğrultusunda diye aldığımız) bir eksen boyunca yukarı spine ve aşağı spine (ç.n.: İngilizceleri 'spin up' ve 'spin down') karşılık gelen sırasıyla ψ_+ ve ψ_- diye iki tane bağımsız dalga fonksiyonu vardır.[9] Benzer bir biçimde, $\phi_{\text{yukarı}}$ ve $\phi_{\text{aşağı}}$ da deney aletinin sırasıyla yukarı spinin (diyelim, deney aletinde +1 okunmasının) ya da aşağı spinin (-1) belirttiği durumlarda olmasına karşılık gelen dalga fonksiyonlarını temsil ederler. ϕ_0 ile deney aletinin başlangıç durumunu anlatmak istiyoruz (bir başka deyişle, deney aletinde bir şey okunmuyor). Başlamak için, etkileşimden önce elektronun (B alanı ile tanımlanan, deney aletinin dikey ekseni boyunca) yukarı spine sahip olduğunu bildiğimizi varsayalım. Bu durumda, ($t = 0$ anında) mikro ve makrosistemler arasındaki herhangi bir etkileşimden önce bütün sistem için dalga fonksiyonu basit bir biçimde

$$\Psi(t=0) = \psi_+ \phi_0 \tag{21.3}$$

olur. $\Psi(t)$ durum vektörünün zamanda evrilişini Schrödinger denklemi belirler.[10] Özellikle, elektron deney aletinin manyetik alanının içerisinden geçerken, mikrosistemle makrosistem arasında bir etkileşim ya da eşleşme gerçekleşir. Bu eğer iyi bir ölçüm aletiyse, (elektron deney aletinin manyetik alanını terk ettikten sonra) $\Psi(t)$ sürekli bir biçimde son duruma evrilir:

$$\Psi(t) \xrightarrow[t \to +\infty]{} \Psi_{\text{çıkan}}(t) = \psi_+ \phi_{\text{yukarı}} \tag{21.4}$$

Benzer bir biçimde, eğer $\psi_- \phi_0$ durumunda başlarsak, bu durumda asimptotik son durum

$$\psi_- \phi_0 \xrightarrow[t \to +\infty]{} \psi_- \phi_{\text{aşağı}} \tag{21.5}$$

olacaktır. Eğer her şey burada bitmiş olsaydı, ortada bir ölçüm problemi olmazdı, çünkü mikrosistemi (elektronu) mikrosistemin durumunu değiştirmeksizin sorgulamak için bir makrosistemi (deney aletini) başarılı bir şekilde kullanmış olarak ölçüm sürecinin kuantum mekaniksel bir betimlemesini vermiş olurduk.

Bununla birlikte, genellikle mikrosistemin durumunun ölçümden önce 'yukarı' mı yoksa 'aşağı' mı olduğunu bilmeyiz (aksi halde bir ölçüm yapmaya hiç gerek olmazdı). Daha doğrusu, elektronun başlangıç durumu

$$\psi_0 = \alpha\,\psi_+ + \beta\,\psi_- \tag{21.6}$$

üst üste gelmesiyle temsil edilir, burada $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$'dir. Deney aletinin başlangıç durumu hâlâ ϕ_0 olduğundan, bütün sistemin başlangıç durumu

$$\Psi(t=0) = (\alpha\,\psi_+ + \beta\,\psi_-)\,\phi_0 \tag{21.7}$$

olur. Schrödinger denklemi *doğrusal*[11] olduğundan, (21.4)-(21.6) denklemlerinden mikro ve makrosistemin durumlarının

$$\Psi_0 \equiv (\alpha\,\psi_+ + \beta\,\psi_-)\,\phi_0 \xrightarrow[t\to+\infty]{} \Psi_{\text{çıkan}} = \alpha\,\psi_+\,\phi_{\text{yukarı}} + \beta\,\psi_-\,\phi_{\text{aşağı}} \tag{21.8}$$

biçiminde *dolaşık* (ç.n.: İngilizcesi 'entangled') olduğu ortaya çıkar. Bu nedenle, elimizde makroskopik deney aleti için belirli bir durum kalmaz. Bir başka deyişle, (21.8) denklemindeki durum ölçüm aletinin 'yukarı' ve 'aşağı' (+1 ve -1) durumlarının bir üst üste gelmesinde olduğu bir hali temsil eder. Öte yandan, her gün karşılaşılan fiziksel cisimleri asla böyle üst üste gelmelerde gözlemlemeyiz. Böylece, kuantum mekaniği kuramı gözlemlerle son derece uyuşmayan öngörülerde bulunuyormuş ve bu nedenle hiç düşünülmeden reddedilmesi gerekiyormuş gibi görünür. Ama aslında öyle değildir. Kuantum mekaniğinin standart ya da Kopenhag yorumu, bir gözlem altına alınmış dalga paketinin

$$\alpha\,\psi_+\,\phi_{\text{yukarı}} + \beta\,\psi_-\,\phi_{\text{aşağı}} \xrightarrow{\text{sürekli olmayan bir biçimde}} \begin{cases} |\alpha|^2 \text{ olasılığı ile } \psi_+\,\phi_{\text{yukarı}} \\ \text{YA DA} \\ |\beta|^2 \text{ olasılığı ile } \psi_-\,\phi_{\text{aşağı}} \end{cases} \tag{21.9}$$

biçiminde 'indirgenmesini' ya da 'çökmesini' ister. Bir başka deyişle, kuram (21.8) denklemindeki Schrödinger denklemiyle betimlenen zaman içinde gelişmeye, "durum vektörü gözlem altına alındığında, (21.8) denklemindeki üst üste gelmeden (21.9) denkleminin sağ tarafındaki gerçekte

gözlemlenen durumlardan birine ya da ötekine kontrol edilemez bir biçimde indirgenir ya da 'çöker'" biçimindeki ad hoc kuralı ekler.

Kuantum mekaniğindeki ölçüm problemi budur. Burada kullandığımız özel örneğe özgü değildir, aksine tüm kuantum mekaniksel ölçüm süreçlerinin bir özelliğidir. Bu, bir sonraki kısımda göreceğimiz gibi kuantum mekaniğinin tamlığı ile ilişkilidir. Eğer kuantum mekaniği fiziksel bir sistemin tam bir betimlemesini sağlıyorsa, o halde bu indirgeme gerçek bir fiziksel süreç olarak ciddiye alınmalıdır ve fiziksel etkileşimler aracılığıyla açıklanmalıdır. Bu düşünce hatları doğrultusunda genel ve başarılı bir çözüm şimdiye dek bulunamamıştır.

21.4 Schrödinger'in Kedisi Paradoksu

Schrödinger 1935'te kuantum mekaniğinin tam olmadığını göstermek için ünlü 'kedi paradoksunu' ortaya attı.[12] Bu makale Schrödinger'in bir sonraki konuda ayrıntılı bir şekilde ele alacağımız Einstein-Podolsky-Rosen makalesinin konusu üzerinde Einstein'la yaptığı yazışmaların bir sonucu olarak ortaya çıktı. Schrödinger bizden sonrasında mühürlenen çelik bir kutunun içine konmuş başlangıçta canlı bir kediyi göz önüne almamızı ister. Kutunun içinde kediyle birlikte bir saatteki rasgele bozulma olasılığı tam olarak ½ olan radyoaktif bir element örneği de bulunsun. Her şey öyle düzenlenmiş olsun ki, elementin bir atomu bile bozulsa, kutu içindeki bir düzenek içinde hidrosiyanik asit (ç.n.: 'hidrojen siyanür' de denen, kimyasal formülü HCN olan, son derece öldürücü bir zehir) bulunan çok küçük bir şişeyi parçalasın ve kediyi öldürsün. Tersi durumda, kedi yaşamaya devam etsin. Probleme başlandığında, bu birleşik sistem (kedi + atom) için dalga fonksiyonu mutlaka canlı bir kediye karşılık gelir. Öte yandan, zaman geçtikçe, atomun bozulması için sonlu bir olasılık vardır, böylece kedi ölür. Bir saatin sonunda sistemin dalga fonksiyonunun canlı bir kedi için olan durumla ölü bir kedi için olan durumun eşit miktarda bir karışımı ya da üst üste gelmesi olduğunu varsayın. Bu durumda bir makrosistem - kedi -, dalga fonksiyonunun gerçekliğin tam ve nesnel bir betimlemesini vermesi koşuluyla, bizim yalnızca bir gözlem yapma davranışımızla ya bir duruma ya da ötekine atılacaktır. Schrödinger bunun akla uygun olduğuna inanmadı. Einstein, 1939'da bu konu hakkında onu yanıtlarken şöyle yazdı:

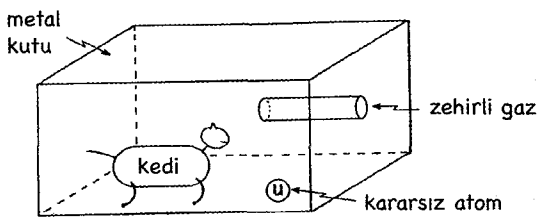
> Maddenin dalga temsilinin olan bitenlerin tam olmayan bir temsili olduğuna, bu temsilin pratik açıdan ne kadar yararlı olduğu kanıtlanmış

olursa olsun, son derece eminim. Bunu göstermenin en güzel yolu, sizin kediyle olan (kendisine bir patlamayla eşlik eden bir radyoaktif bozunma) örneğinizdir. Belirli bir zamanda ψ-fonksiyonunun bazı parçaları kedinin canlı olmasına ve diğer parçalarıysa kedinin toza dönüşmesine karşılık gelir.

Eğer ψ-fonksiyonu bir durumun - gözlemlenmesinden ya da gözlemlenmemesinden bağımsız olarak - tam bir betimlemesi olarak yorumlanmaya çalışılacak olursa, o halde bu, sözü edilen zamanda kedinin ne canlı olduğu ne de toz haline geldiği anlamına gelir. Ancak, bir gözlem yapıldığında bu durumlardan ya biri ya da öteki gerçekleşecektir.

Eğer bu yorum reddedilirse, o halde ψ-fonksiyonunun gerçek durumu ifade etmediği, hatta daha doğrusu durum hakkındaki bilgimizin içeriklerini ifade ettiği varsayılmalıdır. Bu, günümüzde birçok kuramsal fizikçinin büyük olasılıkla paylaşmakta olduğu Born yorumudur. Ancak bu durumda formüle edilebilen doğa yasalarının var olan bir şeyin zaman içindeki değişimine uygulanamaması, ancak bunun yerine akla yatkın beklentilerimizin içeriklerinin zamana göre değişimine uygulanacağı söz konusu olur.

Her iki bakış açısına da mantıksal olarak itiraz edilemez; ancak bu iki bakış açısının hiç birisinin en sonunda doğrulanacağına inanamıyorum.[13]



Şekil 21.4 Schrödinger'in 'kedi' paradoksu

Şekil 21.4 Schrödinger'in düşünce deneyinin bir taslağıdır.[14] Bu alıştırmanın ana noktası, bu durumun standart kuantum mekaniksel betimlemesinin ne olacağını göz önünde tutmamızdır. Eğer $\Psi(t)$ bileşik (kedi + atom) sisteminin, ϕ kedinin ve ψ de atomun dalga fonksiyonu olursa, bu durumda bütün sistem için başlangıçtaki dalga fonksiyonu

$$\Psi_0 = \Psi(t=0) = \phi_{\text{canlı}}\,\psi_{\text{atom}} \tag{21.10}$$

ile verilir. Bu, Schrödinger denkleminin etkisi altında zaman içinde ((21.8) denklemini anımsayınız)

$$\Psi(t) = \alpha(t)\,\phi_{\text{canlı}}\,\psi_{\text{atom}} + \beta(t)\,\phi_{\text{ölü}}\,\psi_{\text{bozunma}} \tag{21.11}$$

dolaşık durumuna evrilir. Olasılıkları hesaplamak için kullanılan olağan kuantum mekaniksel kurallara göre, kutuyu açtığımızda içindeki kediyi canlı olarak bulmamızın olasılığı[15]

$$P_{\text{canlı}}(t) = \left|\langle \phi_{\text{canlı}}\,\psi_{\text{atom}} | \Psi(t)\rangle\right|^2 = |\alpha(t)|^2 \sim \mathrm{e}^{-t/\tau_0} \tag{21.12}$$

iken, kediyi ölü olarak bulmamızın olasılığı

$$P_{\text{ölü}}(t) = \left|\langle \phi_{\text{ölü}}\,\psi_{\text{bozunma}} | \Psi(t)\rangle\right|^2 = |\beta(t)|^2 \sim 1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_0} \tag{21.13}$$

kadardır. Burada $\Psi(t)$ sistemin biz ona bakmazdan önceki durumunu - canlı bir kediyle ölü bir kedinin üst üste gelmesini - temsil eder. Biz baktıktan sonra, durum vektörü (esrarengiz bir biçimde?) ya canlı bir kediye ya da ölü bir kediye indirgenmiştir.

Şu durumda, çok açık bir şekilde, yanıtını kestiremediğimiz ama etkileyici bir soru kendini gösterir. Dalga fonksiyonu neyi temsil eder, sistemin bilgisi durumumuzu mu (ki bu halde kuantum mekaniği tam değildir) yoksa sistemin asıl fiziksel durumunu mu (ki bu halde de sistemde biz onu gözlemler gözlemlemez ani bir değişiklik olmalıdır)? Tam olmama seçeneğinin Born'un istatistiksel yorumuyla (Kısım 20.2) uyum içinde olduğunun farkında olunuz, böylece dalga fonksiyonunun çöküşü yalnızca kedinin durumu hakkındaki bilgimizi gözden geçirmemize karşılık gelir. Kedinin canlı ya da ölü olduğunun farkında olmamızla kediye fiziksel hiçbir şey olmaz. O halde bu istatistiksel betimlemeden daha tam bir betimlemenin olası olmadığını öne sürmek fazladan ve mantıksal olarak bağımsız bir sınırlamadır. Öte yandan, eğer dalga fonksiyonu tek bir kedinin durumunu (tamlık seçeneği - Kısım 20.4'te Heisenberg'in ψ üzerine olan konumunu hatırlayınız) temsil ederse, bu durumda kedideki dramatik bir fiziksel değişiklik dalga fonksiyonunun çöküşüne eşlik eder. Fiziksel durumda yalnızca bir gözlemle oluşan ani bir değişiklik mikro düzeyde fazla dert etmeye değer görünmeyebilse de, kedi gibi makroskopik sistemler düzeyinde rahatsızlık vericidir ve son

derece olanaksız görünür. Schrödinger parasını, yalnızca kediyi gözlemleme davranışının kendisinin aslında canlı ya da ölü bir kedi oluşturduğu (bir başka deyişle, kediyi ya öldürdüğü ya da öldürmediği) önerisine olan içgüdüsel (olumsuz) tepkimize yatırıyor gibi görünüyor. Bu nedenle, Schrödinger kuantum mekaniğinin tamlığının karşısında (bir başka deyişle, kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun karşısında) bir tez (ancak doğal olarak, mantıksal bir olanaksız olma kanıtı değil) oluşturdu.

21.5 Dirac'ın Ölçmenin Etkisi Üzerine Düşünceleri

Şimdi Dirac'ın kendi Şekil 20.10'daki ikiye ayrılmış demet deneyi örneğine, foton (ya da elektron) demeti için gözlemlenen davranışı nasıl açıkladığını görmek için geri dönelim.

> Enerji ölçümü bileşen demetini - örneğin, demeti hareket ettirilebilen bir aynadan yansıtmak ve geri dönüşünü gözlemlemek yoluyla - yok etmeksizin gerçekleştirilebilir. Fotonu betimlememiz, böyle bir enerji ölçümünden *sonra* iki bileşen arasındaki girişim etkilerinin oluşturulmasının olanaksız olduğu sonucuna ulaşmamıza izin verir. Fotonun bir kısmı bir demette bir kısmı da diğerinde olduğu sürece, iki demet üst üste geldikleri zaman girişim meydana gelir, ancak bu olasılık, foton yapılan bir gözlemle demetlerden tamamıyla birinde olmaya zorlandığında ortadan kalkar. Bu durumda diğer demet artık fotonun betimlemesinde yer almaz, böylece foton sonrasında onun üzerinde yapılacak her deneyde olağan bir biçimde tamamıyla bir demette bulunuyormuş gibi sayılır.[16]

Bir başka deyişle, iki yoldan biri boyunca yapılan böylesi bir enerji ölçümü ya da gözlemi sonrasında girişim artık olası değildir. Sistem ölçümden önce iki durumdan (ya da 'bileşenden') birindeymiş gibi görünse de, doğa (Dirac tarafından önerilen imgede) gözlemlendiğinde 'bir seçim yapmaya' zorlanmıştır. Sistem böyle bir gözlem sonrasında artık belirli bir bileşende olduğundan, sonrasında diğer bileşenle herhangi bir girişim yapması olası değildir. Dalga fonksiyonunun 'çöküşü' gerçekleşmiştir. (Bu, Şekil 20.11'deki çift yarık düzenlemesinde bir elektronun ya da fotonun hangi yarıktan geçtiğini - diyelim, elektronu ya da fotonu gözlemlemek için X'deki ışığı açarak - bir kez belirlediğimiz zaman meydana gelen girişim kaybıyla aynı türdedir.)

Kuantum mekaniği ışığın dalga ve parçacık özellikleri arasında bir uzlaşmayı bu hatlar üzerinden gerçekleştirebilmektedir. Temel nokta, fotonun öteleme durumlarından her birinin düşünsel olarak olağan dalga optiğinin dalga fonksiyonlarından biriyle bir araya getirilmesidir. Bu düşünsel olarak bir araya getirmenin doğası klasik mekaniğin temelleri üzerinde betimlenemez, tersine bu tamamıyla yeni bir şeydir. Fotonu ve onunla birlikte düşünülen dalgayı, klasik mekanikte parçacıklarla dalgaların etkileşebildiği bir biçimde etkileşiyor diye betimlemek tamamen yanlış olur. Bu düşünsel olarak bir araya getirmenin anlamı yalnızca istatistiksel olarak açıklanabilir: Dalga fonksiyonu bize, fotonun nerede olduğunu bulmak için bir gözlem yaptığımız zaman onun belirli bir yerde bulunması olasılığı hakkında bilgi verir.

Kuantum mekaniğinin keşfinin öncesi bir zamanda ışık dalgalarıyla fotonlar arasındaki bağlantının istatistiksel bir nitelikte olması gerektiği fark edildi. Bununla birlikte, o zaman açık bir biçimde fark edilmeyen ise dalga fonksiyonunun belirli bir yerdeki fotonların olası sayısını değil, *tek* bir fotonun o yerde bulunması olasılığı hakkında bilgi verdiğiydi. Bu ayrımın önemi aşağıdaki gibi açıklığa kavuşturulabilir. Çok büyük sayıda fotondan oluşan ve eşit ışık şiddetinde iki bileşene ayrılmış bir ışık demetimiz olduğunu varsayın. Bir demetin şiddetinin içindeki fotonların olası sayısıyla bağlantılı olduğu varsayımı altında, bileşenlerin her birinde toplam foton sayısının yarısı kadar foton olmalıdır. Bu durumda iki bileşen girişime uğratılırsa, bileşenlerden birindeki bir fotonun diğer bileşendeki bir fotonla girişim yapabilmesini istemeliyiz. Ara sıra bu iki foton birbirlerini yok etmek, başka zamanlarda da dört tane foton oluşturmak zorunda kalırlar. Bu, enerjinin korunumuyla çelişecektir. Dalga fonksiyonunu bir foton için olasılıklarla ilişkilendiren yeni kuram, bu zorluğun üstesinden her fotonun iki bileşenin her birinde de kısmen yer almasını sağlayarak gelir. Bu durumda her foton yalnızca kendisiyle girişim yapar. İki farklı foton arasında girişim asla meydana gelmez.[17]

Anlatılmak istenen temel nokta, burada tartışılmakta olan olasılıkların toplu olarak fotonlar için değil, tek fotonlar (ya da elektronlar) için olasılıklar olduğudur. Dirac bize enerjinin korunumuyla çelişkilerden kaçınmak için olasılıkların bu şekilde yorumlanmasının gerekli olduğunu anlatıyor. Bu parçacık-dalga 'ikiliği' ilke olarak evrensel olsa ve tüm sistem çeşitlerine yayılıyor olsa da, çoğunlukla günlük deneyimlerimizde bunun farkında değilizdir, çünkü kütleyle frekans arasındaki orantı katsayısı ($m = h\nu/c^2$ olduğundan) çok küçüktür:

Yukarıda ele alman parçacıkların dalgalarla düşünsel olarak bir araya getirilmesi yalnızca ışık için sınırlı değildir, tersine modern kurama göre evrensel olarak uygulanırlığa sahiptir. Düşünsel olarak tüm parçacık çeşitleri bu şekilde dalgalarla ve karşıt şekilde tüm dalga hareketleri de

parçacıklarla bir araya getirilir. Bu nedenle tüm parçacıklar girişim etkileri gösterecek hale getirilebilirler ve tüm dalga hareketleri enerjilerine kuanta biçiminde sahiptir. Bu genel olguların daha açık şekilde görülememesinin nedeni, parçacıkların kütlesi ya da enerjisi ile dalgaların frekansı arasındaki bir doğrusal orantı yasası yüzündendir; bu yasadaki orantı katsayısı benzer frekanslardaki dalgalar için bunlarla bir arada düşünülen kuantalar son derece küçük, elektron kadar hafif olan parçacıklar için ise bunlarla bir arada düşünülen dalga frekansı girişimi göstermesi kolay olmayacak kadar yüksek olacak biçimdedir.[18]

Dirac, son olarak ψ dalga fonksiyonundaki üst üste gelmelerin gözlemlenen sistemlerin ara özellikleriyle (diyelim, siyah ve beyazdan gri) sonuçlanan üst üste gelmelere değil, tersine temel olası durumlardan (buradaki örnekte siyah ya da beyazdan) ya birinin ya da ötekinin meydana gelmesi olasılığı için ara değerlerin ortaya çıkmasına neden olduklarını vurgular.

Belirli kuvvet yasalarına göre etkileşen belirli özelliklerde (kütle, eylemsizlik momenti, vb.) parçacıklardan ya da cisimlerden oluşmuş herhangi bir atomik sistemi ele alalım. Parçacıkların ya da cisimlerin kuvvet yasalarıyla tutarlı çeşitli olası hareketleri olacaktır. Bu türlü her harekete sistemin *durum*u denir.

. . .

Bir durum başka iki durumun üst üste gelmesi tarafından oluşturulduğunda, iki özgün durumun özelliklerinin belirsiz bir şekilde arasında olan özelliklere sahip olacak ve üst üste gelme sürecinde durumlardan hangisine daha büyük ya da daha küçük bir 'ağırlık' iliştirildiğine bağlı olarak aşağı yukarı daha fazla yakınlaşacaktır. Yeni durum, iki özgün durumun üst üste gelme sürecindeki göreli ağırlıkları bilindiğinde tamamıyla bu özgün durumlar tarafından tanımlanır...

. . .

Üst üste gelmenin klasik olmayan doğası, *A* durumundaki bir sistem üzerinde yapıldığında belirli bir sonuca - diyelim *a*'ya - yol açması kesin ve *B* durumundaki bir sistem üzerinde yapıldığında ise farklı bir sonuca - diyelim *b*'ye - yol açması kesin bir gözlem var olacak şekilde *A* ve *B* diye iki durumu göz önüne aldığımızda açıkça ortaya çıkar. Gözlem bu durumların üst üste gelmesindeki bir durumda olan sistem üzerinde yapıldığında sonucu ne olacaktır? Yanıt, *A* ve *B*'nin üst üste gelme sürecindeki göreli ağırlıklarına bağlı bir olasılık yasasına göre sonucun bazen *a* ve bazen de *b* olacağıdır. Yanıt asla *a*'dan ya da *b*'den farklı olmayacaktır. *Böylece üst üste gelmeyle oluşturulan durumun ara niteliği kendisini, bir gözlem için belir-*

li bir sonucun kendisinin özgün durumlara karşılık gelen sonuçların arasında olması aracılığıyla değil, belirli sonucun özgün durumlara karşılık gelen olasılıkların arasındaki olasılığı aracılığıyla ifade eder.[19]

Dirac, buradaki son paragrafta *A* ve *B* diye iki durumun üst üste gelmesiyle temsil edilen bir sistemi örnek olarak veriyor. Kısım 21.3 ve Kısım 21.4'te bu tür üst üste gelmelerin kuantum mekaniğinin formalizminde temsil edildikleri haliyle somut örneklerini verdik.

Yararlı Kaynaklar

Bernard d'Espagnat'ın 'Kuantum Kuramı ve Gerçeklik' adlı makalesi kuantum dünyasının sezgilere aykırı kimi özelliklerinin teknik olmayan bir sunuşudur. Jim Baggott'un *Kuantum Kuramının Anlamı* adlı kitabının 3. Konu'su resmi olmayan bir dille Kopenhag yorumunu ve Bohr-Einstein tartışmasını ele alır. Edward MacKinnon'un *Bilimsel Açıklama ve Atom Fiziği* adlı eserinin 8., 9. ve 10. konuları bu önemli noktaları daha derin bir şekilde gözden geçirir. Andrew Whitaker'ın *Einstein, Bohr ve Kuantum İkilemi* adlı kitabı, kuantum mekaniği söz konusu olduğunda Bohr ile Einstein'ı birbirinden ayıran önemli kavramsal noktaların matematiksel olmayan ancak çok titiz ve insana anlayış derinliği katan bir tartışmasıdır. Max Jammer'in *Kuantum Mekaniğinin Felsefesi* kuantum kuramının düşünsel açıdan gerektirdiklerini derinlemesine inceler ve bunları tarihsel bağlamlarına oturtur.

Bölüm VIII

Kuantum mekaniğinden alınan bazı düşünsel dersler

Sanırım kuantum mekaniğini kimsenin anlamadığını rahatlıkla söyleyebilirim.

Richard Feynman, *Fiziksel Yasanın Karakteri*

Kuantum mekaniği, hiçbirimizin gerçekten anlamadığı, ama nasıl kullanılacağını bildiği o gizemli, karmaşık disiplin. Fiziksel gerçekliği betimlemede şu ana dek görebildiğimiz kadarıyla mükemmel bir biçimde çalışıyor, ama 'sezgilere karşı bir disiplin'...

Murray Gell-Mann, *Gelecek İçin Sorular*

[Kuantum] postülatı atomik süreçlerin nedensel uzay-zaman eşgüdümü bakımından birşeylerden vazgeçmeyi gerektiriyor.

Niels Bohr, *Atom Kuramı ve Doğanın Betimlemesi*

Bununla birlikte olasılık fonksiyonunun kendi başına zamanın akışı içerisinde olayların izledikleri yolu temsil etmediği vurgulanmalıdır. Olaylar için bir eğilimi ve onlarla ilgili bilgimizi temsil eder. Olasılık fonksiyonu gerçeklikle yalnızca temel bir koşul yerine getirildiği zaman ilişkilendirilebilir; tabii sistemin belirli bir özelliğini belirlemek için yeni bir ölçüm yapılırsa.

. . .

En küçük parçaları bile taşların ya da ağaçların - onları gözlemleyip gözlemlemediğimizden bağımsız olarak - var olmalarıyla aynı anlamda nesnel olarak var olan nesnel gerçek bir dünya düşüncesi ... olanaksızdır....

Werner Heisenberg, *Fizik ve Felsefe*

Kuantum kuramında dışarıda bırakılması ve yerlerine başka birşeyin konması gereken *nedensellik ilkesi* ya da daha doğrusu *belirlenimcilik*tir.... Şimdi elimizde nedensellik yasasının *yeni bir biçimi* var.... Bu şöyledir: Eğer belirli bir süreçte başlangıç koşullan belirsizlik bağıntılarının izin verdiğince kesin bir şekilde belirlenirlerse, o halde daha sonra oluşacak olası tüm durumların olasılıkları kesin yasalar tarafından yönetilirler.

Max Born, *Huzursuz Evren*

Bohr'un atoma ilişkin problemlere yaklaşımı ... gerçekten olağanüstü. Sözcüğün genel olarak kullanılan anlamıyla anlamanın olanaksız olduğundan tamamıyla emin.

Erwin Schrödinger, 10 *Ekim 1926'da Wilhelm Wien'e yazılmış mektup*

Bu nedenle sorun, sık sık varsayıldığı gibi, kuantum mekaniğinin yeniden yorumlanması sorunu değildir, - basit süreçlerin istatiksel betimlemesi yerine başka bir betimlemesinin olası olması için kuantum mekaniğinin şu andaki sistemi nesnel olarak yanlış olmak zorunda olurdu.

John von Neumann, *Kuantum Mekaniğinin Matematiksel Temelleri*

Aslında, çağdaş kuantum mekaniğinin temelde istatistiksel niteliğinin yalnızca onun (kuramın) fiziksel sistemlerin tam olmayan bir betimlemesiyle işlediği gerçeğine yorulabileceğinden adım gibi eminim.

Albert Einstein, *Eleştirilere Yanıt*

[Çift yarık deneyinin sonuçlarının] hiçbir şekilde elektronların belirli yolları izlediği düşüncesiyle bağdaştırılamayacağı açıktır.... Kuantum mekaniğinde bir parçacığın izlediği yol diye bir kavram yoktur.

Lev Landau ve Evgenii Lifshitz, *Kuantum Mekaniği: Göreli Olmayan Kuram*

Ancak 1952'de olanaksızın gerçekleştirildiğini gördüm. David Bohm'a ait makalelerdeydi. Bohm göreli olmayan dalga mekaniğine, sayelerinde belirlenimci olmayan betimlemenin belirlenimci hale dönüştürülebildiği parametrelerin gerçekten de nasıl sokulabileceğini açık bir şekilde gösterdi. Bana göre daha da önemlisi, geçerli yorumun öznelliği - bir 'gözlemciye' yapılan gerekli başvuru - elenebiliyordu.

Dahası, temel düşünce daha önce de Broglie tarafından 1927'de 'pilot dalga' betimlemesinde öne sürülen düşünceydi.

Ancak o halde Born niçin bana bu 'pilot dalgadan' söz etmedi? Bana bu düşüncede neyin yanlış olduğunu işaret etmiş olsaydı? Von Neumann bunu niçin göz önüne almadı? Daha da sıradışı olarak, insanlar 1952'den sonra ve yakın tarihlerde 1978'e dek niçin 'olanaksızlık' kanıtları oluşturmaya devam ettiler? Pauli, Rosenfeld ve Heisenberg bile Bohm'un yorumuna 'doğa ötesi' ve 'ideolojik' diye damgalamak dışında daha yıkıcı eleştiriler getiremezken? Pilot dalga betimlemesi ders kitaplarında niçin görmezden geliniyor? Tek yol olarak değil, egemen olan kendi kendine hoşnut olma haline bir panzehir olarak öğretilmesi gerekmez mi? Anlaşılmazlığın, öznelliğin ve belirlenemezciliğin bize deneysel gerçeklerin zorlamasıyla değil, kasıtlı bir kuramsal seçim tarafından dayatıldığını göstermek?

John Bell, *Kuantum Mekaniğinde Konuşulabilenler ve Konuşulamayanlar*

22
EPR Makalesi ve Bell Teoremi

17. Konu'da ikizler paradoksunu göz önüne aldığımızda da gördüğümüz gibi, özel görelilik ilk defa öne sürüldüğünde birçok kişide sezgilere aykırı ve belki de tutarsız olduğu izlenimi bırakmıştı. Kuantum mekaniği de benzer bir etkiye sahip oldu, ancak bu etki 1920lerin ortalarındaki başlangıcından günümüze dek çok daha uzun süre devam etti ve daha büyük bir derecede oldu. Einstein'ın hüküm süren genel kabul görmüş düşünce olarak kabul ettiği kuantum kuramına olan bu tepki, yeni bir konuya sık sık eşlik eden ilk kafa karışıklığıyla sınırlı değildi, bu kuramın en önemli muhalifi olan Einstein için bile yaşam boyu süren bir bilmece olarak kaldı. Burada, Einstein ve iki çalışma arkadaşının, kuantum mekaniğinin mantıksal olarak tutarsız olmasa da, en azından tam olmayan bir kuram olduğunu göstermek için yaptıkları ünlü girişimlerini inceleyeceğiz. Bu tam olmama suçlaması, tam olarak Schrödinger'in kedisi paradoksu (Kısım 21.4) ile ortaya atılan suçlamadır.

22.1 EPR Paradoksu

1935'te (bundan sonra EPR diye söz edeceğimiz) Einstein, Boris Podolsky (1896-1966) ve Nathan Rosen (1909-1995) 'Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekaniksel Betimlemesi Tam Sayılabilir mi?' başlığında bir makale yayınladılar. Bir kuramın gerçeklikte bulunan konu ile ilgili her varlığa karşılık gelen terimler içermesini, o kuramın tam olmasının ölçütü olarak aldılar. Örnek olarak, Güneş'in etrafında dolanan bir gezegen gibi bir sistemin klasik betimlemesinde, sis-

temin çeşitli parçaları için konumu (r), momentumu (p) ve bunun gibi şeyleri temsil eden simgeler vardır. EPR, eğer tam bir kuram bu değişkenlerden ya da niceliklerden birinin değerinin hiçbir belirsizliğe yer olmaksızın ve ele alınan sistemi bozmaksızın öngörülmesine izin veriyorsa, bu durumda bu niceliğin doğada gerçek bir varlığa sahip olduğunu ve gerçekte de öngörülen değere sahip olmak zorunda olduğunu şart olarak öne sürer. Bu ölçütleri temel alarak, tezlerinin mantığının ana hatlarını çıkarırlar.

> Tam bir kuramda gerçekliğin her öğesine karşılık gelen bir öğe vardır. Fiziksel bir niceliğin gerçekliği için yeterli bir koşul, sistemi bozmaksızın onu kesin olarak öngörebilme olanağıdır. Kuantum mekaniğinde değişme özelliğine sahip olmayan işlemcilerle betimlenen iki fiziksel niceliğin durumunda, birinin ne olduğu bilgisi diğerinin ne olduğu bilgisini engeller. Bu durumda ya (1) kuantum mekaniğinde dalga fonksiyonu tarafından verilen gerçekliğin betimlemesi tam değildir ya da (2) bu iki nicelik eş zamanlı gerçekliğe sahip olamazlar. Bir sistemle daha önce etkileşimde bulunmuş başka bir sistem üzerinde yapılan ölçümleri temel alarak, o sistemle ilgili öngörülerde bulunma probleminin göz önüne alınması, eğer (1) yanlışsa bu durumda (2) de yanlıştır sonucuna yol açar. Bu nedenle gerçekliğin bir dalga fonksiyonu tarafından verilen betimlemesinin tam olmadığı sonucuna ulaşılır.[1]

Kanıtın mantıksal yapısı (sonra göreceğimiz gibi bu, kuantum mekaniği için bir çelişki anlamına geldiğinden) basit bir şekilde (1) ve (2)'nin her ikisinin de yanlış olamayacağıdır. EPR daha sonra (1)'in yadsınmasının (bir başka deyişle, kuantum mekaniğinin tam olduğunun var sayılması) (2)'nin yadsınmasını (bir başka deyişle, belirli nicelik çiftlerinin eş zamanlı olarak fiziksel gerçekliğe sahip olabileceklerini gerektirir) mutlaka zorunlu kıldığı özel bir kuantum mekaniksel örnek kurarlar. Az önce de belirttiğimiz gibi, (1) ve (2)'nin her ikisi de yanlış olamayacağından, (1)'in yadsınmasına izin verilmemelidir. Bundan dolayı kuantum mekaniği tam değildir. EPR'nin bir uzaklıkta etkinin var olmadığını varsaydıklarını işaret etmek önemlidir. Uzayın belirli bir bölgesindeki bir olayın kendisinden ayrı başka bir olayı anında etkileyemeyeceği yönündeki bu tür bir varsayımdan sık sık *yerel olma* varsayımı diye söz edilir: Anında bir uzaklıkta etki yoktur. Daha sonra EPR deneyinin yalınlaştırılmış bir biçimini göz önüne alacağız.

Bohr, aynı yılda ve aynı dergide EPR makalesiyle aynı başlığı taşıyan bir makale[2] ile buna yanıt verdi. Belki de EPR'nin yaptığından daha da açık bir şekilde, herhangi bir gerçek fiziksel bir uzaklıkta etki (yerel olmama) olasılığını yadsıdı. (Ç.n.: çok dostça olmayan)

yanıtının (ç.n.: sözlü) saldırısı, EPR'nin fiziksel gerçeklik ölçütlerinin - gerçeklik yalnızca kullanılacak deney gerecinin belirtilmesini gerektiren bir ölçüm cinsinden tanımlanabildiğinden - belirsiz olduğuydu. Bohr için, bir 'gerçeklik öğesinin' değerinin ne olduğu bilgisine olan asıl geçit, o gerçeklik öğesinin var oluşunun ta kendisi için bir ölçüt olarak alınıyordu. Bu arıtma çerçevesinde EPR tezinin daha ileriye götürülemeyeceğini öne sürdü. Bununla birlikte, bir niceliğin fiziksel gerçekliği için kullanılan ölçüt hâlâ tartışmalı olduğundan, mesele asla kesin olarak çözümlenmiş gibi görünmemektedir.

Einstein, kuantum mekaniğinin tam olmayan bir kuram olduğu yönündeki düşüncesini asla değiştirmedi. Heisenberg, yıllar sonra Einstein'm kuantum mekaniğiyle ilgili düşüncesini şöyle özetledi.

> Einstein Born'la kuantum mekaniğinin Göttingen'de geliştirilen ve Cambridge'de ve Kopenhag'da daha da güçlendirilen matematiksel formülasyonunun atomun içerisindeki olguları doğru bir biçimde betimlediği konusunda anlaşıyordu. En azından yerine başka birşey getirilene kadar Schrödinger'in dalga fonksiyonunun Born tarafından biçimlendirilen istatistiksel yorumunun işlevsel bir hipotez olarak kabul edilmesi gerektiğini itiraf etmeye de razı olabilirdi. Ancak Einstein kuantum mekaniğinin bu olguların tam olmak bir yana kesin bir betimlemesini temsil ettiğini kabul etmek istemiyordu. Dünyanın tamamıyla nesnel ve öznel alanlara bölünebileceğine olan inanç ve onun nesnel tarafı hakkında kesin sözler söylenebileceği şeklindeki hipotez, O'nun temel düşünsel tavrının bir kısmını oluşturuyordu. Ancak kuantum mekaniği bu savları karşılayamazdı ve bilimin dönüp Einstein'ın varsayımlarına giden yolu bir daha bulması çok olası görünmüyor.[3]

Heisenberg, Einstein'ın kendi kavramsal çerçevesini, içinde kuantum olgularıyla ilgili standart bakış açısını (bir başka deyişle, Kopenhag yorumunu) da barındıracak biçimde köklü bir şekilde değiştirmeye istekli görünmediğini - ya da belki de bunu yapmanın elinden gelmediğini - söyleyerek devam etti.

Einstein'm kendisi Born'la olan yazışmalarında bu konuya sık sık geri döndü. Einstein, ilk kez Born tarafından ortaya çıkarılan istatistiksel açıklamanın çok kullanışlı bulunduğunu kabul etmekle birlikte, yine de kuantum mekaniğinin bir uzay-zaman zemininde gerçek, sürekli olayları temsil etmekteki yetersizliğinin ona karşı büyük bir ağırlığı olduğunu düşünüyordu. 1947'de şunları yazdı:

> Eninde sonunda birilerinin, içindeki birbirlerine yasalarla bağlı şeylerin olasılıklar değil, çok yakın bir zamana dek öyle olması gerektiği kabul

> edilegelen göz önünde tutulan gerçekler olduğu bir kuram bulacağından tümüyle eminim. Öte yandan bu inancı mantıksal nedenlere dayandıramıyorum, ancak yalnızca küçük parmağımı tanık olarak gösterebiliyorum, bir başka deyişle kendi elimin dışında herhangi bir tür saygıyı hak edebilecek hiçbir yetke sunmuyorum.[4]

Einstein burada, bir yıl sonra Born'la[5] yaptığı bir yazışmadakine benzer bir biçimde kabul edilebilir bir fiziksel kuramın en sonunda belirli genel ideallere uymak zorunda olduğuna olan inancını sürdürüyor. Onun düşüncesine göre bunlar arasında, kendi başına varlıkların uzayda ve zamanda, uzayın çok uzakta bulunan bir bölgesinde gerçek olandan bağımsız bir biçimde yerel olarak var olmaları gereği de vardı. Bu nedenle, bir noktada aslında var olan uzakta bir yerde yapılabilecek olan ölçümlere bağlı olmamalıydı. Einstein böylece, EPR makalesinin ortaya çıkmasından bir düzineden daha fazla bir yıl sonra bile, uzakta yapılan ölçümler tarafından oluşturulan herhangi bir anlık değişimi hâlâ kabul edilemez buluyordu: 'Fizikle ilgili içgüdüm bu konuya karşı büyük bir öfke duyuyor.'[6]

Bir anlamda Einstein'ın kuantum mekaniğinin bu kadar dik başlı bir muhalifi olması biraz paradoks oluşturan bir durumdur, çünkü olasılık düşüncesini atomik süreçlerin kuantum kuramının temel bir özelliği olarak 1917 yılı makalesinde ortaya çıkaran ta kendisidir.[7] Einstein, kuantum mekaniğinin bu kuramın Kopenhag ya da olasılığa dayalı yorumunu reddeden tek kurucusu değildi. De Broglie ilk başta kendi dalga-parçacık ikiliğini açıklamak için belirlenimci bir kuram kurmaya çabaladı, ancak 1927 Solvay Toplantısı'ndan sonra Kopenhag ekolünün bir taraftarı haline geldi. Yine de daha sonra 1952'de - 23. Konu'da ele alacağımız gizli değişkenler kuramıyla bağlantılı nedenlerden ötürü - doğanın en sonunda nedensel bir betimlemesi olduğu inancına geri döndü. Dalga mekaniğinin günümüzdeki modern biçiminin kurucusu olan Schrödinger, bir keresinde Bohr'a 'Eğer bu lanet kuantum sıçramasına bağlı kalınması zorunluysa, o zaman daha en başından beri bu şeye bulaşmış olmaktan dolayı pişmanım'[8] dedi.

EPR tezinin ışığı altında, belirlenimci gizli değişkenler kuramları kuantum mekaniğine karşı olası ciddi bir seçenekmiş gibi görünebilirler. Temel olarak yapılabilecek şey, bir sistemin bir değişkenler setinin ya da o ana dek daha keşfedilmemiş özelliklerinin var olduğunu ve sistemin kesin uzay-zaman davranışının bu 'gizli' değişkenlerin değerleri tarafından nedensel olarak belirlendiğini varsaymaktır. Bu değişkenlerin kesin değerlerini henüz bilmediğimizden, bir parçacığın - diyelim -

konumunun ve momentumunun değerlerinde bir belirsizlik ya da dağılım bulunacaktır. Bu tür gizli değişkenlerin yeterince çok sayıda olduklarını varsayarak, kuantum mekaniği tarafından öngörülen sonuçları her zaman açıklayabilirmişiz gibi görünecektir. Kuantum mekaniği deneylerle uyuştuğu için son derece başarılı bir kuram olarak göründüğünden, tasarlanan düşünce, kuantum mekaniğini tüm deneysel öngörülerinde taklit edebilecek tamamıyla belirlenimci ve nedensel bir gizli değişkenler kuramı oluşturmaktır. Bu kadar çok sayıda gizli değişkenin ortaya çıkarılması yerel olmayı ve gerçekçiliği sürdürebilmek için ödenmesi gereken çok yüksek bir bedel olarak görünebilir, ancak ilk bakışta böyle yapmakta herhangi mantıksal bir tutarsızlık varmış izlenimi yoktur. Bu soruna EPR'nin akıl yürütmesinin kendisini biraz ayrıntılı olarak inceledikten sonra geri döneceğiz.

22.2 EPR Makalesinin Çözümlemesi

EPR makalesinin kuantum mekaniğinin kuruluşunda en önemli makalelerden biri olduğu ortaya çıkmış olsa da, kullandığı matematik oldukça temeldir ve akıl yürütme yolunu izlemesi de göreli olarak kolaydır.[9] EPR, tam bir kuramın gerçekliğin her öğesine karşılık gelen bir öğe içeren (bir başka deyişle, arada bir eşleşme ya da karşılaştırma vardır) bir kuram olduğunu tanımlayarak işe koyulur. Bu tür bir tamlık için bir X gerek koşulu, 'eğer bir kuram tamsa, o zaman X elde edilmelidir' (ya da tamlık $\Rightarrow$ X) anlamına gelir. Buna karşıt biçimde, X yeter koşulu 'eğer X sağlanıyorsa, o zaman kuram tamdır' ($X \Rightarrow$ tamlık) anlamına gelir. Fiziksel bir kuramın tamlığı için aldıkları gerek koşul, fiziksel gerçekliğin her öğesine karşılık fiziksel kuramda benzer bir öğenin olmasıdır. Bu nedenle ortaya fiziksel gerçekliğin öğelerinin ne oldukları sorusu çıkar. EPR, fiziksel gerçekliğin bir öğesi için yeter koşul olarak aşağıdakini alır:

> Eğer fiziksel bir niceliğin değeri - sistemi herhangi bir şekilde bozmaksızın - kesin olarak (başka bir deyişle, olasılığı bir olacak şekilde) öngörülebilirse, o halde fiziksel gerçeklikte bu fiziksel niceliğe karşılık gelen bir öğe vardır.[10]

Doğal olarak bu 'öngörü' kuramsal bir çerçeve bağlamındadır.

Eğer kuantum mekaniğinin standart ya da Kopenhag yorumu tam ise, o halde ψ sistemin durumunun tam bir nitelemesidir (ç.n.:

ya da ayırt edici özelliğidir). Gözlenirin a (kesin) özdeğerine karşılık gelen bir A işlemcisinin ψ özdurumunda bulunan (bir başka deyişle, $A\psi = a\psi$, (21.1) denklemini hatırlayınız) bir sistem için, bu tür bir ψ durumunda bulunan bir sistemin (bu durumda $\Delta A = 0$ olduğundan) fiziksel gerçekliğin bir (*a*) öğesine karşılık geldiği söylenebilir. Aslında, bir sistem A'nın bir özdurumunda ($A\psi = a\psi$) ancak ve ancak gözlenirin değeri net bir değere sahipse ($\Delta A = 0$) olabilir. Kuantum mekaniğinde bundan sık sık özdeğer-özdurum bağlantısı olarak söz edilir: bir A gözleniri için kesin bir değer ancak ve ancak sistemin ψ durumu A'nın bir özdurumu ise vardır. Şu halde eğer gerçekliğin bir öğesi varsa, o zaman (EPR'nin gerek koşul olarak öne sürdüğü gibi) kesin bir değeri vardır. EPR'nin tamlık ölçütüne göre bu değer, kuram tarafından sağlanan betimlemede temsil edilmelidir. Kuantum mekaniği için bu betimleme, sistemin dalga fonksiyonunun tam olarak belirtilmesini gerektirir. Ancak bir gözlenir için kesin bir a değeri, dalga fonksiyonunun A işlemcisinin buna karşılık gelen değer için bir özdurumu olmak zorunda olduğunu gerektirir. Bu nedenle, tamlık ve gerçeklik kuantum mekaniğinin bu gözlenir için net bir değer ($\Delta A = 0$) öngörmesini zorunlu kılar. Şimdiye kadar, net bir değeri olan tek bir gözlenir için hiçbir problem yoktur.

Bununla birlikte, az önce gerçekliğin tek bir öğesi için verdiğimiz aynı türde bir akıl yürütme, değişme özelliğine sahip olmayan işlemcilere karşılık gelen iki nicelik eş zamanlı olarak gerçekliğe sahip olsaydı da geçerli olurdu. Bu birleştirilmiş sistem, eş zamanlı olarak değişme özelliğine sahip olmayan iki işlemcinin bir özdurumu olan bir durumda olmak zorunda olurdu. Bu, değişme özelliğine sahip olmayan gözlenirlerin her ikisinin de eş zamanlı olarak net değerlere sahip olmasını istemeye özdeştir. Şimdi x ve p_x gözlenirlerini göz önüne alın. Kuantum mekaniğinin hesaplamalarda kullanılan kurallarının x ve p_x'in değerlerinin ($[x, p_x] = i$ olduğundan (not [11]'e bakınız)) her ikisinin de herhangi bir durumda hiçbir şekilde net olamayacaklarını gerektirdiklerini gördük. (Bu Kısım 20.4'teki Heisenberg belirsizlik bağıntısının içeriğinin aynısıdır.) Bu nedenle, eğer kuantum mekaniği tamsa, o zaman bu tür gözlenirler eş zamanlı olarak net değerlere sahip olamazlar. Tüm bunlar, kuantum mekaniğinin tamlığı ve değişme özelliğine sahip olmayan belirli işlemcilere karşılık gelen gözlenirlerin eş zamanlı olarak gerçekliği varsayımlarının ikisinin birlikte en azından bir durumda mantıksal bir tutarsızlığa yol açtığı sonucunu verir. Böylece, mantık kuralları (Kısım 1.2'yi

anımsayınız) uyarınca bu varsayımlardan en azından bir tanesi yanlış olmalıdır.

O halde, özetleyecek olursak, EPR tezi için anahtar olan aşağıdakilerden en azından birinin doğru olmak zorunda olduğu savıdır: (i) kuantum mekaniği tam değildir ya da (ii) değişme özelliğine sahip olmayan belirli işlemcilere karşılık gelen gözlenirler eş zamanlı olarak gerçekliğe sahip olamaz. Az önce bunların her ikisinin de eş zamanlı olarak yanlış olamayacağı yönünde akıl yürüttük. Burada içine alan (ancak dışarıda bırakmayan) mantıksal bir ayırım vardır (bir başka deyişle, her ikisi de doğru olabilir). Kuantum mekaniğinin tamlığı ve gerçeklik ölçütü, EPR'nin göz önüne aldığı durumda bir çelişkiyi gerektirir.

Asıl EPR ispatı buradan şöyle ilerler. Kuantum mekaniğinde etkileşen bir sistem için durumlar ölçüm problemini ele alışımızda gördüğümüz gibi ((21.8) ya da (21.9) denklemlerine bakınız) dolaşık hale gelirler. $\{u_n(x_1)\}$ diye bir durumlar kümesi seçelim, öyle ki

$$A\,u_n(x_1) = a_n\,u_n(x_1) \tag{22.1}$$

olsun ve iki parçanın bir araya getirilmesiyle oluşmuş bir sistem için Ψ durumunu göz önüne alalım, bu sistemin 1 ve 2 diye gösterilen alt sistemleri birleşik sistemin ilk başta hazırlanışından sonra etkileşmesinler. Bu akıl yürütmeyi özellikle sıkı yapmak için 1 ve 2 alt sistemlerini, ölçümler yapılırken birbirlerinden çok uzakta alabiliriz. Ψ'nin A'nın değerinin ölçümü sırasındaki çöküşü ((21.9) denklemini anımsayınız)

$$\Psi(x_1,x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x_2)\,u_n(x_1) \xrightarrow[\text{ölçüm}]{} \psi_k(x_2)\,u_k(x_1) \tag{22.2}$$

olur. B, A ile değişme özelliğine sahip olmayan bir işlemci olsun (bir başka deyişle, $[A,B]\neq 0$, ç.n.: sıra değişme özelliğinden söz ediyor) ve $\{v_s(x_1)\}$ kümesi de B'nin özdurumları olsun:

$$B\,v_s(x_1) = b_s\,v_s(x_1) \tag{22.3}$$

Eğer A'nın yerine B gözlenirinin değerini ölçmeyi seçersek, o zaman ((21.9) denklemine göre)

$$\Psi(x_1,x_2)=\sum_{s=1}^{\infty}\phi_s(x_2)\upsilon_s(x_1)\xrightarrow[\text{ölçüm}]{}\phi_r(x_2)\upsilon_r(x_1) \qquad (22.4)$$

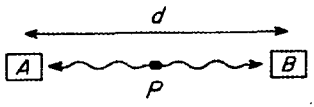
elde ederiz. EPR'nin yaptığı çok önemli yerel olma varsayımı, sistemler bir kez birbirlerinden ayrıldığında, artık bir daha birbirlerini (anlık olarak) - özellikle de birbirlerinden çok uzaktayken - etkileyemeyecekleri varsayımıdır. Bir başka deyişle, EPR kendi gerçeklik öğelerinin - gözlem davranışından bağımsız olarak (ki bu Bohr'un kabul etmeyeceği bir şeydir) - kesin (ya da belirli) değerleri olduğunu ve anlık, uzun erimli etkilerin olmadığını varsayar. EPR'nin iki parçacıktan oluşan bir sistemin momentumları ve konumları için olan özel örneğinde,[12] ψ_k ve ϕ_r 2. sistem için değişme özelliğine sahip olmayan sırasıyla p_2 ve x_2 gözlenirlerinin özdurumlarıdır. Böylece, (1. sistem üzerinde) $A = p_1$'i ölçmeyi seçtiklerinde, p_2'nin değerini - bu arada 2. sistemi hiçbir şekilde bozmaksızın - kesin olarak öngörebilirler; ya da $B = x_1$'i ölçmeyi seçebilirler ve o zaman da x_2'nin değerini çıkarabilirler.[13] Bu nedenle, (EPR ölçütüne göre) p_2 ve x_2'nin her ikisi de fiziksel gerçekliğin öğelerine karşılık gelirler ve bundan dolayı birbirlerinden farklı olan ψ_k ve ϕ_r dalga fonksiyonlarının her ikisi de aynı gerçekliğe ait olurlar. Ancak bu, daha önce ele aldığımız çelişkinin aynısına yol açar.[14]

Tezlerinin bu kısmının yapısı şöyle özetlenebilir: 'Kuantum mekaniği tamdır' önermesi (bir başka deyişle, ~(i)) 'değişme özelliğine sahip olmayan belirli gözlenirler eş zamanlı gerçekliğe sahiptir' (~(ii)) önermesini gerektirir (ya da ~(i) $\Rightarrow$ ~(ii)). Ancak, daha önce de gördüğümüz gibi, ~(i) ve ~(ii) birlikte doğru olamazlar. Bu nedenle, (i) doğru olmalıdır. Kuantum mekaniğinin biçimciliğinin (ç.n.: yapısal öğelerine ve tekniklerine vurgu yapan estetik çözümleme yönteminin) ta kendisinin kuantum mekaniğinin tam olmadığını (doğal olarak, bir uzaklıkta etkinin olmadığı varsayılarak) ortaya koymakta kullanıldığının farkında olunuz.

22.3 Bell Teoremi

Kuantum mekaniğinin öngörülerinin tümünü üretebilecek herhangi bir gizli değişkenler kuramının mümkün olmadığını kanıtla-

maya çabalayan matematiksel akıl yürütmelerin uzun ve karmaşık bir tarihi vardır.[15] 1965'te İsviçre'de, Cenova kentindeki Avrupa Çekirdek Fiziği Araştırma Merkezi'nde (CERN) kuramsal fizikçi olarak çalışan John Bell olağanüstü bir teorem ispatladı. Bu teoremin içeriğini yalın ve ideal hale getirilmiş bir düşünce deneyi aracılığıyla belirteceğiz. Bu teoremin belirli bir uyarlamasının çıkarımı bir sonraki kısımda veriliyor. Burada önce bu sonucun anlamını ele alıyoruz.



Şekil 22.1 Bir Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) ilinti deneyi

Şekil 22.1'de belirtildiği gibi uzamsal olarak birbirlerinden ayrılmış A ve B konumlarında iki ölçümün yapıldığını varsayın. Ölçümler bizim gözlem çerçevemize göre eş zamanlı olsunlar. Örnek olarak, P noktasındaki bir tepkimenin sonucunda oluşan iki ayrı parçacığın A ve B noktalarına ulaştıkları andaki momentumları ya da spinleri algılanabilir. Bell'in gösterdiği, eğer bir nesnel gerçeklik varsa (bir başka deyişle, bizim gözlemleyip gözlememizden bağımsız olarak maddenin bir doğruluğu varsa: sonuçlar *belirli* ise)[16] ve eğer (deneyin tek bir sonucu için) A'da elde edilen sonuç B'de ne ölçüleceğine karar verilirken yapılan (diyelim ki B'deki algılayıcının özel bir yöneliminin seçilmesiyle yapılan) seçimden bağımsızsa, o zaman hiçbir gizli değişkenler kuramının olası tüm durumlarda kuantum mekaniği ile aynı sonuçları (bir başka deyişle, öngörüleri) veremeyeceği idi. Bu uzamsal olarak ayrılmış noktalarda meydana gelen iki eş zamanlı olayın birbirlerinden bağımsızlığı hali, daha önce kendisinden yerel olma varsayımı diye söz ettiğimiz şeydir; çünkü sonuç olarak bu B'de yapılan bir şeyin A ve B birbirlerinden bir d uzaklığıyla ayrılmışken, A'daki bir ölçümü anlık olarak etkileyemeyeceği anlamına gelmektedir. Daha basit bir şekilde söylemek gerekirse, hiçbir belirli, yerel gizli değişkenler kuramı kuantum mekaniğinin tüm öngörüleriyle uyum içinde olamaz.

Bundan başka, Bell belirli deneylerin bu iki kuramı birbirlerinden ayırt edebileceğini de kanıtladı. Kendisi ve kendisinden sonra gelen ve bu konu üzerinde çalışanlar tarafından önerilen türde deneyler laboratuvar ortamında gerçekten de yapıldığında, sonuçlar yerel giz-

li değişkenler kuramlarınınkilerle değil kuantum mekaniksel öngörülerle uyuştu.[17] Bu nedenle, eğer yerel olma varsayımını da içinde barındıran bir nedenselliği sürdüreceksek, fizik için herhangi bir gözlemin sonucunun her zaman kesin olarak öngörülebilmesi anlamında tamamıyla belirlenimci bir temel mümkün görünmez. Bu gizli değişkenler sorununu yeniden gözden geçiren yakın zamanda yazılmış bir makale durumu aşağıdaki gibi özetler.

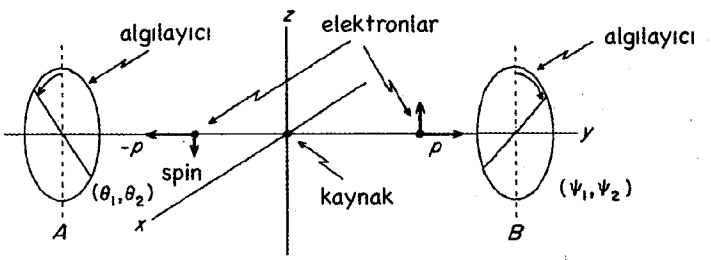
> Kendisine göre dışsal gerçekliğin var olduğu ve bu dışsal gerçekliğin birileri tarafından gözlemlensin ya da gözlemlenmesin belirli niteliklere sahip olduğu varsayılan gerçekçilik düşünsel bir görüştür. Bu bakış açısı modern düşüncede öylesine köklü bir şekilde yerleşmiştir ki, çok sayıda bilim adamı ve düşünür kuantum mekaniği için kendisiyle açık bir şekilde tutarlı olan kavramsal temelleri kurmanın bir yolunu bulmaya çalışmıştır. Geçerli olması umut edilen bir olasılık, kuantum mekaniğini klasik fiziğin genel çerçevesi içine çekmek amacıyla altta yatan bir gizli değişkenler kuramının istatistiksel açıklamaları cinsinden onu (ç.n.: kuantum mekaniğini) yeniden yorumlamaktı. Öte yandan, yakın zamanda Bell teoremi bunun yapılamayacağını gösterdi. Bell teoremi, yerel olma denilen çok basit ve doğal bir koşulu sağlayan tüm gerçekçi kuramların tek bir deneyle kuantum mekaniğine karşı test edilebileceklerini kanıtlar. Bu iki ayrı seçenek mutlaka birbirinden önemli ölçüde farklı öngörülere yol açar. Böylece teorem, büyük çoğunluğu kuantum mekaniğiyle mükemmel bir biçimde uyuşan sonuçlar veren, ancak yerel gerçekçi kuramlar ailesiyle uyuşmazlık içinde olan çeşitli deneylere ilham verdi. Sonuç olarak, şu an için ya gerçekçilik tezinin ya da yerel olma tezinin terk edilmek zorunda olduğu akla yatkın bir güven ile öne sürülebilir. Her iki seçim de gerçeklik ve uzay-zaman kavramlarımızı son derece köklü bir şekilde değiştirecektir.[18]

Böylesi bir gerçeklik ile yerel olma arasında seçim yapmak zorunda olma ikileminin kesin bir biçimde yerel olmama lehinde çözülüp çözülemeyeceği hakkında çok uzun süredir devam eden bir tartışma vardır.[19] Bir sonraki kısımda belirli gerçekliğin bir türünü - belirlenimci bir gerçekliği - göz önüne alacağız. Bu sınırlamayı koymamızın nedeni, bu durumda kabul edilen koşulların açık bir biçimde tanımlı olmaları ve ortaya çıkan ispatın oldukça kolay olmasıdır. Çok daha genel ispatlar (bir başka deyişle, belirlenimcilikten daha etkisiz varsayımlarda bulunan ispatlar) olsa da, 23. ve 24. konularda ele alacağımız konular için burada verdiğimiz tezler yeterlidir. Bundan başka, kendi doğalarında olasılığı içeren (ya da stokastik) kuramlara doğru yapılan geçiş, yerel olmamadan kaçınmak açısından tartışmaya açık bir biçimde durumu daha da kötü

yapmaktadır.[20] O halde göz önünde tutulan bütün bu şeylerden alınacak temel bir dersin, Bell eşitsizliğinin çiğnenmesini açıklayacak her kuramın yerel olmamak zorunda olduğu ise mantıksız görünmez.[21] Bir tür yerel olmamanın dünyanın bir özelliği olarak kısmen ortaya çıkması, Maxwell'in (on dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru) yerel olmanın lehinde verdiği savlara (bakınız Kısım 13.A) karşı sonuç olarak biraz sert bir yanıt olarak durur.

22.4 Bell Teoreminin Çıkarılışı

EPR tipindeki deneyin burada ele alacağımız biçimi David Bohm (1917-1992)[22] tarafından verilmiştir - bu nedenle burada yeni EPRB kısaltmasını kullanacağız. Şekil 22.2 deneyin kaba bir taslağıdır.[23] Kararlı olmayan atom gibi bir kaynak, koordinat sisteminin başlangıç noktasında durmaktadır. Atom bozunurken dışarıya, yatay ya da y-ekseni boyunca giden eşit büyüklükte, ancak birbirlerine zıt yönde momentumlara sahip iki elektron[24] yayar. Bu elektronların spini vardır. Kolaylık olması açısından bu spinlerin momentum vektörleriyle dik açılar yapacak şekilde düzenlendiğini kabul ediyoruz. (Bir başka deyişle, spin vektörleri Şekil 22.2'de algılayıcıların bulunduğu düzleme paralel olan dikey bir düzlemde (x-z) yer alırlar.) A ve B konumundaki algılayıcılar oraya ulaşan elektronların spinlerini ölçebilir. Bir elektronun y-eksenine dik sabit bir eksen boyunca olan spini ölçüldüğünde, spininin o sabit eksen boyunca her zaman ya yukarı ya da aşağı doğru olacağını deneysel bir gerçek olarak kabul edelim. Yukarı spine karşılık olarak +1 ve aşağı spine karşılık olarak da -1 değerlerini alacağız.



Şekil 22.2 EPR deneyinin Bohm'a göre olan uyarlaması

A'daki gözlemci algılayıcısını iki yönelimden (θ_1 ya da θ_2) birine ayarlayabilirken B'deki gözlemcinin ψ_1 ve ψ_2 diye iki seçeneği olsun. Deneyin her yinelenişinde her gözlemci için algılayıcıda okunan her seferinde ya +1 ya da -1'dir. Sonuçlar için elde edilen bu değerleri r ile göstereceğiz. Daha ayrıntılı olmak gerekirse:

> $r_{A_k}(\theta,\psi) = \pm 1$ - A'da θ (bir başka deyişle, θ_1 ya da θ_2) ve B'de de ψ (bir başka deyişle, ψ_1 ve ψ_2) ayarları seçildiğinde, k'ıncı elektron çifti için A algılayıcısında elde edilen sonuç

Benzer bir gösterim de $r_{B_k}(\theta,\psi)$ için geçerlidir. Burada $k = 1, 2, \ldots, N$ deneyin belirli bir tekrarını tanımlamaktadır. Toplam olarak N tane tekrar vardır. Ortalama bir değer ya da beklenen değer ((20.7) denklemini hatırlayınız)

$$\langle r_A(\theta,\psi)\rangle \equiv \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} r_{A_k}(\theta,\psi) \xrightarrow[N\to\infty]{} 0 \qquad (22.5)$$

biçiminde tanımlanır. Bu denklemin en sağ tarafı, basit bir biçimde A noktasındaki deney sonuçlarının bu deney için +1 ve -1'lerden oluşan rasgele bir dizgiden oluştuğunu belirtir. (Benzer bir ifade B noktası için de geçerlidir.) $r_{A_k}(\theta,\psi)\, r_{B_k}(\theta,\psi)$ niceliklerinin ortalama değeri ile ilgileniyoruz. Bu

$$\langle r_A(\theta,\psi)\, r_B(\theta,\psi)\rangle \equiv \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} r_{A_k}(\theta,\psi)\, r_{B_k}(\theta,\psi) \qquad (22.6)$$

ilintisidir (ç.n.: korelasyon ya da İngilizce 'correlation'). Aslında ilinti kavramı günlük yaşam bağlamında oldukça bilinen bir şeydir. Örnek olarak, eğer belirli bir topluluk örneğini kimlerin sigara içtiğini ya da içmediğini (r_A) ve kimlerin akciğer kanseri olup kimlerin olmadığını (r_B) görmek için incelersek, sigara içenlerle akciğer kanseri olanlar arasında (kesin, ancak tam olmayan) bir ilinti olduğunu buluruz. Benzerliği daha da vurgulamak için, r_A'ya sigara içme için +1, sigara içmeme için -1 değerlerini ve r_B'ye de akciğer kanseri için +1, akciğer kanseri olmama için -1 değerlerini atayalım. O hal-

de, N kişiden oluşan bir örnek için tıpkı (22.6) denkleminde olduğu gibi $\langle r_A r_B \rangle$ diye bir ilinti tanımlayabiliriz. Eğer sigara içen herkes akciğer kanseri olsaydı ve sigara içmeyen hiçbir kimse de akciğer kanseri olmasaydı, o zaman tam bir ilinti $\langle r_A r_B \rangle = +1$ olmuş olurdu. Eğer sigara içen hiçbir kimse akciğer kanseri olmasaydı ve sigara içmeyen herkes de akciğer kanseri olsaydı, o zaman da tam bir karşıt ilinti $\langle r_A r_B \rangle = -1$ olmuş olurdu. Genel olarak bir ilinti -1 ile $+1$ arasında yer almalıdır. Oldukça sık bir biçimde güçlü ilintileri iki değişken arasındaki yerel nedensel ilişkiler cinsinden yorumlarız.

Birbirlerinden uzak olaylar arasındaki birçok ortak ilinti yalnızca yerel nedenler cinsinden anlaşılabilir. Örnek olarak, iki kişinin - diyelim A ve B - hiç paralarının olmadığını, üçüncü bir kişinin bu iki kişiden birinin pantalonunun cebine bir çeyrek dolar koyduğunu, diğer kişinin cebine ise hiçbir şey koymadığını ve her iki kişinin de hangisine çeyrek dolar verildiğini bilmediğini varsayın. Eğer A New York'a ve B de San Francisco'ya giderse, her biri yalnızca çeyrek doların kendi cebinde olması şansının %50 olduğunu söyleyebilir. Şimdi A'nın cebine bakmasına ve orada çeyrek doları bulmasına izin verin. Anında kendisinden binlerce mil uzakta olan B'nin cebinde çeyrek dolar olmadığını bilir. Bununla birlikte, yalnızca tek bir kişinin çeyrek dolara sahip olabileceği ilintisi A ve B birlikteyken başlangıçta sistemin içinde oluşturulduğundan, bu durumda hiçbir gizemli bir uzaklıkta etki olmamıştır. Şu an ele aldığımız EPRB ilintileri hakkındaki önemli nokta, kısa bir süre sonra göreceğimiz gibi bu ilintilerin bu tür yerel etkileşimler cinsinden açıklanamaz olmalarıdır.

Şimdi (22.6) denklemiyle gösterilen EPRB örneğimize geri dönecek olursak, o tür bir deneyin gerçekte gözlemlenen sonucu (ya da buna denk bir biçimde ilinti için kuantum mekaniksel öngörü) (spini sıfır olan bir durum için)

$$\langle r_A(\theta,\psi)\, r_B(\theta,\psi)\rangle_{\mathrm{KM}} = -\cos(\theta-\psi) \tag{22.7}$$

olur. Burada bu sonucu yalnızca belirtiyoruz ve nasıl çıkarıldığını göstermiyoruz. Şu an amaçladıklarımız açısından, (22.7) denklemi herhangi özel bir kurama bağlı kalınmaksızın verilerin olgusal bir betimlemesi olarak alınabilir. Bununla birlikte, Kısım 22.A'da bu ilintinin kuantum mekaniksel olarak nasıl hesaplanabileceğini belirtiyoruz. Şimdi yerel olma ve belirlenimcilik koşullarını koyalım. Eğer A konumundaki $r_{A_k}(\theta,\psi)$ sonucu sistemin durumu tarafından

daha önceden belirlenmezse ve eğer B'deki gözlemcinin yaptığı (ψ) seçimi A'daki gözlemci tarafından elde edilen $r_{A_k}(\theta,\psi)$ sonucunu etkileyemezse, o zaman aslında $r_{A_k}(\theta,\psi)$ yalnızca θ'ya bağlı olabilir ve böylece $r_{A_k}(\theta)$ diye yazılmalıdır. Benzer bir biçimde, B noktasında elde edilen sonuç için de $r_{B_k}(\psi)$'ı kullanacağız.

Diyelim k'ıncı denemede elde edilen $r_{A_k}(\theta_1)\, r_{B_k}(\psi_1)$ deney sonucu için, (A'daki deneyci hâlâ θ_1 seçimini yaparken) B'deki deneyci tarafından (ψ_1'in yerine) ψ_2 seçiminin yapıldığı bir başka olası deneyi de tasarlayabiliriz. (Bu denemedeki) deney sonucu bu durumda $r_{A_k}(\theta_1)\, r_{B_k}(\psi_2)$ olurdu, ki burada (yerel olma ve belirlenimcilik nedeniyle) $r_{A_k}(\theta_1)$'in asıl deneyde olduğu gibi bu (olası) alternatif deneyde de hâlâ aynı değere sahip olmasını beklerdik. Bununla birlikte, $r_{B_k}(\psi_2)$'nin değerini (bir başka deyişle, +1 ya da -1 olup olmadığını) bilmiyoruz. Benzer bir biçimde, buna uygun $r_{A_k}(\theta_2)\, r_{B_k}(\psi_1)$ ve $r_{A_k}(\theta_2)\, r_{B_k}(\psi_2)$ diye sonuçları olan başka olası deneyleri de (her denemeyi ayrı ayrı temel alarak) göz önüne alabiliriz. Daha sonra, $\{r_{A_k}(\theta_1) r_{B_k}(\psi_1)\}$, $\{r_{A_k}(\theta_1) r_{B_k}(\psi_2)\}$, $\{r_{A_k}(\theta_2) r_{B_k}(\psi_1)\}$ ve $\{r_{A_k}(\theta_2) r_{B_k}(\psi_2)\}$ deney sonuçlarının (22.7) denkleminin deneysel ilintisine uyan akla yatkın bir kümesi (ya da derlemesi) olup olmadığını sorabiliriz. Her $r_{A_k}(\theta)$ ve $r_{B_k}(\psi)$'nin +1 ya da -1 olduğunun farkına varınız. Şu durumda, bu nedenden ötürü

$$P_k \equiv r_{A_k}(\theta_1)\left[r_{B_k}(\psi_1)+r_{B_k}(\psi_2)\right]+r_{A_k}(\theta_2)\left[r_{B_k}(\psi_1)-r_{B_k}(\psi_2)\right] \qquad (22.8)$$

tanımı kullanıldığında, $|P_k| \equiv 2$ elde edildiğini gözlemleyiniz. Bu k'nın tüm değerleri için geçerli olan cebirsel bir özdeşliktir. (Bu olası dört deney için) R diye bir ilinti fonksiyonunu

$$R \equiv \left|\langle r_A(\theta_1) r_B(\psi_1)\rangle + \langle r_A(\theta_1) r_B(\psi_2)\rangle + \langle r_A(\theta_2) r_B(\psi_1)\rangle - \langle r_A(\theta_2) r_B(\psi_2)\rangle\right| \qquad (22.9)$$

diye tanımlayınız. (22.6) denkleminde verilen tanımdan bunun

$$R = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} P_k \right| \leq \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} |P_k| = 2 \qquad (22.10)$$

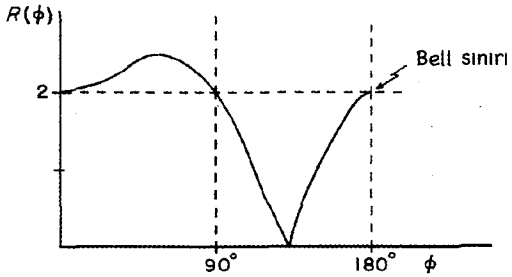
diye yazılabileceğini görürüz. (22.10) denklemi her yerel, belirlenimci kuram için R'nin 2'den küçük eşit olmak zorunda olduğunu belirtir.

Bundan sonra, $\theta_1 = \psi_1 = 0$, $\theta_2 = -\psi_2 = \pi/3$ (ya da 60°) diye seçelim ve (22.7) denklemindeki deneysel (ya da kuantum mekaniksel) ifadeyi R_{KM}'nin değerini (22.9) denkleminden

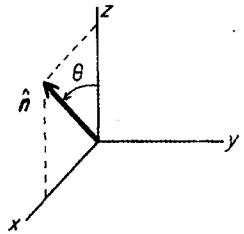
$$\begin{aligned} R_{KM} &= \left| -1 - \cos(60^\circ) - \cos(60^\circ) + \cos(120^\circ) \right| \\ &= \left| -1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right| = \left| -2{,}5 \right| = 2{,}5 \end{aligned} \qquad (22.11)$$

diye çıkarmak için kullanalım. Ancak (22.10) ve (22.11) denklemleri bir arada $2{,}5 \leq 2$ olmasını gerektirir. Bu, yerel olma ve belirlenimcilik varsayımlarının ikisinin birlikte (benzerleri bugüne dek yapılmış olan) bu deneylerin olası herhangi bir sonuç ya da çıktı dizisiyle uyum içinde olamayacağını gösteren açık bir çelişkidir. Hangisinden vazgeçmek istersiniz, yerel olma mı yoksa belirlenimcilik mi? Bu olağandışı ispat ilk kez fizikçi Asher Peres (1934-) tarafından verilmiştir.[25] Bu ikilemin doğası göz önünde tutulduğunda, Peres'in makalesinin 'Yapılmamış Deneylerin Sonuçları Olmaz'[26] başlığını taşıması anlamlıdır.

(22.11) denkleminde belirlenimci herhangi bir yerel kuramla kuantum mekaniğinin (en azından) bir öngörüsü arasında açık bir çelişkiye sahibiz. Öte yandan, okur yerel belirlenimci kuramların kuantum mekaniğinin hiçbir öngörüsünü çıkaramadığı izlenimini edinmemelidir. Bu noktayı açıklamak için, $\theta_1 = \psi_1 = 0$ ve $\theta_2 = -\psi_2 = \phi$ olarak alalım, böylece R ϕ'nin bir fonksiyonu haline gelsin.[27] Şekil 22.3, $R(\phi)$'nin ϕ'ye bağlı grafiğini göstermektedir. Bell sınırı $R = 2$ doğrusudur. Bell sınırının yalnızca $0 < \phi < 90^\circ$ aralığında çiğnendiğine (maksimum çiğnenmenin de (22.11) denklemindeki gibi $\phi = 60^\circ$'de olduğuna), ancak $90^\circ < \phi < 180^\circ$ aralığında çiğnenmediğine dikkat ediniz. Bu ikinci bölgede kuantum mekaniği ile uyum içinde olan yerel belirlenimci modeller kurmak mümkün olabilir.



Şekil 22.3 PRB deneyi için Bell ilintisi



Şekil 22.4 Bir spin ölçümünde algılayıcının düzenlenişi

22.A EPRB İlintilerinin Hesaplanışı

Bu ek kısımda (22.7) denkleminde verilen kuantum mekaniksel ilintinin çıkarılışında gereken teknik ayrıntıları sağlıyoruz. İki elektronun sıfır spin durumu için durum vektörü

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\otimes\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\otimes\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\right] \tag{22.12}$$

olur. Yukarı spin ve aşağı spin için sırasıyla durum vektörleri, Şekil 22.4'ün $\hat{\boldsymbol{n}}$ birim vektörü boyunca (Şekil 22.2'ye de başvurunuz)

$$\phi_+(\theta) = \begin{pmatrix}\cos(\theta/2)\\ \sin(\theta/2)\end{pmatrix} \qquad \phi_-(\theta) = \begin{pmatrix}-\sin(\theta/2)\\ \cos(\theta/2)\end{pmatrix} \tag{22.13}$$

$$\hat{\boldsymbol{n}} = (\sin\theta, 0, \cos\theta), \qquad \hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ \sin\theta & -\cos\theta\end{pmatrix} \tag{22.14}$$

$$\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{\sigma}\,\phi_{+}(\theta)=\phi_{+}(\theta) \qquad \hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{\sigma}\,\phi_{-}(\theta)=-\phi_{-}(\theta) \tag{22.15}$$

olarak verilir. Burada $\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{\sigma}$ spin işlemcisinin $\hat{\boldsymbol{n}}$ birim vektörü boyunca olan izdüşümüdür. Bu iki durumun gerçekten de izdüşüm işlemcisinin özdurumları olduğu dorudan doğruya matrislerin çarpımı kullanılarak kanıtlanabilir. Elektronların Şekil 22.2'nin A ve B noktalarındaki son durumları $\phi_{\pm}^{A}(\theta)\otimes\phi_{\pm}^{B}(\theta)$ biçiminde ve ortak olasılıkları da $p^{AB}(\pm\pm\,|\,\theta,\psi)=\left|\langle\Psi|\phi_{\pm}^{A}(\theta)\otimes\phi_{\pm}^{B}(\psi)\rangle\right|^{2}$ biçiminde verilir. Daha sonra doğrudan doğruya yapılan bir hesaplama

$$p^{AB}(++\,|\,\theta,\psi)=p^{AB}(--\,|\,\theta,\psi)=\frac{1}{2}\sin^{2}\left(\frac{\theta-\psi}{2}\right) \tag{22.16a}$$

$$p^{AB}(+-\,|\,\theta,\psi)=p^{AB}(-+\,|\,\theta,\psi)=\frac{1}{2}\cos^{2}\left(\frac{\theta-\psi}{2}\right) \tag{22.16b}$$

sonuçlarını verir. Son olarak, ilinti fonksiyonu basit bir şekilde

$$\begin{aligned}\langle r_{A}(\theta,\psi)\,r_{B}(\theta,\psi)\rangle_{\mathrm{KM}} &= p^{AB}(++\,|\,\theta,\psi)(+1)(+1)+p^{AB}(--\,|\,\theta,\psi)(-1)(-1)\\ &\quad+p^{AB}(+-\,|\,\theta,\psi)(+1)(-1)+p^{AB}(-+\,|\,\theta,\psi)(-1)(+1)\\ &=\sin^{2}\left(\frac{\theta-\psi}{2}\right)-\cos^{2}\left(\frac{\theta-\psi}{2}\right)\\ &=-\cos(\theta-\psi)\end{aligned} \tag{22.17}$$

olur. Bu metinde (22.7) denkleminde belirtilen sonuçtur.

Yararlı Kaynaklar

Jim Baggott'un *Kuantum Kuramının Anlamı* adlı kitabının 4. Konu'su, EPRB deneyinin, Bell teoreminin ve deneysel testlerin güzel bir şekilde yazılmış ve eksiksiz bir özetini verir. James Cushing ve Ernan McMullin'in *Kuantum Kuramının Düşünsel Sonuçları* adlı kitabı Bell teoreminin gerektirdiklerinin çeşitli yönleri üzerine bir dizi deneme içerir. Arthur Fine'ın *Çürük Oyun* adlı kitabı Einstein'ın kuantum kuramı üzerine olan düşüncelerinin mükemmel bir çözümlemesidir, ayrıca EPR makalesinin tarihsel zeminini ve bu makaleyle ilgili düşünsel sorunları da içerir. Michael Redhead'in *Tam Olmama, Yerel Olmama ve Gerçekçilik* adlı eseri kuantum mekaniğinin yerel

olmama, Bell teoremi ve gizli değişkenler gibi düşünsel yönleri üzerine standart bir teknik başvuru kitabı haline gelmiştir. Son olarak, John Bell'in başka hiçbir eserle karşılaştırılamaz kitabı *Kuantum Mekaniğinde Söylenebilenler ve Söylenemeyenler*'i Bell'in kuantum mekaniğinin temelleri üzerine önemli denemelerinin tümünü tek bir yerde toplar - gerçekten de kuantum kuramının algılaması güç noktaları arasında kavrayışa yönelik bir yol gösterici arayanlar için konu üzerindeki uzmanlığı su götürmez bir usta tarafından yazılmış 'mutlaka okunması gereken bir eser'dir.

23
Kuantum Mekaniğinin Başka Bir Yorumu

Daha önceki konularda kuantum mekaniğinin standart, genel olarak kabul gören Kopenhag yorumunu sunduk ve ele aldık; bu yoruma göre doğada en temel düzeyde indirgenemez ve elenemez bir belirlenemezcilik vardır. Tarihsel olarak kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunu neyin oluşturduğunu kesin olarak belirtmenin zor olduğunu görmüş olsak da, bu yorumun bağlı olduğu üç ana başlık onu nitelendirir. (1) Genel olarak, bir uzay-zaman zemininde hiçbir parçacık yörüngesi var olamaz. (2) Temel fiziksel olguların hiçbir belirlenimci betimlemesi olası değildir. (3) Doğanın temel fiziksel olgularının yasalarında temel ve elenemez bir belirlenemezcilik ya da (klasik fizikteki karmaşık fiziksel olguların daha ince ayrıntıları hakkındaki bilgisizliğimizi yansıtan olasılığa benzemeyen) bir olasılık vardır. Kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun bu nitelikleri hakkında VIII. Bölüm'ün (*Kuantum mekaniğinden alınan bazı düşünsel dersler*) başında yer alan alıntılardan bir fikir elde edilebilir. Bu bakış açısına göre, ilke olarak diyelim bir elektronun gelecekte kesin olarak nasıl davranacağını öngörmek (bir başka deyişle, konumunu ve hızını zamanın fonksiyonları olarak vermek) olanaksızdır. Kopenhag ekolüne göre, mikro olguların (klasik fizikte olduğu gibi) sürekli bir uzay-zaman zemini cinsinden nedensel bir betimlemesi olamaz. Bunun böyle olduğunu gösteren hiçbir ispat bulunmasa da, genel olarak kuantum mekaniğinin nedensel bir yorumunun olanaksız olduğuna inanılır.

Bununla birlikte, kuantum mekaniğinin mantıksal olarak tutarlı nedensel bir yorumu[1] - bu yorumu ilk kez Bohm ortaya çıkarmıştır - vardır; bu yoruma göre çift yarık deneyindeki elektron gibi bir mikro varlık, kaynaktan ekrana kadar (Şekil 20.11'i anımsayınız) belirli ve iyi tanımlanmış (yarıklardan yalnızca birinden geçerek) bir

yol izler. Bu açıklamaya göre elektron, bir dalga tarafından eşlik edilen bir parçacık olma anlamında bir dalga ve bir parçacıktan oluşur. Pilot ya da kılavuz dalga (bu terim özgün olarak 1920lerde farklı bir bağlamda ilk kez de Broglie tarafından kullanılmıştır) parçacık üzerine bir etki uygular. Dalga her iki yarıktan geçerken, parçacık yalnızca bir tanesinden geçer. Bu durumda Heisenberg belirsizlik bağıntıları, (yarıklar ya da bir ölçüm aleti gibi) makroskopik cisimlerle olan etkileşim süreci sırasında mikro sistem üzerinde oluşturulan rahatsızlık nedeniyle ortaya çıkar. Kuantum mekaniğinin bu yorumunun tıpkı her zamanki Kopenhag yorumunda olduğu gibi tam olarak aynı formalizmi (ya da matematiksel denklemler setini) temel aldığının ve böylece dünyanın bu iki yorumu ya da açıklaması arasında deneysel bir karar almanın olanaksız olarak göründüğünün farkında olmak önemlidir. Kopenhag yorumunun nasıl nedensel yorumun aslında (neredeyse) tamamen dışlanması ile kabul edilir hale geldiği etkileyici bir öyküdür, bu öykünün bir kısmını 24. Konu'da anlatacağız.[2]

Bu yorumların ana noktası, okurun kuantum mekaniğinin genel olarak kabul edilen Kopenhag yorumundan farklı bir seçenek olarak başka yorumlarının olası olduğunun bilincinde olmasını sağlamaktır. Yine de kuantum mekaniğinin herhangi bir yorumu üzerine (bir önceki konuda ele alınan) Bell teoremi tarafından konulan katı sınırlamaları hafife almamalıyız. Örnek olarak, Bohm'un yorumu (bir anlamda Kopenhag yorumunun da olduğu gibi) yerel değildir ve bu daha önceki klasik dünya görüşünden kökten bir şekilde ayrılır. Bu ve bundan sonraki konu, Kopenhag ekolü tarafından bağlı kalınan genel düşünsel başlıkların tümünün aslında gerçekler tarafından - bırakın gerektirildiklerini - doğruluklarının kanıtlanıp kanıtlanmadığı sorusuyla ilgili olacaktır.

23.1 Bir Özet

Kuantum mekaniğine standart ya da Kopenhag bakış açısını - ki bu bakış açısı, bu konularda çalışan tüm fizikçiler tarafından neredeyse evrensel olarak ve bu tür sorunlarla ilgilenen bilim felsefecileri tarafından da sık sık kabul edilir - tamamlayıcılık (diyelim, dalga-parçacık ikiliği), kuantum olgularının en temel düzeyinde doğal olarak bulunan belirlenemezcilik ve sürekli bir uzay-zaman zemininde olaydan olaya sırayla giden nedensel bir betimlemenin olanaksızlığı

ile nitelendirdik. Bununla birlikte, bir kuram olarak kuantum mekaniği (fizikte her modern kuramda olduğu gibi) iki bileşene sahiptir: bir formalizm ve bir yorum. Çok kaba bir şekilde söylenecek olursa, *formalizm* ile denklemlerden ve deneysel olarak (temel olarak 'doğru sayıların elde edilmesi' anlamında) yeterli olduğu ortaya çıkan hesaplama kurallarından, *yorum* ile kuramın fiziksel evrenle ilgili olarak verdiği (denklemlerle bir arada süregiden öykü ya da kuramın bize dünya hakkında 'gerçekte' ne anlattığı anlamında) eşlik eden betimlemeden söz edilir. (Başarılı) bir formalizm kendi yorumunu tek bir şekilde belirlemediğinden, deneysel olarak yeterli tek bir formalizmle eşit derecede iyi uyuşan köklü bir biçimde birbirinden farklı iki ayrı yorum (ve ontoloji) bulunabilir.

Bir kuramın iki bileşeni arasındaki bu ayrımı biraz daha açalım. Bir kuramın formalizm ve yorum olarak bu şekilde iki bileşene bölünmesinin mutlaka tek bir biçimde, tam ya da her şeyi kapsar bir tarzda olması gerekir demek istemiyoruz. Burada amaçladıklarımız açısından yalnızca bir formalizm ve bir yorumun birbirleriyle ilişkili olsa da bir kuramın iki ayrı parçası olduklarının farkında olunmasına gereksinim duyuyoruz. Herhangi bir formalizmi o formalizmin bir yorumuna ulaşırken tüm akla yatkın durumlara ve (ister gerçek ister 'düşünce' çeşidinde olsun tüm) deneylere uygulamak olası olmadığından, yorum bir formalizmin (mutlaka) tam olmayan bir incelemesini temel alır. Dünya hakkındaki 'sezgilerimiz' büyük oranda (genellikle kesin olarak) çözebildiğimiz göreli olarak az sayıdaki (ancak umut edilir ki 'tipik' olan) durumları ya da problemleri temel alır. Bu nedenle, klasik mekaniğin (kütlesi m olan) bir gezegenin (M kütlesindeki) Güneş etrafındaki hareketine uygulanması durumunda, uygun formalizmi çok kaba bir taslakla Newton'un ikinci yasası ($F = ma$) ve Newton'un evrensel kütleçekim için ters kare yasası cinsinden betimleyebiliriz. Çok sayıda uygulamayı (temel olarak iki cisim problemini ve bu problemdeki küçük sapmaları) temel alarak, daha sonra dünyanın bu yasalar sistemi tarafından yönetilen doğasının bir yorumunu geliştiririz. Tarihsel olarak ortaya çıkan resim ya da 'halkbilimsel' (ç.n.: hemen herkes tarafından fazla sorgulanmadan, alışkanlık halinde kabul edilen) inanç, tamamıyla belirlenimci olan, (ilke olarak) öngörülebilir fiziksel bir evrenin resmidir. Bu sezgi eldeki çözümsel araçlara fazla direnç göstermeden çözülebilen (günümüzde 'integre edilebilir' diye anılan) problemler sınıfını temel alır. Bununla birlikte, 12. Konu'da gördüğümüz gibi, yaklaşık olarak son bir iki onyıllık sürede ortaya çıkan modern kaos kuramından

alınan ders, bu tür integre edilebilir dinamik sistemlerin klasik mekaniksel sistemler için hiç de tipik olmadıklarıdır. Şimdi 'tipik' bir mekaniksel sistemin kaotik davranış gösterebilmesinin farkında olup bunu anlıyoruz, böylece bu sistemin gelecekte çok uzun dönemdeki davranışı hakkında aslında hiçbir öngörüde bulunma gücümüz yoktur. Klasik mekaniksel sistemlerin doğası hakkındaki sezgilerimiz neredeyse 300 yıl kadar bir süreyle ciddi bir şekilde yanlıştı. Klasik mekaniğin formalizmi (ya da denklemleri) değişmedi, ancak (ontolojik bir belirlenimcilik hâlâ kabul edilebilse de) klasik mekaniğin yorumu çoğu kimse için kesinlikle değişti. Formalizm ile yorumu arasındaki farkın temel bir örneği olarak bunu ele aldıktan sonra, şimdi kuantum mekaniğinin durumu için işe koyulalım.

23.2 Kopenhag Yorumu

(Görelilik kurallarına bağlı olmayan) kuantum mekaniğinin formalizmi üzerine çok kapsamlı kitaplar yazılmıştır ve burada yalnızca birkaç basit kural cinsinden genellikle kuantum mekaniksel hesaplamalar yapılırken kullanılan varsayım türlerinin en kısa biçimde kaba bir taslağını çizmek niyetindeyiz. Bu varsayımların tam, bağımsız ya da olası en genel varsayımlar oldukları yönünde hiçbir şey öne sürülmüyor. Bunlar yalnızca, bir ψ durum vektörünün belirli bir fiziksel durumu temsil etmekte kullanılabildiği sürece, biçimsel bir yapının gösterimi olarak tasarlanıyorlar.

i sistem için bir (ψ) durum ya da dalga fonksiyonu.[3]

ii ψ durumunun fiziksel sistem için H Hamiltonian'ın etkisi altında zaman içindeki evrilişini veren dinamik bir denklem (Schrödinger denklemi[4]).

iii (Hermitik (ç.n.: İngilizcesi 'Hermitian')) A işlemcileri ile a fiziksel gözlenirleri arasında bir karşılıklılık.[5]

iv a'nın bir dizi gözlemi için ortalama değerleri hesaplamak için bir kural.[6]

v (ya açık bir şekilde ya da sonuç olarak varsayılan bir) ölçüm üzerine bir izdüşüm varsayımı ya da dalga fonksiyonunun çökmesi.[7]

Heisenberg belirsizlik ya da belirnememe ilkesi bu formalizmden çıkar. Bu, Bohr'un tamamlayıcılık ilkesiyle ilgilidir. Burada amaçladıklarımız açısından, tamamlayıcılığın bir örnek olarak kullanılabilecek özel bir hali çok iyi bilinen dalga-parçacık ikiliğidir, ki bu ikiliğe göre fiziksel bir sistem (diyelim, bir elektron ya da bir foton) içinde bulunduğu bağlama ya da çevreye bağlı olarak ya bir dalga ya da bir parçacık gibi davranır. Kuantum mekaniğinin formalizminin (ideal olarak düşünülmüş) konum-momentum ölçümlerine, çift yarık düzenlemelerine ve benzerlerine olan uygulamaları, kendi içinde belirli uzay-zaman yörüngelerinin sürdürülemediği, gözlenirlerin sahip oldukları belirli (spinin tüm bileşenleri gibi) değerlerin her zaman olası olmadığı ve birbirini sırayla izleyen olaylar dizisi şeklinde giden nedenselliğin bırakılmak zorunda olduğu (ve yerine belki de 'istatistiksel nedenselliğin' - her ne ise - konulacağı) bir resime ya da yoruma yol açar. Bundan başka, ölçüm süreci tıpkı (altta yatan fiziksel bir ontoloji cinsinden) klasik bir limite geçişte olduğu gibi, doğada merkezi ve son derece şüpheli bir rol (bir başka deyişle, izdüşüm varsayımı ya da dalga fonksiyonunun çökmesi) üstlenir. Biçimciliğin belirli EPRB ilinti tipinde deneylerdeki incelemesi, kuramın *ayrılamaz* doğasını (bir başka deyişle, (21.8) denklemindekilere ya da (22.2) ve (22.4) denklemlerinde yer alan toplamlardakilere benzer türde dolaşık kuantum durumları) gösterir ve bu da ortaya birbirlerinden uzamsal olarak ayrılmış bölgeler arasında yerel olmayan etkilerin varlığını gerektiren ilintileri çıkarır. Böylece, kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunda fiziksel süreçler, en temel düzeyde hem doğal bir biçimde belirlenemezcidirler hem de yerel olmama özelliğine sahiptirler. Klasik fiziğin ontolojisi ölmüştür.

23.3 Mantıksal Olarak Olası, Deneysel Olarak Var Olabilir Bir Seçenek

Kuantum mekaniğinin formalizmi bu formalizmin Kopenhag yorumuyla özdeş olmadığından ya da onun bu yorumu içermesi gerekmediğinden, aynı formalizmin Kopenhag yorumuna seçenek oluşturan, deneysel olarak onunla eşit derecede yeterli bir yorumunun ana hatlarını çıkaralım. Böyle bir yorumun varlığı bir kez kanıtlandıktan sonra, onun tarihsel kökeni ve yazgısı sorusu üzerinde duracağız. Belki de bunu tanıtmanın en kısa yolu, Bohm'un nedensel yorumunu ele almak-

tır.[8] Matematiksel ayrıntıları (bunlar bu konunun sonundaki Kısım 23.A'da bulunabilir) bir kenara koyacak olursak, Bohm'un yaptığı Schrödinger denklemini almak ve onu matematiksel bir dönüşüm aracılığıyla Newton'un $F = ma$ ikinci hareket yasasına benzer özdeş bir biçimde yeniden yazmaktı, burada F artık hem olağan V klasik potansiyeli hem de yeni bir U kuantum potansiyeli tarafından (Kısım 23.A'daki (23.7) ve (23.4) denklemlerine bakınız) belirlenmektedir.

Burada amaçladıklarımız bakımından bu sonuçların bizimle ilgili kısmı, kuantum mekaniğinin dinamiğinin $F = ma$ diye 'Newtoncu' bir biçime ((23.7) denklemi) koyulabilmesi ve bu dinamiğe elektronlar gibi mikroskopik parçacıkların uzay-zamanda tutarlı bir şekilde tanımlı yörüngeler izlediği nedensel bir yorumun verilebilmesidir. Bununla birlikte, bu yörüngeler kuantum potansiyelinin etkisi nedeniyle parçacıkların $(r_0, \mathbf{v}_0)$ başlangıç koşullarına karşı çok duyarlıdır. (Bohm'un özgün makaleleri 1952'de modern kaos kuramının gelişinden ve tutulmasından çok önce yazıldıkları halde, Bohm'un genel yaklaşımı ve gösterdiği kavrayış derinliğinin birkaçı bu güncel etkinlik alanının müjdecisidir ve kesinlikle bu alanla uyum içerisindedir.) Bohm'un nedensel yorumunu aşağıdaki gibi betimleyelim. ψ dalga fonksiyonu, göz önünde tutulmakta olan mikro sistem (burada m kütlesinde bir parçacık) üzerinde çevrenin etkisini temsil eder. Bu ψ Schrödinger denkleminin bir çözümüdür ve ((23.4) denklemi aracılığıyla) U kuantum potansiyelini verir. Bu kuramda ψ'nin temel rolü budur. Nedensel yorum ve standart Kopenhag yorumu aynı formalizmi temel alırlar ve aşağıdaki üç varsayımda bulunulursa, yaptıkları öngörülerde ayırt edilemezler:

i ψ alanı Schrödinger denklemini ((23.1) denklemi) sağlar.

ii parçacığın hızı $\mathbf{v} = (1/m)\nabla S$ 'rehberlik koşulu' ((23.6) denklemi) ile sınırlandırılmıştır.[9]

iii bir parçacığın kesin konumu öngörülmez ya da kontrol edilmez, ancak $P(x,t) = |\psi(x,t)|^2$ olasılık yoğunluğuna göre istatistiksel bir dağılıma (ç.n.: olasılık kurallarına uygun biçimde, belli bir sonucun bir grup denemede ortaya çıkmasında olduğu gibi bir dağılıma) sahiptir.

Bunlar mantıksal olarak bağımsız varsayımlardır. Özellikle ψ'nin kavramsal olarak (i) ve (iii) varsayımlarında çok farklı roller oynadıklarına

dikkat ediniz. Yukarıda formalizmin açıklamasına yönelik olarak sunduğumuz notta, (i) ve (iii) (ψ dalga fonksiyonu aracılığıyla bir kuantum potansiyeli tarafından etkilenen) bir mikro sistemin kuantum dinamiğini temsil ediyorlar diye alınır. Bunlara ek olarak P olasılık yoğunluğunun niçin $|\psi|^2$ değerine sahip olması gerektiği sorusuna karşılık Bohm[10], tıpkı (klasik) istatistiksel mekanikte rasgele seçilmiş bir başlangıç dağılımının rasgele etkileşimler aracılığıyla bir denge (Maxwell–Boltzmann) dağılımına sürülmesi gibi, başlangıçta $P \neq |\psi|^2$ olan herhangi bir P yoğunluğunun rasgele etikileşimler aracılığıyla ve kuantum dinamiği tarafından $P = |\psi|^2$ haline 'sürülebileceğini' göstermek için bir düşünce öne sürdü. Bu nedenle, (iii)'ün yalnızca kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumu ile uyuşmanın oluşmasını sağlamak için yapılmış ad hoc bir varsayım olarak görülmesi gerekmez. Doğal olarak, tamamıyla mantıksal bir bakış açısından ele alındığında, (iii) basit bir şekilde - aslında Kopenhag yorumu için yapıldığı gibi - keyfi bir şekilde alınan bir karar uyarınca da istenebilir. Bohm'un kendisi (iii)'le ilgili özel olarak şunları söyler:

> Parçacığın kesin konumunu öngörmüyoruz ya da kontrol etmiyoruz, ancak uygulamada olasılık yoğunluğu $P(x) = |\psi(x)|^2$ olan istatistiksel bir topluluğa sahibiz. Bununla birlikte, istatistiğin kullanımı kavramsal yapıda doğal olarak bulunmaz, ancak yalnızca parçacığın kesin başlangıç koşullarıyla ilgili bilgisizliğimizin bir sonucudur.[11]

Burada amacımız kuantum mekaniğinin bu yorumu ile standart yorumunun deneysel olarak birbirlerinden ayırt edilemezliği sorusunu çok ayrıntılı olarak ele almak değildir. Bu tür ayrıntılar başka yerlerde bulunabilir.[12] Köklü bir biçimde birbirlerinden farklı olan yorumların nasıl kuantum mekaniğinin standart formalizmini temel alabileceklerini gösterdik. Heisenberg belirsizlik bağıntıları gibi standart sonuçların tümünün hâlâ elde edilebilmesine karşın, bu nedensel yorumda ölçüm ve dalga fonksiyonunun çökmesi sorunları diye sorunların olmadığına işaret etmek de dikkate değer.[13] Bir başka deyişle, klasik ve kuantum dünyaları ya da egemenlik alanları arasında hiçbir ontolojik ayrılık bulunmaz.[14] Bundan başka, klasik yönetimi kuantum potansiyelinin ((23.4) denklemi) ihmal edilebilir olması koşulu aracılığıyla niteleyebiliriz. Bu ψ dalga fonksiyonunu işin içine soktuğundan, dalga fonksiyonunun klasik bir egemenlik alanı için sağlamasının zorunlu olduğu bir özellik haline gelir (ki bu sık sık belirtilen ancak gerçekleştirilemez ve

kavramsal olarak iyi tanımlanmamış olan $\hbar \to 0$ gibi bir 'limit'ten çok daha anlaşılır ve tutarlı bir ölçüttür).

Nedensel kuantum mekaniği düzenlemesinin bir başka yönü de, bu yoruma fiziksel temeller sağlamak için yapılan çeşitli denemeler olmuştur. Bu tasarının oldukça zor olduğu ortaya çıkmıştır ve bu çabaları (yukarıda ana hatları verilen) Bohm'un yorumunun mantıksal alıştırmasından ayırt etmek önemlidir. Burada diğer düzenlemeleri ele almak için yerimiz yok. Şu anda, hiçbiri - standart kuantum mekaniğinin olduğundan daha - tam ve kendi sorunlarından arınmış halde değil.

23.4 Farklı Bir Yorumun Değeri

Şu anda elimizde kuantum mekaniğine gerçek bir seçenek oluşturan bir yorum bulunduğuna göre, bu alıştırmanın değerinin ne olduğunu sorabiliriz. 'Kopenhag' yorumu iş gördüğünden ve tutarlı olduğundan, bunu yapmanın çok bir önemi olmadığı düşünülebilir. Ancak, bu son sav kabul edilse bile, anlaşılabilirlik sorunu hâlâ ortada durur. Bohm, klasik haline gelmiş olan 1952 yılı makalesinde, bu durumun kendisi tarafından nasıl değerlendirildiğini öz ve ince bir şekilde şöyle belirtir.

> Kuantum kuramının olağan yorumu kendi içinde tutarlıdır, ancak deneysel olarak smanamaz bir varsayımı içerir, bir başka deyişle, tek bir sistemin en tam olası belirtilmesi yalnızca gerçek ölçüm süreçlerinin olası sonuçlarını belirleyen bir dalga fonksiyonu cinsindendir. Bu varsayımın doğruluğunu araştırmanın tek yolu, kuantum kuramının şu an için 'gizli' olan - ilke olarak tek bir sistemin kesin davranışını belirleyen, ancak uygulamada artık gerçekleştirilebilen ölçüm çeşitlerinde ortalama değeri alınan - değişkenler cinsinden başka bir yorumunu bulmaya çalışmakla olur. Bu makalede ve bunu izleyen ayrı bir makalede kuantum kuramının tam da bu türden 'gizli' değişkenler cinsinden bir yorumu öneriliyor. Matematiksel kuramın şu anki genel biçimini koruduğu sürece, önerilen bu yorumun tüm fiziksel süreçler için olağan yorumun verdiği sonuçların tam olarak aynılarını ortaya çıkardığı gösteriliyor. Yine de, önerilen yorum olağan yorumun sağladığından daha geniş bir kavramsal çerçeve sağlıyor, çünkü önerilen yorum tüm süreçlerin kuantum düzeyinde bile kesin ve sürekli bir betimlemesini mümkün kılıyor.[15]
>
> . . .
>
> Aslına bakılacak olursa, daha öncesinde ne zaman istatistiksel kuramlara başvurduysak, her seferinde sonuçta istatistiksel bir topluluğun

bireysel üyelerini yöneten yasaların tam da bu türden gizli değişkenler cinsinden dile getirilebileceğini bulduk.[16]

. . .

Olağan fiziksel yorum [bir başka deyişle, ulaştığı en son noktada ve tamlıkta] ... bize bir tuzağa düşmek için göz önünde tutulması gereken bir tehlike sunar; bu tuzak kendi kendine kapanan dolambaçlı - ve eğer doğru iseler doğrulukları ilke olarak kanıtlanamaz - bir hipotezler zincirinden oluşur.[17]

Kopenhag yorumu bize dünyanın bu terimin biraz olsun anlamlı bir duyumla anlayabileceğimiz bir betimlemesini verir mi? Bu kesinlikle tartışmaya açık bir sorudur. Daha neredeyse anlaşılabilir bir dünya görüşüne ulaşmak için çıkılan bu yolculuk, kuantum formalizminin başka bir yorumunu bulmaya çalışmada harekete geçiren bir etkendir. Bu sorunlar bir sonraki konuda daha ayrıntılı olarak ele alınıyor. Kuantum mekaniğinin standart yoruma seçenek oluşturan diğer yorumları, basit bir şekilde bir dogmaya uygun bir biçimde davrananlar gibi çekilip atılmak yerine en azından bilinir hale getirilmelidirler.

Bu tutumu göz önüne alarak, Kısım 23.1'de bilimsel bir kuramın iki bileşeni - formalizmi ve yorumu - arasında yaptığımız basit ayrıma geri dönelim. Hem standart kuantum mekaniği hem de Bohm'un yorumu aslında gözlemlenebilen niceliklerin değerlerini öngörmek için tam olarak aynı kurallar setini kullanır. Kuantum mekaniğinin formalizmi o kadar büyüleyici bir biçimde başarılı - hiç tartışmasız fizik tarihindeki niceliksel olarak en başarılı kuram kuantum mekaniğidir - olmuştur ki, başlangıcından (yaklaşık olarak 1930 diyelim) bu yana geçen çok sayıdaki onyıllar içinde şimdiye dek uygulanageldiği herhangi bir fiziksel olgular seti için deneysel olarak tamamıyla yeterli olduğunu tezimizde basit bir şekilde kabul ederiz. Fiziksel yorum ile kuramın bize bu olguların altında yatan yapı (dünyanın mobilyası hakkındaki benzer resimli öykü - bir ontoloji) hakkında anlattıklarından söz edilmektedir. Önemli olan nokta, formalizm değil, tersine yorumdur. Bunlardan ikincisiyle (ç.n.: yorumla) ilgili olarak, Kopenhag yorumu için değil, Bohm için kavramsal bakımdan ilke olarak iyi tanımlanmış anlamları olan (bir parçacık için bir yörünge gibi) nicelikler vardır. Bunların gözlemle ulaşılabilir olması gerekmez.

Kuantum mekaniğinin standart, Kopenhag yorumu, göz önünde tutulan fiziksel sistemin ölçümü ya da gözlemi üzerine ψ durum vektörünün sürekli olmayan ve doğasında bulunan kontrol edilemez bir değişimini, sıçramasını ya da çöküşünü gerektirir. Bunun gerektirdiği bir şey, fiziksel süreçlerin en temel düzeyinde öz ve elenemez bir belirlenemezliğin var olduğudur. Eğer kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumu fiziksel dünyamızın doğası hakkında bize birşeyler anlatıyor diye alınırsa, o zaman bu yorum indirgenemez bir biçimde belirlenemezcilik özelliğine sahip bir ontolojiye sahip olmalıdır, böylece bir mikro sistem için ilke olarak sahip olunan değerlerin sürekli evrilişinden ya da bir uzay-zaman zeminindeki yörünge hakkında konuşamayız.

Öte taraftan, tam olarak aynı formalizmin Bohm yorumunda mikro sistemler tamamıyla belirlenimci bir şekilde evrilirler. Parçacıklar bir uzay-zaman sürekliliğinde - bazı zamanlar son derece sıradışı olsalar da - belirli yörüngeleri izlerler. Ölçüm üzerine dalga fonksiyonunun çökmesi diye birşey olmaz, yalnızca parçacığın nerede olduğunu buluruz.[18] Heisenberg belirsizlik bağıntıları kuantum potansiyelinin etkileri yüzünden ölçümlerimizin kesinliği üzerinde sınırlamalar haline gelirler. Standart kuantum mekaniğinin tüm istatistiksel öngörülerini yeniden elde ederiz. Bu yorumda, bir mikro sistem klasik kaotik bir sisteme benzer bir şekilde davranır.

Bohm'un kuramı belirlenimci olduğundan ve standart kuantum mekaniğinin bulunduğu öngörülerin tümüyle aynı öngörülerde bulunduğundan, ortaya Bell teoreminden (Kısım 22.3) Bohm'un kuramının yerel olmamak zorunda olduğu çıkar. Bunun böyle olduğu kuantum potansiyelinin etkisi nedeniyle çok açıktır: Çevredeki bir değişiklik dalga fonksiyonunun uzayda her yerde anında değişmesini gerektirir, bu da sırasıyla kuantum potansiyelini ((23.4) denkleminin U'su) her yerde ve anında değiştirir. İlk bakışta Bohm'un kuramının yerel olmama özelliği, özel göreliliğin ilk işaret (ç.n.: sinyal) ilkesiyle bir çelişki varmış izlenimi verebilir. Ancak bu uzun erimli ilintilerin (örnek olarak (22.7) denklemine bakınız) imleşim (ç.n.: İngilizcesi 'signaling') amacıyla kullanılamayacağı kanıtlanabildiğinden bu böyle değildir.[19]

Böylece, Bohm yorumu özel göreliliği mutlak bir biçimde evrensel olarak temel bir kuram olma konumundan indiriyormuş ve bunun yerine görelilikle uyuşan değişmezliği yalnızca fiziksel bir kuramın 'gözlemsel' içeriğinden istiyormuş gibi görünebilir. Hem sonra bu niçin o kadar kötü ki? Kaldı ki Einstein'ın özel görelilik için

aksiyomlarının (bir başka deyişle, fiziğin yasalarının biçimsel olarak değişmezliği - mutlak bir hızın algılanmasının mümkün olmaması - ve tüm eylemsiz gözlemciler için ışık hızının sabitliği) kendileri de gözlemsel sonuçları temel alıyorlardı. Bunu bu aksiyomların, kendilerinin deney tarafından gerektirildikleri için değil, deneylerin sonuçlarını açıklamak için yapıldıkları anlamında kullanıyoruz. Bu bağlamda Kısım 16.3'te Einstein'ın eşzamanlılık için ölçütünün üzerinde uzlaşılmış kurallara bağlılık niteliği hakkında yaptığımız yorumları anımsayınız. Orada başka - tüm eylemsiz çerçeveler arasında mutlak bir eşzamanlılığa izin veren biri gibi - üzerinde uzlaşılmış kuralların mümkün olduklarını, ancak bunların özdeş deneysel sonuçlara yol açtıklarını gördük. Bu seçimi akılda tutmaya değer, çünkü her şeyiyle görelilikle uyuşan değişmezliği (kuramın denklemlerinin düzeyinde) kuantum mekaniği ile birleştirmek için kabul edilebilir hiçbir yol olmayabilir.[20]

Demek ki Bohm asıl uzay-zaman yörüngeleri hakkında gerçekçi olmamıza izin veriyor, ancak bunun bir bedeli de var. Kuantum mekaniğinin tüm yorumları kendilerine iliştirilmiş fiyat etiketlerine sahiptirler. Farklı bir bağlamdan kaynaklanan bir terimler dizgesinde, bu yorumların ya da dünyaya bakış açılarının genel bir kavramlar ve bağlılıklar ağı içerinde kuramsallaştırıldıklarını ve birinin kendisi için en kabul edilebilir alışverişi düzenlemek zorunda olduğunu söyleyebiliriz.[21] Yine de Bohm'un 1952 yılı makalelerine bakmaktaki amacımızın, yörüngelerin olası olduklarını ve bu nedenle Kopenhag dogmasının bir kısmının (tamlık ve bundan dolayı bu tür yörüngelerin olanaksızlığının öne sürülmesinin) yanlış olduğunu göstermek olduğunu hatırlayalım. Bu makaleler bunu kesinlikle yaptılar.

23.5 Açıklamayla Anlayış Karşı Karşıya

Şimdi kuantum mekaniğinin bize en temel düzeyde fiziksel dünyanın işleyişiyle ilgili olarak verdiği ulaşım hakkının türü sorusunu ele alacağız. Bu, gerçekliğin klasik ve kuantum görüşlerinin kısmen karşılaştırılması ile yapılacaktır. Bilimsel kuramların işlediği üç düzeyi göz önünde bulundurun: (i) deneysel olarak yeterlilik (ç.n.: ya da uygunluk), (ii) (biçimsel) açıklama ve (iii) anlayış. Bu aşama düzeylerinden biriyle bir sonraki arasında kesin bir sınır çizmek her zaman olası olamasa da bunlar bilimsel bir kuramın üç ayrı amacı-

dır. Ele alacağımız ayırımlar ve ilişkiler yalnızca fiziksel bilimlere - ki bilimin bu alanından örnekler seçilecektir - uygulanabilir.

Fiziksel olguların açıklamasıyla anlaşılışı arasındaki farkla ilgilendiğimizden, önce burada kullandığımız halleriyle 'açıklamak' ve 'anlamak' terimleri arasındaki farkı ortaya koyalım. Bilimde açıklamanın doğası, bilim felsefecileri tarafından çok tartışılan bir konudur.[22] Açıklamayı ve bilimsel anlayışı bir açıklamanın ne olduğunu ve bu açıklama hakkında neyin bize anlayışı verdiğine karar vermek amacıyla göz önünde tutunuz. 'Biçimsel açıklamamız' (ya da kısaca yalnızca 'açıklama') temelde mantıksal olarak çıkarılan sonuç cinsinden bir açıklamadır ve aslında tümdengelimsel-nomolojik (ç.n.: nomoloji: Bilim felsefesinde genel fiziksel ve mantıksal yasaların ortaya çıkarılışı ve incelenmesiyle ilgili çalışma alanı) (kısaca T-N) ya da kapsayan-yasa modelindeki açıklama kavramıyla özdeştir. (Bu, bilim felsefesinde kabul edilen bir hipotezden ya da 'yasadan' mantıksal tümdengelim ile çıkarılan bir sonuçtan elde edilen açıklama için kullanılan standart bir terimdir.) Kuantum mekaniğinde olduğu gibi, açıklama işini yapan son gerçekler oldukça tuhaf ve yabancı olabilirler. Oldukça kesin olarak tanımlanabilir ve nesnel olan bu tür bir açıklama, bize ele alınan yasa altında sınıflandırılan ya da kapsanan olguların kendi başına anlaşılışını vermez. Bilimsel açıklamaların çoğu, aslına bakarsanız, yalnızca bu tür biçimsel açıklamalardır ve bize mutlaka biraz olsun bir anlayış duygusu sağlamazlar.

Bir açıklamanın anlayış için gerekliymiş gibi görünen belirli pratik yönleri bulunur. Birleştiricilik önemli bir öğedir. Evrensel (ç.n.: ya da geniş çaplı) bir açıklama, verilmiş (ç.n.: ya da öyle) diye kabul etmek zorunda olduğumuz bağımsız olguların sayısını azalttığından anlayışa yardım eder. Birleştiricilik ve indirgeme (atom fiziğinde ve temel parçacık kuramında olduğu gibi birkaç kolay indirgenemez 'verilene' ya da hipoteze düşürme) anlayışı oluşturabilen bir açıklamanın önemli nitelikleriyken, kendi başlarına yeterli değildirler. Bu, bir sonraki kısımda öyle olduğunu göstermeye çalışacağımız gibi, EPRB ilintilerinde olduğu gibi tam olarak kuantum etkileriyle özellikle açık hale gelir. Geçmişteki kuramlarda bir anlayış duygusu oluşturan ortak özelliklerden bazıları nelerdir? Bizim anladığımız anlamda anlayış, bazı kuramların sahibi olduğu ve onları kabul etmemizle ilgisi olabilen - katıksız bir biçimde epistemik (ç.n.: bilgiyi içeren ya da bilgiyle ilgili; bilişsel) olandan öteye giden - pratik bir artı özellik olur. Kuşkusuz ki koşullara bağlı olan bir yanı vardır; çünkü insan olarak bizim, sayelerinde bir anlayış duygusuna sahip

olabildiğimiz belirli koşullara bağlıdır. Şaşırtıcı olmayan bir biçimde nedensellik ve nedensel mekanizmalar sık sık, ortaya bir anlayış çıkaran açıklamaların temel özellikleridirler. Doğal olarak, her zaman fiziksel olguların anlaşılışını oluşturacak bir açıklamayı bulabileceğimizin bir garantisi yoktur.

Akıl yürütmemiz, aslında fiziksel olguların anlaşılışının resmedilebilir fiziksel mekanizmaları ve süreçleri içerdiği yönündeki - deneyimleri ve fiziğin tarihini temel alan - sezgiden başlar. Bir tarihçi ve bilim felsefecisi olan William Whewell (1794-1866) (ilk kez 1837'de yayınlanan) *Tümevarımsal Bilimlerin Taribi* adlı kitabında, bir yasayla bir neden arasındaki ya da bir kuramın gelişimindeki biçimsel ve fiziksel evrelerin arasındaki farkı ortaya koyduğu zaman, bu tür bir konumun ana hatlarının kaba bir taslağını verdi. Benzer bir biçimde, Kısım 16.3'ün sonunda Einstein'ın (fiziğin yasalarının biçimlerinin değişmezliğiyle ilgili genel ilkeleri ve ışık hızının değişmezliğini temel alan özel görelilik gibi) ilke kuramlarını (Lorentz'in elektronun eteri temel alan kuramı gibi) yapıcı kuramlarla karşılaştırdığını gördük. İlk sınıftaki kuramların erdemlerini epistemik güvenilirlik (bir kez deneysel olarak temellendirilmiş ilkeler kabul edildiklerinde tümdengelimle çıkarılan sonuçların güvenilirliği) ve uygulanabilirlik genelliği olarak görürken, ikinci sınıftaki kuramlar sık sık belirli fiziksel modeller cinsinden kavrama açıklığı (bizim anlayışımız) sağlıyordu. Biçimsel açıklama ile anlayış arasındaki fark çok büyük bir oranda budur.

Basit bir örnek olarak, elimize (bir gezegenin yörüngesinin düzlemde bir eğri olduğunu öğrendikten, gözlemledikten ya da bize böyle olduğu anlatıldıktan sonra) Kepler'in gezegenlerin hareketi için ikinci yasasının (herhangi bir kuramdan çıkartılışının temel alınması gerekmeksizin) matematiksel biçimiyle verildiğini varsayın.[23] Bu yasa gezegenin Güneş'ten olan (Güneş'in yer aldığı odak noktasından ölçülen) r uzaklığını gezegenin (θ) açısal konumu cinsinden verir. Bu formül gözlemlerden elde edilen verilerin deneysel olarak yeterli bir betimlemesidir; ancak (bu düzeyde) niçin bu özel ilişki biçiminin elde edilmesi gerektiği hakkında en ufak bir fikrimiz yoktur. Newton'un ikinci hareket yasası ve Newton'un evrensel kütleçekim yasasının birlikte bu sonucu verecek şekilde çözülebileceğini kanıtlamak, yapılması kolay (ancak tamamıyla da önemsiz olmayan) bir alıştırmadır. (9. Konu'yu anımsayınız.) Bu tür bir tümdengelimsel akıl yürütme, kesinlikle biçimsel bir açıklama sağlar; ancak bize hangi fiziksel sürecin gezegenin eliptik bir yörünge izle-

mesine neden olduğu hakkında hiçbir anlayış vermez. Nedensel bir açıklama için bir deneme (anlık) kütleçekimsel bir uzaklıkta etki düşüncesini (ç.n.: Tanrı'dan) dilemek olabilir. İki yüz yıldan daha fazla bir süre boyunca herhangi birinin bu tür bir uzaklıkta etkiyi anladığı hiç de akla uygun görünmez. Bir bakıma Einstein'ın genel görelilik kuramı anlaşılabilir (resmedilebilir) nedensel bir açıklamayı, içerisinde bir kütlenin bir diğeri üzerindeki fiziksel etkilerini iletmek için gravitonların (ç.n.: graviton, kütleçekim etkileşimlerinin kuantumu olduğu varsayılan, belirsiz uzunlukta ömrü, sıfır elektrik yükü ve sıfır durgun kütlesi olan parçacık) (ya da kütleçekimsel dalgaların) yayıldığı (kendine özgü yapısı Şekil 18.3 ve 18.4'te izlenimci bir tarzda resmedildiği gibi kütlelerin dağılımı ile belirlenen) eğrilmiş bir uzay-zaman zemini cinsinden sağladı. Kesin olmayan bir şekilde belirtilecek olursa, bu uzay-zaman içerisinde 'rahatsızlıkların' (ç.n.: örneğin sistemde oluşan küçük sapmaların) sonlu bir hızla yayılabildiği bir zemin gibi davranması açısından bir 'eter' rolü oynar.

Şimdi özel olarak iyi bilinen EPRB düşünce deneyi (Şekil 22.2'yi hatırlayınız) tarafından gösterilen kuantum olguları için durumu göz önüne alalım. Bu deneyde, uzamsal olarak birbirlerinden ayrılmış bölgelerdeki iki gözlemcinin her biri ne gözlemleneceği konusunda (deney araçlarının ayarları için) iki seçenekten birini seçebilir ve her ayar için iki olası sonuç (spin yukarı ya da spin aşağı) vardır. Daha önceden gördüğümüz gibi, Bell'in çalışması hiçbir belirli, yerel kuramın kuantum mekaniği tarafından öngörülen deneysel sonucu açıklayamayacağını gösterdi.[24] Daha sonra yapılan birçok çözümleme, Bell tipinde eşitsizliklerin elde edilmesi için tam olarak nelerin varsayılması gerektiği konusundaki anlayışımızı keskinleştirdi. EPRB durumu için Bell eşitsizliklerinin gerçekte gözlemlenen ilintilerin (Kısım 22.4'teki iki kişi-tek çeyrek dolar örneğinde göz önüne aldığımız tipteki) yerel bir bilinen neden açıklaması için birleşik dağılımlar üzerindeki yeterli ve gerek koşullar oldukları ortaya çıkar.[25] Bu eşitsizlikler çiğnendiklerinden, bu durumda en azından bu tek deneysel düzenleme için (ve başkaları da vardır), hiçbir yerel, bilinen neden açıklaması olası değildir. Gözlemlenen sonuçlar için akla uygun bir ayrıntılı açıklayıcı kaynaklar listesi (i) yalnızca şans ya da rastlantı; (ii) birbirilerinden uzamsal olarak ayrılmış iki deney istasyonu arasındaki doğrudan doğruya nedensel bir bağlantı; (iii) sistemin ve deney araçlarının ortak geçmiş olaylarında yerleşmiş yerel bir bilinen neden açıklaması şeklindedir. En sonuncusun (madde (iii)'nin) önü Bell eşitsizliklerinin çiğnenmesi nedeniyle,

madde (ii)'nin önü de (sık sık böyle olduğu öne sürülür) özel göreliliğin ilk işaret ilkesi nedeniyle kapalıdır ve ilkini (madde (i)'yi) de hiçbir şekilde açıklaması olamayacağından şimdilik bir kenara bırakıyoruz.

Şu andaki durumda, deneysel yeterlilik, açıklama ve anlayış arasında aklımızdaki ayırımlar Şekil 22.2'deki EPRB deneyi için (22.7) denklemindeki $\langle r_A\, r_B(\theta,\psi)\rangle$ ilintisinden başlanarak görülebilir. Bu deneyde A ve B'nin birbirlerinden uzamsal olarak ayrılmış iki deney istasyonunu ve (θ,ψ) açılarının da (ilki A'da, ikincisi de B'de) spinlerin boylarınca gözlemlendiği yönleri belirttiğini anımsayınız. Bu tür bir dizi deneyin verileri ele alındığında, Ptolemaios günümüzde yaşıyor olsaydı (kuantum mekaniği ya da başka herhangi bir kuram kullanmadan) bu veriler için deneysel hata payları içerisinde (22.7) denkleminin tamamıyla olgusal bir betimlemesini (Kısım 19.2'de Planck'ın kendi ışıma yasasını nasıl bulduğunu gördüğümüzdekine çok benzer bir şekilde) elde edebilirdi. Bu betimleme şüphesiz ki deneysel olarak yeterlidir. Aslında, bu türden verilere uygun bir eğri bulma işlemi, verilerin kendisine özdeş olmaktan biraz daha fazlasıdır. Ancak bu aşamada, bu sonuçlar için elimizde ne bir açıklama vardır, ne de bunların nasıl ortaya çıktıklarını hakkında bir anlayış sahibiyizdir. Daha sonra, eğer biri bize kuantum mekaniğinin (belki de Kısım 23.2'nin başlangıcında betimlendiği şekliyle) formalizmini verirse, o zaman Kısım 22.A'da verilen türde bir hesaplama yaparak (22.16a) ve (22.16b) denklemlerinin sonuçlarını biçimsel olarak açıklayabiliriz. Böylece (22.7) denklemindeki birleşik dağılımların biçimsel bir açıklamasına sahip oluruz, ancak doğada bu olayların (altta yatan fiziksel süreçler cinsinden) nasıl oluşturuldukları hakkında hiçbir anlayışa sahip olmayız. Bir başka deyişle, formalizmin anlaşılabilir bir yorumu eksiktir.

23.6 Kuantum Mekaniği Anlamak İçin Yapılan Denemeler

Kuantum mekaniğinin formalizminde temel fiziksel olgular hakkında anladığımızı hissettiğimiz bir öyküyü anlatmayı bu kadar zor kılan şey nedir? Sorunun en can alıcı noktası, ortaya (Kısım 21.3) ölçüm problemini ve (örneğin (22.7) denklemindekiler gibi uzun erimli kuantum ilintileri) yerel olmamayı çıkaran kuantum durumlarının (bakınız (21.8), (22.2) ve (22.4) denklemleri) dolaşıklığıdır (ya

da çevrelerinden ayrılamamalarıdır). Bu dolaşıklık, herhangi bir yalıtılmış fiziksel sistem bir kez geçmişte başka bir sistemle etkileştiğinde - sistemler artık birbirleriyle etkileşmiyorlar olsa bile - bu sisteme artık bağımsız niteliklerin verilmesini olanaksız kılar. Bu, Kısım 21.3'te bir ölçüm süreci için özel bir örnekle açıklanmıştı, ancak bu tür bir dolaşıklık (genellikle elde edilemeyen çok özel koşullar dışında) kuantum sistemlerinin genel bir özelliğidir. Standart kuantum mekaniğinin çerçevesinden bakılacak olursa, günlük olarak kullanılan cisimlerden aslında bu türden sahip olunan nitelikleri gösterenlerinin klasik davranışını ve görünüşünü açıklamanın hiçbir yolu yokmuş gibi görünüyor.[26]

Şimdi, bu teknik ve kavramsal zorlukların üstesinden gelmek amacıyla ileri sürülen önerilerin bazılarını belirteceğiz, bu önerilerin tümü genel bir biçimde kuantum mekaniğinin - belirlenemezciliğin temel ve elenemez olarak kabul edildiği - standart ya da Kopenhag yorumu içerisinde yer alır. Genellikle kuantum olgularının anlaşılmasını oluşturmaya yönelik herhangi bir denemede engellendiği varsayılan - daha açık olarak belirtecek olursak, doğrudan doğruya nedensel bağlantılar ve yerel, bilinen neden açıklamaları - bazı hareketler gördük.[27] Kuantum mekaniğinin (biçimsel) açıklayıcı planının biraz anlaşılmasını sağlamak çok arzu edilir bir amaçtır; bu amacın peşine çoğunlukla başarılı bilimsel kuramlarımızın bize mikro egemenlikteki (ç.n: İngilizcesi 'microrealm') varlıklar için bile güvenilir bir bakış açısı verdiğine inanan *bilimsel gerçekçiler* tarafından düşülür. Yalnızca biçimsel bir açıklamanın ötesine giden fazladan birşeyleri istemek (en azından daha yakın zaman Batı geleneğinde), insan doğasının bir parçası olarak görünür. Kuantum mekaniğinin anlamını açıklamak için birçok - çoğunlukla gerçekçi - deneme olmuştur. Şimdi güncel olanlardan bazılarının olguları anlamamızı sağlamakta başarılı olup olmadıklarını görelim.

Bir kuantum sisteminde gözlemlenebilen değişkenlerin birçoğunun 'ontolojik olarak bulandırılmasının' (bir parçacığın, diyelim, konumunun ve momentumunun eşzamanlı olarak kesin bir şekilde gözlemlenebilir değerlerinin bulunmaması) ciddiye alındığı bir kuantum gerçekliği savunulabilir. 'Kuantum parçacığı' terimi dalga-parçacık ikiliği gösteren bir cismi geleneksel 'klasik parçacıktan' ayırt etmek için ortaya atılabilir. Kuantum sistemlerinin çevrelerinden ayrılamama özelliği bu tür sistemlerin 'bütünsel niteliğinin'(ç.n.: İngilizcesi 'holistic': Yaşayan maddelerin ya da gerçekliğin kendilerini oluşturan parçaların toplamından çok daha büyük olan

organik ya da birleştirilmiş bütünlerden oluştuğunu belirten kuramla ilgili) bir belirtisi olarak görülebilir. Bir bakıma, yapılmış olan kuantum formalizminin eşi olmayan yönlerinin bazılarını almak ve sonra da bunlara isimler ve ontolojik konumlar atamaktır. Bu kendi içinde fiziksel olguların anlaşılması için herhangi bir anlam oluşturmaz. Eğer kuantum gerçekliğinin kuantum mekaniği tarafından gerektirilen gerçeklik olduğunu söylersek, herhangi birinin kuantum gerçekliğinin dünyanın bir resmi olarak tastamam ne olduğunu kavramasına yardım etmiş olmayız.

Bazıları yeni bir nedensellik kavramına gereksinimimiz olduğunu öne sürer, ama bu yeni kavramın tam olarak ne olduğu açık değildir. Heisenberg bundan çok önce kuramımıza (ve ontolojimize) yeni bir fiziksel varlık sınıfını - *potentia* - eklememizi önerdi. Bu, uzay-zamanın tek bir sınırlandırılmış bölgesinde belirli sonuçların nasıl ortaya çıktığını ya da gerçekleştiğini anlamamıza yardımcı olma sözü veren bir harekettir. Bu, kuantum mekaniğinde kendisinden çoğunlukla dalga paketinin indirgenmesi ((21.9) denklemine bakınız) diye söz edilen ve kuantum mekaniğinin standart yorumlanışındaki formalizmi için en temel problem olan yönünün üstesinden gelmek içi yapılan bir denemedir. Başkaları Schrödinger denkleminin EPRB ilintilerini de içeren makro ve mikro olguların bütünleşik (temel olarak dalga ontolojisi) olarak ele alınmasını sağlayacak bir şekilde değiştirilmesini önerdi. Bununla birlikte, ölçüm probleminin bu biçimsel çözümü gerçek fiziksel olgular düzeyinde EPRB tipindeki ilintilerin uzamsal olarak birbirlerinden ayrılmış sistemlerde nasıl oluşturulduğu hakkındaki aynı (fizik) bulmacasıyla karşı karşıya bırakır. Bunların ışığı altında, cisimlerin kendileri arasında doğalarında var olan ilişkilere sahip olduğu ve bu ilişkilerin rasgele istenecek her büyüklükteki uzaklıklarda sürüp gittiği bir tip ilişkisel bütünselcilik yeğlenebilir. İlişkisel bütünselciliğin söylendiğine göre geçerli olduğu mikro egemenlik alanından bu bütünselciliğin açık bir şekilde genel olmadığı makro egemenlik alanına olan geçişte kalacak olan ciddi problem bir kenara konacak olsa bile, ilişkisel bütünselcilik olgusunun öne sürdükleri bize fiziksel sistemler için anlayabildiğimiz bir kavram sağlar mı?

Çok farklı bir hareket tipi de doğrudan doğruya yerel nedensel bağlantılar ve yerel bilinen nedenler kuantum ilintileri için olanaksız olduklarından, bu kuantum ilintilerinin kendilerinin üzerlerine daha başka ve ileride açıklamalar kurduğumuz ilkel varsayımların indirgenemez kaba gerçekleri diye alınmaları gerektiği yönündeki bakış

açısını taşır. Bu, anlayış sorunundan kaçınır. Kuantum mekaniğinin bir betimlemesi şöyledir:

> 'Kuantum mekaniği ... kara kutu kuramlarının en karasıdır; harika bir öngörücüdür; ancak beceriksiz bir açıklayıcıdır.'[28]

Bu tür bir - bir açıklamaya temel olarak - önce kaba gerçeklerin yerleştirilmesi denemesi, kuantum olgularını anlayamadığımız iddiası ile tutarsız değildir. Böylece, eğer hiçbir şeyden sakınmaksızın belirlenemezci bir dünya görüşüne inanmak zorundaysak, hâlâ bu dünya görüşünü anlayamıyor olabiliriz.

Bununla birlikte, Bohm'un kuramı - konumu sahip olunan tek özellik (ya da tek gözlenir) olarak alarak ve kuantum olgularının ayrılamaz yerel olmama özelliğini kabul ederek - ölçüm probleminden uzak durur ve nesnel olarak sahip olduğu özellikleriyle gerçek bir dünyanın klasik olarak şartlandırılmış betimlemelerimizin çoğu ile hiçbir kavramsal çatlak oluşturmayan bir ontolojiye sahiptir. Bu, kuantum mekâniğinin belirli, resmedilebilir, geleneksel olmaya daha yakın (bazı belirgin özelliklerinde neredeyse 'klasik') bir yorumunu ortaya çıkarır. Bohm'un kuramı, parçacıkların her zaman için gerçek, nesnel olarak var olan yörüngelere sahip olduğu ve bir kuantum potansiyeli aracılığıyla etkileştikleri tamamıyla belirlenimci bir kuramdır. Buna karşılık ödenen bedel yerel olmama (doğrudan doğruya, anlık, uzun erimli etkileşimler) özelliğidir, ancak bu görelilik ile hiçbir deneysel çelişki oluşturmayan oldukça tehlikesiz bir çeşittedir. Bu modelin az önce söz etmiş olduğumuz diğer denemelerden daha fazla bir anlayış duygusu oluşturduğu öne sürülebilir.

23.A Bohm'un Kuramının Bazı Matematiksel Ayrıntıları[29]

Bohm'un yaptıkları temel olarak aşağıdaki gibi betimlenebilir. (Görelilik ile uyum içinde olmayan)

$$\mathrm{i}\,\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V\psi \qquad (23.1)$$

Schrödinger denklemiyle başlanarak (bu denklem burada verilmiş olarak kabul ediliyor ancak çıkarılmıyor), $R(x,t)$ ve $S(x,t)$ diye iki

tane gerçel fonksiyon $\psi(x,t) = R\exp(\mathrm{i}\,S/\hbar)$ biçiminde tanımlanır. Bu ayrışımın (23.1) denkleminde yerine konması ve sonuçta elde edilen ifadenin gerçel ve sanal kısımlarına ayrılması ile

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{2m}\left[R\,\nabla^2 S + 2\,\nabla R\cdot\nabla S\right] \tag{23.2}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\left[\frac{(\nabla S)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R}\right] \tag{23.3}$$

olduğu ortaya çıkar. *U kuantum potansiyeli*

$$U \equiv -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R} \tag{23.4}$$

olarak tanımlanır. (23.2) denklemi $P = R^2 = |\psi|^2$ tanımı ile

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\cdot\left(P\frac{\nabla S}{m}\right) = 0 \tag{23.5}$$

biçiminde yeniden yazılabilir. Eğer bir **v** hız alanını

$$\mathbf{v} = \frac{1}{m}\nabla S \tag{23.6}$$

biçiminde tanımlarsak, o zaman (23.5) denklemi tam olarak süreklilik denklemidir. (23.6) denkleminden sık sık Bohm'un kuramındaki 'rehberlik' koşulu olarak söz edilir.[30] Bu, parçacıklar için olası yörüngeleri tanımlar. P'yi parçacıkların dağılımı için olasılık yoğunluğu olarak yorumlayabiliriz. Momentumun $\boldsymbol{p} = m\mathbf{v}$ olarak tanımlanmasıyla ve **v** için (23.6) denkleminin kullanılmasıyla, (23.3) denkleminin kolaylıkla[31]

$$\frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}\,t} = -\nabla(V+U) \tag{23.7}$$

biçiminde yeniden yazılabileceğini gösteririz, böylece $\mathrm{d}\,\boldsymbol{p}/\mathrm{d}\,t = \boldsymbol{F}$ olur, ki burada $\boldsymbol{F}$, $(V+U)$ potansiyel enerjisinin gradyanıdır. Bu potansiyel enerji şimdi bilinen 'klasik' V potansiyel enerjisine ek olarak U 'kuantum' potansiyel enerjisini de içerir. (23.4) denklemindeki kuantum potansiyeli son derece klasik olmayan, yerel olmayan etkileri ortaya çıkarır.

Yararlı Kaynaklar

Jim Baggott'un *Kuantum Kuramının Anlamı* adlı kitabının 5. Konu'su, kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun şu an elimizde olan seçeneklerinin birkaçının güzel bir tartışmasıdır. James Cushing'in *Kuantum Mekaniği* adlı kitabının özellikle 2. Konu'dan 5. Konu'ya kadar olan kısmı, içinde bulunduğumuz konuda işlenen konulardan bazılarının geniş bir tartışmasını içerir. David Bohm'un 'Kuantum Kuramının "Gizli" Değişkenler Cinsinden Önerilen Bir Yorumu, I ve II' adlı çalışmaları, sonrasında Bohm mekaniği diye bilinir olan çalışma konusunun özgün çıkış yeridir ve kuantum mekaniğinin temelleri hakkında birçok keskin düşünce barındırır. David Bohm ve Basil Hiley'in *Bölünmemiş Evren* adlı kitabı, kuantum kuramının Bohm'a göre yorumunun - teknik bazı ayrıntılarıyla - genel bir sunumudur. Peter Holland'ın *Hareketin Kuantum Kuramı* adlı eseri, Bohm'un kuramı üzerine yazılmış ileri zorluk derecesinde ve çok doyurucu bir metindir. Antony Valentini'nin *Klasik, Kuantum ve Kuantum Altı Fiziğin Pilot Dalga Kuramı Üzerine* adlı kitabı, Bohm'un kuramının ve onun daha genişletilmiş biçimlerinin birçok yönünü ileri bir düzeyde, ancak yine de son derece okumaya değer ve insanı düşünmeye kışkırtan bir biçemde ele alır. James Cushing, Arthur Fine ve Sheldon Goldstein tarafından yayına hazırlanan *Bohm Mekaniği ve Kuantum Kuramı* adlı eser, Bohm'un programının çeşitli yüzleri üzerine denemelere sahiptir.

24
Tarihsel Belirsizlikler İçin Temel Bir Rol

Daha önceki konularda kuantum mekaniğinin deneysel olarak başarılı olan formalizminin, birbirleriyle karşılıklı olarak uyumsuz olan iki genel ontolojiye de - kendi doğası gereği belirlenemezci olan ve genel olarak kabul edilen Kopenhag yorumu ve Bohm'un tamamıyla belirlenimci yorumu - eşit derecede dayandığını kanıtlamaya çalışmıştık. Yorumun formalizm tarafından bu şekilde kesin olarak belirlenememesi, basit bir şekilde birbirine eşdeğer iki kuramın görünürde bir oldukları anlamına gelmez çünkü bu ontolojilerden birinin terimlerini diğerinin terimlerine çevirmenin hiçbir yolu yoktur. Bu durum başarılı bilimsel kuramlardan dünyanın doğru bir betimlemesini bulmaya çalışan bilimsel gerçekçiye bir meydan okuma sunuyormuş gibi görünebilir. Ayrıca, bu kuramlar arasındaki gerçek tarihi çekişmenin ve Kopenhag yorumunun Bohm yorumuna tercih edilmesinin, tarihsel açıdan belirsiz bu tür bir sürecin kazanan kuramın akla yatkın bir şekilde olayları yeniden kurgulamasından ve mantıksal yargılamasından anlamlı bir şekilde farklı olmadığını gösterdiğini öneriyoruz.[1] Başarılı sayılanın ve gerçekte olanlardan sonra bilimsel toplum tarafından doğruluğunu kanıtlaması için bilim felsefecisinin önüne teklif olarak konanın kendisi belirsiz ve tek olmayan bir üründür.

24.1 Kesin Olarak Belirlenememe

Burada adından Duhem-Quine tezi[2] olarak söz edeceğimiz bilimsel kuramların kesin olarak belirlenememesi sorununun kökeni, tipik olarak Pierre Duhem'in *Fiziksel Kuramın Yapısı ve Amacı* adlı kitabında (ilk kez yayınlandığı tarih 1906) yer alır. Bu eserde Duhem, ele alınan bir fiziksel kuramın kabul edilebilir olup olmadığı yargısına ulaşmanın temeli olarak aldığı hakkında oldukça açıktır.

> Fiziksel kuramın tek amacı, deneysel yasaların sınıflandırmasını ve bir betimlemesini sağlamaktır; fiziksel bir kuramı yargılamamıza ve onu iyi ya da kötü diye anmamıza izin veren tek sınav, bu kuramın sonuçlarıyla betimlemek ve sınıflandırmak zorunda olduğu deneysel yasalar arasındaki karşılaştırmadır.[3]

Bununla birlikte Duhem, deneysel düzenliliklerin yalnızca başarılı bir öngörüsünden ve açıklanmasından öteye hipotezler için - diyelim, öyle olduğu düşünülen ayrıntılı bir seçenekler kümesi içinden ya da arasından çok önemli bir deney ya da kesin bir mantıksal önerme aracılığıyla - yeterli temellerin sağlanması düzeyine geçilmeye çalışıldığı zaman, 'fizikçi, hayal edilebilir tüm varsayımları tükettiğinden asla emin olamadığı' için mutlaka başarısız olmaya mahkum olduğumuzu kanıtlamaya çalıştı.[4] Duhem bize, bir kuramın deneysel bir sonuçla çelişki içinde olduğu gösterildiği zaman, çürütülenin, hipotezlerin bir araya gelmesinden oluşan bir önerme olduğunu söyler. Bir başka deyişle, bir öngörüde bulunabilmek ya da bir hesaplamayı uygulanabilir kılmak için ana ilgi noktası olan kuramsal varsayıma ek olarak başka varsayımlara ya da yardımcı hipotezlere gerek vardır. Örnek olarak, (diyelim, Newton'un ikinci hareket yasasını sınamak için) temel eğik atış hareketi hesaplamaları yaparken, tipik olarak hava direncinin etkileri ihmal edilir. Bu, bazı zamanlar (Kısım 6.5'in sonunda gösterildiği gibi) gözlemlerle uyuşmayan öngörülere yol açabilir. Kaufmann deneyleriyle olan (Kısım 15.5'e bakınız) karmaşık durumu da anımsayınız. Farklı bilim adamları, bu tür uyuşmazlıklar ortaya çıktığında farklı hipotezleri değiştirmeyi seçebilirler. Duhem'e göre, bunu yaparken hepsi de tüm olguları kurtardıkları sürece mantıksal olarak eşit düzeyde haklıdır:

> [Fizikçilerin] izledikleri yöntemlerin doğruluğu yalnızca deney tarafından kanıtlanabilir ve eğer her ikisi de deneylerin gerektirdiklerini karşılamada başarılı olurlarsa, her birinin kendisini başarıyla sonuçlandırdığı çalışma ile hoşnut olarak ilan etmeye mantıksal olarak hakkı vardır.[5]

Doğal olarak, Duhem bile belirsizlik içinde ümitsizce başıboş olarak bırakıldığımızı öne sürmez. Aslında, kuram değişikliğine olan iki ya da daha fazla sayıdaki yaklaşımdan hangisinin tercih edilebilir ya da kabul edilebilir olduğuna karar vermekte, olumlu yöndeki aklımızı kullandığımızı gözlemledi. Daha çok günümüzde kullanılan teknik bir dille anlatacak olursak, belirli durumlarda kesin olarak belirlenememe sorununu ortadan kaldırmak için açık ve mantıksal

olmayan ölçütler kullanılır. Bu tür hareketleri yapabildiğimiz ve yaptığımız sürece, burada bir sorun vardır.

> Ancak bu olumlu yöndeki aklın gerekçeleri, kendilerini mantığın koyduğu kuralların yaptığı gibi aynı dindirilemez sertlikte dayatmazlar. Bunlarda net olmayan ve belirsiz olan bir şeyler vardır; kendilerini tüm zeki insanlara aynı anda aynı açıklık derecesinde göstermezler.[6]

Daha sonra bu türden açık olmayan ölçütlerin konumuna geri döneceğiz. Bu kesin olarak belirlenememe tartışmasında anahtar konumunda bir sorundur.

Duhem, uygun bir değer biçme birimini en azından bilimsel bir kuram olmak olarak alırken, Williard Quine 'deneysel önemin biriminin bilimin bütünü olduğuna' inanıyordu.[7] Her fiziksel kuram fiziksel gerçekliğin katı sınır koşullarıyla karşılaşmak zorundadır, ancak 'herhangi tek bir karşı deneyimin ışığı altında hangi ifadelerin yeniden değerlendirileceği konusunda oldukça fazla bir seçim serbestisi vardır'.[8] Sağduyunun - ya da kendi terimler dizgesinde 'konu ile ilgili olmanın' - oynadığı role gelince, Quine 'boyun eğmeyen bir deneyim olayında yeniden gözden geçirme için bir ifadeyi bir başkasına - uygulamada - tercih etmemizin göreli olasılığını yansıtan gevşek bir ortaklıktan daha fazla birşey'[9] görmedi. Bu, kendisinin 'bilimin - sonuç olarak - geçmiş deneyimlerin ışığında gelecekteki deneyimleri öngörmek için bir araç olarak kavramsal taslağının'[10] resmi ile uyum içindedir. Ona göre, bir kurama yalnızca mikro varlıklar değil, genel olarak fiziksel nesneler de kavramsal ya da pratik bir elverişlilik olarak sokulur:

> Ancak epistemolojik temeller açısından bakılırsa [Homer'in] fiziksel nesneleri ve tanrıları yalnızca düzey olarak değişirler, yoksa çeşit olarak değişmezler. Her iki varlık çeşidi de kavrayışımıza yalnızca kültürel varsayımlar olarak girer. Fiziksel nesnelerin miti birçoklarından - deneyimlerin akısına kullanışlı bir yapı kurmak için bir araç olarak başka mitlerden daha etkili olduğu kanıtlandığından - epistemolojik olarak daha üstündür.[11]

. . .

> Her insana bilimsel bir kalıt artı süregiden bir duyularla ilgili uyarım ateşi (ç.n.: makineli tüfek ateşi gibi) verilir; ve insana bilimsel kalıtını süregiden duyularıyla ilgili işaretlere uydurmak için uygun rotaya sokmasına rehberlik eden etmenler (ç.n.: ya da düşünceler) - akla yatkın oldukları zaman - pratiktirler.[12]

Eğer köklü ve evrensel bir kesin olarak belirlenememe için tezler öne sürülebilirse, o zaman bilimin bize fiziksel dünyanın güvenilir bir betimlemesini hipotez olarak öne sürülen mikro varlıklar cinsinden verecek bir kuramı seçme yeteneği için ciddi bir sorun, tartışmalı bir biçimde var olacaktır. Bununla birlikte, kesin olarak belirlenememenin (akla yatkın her kuram için) evrensel bir iddia olarak geçerli olmadığı gösterilebilse bile, umulmadık bir biçimde en iyi bilimsel kuramımız için geçerli olduğu ortaya çıkabilir. Bu türden olası tek başına kesin olarak belirlenememe durumları, bir girişim olarak bilim için çok geniş erimli sonuçları beraberinde getirebilir. Örnek olarak, eğer bilimsel kuramlara (fiziksel bilimlerin tüm alanlarındaki başarılı bilimsel kuramları altta yatan - kuantum mekaniği gibi - tek bir temel kuram cinsinden açıklayan) indirgemeci bir görüşle bakılacak olursa, o zaman bu temel oluşturan kuramdaki temel bir kesin olarak belirlenememe sorunu, o kuram üzerine kurulmuş olan tüm kuramları etkileyebilir.

Duhem-Quine kesin olarak belirlenememe tezinin bilimsel bir gerçekçi için ortaya çıkardığı sorunu özetleyelim.[13] Çok öz bir şekilde belirtilecek olursa, eğer birbirlerinden köklü bir biçimde farklı ve birbirleriyle uyuşamaz ontolojileri destekleyen - olası deneysel tüm testlerde uyuşan ve böylece gözlemsel olarak birbirlerinden ayırt edilemez olan - eşit derecede deneysel olarak yeterli ve başarılı iki bilimsel kuram varsa, o zaman böyle bir durum bilimsel bir gerçekçiyi, dünyanın - akla uygun uyarılarla konulmuş sınırlar içerisinde bile - doğru bir resmini veren, doğru bilimsel kuramı arayışında hayal kırıklığına uğratabilir. Göz önünde tutulan iki kuram ontolojileri açısından, göreli olarak ufak yönlerden farklı oldukları sürece, basit bir şekilde bunların gereksiz farklılıklar olarak sınıflandırılmasına karar verilebilir. Son birkaç konuda ele aldığımız durum, dünyadaki temel fiziksel süreçleri kendi içinde doğal bir biçimde ve indirgenemez bir şekilde belirlenemezci olarak betimleyen bir kuramla fiziksel evrenin mutlak bir şekilde belirlenimci bir davranışını temel alan bir diğer kuramı içerir. Bu, ufak ya da önemsiz bir farklılık olarak görünmez.

Buraya belki de bir iki tane sorumluluğu yadsıma notu düşmek harcanan çabaya değer. Ana konu olarak, bilimsel kuramların çürütülmesi sorusuyla ilgilenmiyoruz. Kuramların çürütülüp çürütülemeyecekleri sorusuna karşılık olarak, 'evet' yanıtını aşağıdaki anlamda açığa çıkarmaya istekli olabiliriz. Akla uygun bir şekilde kanıtlara dayalı nedenlerle reddedilebilecek birçok kuram olduğu (ki bunlar işin kolay kısmıdır) kabul edilse bile, gelişip varlığını sürdürebilecek, verimli kuramların reddedildiği hâlâ başka durumların da arta

kaldığını öne süreriz. Konumumuz pratik açıdan kesin olarak belirlenememenin tüm durumlar için her zaman var olduğunu[14] öne süren köktenci bir konum değil, tersine gerçekten de kesin olarak belirlenememenin var olduğu bazı durumların - en azından bir önemli örnek için - bulunduğunu söyleyen bir konumdur. Bunda ve bundan bir önceki konuda ele alınan durum, tam olarak sonuçta birbirlerinden farklı iki kuramın şu an için elde bulunan verilerle yalnızca bağdaşmasıyla ilgili değildir; çok daha derinde yatan bir birbirlerinden ayırt edilemezliği içerir. Açık olmayan ölçütler temelinde bir seçim yapılabilirken ve yapılırken, bu durumda karşı karşıya kalınan soru, bu tür ölçütlerin temelinin ve tarihsel olarak belirsiz etkenlerin bunları ortaya çıkarırken oynadıkları rolün ne oldukları sorusu olmak zorundadır. Kesin olarak belirlenememe sorununun çözümünü, bilimde gelecekte ortaya çıkabilecek gelişmeler cinsinden bulmaya çalışma dürtüsüne karşı konulmalıdır. Kendi başına böyle bir şey, bir akıl yürütmeden çok, bir inancın bildirilmesi olacaktır.

Buradaki temel sorun, - seçiliş süreci nesnel olan ve tutarlılık, güzellik, yalınlık ya da (daha öncesinde kabul edilen kuramsal yapının) en düşük derecede kesilerek bozulması gibi herhangi bir şekilde elenemez tarzda öznel ölçütler içermeyen - doğru bir bilimsel kuramın en azından sonuç olarak tekliğine olan inançtır.[15] Ele aldığımız her iki kuram da mantıksal olarak tutarlı olduğundan ve her ikisi de doğaları bakımından küçük düşürücü bir tarzda ad hoc olmadıklarından, tutarlılık ile yalnızca mantıksal çelişkilerin olmamasını anlatmak istemediğimizi özellikle vurguluyoruz. Bilim adamları tipik olarak başarılı bilimsel kuramların, uygulama bakımından tekliğini daha baştan öyle diye kabul ederler. Örnek olarak, Einstein birden fazla sayıda deneysel olarak yeterli kuramın kuramsal (ya da mantıksal) olarak olabilirliğine izin verdi, ancak hemen sonrasında herhangi bir zamanda (kulağa oldukça nesnel gelen) 'olgular dünyasının' tek bir kuramı diğer tüm kuramlardan üstün diye belirlediğini bildirerek devam etti.[16] Benzer bir şekilde, Heisenberg 1926 yılında Kopenhag'da nelerin olup bittiğini geriye dönüp bakarak yeniden kurgulaması sırasında şunları belirtir:

> O sıralarda bildiğimiz haliyle kuantum mekaniğinin daha o zaman bile kendi içinde ortaya çıkan bazı büyüklüklere tek bir fiziksel yorum getirdiği ... - ve böylece bu yorum açısından bakıldığında sanki artık neredeyse hiçbir özgürlüğümüz kalmamış gibi göründüğü - gerçeğinden başlamak istedim. Bunun yerine, doğru genel yorumu, ulaşılması kolay olan daha özel yorumdan katı mantık kullanarak çıkarmayı denemek zorunda kalacaktık.[17]

Burada tam olarak sorguladığımız, yalnızca geleneksel olmanın tersine, neredeyse uygulama bakımından ya da sonuç olarak öyle olan tekliktir.

24.2 Gerçekçi İçin Bir İkilem

Şu anda bu durum bilimsel bir gerçekçi için bir anlamda ikili bir gözdağını göstermektedir. Başlangıç için neredeyse evrensel olarak kabul edilen Kopenhag yorumu geleneksel olarak kuantum mekaniğinin gerçekçi bir yorumuna (Kısım 23.6'da da belirttiğimiz gibi) ciddi bir meydan okuma olmuştur. Zorluğun özü, gerektirdiklerinden birisi fiziksel bir sistemin ilke olarak bile tüm (konum, hız, spinin tüm bileşenleri, vb. gibi) fiziksel olarak gözlemlenebilir doğal niteliklerinin belirli - ancak bize yalnızca bilinmez olan - değerlere sahip olamayacağı olan ölçüm problemidir. Bir başka deyişle, basit bir 'bilgisizlik' yorumu, kuantum mekaniğinin varsayılan tamlığı ile tutarlı değildir. Standart kuantum kuramını tek tek mikro varlıkların düzeyinde fiziksel dünyanın gerçek bir betimlemesi olarak ciddiye almak (kaldı ki eğer ortada gerçekten de gerçek bir ontoloji varsa) oldukça tuhaf bir ontolojiyi kabul etmemizi gerektirir. Ölçüm problemi şu an için çok uzun yıllardan (yaklaşık olarak 1930'dan) beri ortalıktadır ve herhangi bir başarılı, genel olarak kabul edilen çözüme kararlı bir şekilde kafa tutmuştur. Bu, mikro olguların düzeyinden başlayan, Kopenhag kuantum mekaniğini tüm fiziksel süreçlerin temel ve kesin kuramı olarak kabul eden ve sonra da gerçekçinin önüne kuantum kuramının istekleriyle tutarlı olan ve kendi içinde de tutarlı bir ontoloji kurması için bir meydan okuma ile çıkan bir gerçekçilik karşıtı için, işlevsel olarak bir cephane oluşturur.[18] Bir başka deyişle, böyle bir gerçeklik karşıtı, akıl yürütmesini mikro egemenlik alanında başlatır, bunu günlük deneyimlerin makro egemenlik bölgesine yayarak sonuçlar çıkarır ve bütün bunların sonucunda ortaya çıkan çözümsüz ve bir paradoks oluşturan bilmeceyi gerçekçinin eşiğinde bırakıp gider. Ancak adil olmak gerekirse, gerçekçinin makro olgular (her gün karşılaşılan nesneler, bakteriler, dinozorlar, vb.)[19] ülkesinde göreli olarak daha rahat hareket ettiğine işaret etmek, ama sonrasında bu açıklayıcı zenginlikleri aşağıya mikro olguların ülkesine taşımakta zorluklarla karşılaştığını belirtmek zorundayız.

İlk bakışta, kuantum mekaniğinin Bohm yorumu gerçekçiye bir teselli ve gerçekçilik karşıtlığının yanlışlığını kanıtlamak için potansiyel olarak güçlü bir yöntem sunuyormuş gibi görünür. Bir mikro varlığı, Kopenhag yorumunun yaptığı gibi (tamamlayıcılık aracılığıy-

la), bir dalga ya da bir parçacık olarak betimlemek yerine, bir dalga ve bir parçacık olarak betimleyen bu yorum, kendisini kolayca sürekli bir uzay-zaman arka planında tamamıyla belirlenimci bir şekilde gelişen temel fiziksel süreçlerin bile gerçekçi bir yorumuna verir. Son derece yerel olmayan, klasik olmayan bazı etkiler bulunduğu halde, bu Kopenhag yorumu için de doğrudur. Bu Bohm yorumu, gerçekçi bir konumla uyum içinde ve hatta bu konuma katkıda bulunuyor olsa da, deneysel açıdan ontolojik olarak bağdaşamadığı Kopenhag yorumundan ayırt edilemez. Böylece, gerçekçi, gerçekçiliğe uygun bir yorumu istemek için özel tercih ya da nedensiz bir emir aracılığı dışında fazla bir temele sahip olamaz. Gerçekçilik burada iki misli bir tehlike içerisindedir: Kopenhag yorumu gerçekçiliğe yardımcı olmaz, bu arada tutarlı bir gerçekçi yorum sağlayan Bohm bir kesin olarak belirlenememe ikilemi sunar ve böylece gerçekçinin arzulanan hedefe ulaşmasının önünü keser. Bir başka deyişle, eğer belirli bir formalizm üzerinde karşılıklı olarak bağdaşamaz ontolojiler dikilebilirse, o zaman bu gerçekçi için ortaya gerçek bir problem çıkarabilir. Bir gerçekçilik yandaşı, 'bir kez içten bir biçimde birbirlerinden farklı ontolojiler öne sürüldüğünde, formalizmi değişik doğrular boyunca genişletmek olanaklı olacaktır; çünkü ayrı ontolojiler ayrı fiziksel büyüklükleri içerir' diyen bir iddiayı kanıtlamak ya da onu destekler yönde güçlü bir şekilde akıl yürütmek zorunda kalırdı. Bu olabilir, ancak olması gerekir mi?

Doğal olarak, bu noktada gerçekçiye hâlâ açık olan görülmesi kolay bir hareket vardır. Gerçekçi, deneysel olarak birbirlerinden ayırt edilemez olan iki kuramın aslında tanım gereği yalnızca temel olmayan şeylerde farklı olabileceğini öne sürebilir. Schrödinger, bu amaca çok uygun bir biçimde dünyanın temelde belirlenimci mi yoksa belirlenemezci mi olduğuna, gözlemleri temel alarak karar vermenin olanaksız olduğu inancını belirtti. (Bu, Kısım 12.3'ün sonuna doğru olan tartışmayı anımsatır.) Hangi betimlemenin kullanıldığı, elverişlilik tarafından kabul ettirilen tamamıyla uygulamaya dönük bir konudur. Schrödinger, 1929'da Prusya Bilimler Akademisi'ne atanması onuruna yapılan törende yaptığı konuşmada şunları öne sürdü: '[Belirlenimciliğe karşı belirlenemezcilik konusu üzerinde] en fazla karar verilebilen, bu kavramlardan birinin mi yoksa ötekinin mi gözlemlenen tüm gerçeklerin daha kolay ve daha açık bir incelemesine yol açtığıdır.'[20] Böylece, bilimsel gerçekçi dünyanın ontolojisindeki belirlenemezcilik ile belirlenimcilik arasındaki farklılığın üstünü önemsiz bir nokta diye çizebilirdi,[21] ancak bu dünyanın güvenilir ve an-

lamlı olarak tam bir resmi ile ilgilenen biri için gerçekten de tuhaf olurdu. Bundan başka, olguların doğasında bulunan belirlenemezcilik ile mutlak belirlenimcilik arasındaki bu köklü kavramsal farklılık, bu kuramlardan birinin dilini diğerininkine atayacak (bir başka deyişle, temel bir kavramı onun değiline atayacak) bir 'sözlüğün' bir düşünce olarak tasarlanmasına izin vermez. Bu, sonuç olarak bu ikilemden kaçış için kullanılabilecek görülmesi kolay bir yolu kapar.

Deneysel yeterlilik ile mantıksal tutarlılık birlikte burada sunulan iki kuram arasında bir seçim yapmak için yeterli ölçütleri tek başlarına sağlamadıklarından, bu ölçütlerin verimlilik, güzellik, kendi içinde tutarlılık, doğallık gibi ve bunlara benzer etmenleri içerecek şekilde genişletilmesi dilenebilir. Kesinlikle, bilimsel topluluk (ç.n.: bilim 'dünyası') oldukça erken bir aşamada o sıralarda (yaklaşık 1927'de) halihazırda bulunan rakip yorumların - Schrödinger'in dalga resmi ve (Bohm'un yaklaşık yirmi beş yıl sonrasında öne sürdüğü kavramsal açıdan benzer yorumun bir öncüsü olan) de Broglie'nin pilot dalga modeli - yerine Kopenhag yorumu lehinde kesin bir seçimde bulundu. Aslında bir kuram seçilmişti. Kullanılan asıl ölçütler nesnel ya da en azından 'hiçbir temel açıdan tarihsel belirsizliklerin ya da rastlantıların kararsız ürünleri değildirler' anlamında değişmez olabilirler miydi? Bu kuramların her ikisi de, gerçekte ortaya çıkan yeni deneysel gelişmelerle ve uymazlıklarla (ç.n.: İngilizcesi 'anomaly') başa çıkmak için gerekli iç zenginliklere sahip olma anlamında bir verimlilik sınavına ek olarak, araştırma ve genelleme için yeni yollar önermek sınavından da başarıyla geçer.[22] 19. Konu'da tarihsel kayıtların, - kabul edilebilir bir kuramın sahip olmak zorunda olduğu nitelikler hakkındaki kimi önemli varsayımlar için - anahtar konumundaki harekete geçiren etmenlerin, kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun yaratıcılarının özel düşünsel tercihlerini ve çok kolay bir şekilde başka türlü de olabilecek olan son derece belirsiz tarihsel koşulları temel aldıklarını gösterdiklerini belirttik.

Örnek olarak, Kısım 19.6'nın sonlarına doğru, kuantum mekaniğinin iki biçimi arasındaki çarpışmada Kopenhag grubunun kendisini sonuç olarak galip ilan ettiğini ve kendi yorumunu olası tek deneysel olarak yeterli yorum diye tanımladığını gösterdik. Bu süreçte bu görüşe aykırı yöndeki düşünceler engellenmişti ve tarih, Kopenhag yorumu kaçınılmazmış ve bu yoruma inananlar ve bu yorumun üstün gelmesi için uğraşanlar dışında kalan 'işçiler' kuramın gelişmesinde anahtar hiçbir rol oynamamışlar gibi görünsün diye yeniden yazılmıştı.[23] Bunun meydana gelebilmesinin nedenlerinden biri, etkin olarak çalışan

bilim adamlarından çoğunun bir kuramın deneysel yeterliliğiyle hesaplamalar yapmadaki başarısına sık sık formalizmle birlikte taşınan gereğinden fazla aşırı yük olarak görülen konulara verdikleri önemden daha fazla ilgi göstermeleridir. Bilim dünyası çok büyük bir oranda 'düşünsel' konuları Bohr'a ve çalışma arkadaşlarına bırakmaktan hoşnuttu. Ayrıca, özellikle yeni ve büyük bir kuramsal çatının gelişiminin başlangıç aşamalarında, tam olarak yorumun ne olduğu ve hesaplamalar yapmada kullanılan kurallarda (daha öncesinde adına formalizm dediğimiz) neyin temel olduğu genellikle çok açık değildir. Kopenhag yorumu net bir biçimde belirtilirken, ortalıkta bulunan bazı dıştan gelen etmenler hakkında bir fikir elde edilebilir:

> Pauli'ye ait mektuplar, Born'un ve Bohr'un etrafında çalışan kuantum fizikçilerinin altında kaldıkları çok büyük psikolojik *Zwang*'a ('baskı', Kopenhag sanatının kullandığı bir başka terim) tanıklık ederler. Born'un kendisi alçak gönüllü bir kendine güven duygusuyla derin bir kendinden şüphe duygusu arasında salınıyordu; Bohr sık sık hastalanıyordu; Pauli bir sinir krizinin eşiğinde yaşıyordu; bu arada sağlıklı bir olanları hafife alma tavrı takınan Heisenberg hepsini kurtarmakta başarılı oluyordu. Birbirleriyle olan yazışmaları umutsuzluk, mutsuzluk ve çaresizce bir boyun eğme ya da neşe, umut ve sevinç anlatan güçlü sözcüklerle doluydu... Bu romantik anlatımlar ... çok kısa bir sürede bir tamamlayıcılık dini oluşturan [bu insanların içinde bulundukları] genel zihinsel durumu gösterir....[24]

Buna ek olarak, Kopenhag okulunun kendi yorumunun egemenliğini kurmasında hızlı davranma baskısı getiren mesleki ilerleme ve fiziğin geleceğinin belirlenmesi gibi başka kişisel ve sosyolojik etmenler de vardı.[25]

Kökleri tarihsel belirsizlikte yatan, öne sürülen bu kesin olarak belirlenememe durumunun bilimsel gerçekçi için ilgisi neydi? Eğer tarihsel kayıtlar son derece belirsiz etmenlerin yeniden düzenlenişinin akla yatkın bir şekilde köklü bir biçimde farklı bir bilimsel kuramın ve dünya görüşünün doğru ve fiziksel dünyayı tek başına betimliyor diye kabul edilmesine yol açtığını gösterirse, o zaman haklı bir şekilde düşünürün bilimsel bir kuram üzerinde bir yargıya varmak için akılcı bir biçimde olayların aslını su yüzüne çıkarmasının değeri sorgulanabilir. Düşünürler, bilimin akla uygunluğunu anlamanın ve bunu keşfetmenin bir aracı olarak, tipik bir biçimde bilimsel topluluk tarafından çoktan kabul görmüş başarılı bir kuramı çözümlerler. Kuşkusuz ki akılcı bir biçimde daha öncesinde bilimsel topluluğun dikkatli bir incelemesinden sağ salim kurtulmuş herhangi bir kuramı yeniden kurma ve bu nedenle onun 'yasal' olarak ge-

çerliliğini kanıtlama yeteneğine sahiptirler. Ancak iş tarihsel belirsizliğe gelince de, sonuç olarak farklı, eşit derecede başarılı ve geniş kesimlerce kabul edilen bir kuramın doğruluğunun kanıtlanması ve bu kuramın yeniden kurulmasında da kendilerini bir o kadar iyi bir iş çıkarırken bulabilirler. Öyleyse, herhangi bir tutarsızlığın bulunmadığının denetlenmesi dışında uygulamanın ne değeri vardır? Bu olayların aslının su yüzüne çıkarılışının her biri eşit derecede akla yatkın olabilir, ancak ikisi arasında bir seçim yapmak için herhangi bir akla yatkın yöntem mutlaka bulunmayabilir.

24.3 Farklı Bir Tarihsel Senaryo[26]

Şu an elimizde kuantum mekaniğinin - her ikisi de mantıksal olarak kendi içinde tutarlı olan ve deneysel olarak birbirlerinden ayırt edilemez oldukları kanıtlanmış - kavramsal olarak çok farklı iki yorumu olduğuna göre, doğal olarak nasıl olup da bu kuramlardan birinin diğerinin dışlanması pahasına kabul edilişinin gerçekleştiğini sorabiliriz. Ne mantıksal ne de deneysel etmenler birinin diğerine tercih edilmesi için yeterli değildiyse, işin içine girmiş olan başka etmenler olmak zorundaydı. Bunların ne olduklarını ve kabul edilen kuramın aldığı son biçimi nasıl etkilediklerini görmek için, kuantum kuramının tarihsel gelişimine ve içinden çıktığı kültürel zemine - ki bu Kısım 19.5 ve 19.6'da kaba hatlarını çıkardığımız bir öyküdür - geri dönmeliyiz. Var olmaya başlayan (ilk kez de Broglie'nin başlattığı) nedensel akademik çalışma taslağının 1927 Solvay Toplantısı'ndan sonra ölü doğmuş olarak bırakıldığını ve Kopenhag yorumunun üstünlüğünü kurduğunu gördük. Geçen yıllar süresince inançlar katılaşarak, bunun böyle olduğunun kesin hiçbir kanıtı var olmadığı halde kuantum mekaniğinin tutarlı ve deneysel olarak yeterli nedensel bir yorumunun olanaksız olduğunu belirten bir dogmaya döndü.

Sorunlar sonuç olarak ta 1952'ye, Bohm kuantum mekaniğinin nedensel bir yorumu üzerine iki makale yayınlayıncaya dek orada öylece durdu. (Bunu 23. Konu'da ele almıştık.) İlk başlarda de Broglie, Bohm'un (kendisinin 1927'deki pilot dalga kuramına benzeyen) fikirlerine karşıydı ve kendi fikirlerine karşı getirilenlere benzer itirazlarda bulundu. Bohm Pauli'ye içinde Pauli'nin nedensel yoruma yaptığı itirazların görünüşte doğru, ama aslında yanlış olduklarını gösterdiği makalenin bir kopyasını yolladığında, Pauli oldukça ilginç bir şekilde asla yanıt vermedi. Bundan başka, Pauli'nin bilimin doğası ve bilimin kendi (temel olarak, istatistiksel nedenselliği zorla dayatan evrensel bir sayman olan) Tanrı anlayışıyla olan ilişki-

si üzerine görüşleri, ona uzay-zamanda resmedilebilir, sürekli oluşumlarıyla ve nedenselliğiyle 'klasik' bir dünyaya geri dönüş gibi bir şeyin olası olduğu düşüncesinin hiç de akla yatkın gelmemesine neden oluyordu; ona göre böyle bir şey sağduyunun yitirilmesinden daha aşağıda bir şeydi ve karanlığa geri dönüştü. Daha önce de gördüğümüz gibi Bohm, kuantum mekaniğinin nedensel - büyük oranda klasik (mikro) bir ontolojiye sahip gerçekçi bir yorum yapma yeteneğinde - bir biçimini oluşturmuştu. Bohm'un 1950li yılların başlarında yaptığı çalışmalar de Broglie'yi daha önceden sahip oluğu düşüncelere geri döndürdü. De Broglie'ye göre kazanılacak ya da kaybedilecek olan şey klasik belirlenimcilik değil, tersine mikro süreçlerin açık bir resmi için kesin bir uzay-zaman betimlemesinin olması olasılığıydı. Bu konuda beklentileri Einstein'ınkilere benziyordu. De Broglie klasik Hamilton-Jacobi kuramının[27] dalgalarla parçacıkların birliğinin - maddenin gerçekçi bir anlayışı ile tamamıyla tutarlı bir tarzda - çekirdek bir kuramını sağladığını hissediyordu. Temel oluşumlar için bir model, kuantum potansiyeli kavramıyla göz önünde canlandırılabiliyordu. De Broglie'nin kuantum biçimciliğinin gerçekçi bir yorumuna olan bu güçlü bağlılığı, de Broglie'nin düşünür Émile Meyerson'un *Essais* (ç.n.: Fransızca kökenli, 'Deneyler' anlamında) (1936) adlı kitabının önsözünde de belirttiği gibi kendisinin Meyerson'un çalışmalanna verdiği büyük değer ile tutarlıydı. Meyerson, pozitivist önyargıyı kırmaya çalışıyordu ve bilimin amacının ontolojik bir amaç olduğuna inanıyordu.

Önerdiğimiz öykü ile ilgili iki tane ek gerçek daha vardır. İlk olarak, Bohm'un akademik çalışma taslağı göreliliğe uygun hale gelecek biçimde genelleştirilmiştir, böylece yalnızca göreli olmayan olgularla sınırlı olduğu ve bu nedenle gücünün standart çalışma taslağının geniş deneysel yeterliliğine yetmediği öne sürülemez.[28] İkincisi, Bohm'un makalelerinin hemen sonrasında, yayılma katsayısı $(\hbar/2m)$ olan ve sürtünmesiz bir Brown hareketi yapmakta olan, kendisi üzerine etki ettirilen kuvvetlere Newton'un ikinci yasasına $(\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a})$ uygun bir biçimde yanıt veren tek bir parçacığın tam olarak Schrödinger denklemine uyduğu gösterilmişti.[29] Bu tür bir kuramda rastlantısallık bulunsa bile, klasik fizikten köklü bir ayrılış gereksizdir, böylece sonuç olarak çıkan kuram klasik bir biçimde olasılık kurallarına uyar.

Nedensel bir akademik çalışma taslağında doğal olarak bulunan bu teknik ve kavramsal zenginliklerin ışığında, ileri derecede yeniden kurulmuş ancak tamamıyla akla yatkın bir kısmen 'gerçeklere aykırı' (tamamı yaklaşık 1925-1927 arasında geçen) tarih parçasını aşağıdaki gibi biçimlendirebiliriz. Heisenberg'in matris mekaniği ve Schrödinger'in

dalga mekaniği açık bir şekilde ortaya konurlar ve matematiksel olarak özdeş oldukları gösterilir. Hakkında (bu konudaki ünlü çalışması[30] göz önüne alındığında) Einstein'ın bir şeyler bildiği kesin olan Brown hareketi yapmakta olan klasik bir parçacığın incelenmesi, daha öncesinde keşfedilmiş olan Schrödinger denkleminin klasik olarak anlaşılmasına yol açar. Stokastik bir kuram, bu yorumu mikro olguların göz önünde canlandırılabilir bir modeli ile aşağıdan destekler ve böylece gerçekçi bir ontoloji hâlâ varlığını sürdürebilir. Stokastik mekanikle matematiksel olarak başa çıkmak zor olduğundan, incelemeler doğal bir şekilde matematiksel olarak özdeş olan doğrusal Schrödinger denklemine yönelir. Bu nedenle, Dirac dönüşüm kuramı[31] ve bir işlemci formalizmi, matematiğin hesaplamalar için algoritmalar sağlaması yönünden daha da gelişmesi açısından bir elverişlilik olarak kullanılabilir.

Bu noktada Einstein'ın temel düşünsel bağlılıklarını bir özet biçiminde gözden geçirmeye değer. Kısım 19.5'te Einstein'ın fiziksel dünya görüşünün akılcı ve nedensel bir görüş olduğunu görmüştük. Mikro varlıkların sürekli, nesnel, gözlemciden bağımsız bir varlığa sahip olduğu gerçekçi bir dünya görüşü için güçlü bir inanca sahipti. Onun için diğer öz iki bağlılık da olayların sırayla birbirlerini izlediği nedensellik (aslında belirlenimcilik) ve yerel olma özelliğiydi. Temel fiziksel bir kuram adayının sağlamak zorunda olduğu üç tane *desideratum* (ç.n.: Latince 'gerekli ya da son derece istenilir gözü ile bakılan şey') olduğunu düşünüyordu. Şu durumda stokastik mekanik formalizminin bu birbirine dolaşık olma ya da yerel olmama özelliği, çok kısa bir süre içinde kolaylıkla açık hale gelirdi. Einstein, bu niteliğe sahip her modeli reddederdi.[32] Şimdi gerçeklere aykırı senaryomuza geri dönelim.

Bell tipinde bir teorem ispatlanır ve yerel olmama özelliğinin kuantum olgularında bulunduğunun inandırıcı bir kanıtı olarak kabul edilir. Kuantum mekaniksel ilintiler için bir 'hiç işaret göndermeme teoremi'[33] ispatlanır ve bu Einstein'ın kuantum mekaniğinin ayrılamazlığına olan itirazlarını ortadan kaldırır. Burada önemli olan nokta şudur. Eğer belli bir zamanda birbirlerinden uzamsal olarak ayrılmış S_1 ve S_2 diye iki alt sistemden oluşan bir sistem göz önünde bulundurulursa, bu durumda Einstein '... S_2 sisteminin asıl gerçeklere dayanan durumunun, ilkinden uzamsal olarak ayrılmış olan S_1 sistemiyle ne yapıldığından bağımsız olduğu'[34] kanısında oldu. Einstein, olan bitenin bu olmaması durumunda bilim yapmanın ne anlama geleceğinden bile endişeliydi. Ancak, bir 'hiç işaret göndermeme teoremi' göreliliğe pratik ya da gözlemsel düzeyde uyulabileceğini ve doğada var olan yerel olmama özelliğinin tehlikesiz bir türde olduğunu gösterirdi. Bu, oldukça akla uygun bir biçimde onun

kuantum mekaniğinin formalizminin de Broglie-Bohm yorumunun yerel olmama özelliğine olan itirazlarının üstesinden gelmeye yeterli olabilirdi. Einstein, de Broglie-Bohm modeli yalnızca yerel olmama özelliğine sahip ve hâlâ gerçekçi bir yoruma açık iken, stokastik kuramın hem yerel olmama hem de belirlenemezcilik özelliğine sahip olması yüzünden de Broglie-Bohm tipinde bir kurama geçiş yapabilirdi.

Bir başka deyişle, kavramsal ve mantıksal olarak 1927 yılı dolaylarında gerçekleşebilecek olan (ç.n.: ama gerçekleşmeyen) bu gelişmeler, Einstein'ın ve Schrödinger'in bir de Broglie-Bohm akademik bilimsel çalışma taslağının desteklenmesine olan direnişlerinin üstesinden gelebilirdi. Daha öncesinde henüz 1926'da Erwin Madelung (1881-1972), Bohm'un 1952'de kullanacaklarıyla aynı olan denklemlere sahipti; ancak yaptığı yorum Bohm'unkinden çok farklıydı ve inandırıcı değildi. Bohm'un yorumu hiç kuşkusuz ki 1927'de mümkün olabilirdi. Bu modeller ve kuramlar, göreliliği ve spini de içerecek şekilde genelleştirilebilirdi. Program kapalıdır ve çalışmaktadır. Son olarak, bu nedensel yorum kuantum alanlarına da genişletilebilir.[35]

Böylece, diyelim ki 1927'de eğer nedensel yorumun yazgısı çok farklı bir yol izlemiş ve Kopenhag yorumunun yerine kabul edilmiş olsaydı, geniş temelli bir deneysel yeterlilik için gerekli genellemelerle başa çıkmak için zenginliklere sahip olurdu. Bugün mikro olgular için çok farklı bir dünya görüşüne ulaşmış olabilirdik. Eğer o zaman birileri deneysel olarak yalnızca eşit derecede yeterli olan - fazladan kendi hiç de sezgisel olmayan ve akılları karıştıran tüm yönleriyle birlikte - Kopenhag yorumunu sunmuş olsaydı, kim onları dinlerdi ki? Burada ele alınan teknik gelişmelerin tümü aslında fizik yazınında var olduklarından, bu öykünün ne (bu nedensel modellerin kendilerinin doğru olduklarını gösteren tek nokta olarak rakip bir akademik çalışma taslağının başarılı sonuçlarında bir kökene sahip olmaları anlamında) ad hoc ne de yalnızca hayal olmadığının farkında olmak gereklidir. Öte yandan, dağın zirvesine ilk olarak Kopenhag yorumu ulaştı ve etkin olarak çalışan çoğu bilim adamına göre onu yerinden etmenin hiçbir anlamı yok gibidir.

24.4 İçten Gelen Açıklamalarla Dıştan Gelenler Karşı Karşıya

Burada niyetimiz, kuantum mekaniğinin standart Kopenhag yorumunun aleyhinde Bohm tipinde bir yorumuna destek olacak şekilde bir

şeyleri kanıtlamaya çalışmak değildir. Tersine, ilgilendiğimiz şey, asıl tarihsel olandan çok farklı bir seçimin akla uygun bir şekilde yapılabilip yapılamayacağını görmek oldu. Şu anki durumda, ne tek başlarına içten gelen (mantıksal tutarlılık ya da deneysel yeterlilik gibi) etmenlerin ne de tek başlarına dıştan gelen (diyelim, sosyolojik ve psikolojik) etmenlerin, nedensel bir dünya görüşünün yerine Kopenhag dünya görüşünün geniş bir şekilde kabul edilişini açıklamak için yeterli olmadığını gördük. Yalnızca gerçekler, kuramın tek bir şekilde kuruluşunu ve seçilişini kısıtlamazken, kendi başlarına bir kişinin özel tutkuları ya da tercihleri de öylece herhangi bir kuramı zorla kabul ettiremez.[36] Doğa sık sık kısıtlamalar sağlar, ancak kuram seçiminde - burada, bir yorum ya da dünya görüşü - hâlâ bir serbestlik kalır. Kuramın kuruluşunda ve seçilişinde izlenen asıl yol, üst üste gelen bir çok etmenle zengin ve karmaşık bir yoldur. Bilim, ürettiklerinde ya da yasalarında bile temel bir tarzda tarihsel ya da belirsiz olarak kalır. Olayların belirli çok önemli hassas anlarda nasıl olup da çok farklı yollara sapabilecekleri ve neden bunu yapmadıkları, bilimin yaptığı 'doğru' seçimlerin nedenleri kadar önemli olabilir. Tarihin başka alanlarında kaçınılmazlığın eksikliğinden özel olarak rahatsız olmayız. Bu nokta, Güneydeki Birliğin (ya da Konfederasyonun) on dokuzuncu yüzyılın sonundaki Birleşik Devletler İç Savaşı'nı Kuzey'e kaybetmesinin kaçınılmaz olup olmadığını inceleyen bir kitabın eleştirisinde hoş bir şekilde anlatılır.

> Kaçınılmazlık tarihsel olayların yeterince zamanın geçmesinden sonra üstlendikleri doğal bir niteliktir. Bir kez olay meydana geldiğinde ve her şeyin daha sonra nasıl sonuçlanacağı konusundaki endişelerin ve şüphelerin zihinlerden silinip gitmesi için yeterince süre geçtiğinde, olay artık kaçınılmazmış gibi görünür. Farklı sonuçlar giderek daha az akla yatkın hale gelir ve çok geçmeden gerçekte olanlar neredeyse olmak zorunda olanlar gibi görünür. Nelerin olabileceğini ya da kaçınılmaz olduğu düşünülenlerin neden öyle olması düşünülenler gibi sonuçlandığını, böyle sonuçlanıp sonuçlanmayacağını tartışmak çoğu kişi için bir zaman kaybı izlenimi bırakır.[37]

Modern tarih üzerine çalışan ve Cambridge Üniversitesi'nde profesör olan Herbert Butterfield (1900-1979) aynı konu üzerinde yazılar yazmıştır, bu genel yaklaşımı 'tarihin whig (ç.n.: 'İngiliz tarihinde 18. ve 19. yüzyıllarda İngiliz Muhafazakar Partisi'ne muhalif partinin destekçisi' anlamında) yorumu'[38] diye anmıştır. Bu sözle geçmişin olaylarını bugünün değerlerine başvurarak - ya da bugünün küçük düşürücü bir şekilde önyargılı bakış açısını kullanarak - inceleme eğiliminde oluşumuzu[39] anlatmak istemiştir; buna örnek olarak, on altıncı yüzyılda

Katoliklerle yaşanan çatışmaların ayrıntılı bir biçimde geçmişi de kapsayan bir açıklaması olarak, bu çatışmaları kazanan taraf olan Protestanların torunlarınca ancak 'aydınlanmış' on dokuzuncu yüzyıl Whiglerinin bakış açısından yazılmış şeylerin bulunabileceğini göstermiştir. Kişinin kendisini doğru olarak kabul edilen ve kendilerini zihinlerin derinliklerine köklü bir biçimde yerleştirmiş olan görüşlerden özgür bırakması hiç de kolay bir iş değildir.[40]

> Bu whig eğiliminin kökleri o kadar derinlerdedir ki, iğneyle kuyu kazmak gibi çok yavaş ilerleyen araştırmalar bile öyküyü ayrıntılı bir şekilde düzeltmiştir, tüm bu keşiflerin ışığı altında konunun bütününü yeniden değerlendirmekte ve geniş ana hatlarını yeniden düzenlemekte yavaş kalıyoruz...[41]

Bu türden çarpıtılmış bir tarihin düzelticisi, ilkine karşı çıkan bakış açısından ilkiyle eşit derecede çarpıtılmış bir başka öykü değildir, tersine olayların ve nedenlerinin dengeli bir sunumu ve yorumudur. Tüm ilginç ve gerçekten bilgilendirici tarihin kaçınılmaz olarak belli bir bakış açısından ve sunulacak gerçeklerin bir seçmeden geçirildikten sonra yazılması nedeniyle, yazarın kendisinde hissettiği bağlılık duygularının açık olarak neler olduğunu belirtmeyi ve bunların geçmiş olayların betimlemesini nasıl etkileyebileceklerine dikkat etmeyi denememiz tüm bunlardan sonra daha da gereklidir. Bu türden bir nesnelliğin bir amaç olması gerekirken, bu uygulamada asla tam anlamıyla gerçekleştirilemez.

Bu, Francis Bacon'un doğanın gerçekleri üzerine, doğada aslında var olandan daha fazla düzen yüklememiz (bir başka deyişle, gözlemlediklerimizi beklentilerimize ya da özel tutkularımıza uymak için zorlamamamız) yönündeki uyarısıyla özünde benzerdir.

> İnsan anlayışı kolayca - kendine özgü doğasından - olaylarda gerçekte onlarda bulduğundan daha büyük bir düzen derecesi ve birlik varsayar; ve doğadaki çoğu şey *sui generis* (ç.n.: Latince 'kendi türünün tek örneği olan, eşsiz' anlamında) ve son derece sıra dışı olsa da, o türden hiçbir şeyin bulunmadığı doğada hâlâ benzerlikler, eşlenikler ve olayları birbirleriyle ilişkilendiren bağlar icat eder.
>
> . . .
>
> İnsan anlayışı, herhangi bir önerme bir kez (ya genel kabulden ve inançtan ya da sağladığı hazdan) ortaya konduğunda, geri kalan her şeyi taze destek ve kanıt eklemeye zorlar ve bunun tersi yönde akla inandırıcı gelen, zengin birçok örnek var olsa da, ya bunları gözlemlemez ya da

> bunları hor görür ya da en başta ulaşılan sonuçların yetkesini gözden çıkarmak yerine bunları bir çeşit ayrımcılıkla - şiddetli ve zarar verici bir önyargı ile - atar ve reddeder. Tapınağın birinde bazı yeminleri simgeleyen yazıtların tavandan, örneğin bir gemi kazasının tehlikesinden kurtulmuş olanlar gibi kişilerce asıldığının gösterildiği ve bir soru ile bu durumda tanrıların gücünün farkına varıp varamayacağı konusunda sıkıştırılan biri tarafından şu şekilde güzel bir şekilde yanıtlanır: Ama yeminlerine rağmen yok olan bu kişilerin resimleri nerede?[42]

Bu konuda, kuantum mekaniğinin tarihinin - öğrencilere ya derslerde sözlü olarak ciddi olmayan bir tarzda ya da ders kitaplarında konu dışında ek bilgi olarak son derece sık bir biçimde verildiği - genel olarak kabul edilen, sık sık yaygın olarak inanılan, ama aslında temelsiz olan uyarlamalarındaki belirli bir 'whig'lere özgü eğilimin yaygınlaşmasını gösterdik. Buralarda Kopenhag yorumu kaçınılmazmış ve deneysel gerçeklerle mantıksal olarak tutarlı tek yorummuş gibi görünecek şekilde gösterilir. Şimdi okur en azından gerçek tarihsel kayıtların bundan daha karmaşık olduğunun farkında olmalıdır.

Yararlı Kaynaklar

Kuantum kuramının başlarda izlediği yolun içerdiği belirsizliklerin bazıları üstüne, Franco Selleri'nin - özellikle 1., 2. ve 7. konuları olmak üzere - *Kuantum Paradoksları ve Fiziksel Gerçeklik* adlı kitabına bakınız. James Cushing'in *Kuantum Mekaniği* adlı kitabının 10. ve 11. konuları bu konuda kaba bir taslağı sunulan gerçeklere aykırı tarihsel senaryoyu daha ayrıntılı olarak işler ve geliştirir. Herbert Butterfield'ın *Tarihin 'Whig' Yorumu* adlı eseri, olayların günümüzdeki bilgisinin geçmiş olayları - özellikle de inceleme altındaki olayların günümüzdeki 'bilgiye' nasıl ulaştığımızla ilişkisi bulunduğunda - su yüzüne çıkarma çabalarımız üzerine olan etkisinin klasik bir incelemesidir.

Bölüm IX

Geriye dönük bir bakış

"Maxwell kuramı nedir?" sorusuna yanıt olarak aşağıdakinden daha kısa ya da daha açık bir yanıt bilmiyorum: - Maxwell kuramı, Maxwell'in denklemler sistemidir.

Heinrich Hertz, *Elektrik Dalgaları*

Benim düşünceme göre doğru bir yol vardır ve ... onu bulma yeteneğine sahibiz. Bugüne dek elde ettiğimiz deneyim, doğanın akla uygun en basit matematiksel fikirlerin gerçekleşmesi olduğuna inanmamızı haklı çıkarır. Tamamıyla matematiksel yapılar aracılığıyla doğal olguların anlaşılması için anahtar görevi gören kavramları ve bunları birbirlerine bağlayan yasaları keşfedebileceğimize eminim. Deneyimler uygun matematiksel kavramlara işaret edebilirler, ancak bu kavramlar hiç kuşku yok ki, deneyimlerden çıkarılamazlar. Deneyim, doğal olarak, matematiksel bir yapının fiziksel açıdan yararlılığının tek ölçütü olarak kalır. Ancak yaratıcı ilke matematikte yer alır. Bu nedenle, belli bir anlamda soyut düşüncenin - çok eski çağdakilerin hayalini kurdukları gibi - gerçekliği kavrayabileceğinin doğru olduğuna inanıyorum.

. . .

Algılayan özneden bağımsız bir dış dünyaya olan inanç, tüm doğal bilimlerin temelidir. Bununla birlikte, duyu algıları yalnızca doğrudan doğruya olmayan bir biçimde bu dış dünyaya ya da 'fiziksel gerçekliğe' ait bilgiler verdiğinden, fiziksel gerçekliği yalnızca kuramsal yöntemlerle kavrayabiliriz. Bundan fiziksel gerçeklikle ilgili düşüncelerimizin asla kesin olamayacağı sonucu çıkar. Mantıksal olarak en kusursuz biçimde algılanan gerçeklere karşı adil olmak için bu düşünceleri - bir başka deyişle, fiziğin aksiyomlardan oluşan alt yapısını - değiştirmeye her zaman hazır olmalıyız. Aslına bakarsanız fiziğin gelişimine atılan bir bakış, onun zamanın akışı içerisinde çok önemli sonuçlara yol açan değişikliklere uğradığını gösterir.

Albert Einstein, *Fikirler ve Görüşler*

Bununla birlikte, bilim adamının epistemolojik sistematik için olan uğraşısını [çok] uzağa taşımaya gücü yetmez. Epistemolojik kavramsal çözümlemeyi şükran duyguları içerisinde kabul eder; ancak kendisi için deneyimlerin gerçekleri tarafından koyulan dış koşullar, epistemolojik bir sisteme bağlılıkla kendi kavramsal dünyasını kurmakta kendisini çok fazla sınırlandırarak bırakmasına izin vermezler. Bu nedenle, sistemli bir epistemoloğun gözünde bir çeşit vicdansız fırsatçı olarak gözükmelidir: Dünyanın algı davranışlarından bağımsız bir betimlemesini bulmaya çalıştığı sürece bir *gerçekçi* gibi; kavramlara ve ku-

ramlara (deneysel olarak verilenlerden mantıksal olarak çıkarılabilenler olarak değil) insan ruhunun özgür buluşları olarak baktığı sürece bir *idealist* gibi; kavramlarını ve kuramlarını *yalnızca* duyusal deneyimler arasındaki ilişkilerin mantıksal bir betimlemesini sağladıkları derecede doğruluğu kanıtlanmış diye göz önünde bulundurduğu sürece bir *pozitivist* gibi görünür. Mantıksal yalınlıkla ilgili bakış açısına araştırmasının kaçınılmaz ve etkili bir aracı gözü ile baktığı sürece bir *Platoncu* ya da bir *Pythagorasçı* olarak bile görünebilir.

Albert Einstein, *Eleştirilere Yanıt*

25
Bilimin Hedefleri ve Bilgisinin Durumu

Bu kitapta şimdiye dek, fiziğin tarihindeki önemli ilerlemelerin bazılarını inceledik. Şimdi geriye dönüp bakabilir ve fiziğin diğer doğal bilimlerle olan ilişkisinin ne olduğunu sorabiliriz; buradan bilimin doğası ve nasıl işlediği hakkında bazı dersler çıkarmayı deneyebiliriz. Örnek olarak, bilimin onu diğer şeylerden ayıran nitelikleri nelerdir ve - eğer böyle bir şey varsa - bilimsel bilgiyi diğer bilgi çeşitlerinden farklı kılan nedir? Neredeyse tüm bilim adamları ve bilim felsefecilerinin çoğunluğu tarafından desteklenen bilime geleneksel bakış, en sonunda ulaşılan bilimsel bilgiyi - mantıksal çözümlemenin dikkatli incelemesini başarıyla geçtiği ve daha ileri gözlemlerle uyum içinde olduğu sürece - büyük oranda nasıl elde edildiğinin ayrıntılarından bağımsız olarak geçerli diye görmek olmuştur. Bilim felsefesinde ve tarihinde yakın zamanlarda yapılan önemli sayıda çalışma sonucunda, bu tür bir duruş artık sorgulanır olmuştur. Kuantum kuramının matematiksel olarak açık bir şekilde ortaya konmasını 19. Konu'da tarihsel olarak sunuşumuzda, bilimin belirli sosyolojik ya da genel yönlerine değinmiştik. Bu konuda bilimin katı bir biçimde akla yatkın tarafını saptama ve bunu bilimin içerisinde işlediği daha büyük sosyal bağlamla uzlaştırma girişimleri üzerine odaklanacağız. Fiziği, üzerinde çalıştığımız ilk örnek (ç.n.: İngilizcesi 'prototypical') bilim olarak kullanacağız ve Albert Einstein'ın gerçeklik, bir bilgi kuramı ve bilimin yöntemi ve hedefleri üzerine olan düşüncelerini de biraz ayrıntılı bir biçimde ele alacağız. İlk işimiz, fiziğin göz önünde tutulacak bazı belirleyici özelliklerinin sınırlarını belirlemek olacak.

25.1 Einstein'ın Bilim ve Bilimin Hedefleri Üzerine Düşünceleri

Einstein'ın bu düşünsel konular üzerine olan görüşlerini göz önüne alma nedenlerimiz, - sonradan bir bilim felsefecisine dönen kuramsal bir fizikçi ve daha öncesinde Berlin'de Einstein'ın bir iş arkadaşı ve dostu olan - Philipp Frank tarafından oldukça güzel bir şekilde özetlenmiştir.

> Aslına bakacak olursanız, Einstein'ın fiziksel kuramları çağdaş felsefenin tarihinde büyük bir rol, gerçekten de çok büyük bir rol oynamıştır. 20. yüzyılın hiçbir 'profesyonel düşünüründen' diğer düşünürlerce Einstein'dan olduğu kadar büyük bir sıklıkta alıntı yapılmadığı ifadesinin tehlikesini sağlam temellere dayanarak göze alabiliriz. Einstein, felsefede - mesleki standartlarca ölçüldüğünde - bir 'amatördü', ancak 'bir bilgelik tutkunu' anlamına gelen sözcüğün tam anlamıyla bir 'düşünürdü'.[1]

Einstein, 1918'de Max Planck'ın altmışıncı doğum yıldönümü için yapılan özel törende, Berlin'deki Fizik Derneği'nin huzurunda Planck'ın onuruna bir konuşma yaptı. Einstein burada, fiziğin amacını ve insanların fizik yapmalarının nedenlerini çok güzel bir biçimde belirtti.[2] Einstein'ın düşüncesine göre, bilim adamı - bir ozan ya da düşünür gibi - dünyanın yalınlaştırılmış - ancak betimleme gücü bakımından yeterli - ve akılla anlaşılabilir bir resmini yaratmaya uğraşır. Bir fizikçinin eserinin ayırt edici özelliği olan, - göz önüne alınan problemlerin erimindeki büyük azalma pahasına - matematiğin katı kesinliğidir. Einstein'ın görüşüne göre umut, bu şekilde biçimlendirilen yasaların fiziksel tüm olgular için evrensel olarak geçerli olacağı ve bunlardan ilke olarak (yaşam dahil) her doğal sürecin açıklanabileceğidir. Bu yaklaşımın üzerine eğildiği konuyu katı bir biçimde tüm matematiksel ayrıntılarıyla ve eksiksiz bir şekilde inceleyebileceği nispeten daha kolay durumlarla sınırlandırması, bilim felsefesine de ilgi duyan modern bir kuramsal fizikçi tarafından da vurgulanmıştır.

> Bilimin entelektüel açıdan ve uygulamalar açısından en şaşırtıcı başarıları, çoğu kişi tarafından bilimsel bilginin ideal çeşidi olarak kabul edilen *fizik*te olmuştur. Aslında fizik, bilimin üzerine eğilinen konuların nicel çözümlemeye uygun olacak şekilde bilerek seçildiği çok özel bir çeşididir.[3]

. . .

> Fizik kendisini *gerçekliğin matematiksel çözümlemeye uygun olan yönlerini keşfetmeye, geliştirmeye ve bunları anlaştırmaya adamış olan bilim dalı* diye tanımlar.[4]

Kuramsal fizikçi, matematiksel olarak kesin bir biçimde ele alınabilen ve açık bir şekilde ortaya konulabilen mükemmelleştirilmiş modeller kurar. Bu tür modeller asla gerçekliğin tam bir betimlemesini veremez, öyle olsaydı her şeyi tüm matematiksel ayrıntısıyla ele almak için son derece karmaşık olurlardı. Bu tür modelleri kurmadaki ya da tasarlamaktaki asıl sanat, bu modellerin içine gerçek sistemin gerçekten de temel özelliklerinden birkaçını katmaktır, böylece model gerçekliği hâlâ uygun matematiksel çözümlemeler sonrasında fiziksel açıdan ilginç olabilecek öngörülerde bulunabilmeye yetecek kadar yansıtacaktır. Kuramsal fizikçiler tarafından oynanan 'oyunlarla' saf matematikçiler tarafından oynananlar arasındaki önemli farklardan biri, bir fiziksel modelin - kendi içinde tutarlılık ve matematiksel katılık koşullarını karşılamasının yanında - sonuçta fiziksel gerçeklikle uyum içinde olma değişmez sınır koşulunu da karşılamak zorunda olmasıdır. Basit bir model örneği, gazların kinetik kuramında nokta moleküllerden oluşan bir ideal gaz örneğidir. Bu modeli yalnızca temel matematik kullanarak oldukça eksiksiz bir şekilde ele alabiliyor ve buradan da gerçek gazların geniş bir basınç ve sıcaklık bölgesi içerisindeki kaba özelliklerini açıklayabiliyoruz. Yine de model gerçekliğin mükemmel bir yansıması değildir ve örneğin çok yüksek yoğunluklarda geçerli olmaktan çıkar. Einstein, fiziksel modellerin ve kuramların - bunlar gerçekliğin giderek daha fazla sayıdaki olgusunu giderek daha az sayıdaki yapı (ç.n.: önerme) cinsinden düzenlemeyi başardıkça - daha da soyut hale geldiklerini vurguladı.[5]

Einstein, Planck gibi (bakınız Kısım 3.6) bizim onu algılamamızdan bağımsız olarak var olan nesnel bir dünyanın gerçekliğine inandı.[6] Bu, Bohr'un gerçeklik anlayışından (bakınız Kısım 21.1) son derece farklıydı. Einstein, yine Planck gibi Mach'ın pozitivizminden ve Poincaré'nin gelenekselciliğinden (ç.n.: İngilizcesi 'conventionalism', örneğin bir sanat eserindeki gibi yalınlaştırılmış ya da soyut biçimde betimleme akımı) öğeleri - kendisinin 1933'te Oxford Üniversitesi'nde (I. Bölüm (*Bilimsel girişim*) için olan alıntılara bakınız)[7] 'Kuramsal Fiziğin Yöntemi Üzerine' başlığıyla verdiği Herbert Spencer Konferansı'ndaki ünlü bölümün de göstergesi olduğu gibi - birleştirdi. Burada Einstein kuramsal fiziğin sistemini kaba bir taslak olarak kavramlardan, bu kavramları birbirleriyle ilişkilendiren temel yasalardan ve bu yasalar temel alınarak yapılan öngörülerden oluşur diye resmetti. Sistemin yapısı aklın bir ürünüyken (kendi deyimiyle 'insan aklının özgür buluşları' iken), doğanın gözlemlenen olguları, bu kuramsal yapının kavramları ve ilişkileri içerisindeki yerlerini bulmalıdırlar. Bu tür bir betimlemenin başarısı,

tüm bu matematiksel çerçevenin işe yararlılığı için en son (ç.n.: ya da temel) doğrulamadır. Böylece, Einstein'ın görüşüne göre (IX. Bölüm (*Geriye dönük bir bakış*) için Einstein'dan yapılan alıntıların ilk kısmına bakınız) yaratıcı ilkelerin, matematiğin ve deneysel kısıtlamaların bu birleşimi saf düşüncenin gerçekliğin tutulacak bir yerini oluşturmasına izin verir.[8] Son (ya da temel) olan ancak tam olmayan gerçekliğe giderek daha fazla yaklaşabilen birbirini izleyen bir kuramlar dizisini araştırma anlamındaki bu fizik anlayışı, Planck'ın durmaksızın varmaya uğraştığımız ancak asla ulaşamadığımız (bakınız Kısım 3.6) doğa ötesi bir gerçeklik görüşüne benzerdir. Bilimin amacı, duyu deneyimlerimizi düzenlemek ve dünyaya olan bakışımızda bir birlik oluşturabilmek için bunları mantıksal bir sistemin içine oturtmak ve tüm bunları olası en az sayıdaki yapıyı (ya da önermeyi) temel alarak yapmaktır (bir başka deyişle, Kısım 12.1'de başka bağlamlarda gördüğümüz gibi, yalınlık doyurucu bir fiziksel kuram için bir ölçüt haline gelir). Einstein'a göre bu süreç bizi gerçekliğin tam bir anlayışına da daha çok yaklaştırır.[9]

Einstein'ın bu fikirleri fiziği, kendisinden gözlemlerle uyum içinde olan öngörüler çıkarabildiğimiz mantıksal olarak basit ve kendi içinde tutarlı bir aksiyomlar kümesi cinsinden nitelendirir. Tartışmanın sürebilmesi bakımından, bunu bilimin akla yatkın bir betimlemesi olarak kabul etsek bile, bu durumda birbirini izleyen bir bilimsel kuramlar dizisinin gerçekliğe doğru bir ilerlemeyi temsil edip etmediğini nasıl değerlendirebiliriz?[10] Yalın ve açık olarak en azından sağlanması gereken bir koşul, bir sonra gelen her kuramın giderek daha yalın aksiyomları temel alarak kendisinden önce gelenden daha fazla (ya da en azından en az onun kadar) şeyi açıklaması ya da betimleyebilmesi gerektiğidir.[11] Öte yandan, aksiyomların mantıksal yalınlığı için nicel bir ölçütü açık bir biçimde ortaya koymak kolay değildir. Daha önce gördüğümüz gibi, yalınlığın ya da güzelliğin yargılanmasında önemli derecede öznel bir öğe bulunur. Modern bilim felsefesinin büyük bir kısmı, birbirine rakip kuramları ya da bilimde ilerlemeyi değerlendirmek için nesnel ölçütleri bulup seçme ve bunları doğrulama ile ilişkilidir. Eğer geçerli bir tümevarımsal mantık bulunuyor olsaydı, bu pekiştirme probleminin üstesinden gelinmiş olurdu, çünkü o durumda bir sonraki genelleme düzeyine çıkan her tümevarım bizi mutlaka daha kapsamlı ve daha temel bir kurama ulaştırırdı. Bu türden mutlak olarak kesin bir tümevarımsal mantığa sahip olmadığımızın farkına en azından Hume'un zamanından beri varılmışken, yirminci yüzyılda belirli bir veri kümesini temel alan herhangi bir genellemeye ya da yasaya bir

güvenilirlilik derecesi atamak için kullanılacak ölçütler - hatta nicel ölçütler - ortaya koymak için çabalarda bulunulmuştur. Diğerlerinin arasında Hans Reichenbach (1891-1953) ve Rudolf Carnap adlı düşünürler, bir kuramın doğruluğunun olasılığı için açık matematiksel kuramlar ortaya koymaya çalıştılar. Bununla birlikte bu formalizmler, ne karmaşık bilimsel kuramları gelişimleri sırasında değerlendirmek için üzerinde çalışılabilir bir temel sağlarlar, ne de bilim adamlarının gerçekte kuramları değerlendirdikleri yollara karşılık gelirler.

25.2 İndirgemeci Bir Çalışma Taslağı

Einstein Planck'ın onuruna yaptığı konuşmanın sonuna doğru, fiziğin gerçekliğin belirli kesimlerinden kazandığı kusursuzlaştırılmış bilginin ilke olarak her doğal olgunun bir betimlemesinin temeli olarak kullanılabileceği yönünde akıl yürüttü.[12] Şimdi bu tür bir çalışma taslağının ne kadarının akla uygun bir biçimde yerbilim, kimya ve biyoloji gibi diğer doğa bilimleri bağlamında gerçekleştirilebileceğini görelim.

Yerbilim, klasik fiziğin yasaları cinsinden açıklanabilir doğa bilimleri için bir örnek oluşturuyormuş gibi görünür. Dünya'nın kabuğunun belirli başlangıç koşulları göz önüne alındığında, sistem ısınma ve soğuma tarafından oluşturulan gerilimlerin etkisi altında temel mekanik yasalarına göre gelişti. Bununla birlikte, sistem o kadar büyük ve karmaşıktır ki, yalnızca Newton'un yasalarını temel alan bir matematiksel hesaplama umutsuzdur. Kendisine göre Dünya'nın yüzeyinin Dünya'nın kabuğundan daha derinlerde üst mantoya kadar uzanan yaklaşık altı ana kaya parçasına ayrıldığı modern levha tektoniği (ç.n.: Dünya'nın kabuğunun yapısal biçim değişikliklerine neden olan, bunun sonucu olan ya da bununla ilgili olan) kuramı, ilk kez 1912'de Alfred Wegener (1880-1930) tarafından ortaya atılmıştı. Bu ana karaların sürüklenmesi hipotezi, çok büyük oranda Güney Amerika'nın doğusundaki kıyı şeridiyle Afrika'nın batısındaki kıyı şeridinin arasındaki uyumu temel alarak önerilmişti. Daha sonrasında elde edilen yerbilimsel kanıtlar yeterince önemliydi, böylece 1960'lara gelindiğinde çok eskiden bir hipotez olarak güney yarımkürede Güney Amerika'yı, Afrika'yı, Hint Yarımadası'nı, Avustralya'yı (ç.n.: Okyanusya Kıtası'nı) ve Antarktika'yı (Güney Kutbu Kıtası'nı) içeren - Gondwanaland diye bilinen - süper bir anakaranın var olduğu düşüncesi kabul edilmişti. Bu tür bir varsayım, fizik bu tür bir olguyu sistemin akıl almaz derecede büyük karmaşıklığı nedeniyle *ab initio* (ç.n.: Latince 'başından beri' anlamında) öngöremez olsa da, temel fiziksel

yasalar – burada çok büyük kara parçaları üzerine yerbilimsel zamanın çağları boyunca anakaraların yavaş yavaş birbirlerinden ayrılmalarını oluşturmak için etki eden büyük kuvvetler – cinsinden anlaşılabilir bir kurama örnektir. Benzer bir duruma kimyada ve biyolojide de rastlıyoruz. Sayısız mikro sistemden (burada, anakaraları oluşturan moleküller) oluşan makro sistemlerden (anakaralar) hangilerinin, fenomenolojik (ç.n.: fenomenoloji: gerçekliğin insan bilincinde algılandıkları ya da anlaşıldıkları halleriyle cisimlerden ya da olaylardan oluştuğu ve insan bilincinden bağımsız hiçbir şey içermediği noktasına dayanan felsefe ya da araştırma yöntemi) bir modelde incelenmesi uygun varlıklar olduğunu göstermek için belirli bir miktarda deneysel veri gereklidir. Mikroskobik düzeyden yukarı giden ayrıntılı yolu şu an için – ki ileride tersinin olacağına inanmak da çok güç – çözebilmek kuram için son derece karmaşıktır.

20. Konu'da kuantum mekaniğinin – Schrödinger denkleminin kullanılmasıyla – fiziksel sistemlerin en yalını olan tek bir hidrojen atomunun ayrıntılı ve nicel bir incelemesini verebildiğini gördük. Schrödinger denklemini ve Pauli dışarlama ilkesini temel alan çok karmaşık sayısal hesaplamalar elementlerdeki elektronların kabuk yapısını (ç.n.: çekirdeğin çevresinde belirli enerjilere karşılık gelen belli yörüngelerde Güneş Sistemi'ndeki gezegenler gibi bulunmaları) açıklar. Çift atomdan oluşan en yalın gaz molekülü, bir başka deyişle hidrojen H_2 gazı üzerinde çalışıldığında, matematiksel problem, modern elektronik bilgisayarların kullanılmasıyla hâlâ güvenilir sayısal öngörüler elde edilebiliyor olsa da, son derece karmaşıktır. Göz önünde bulundurduklarımızı su (H_2O) gibi çok yalın kimyasal bileşiklere genişlettiğimizde, durum kısa bir süre içerisinde hesaplamalarda bulunabilme bakışı açısından ümitsiz bir karışıklığa dönüşür. Kesin (ç.n.: yaklaşık olmayan) kuantum mekaniksel denklemler yazılabilir, ancak bu denklemler hiçbir güvenilir nicel biçimde çözülemezler. (Doğal olarak, zaman geçtikçe çok daha karmaşık sistemlerin nicel çözümleme yöntemleri önünde 'teslim olması' beklenebilir, ancak bunun ne kadar ileri gidebileceğinin hâlâ bir sınırı olabilir.) En iyi durumda, yalnızca nitel öngörüler ve eğilimler olasıdır. Sık sık, tıpkı yerbilimdeki anakaraların sürüklenmesi modelinde olduğu gibi, büyük alt sistemleri temel alan yararlı fenomenolojik modeller vardır. Fiziğin – kuantum mekaniği başta – temel yasalarının ilke olarak kimyanın tümüne bir açıklama sağlayabileceği konusunda akla yatkın hiçbir kuşku bulunamayabilir olsa da, bu sav tamamıyla teknik ve hesaplamalarla ilgili engeller nedeniyle sıkı ve eksiksiz bir sınavdan geçirilemez. Bu nedenle, kimyanın uygulamalı fiziğe indirgendiğinin ne dereceye kadar söylenebileceği tartışmaya açıktır. Kimyada keşfedilen yasaların çoğu, fiziğin temel ve doğ-

ruluğu kanıtlanmış yasalarından çıkarılmış olmak yerine doğrudan doğruya deneysel bir temele sahiptir.

Modern biyofiziğe geldiğimizde ise resim daha da bulutludur. Bu alanın yalnızca tek bir yönünü kısaca ele alacağız. 1943'te, o sıralarda Dublin'deki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde bulunan Schrödinger, Dublin'deki Trinity College'da canlı bir hücrenin fiziksel yanı üzerine bir dizi konferans verdi. Bir yıl sonra bu konferanslar *Yaşam Nedir?* başlığı altında bir kitap olarak yayınlandı ve biyolojinin temel mekanizmalarının yalnızca fiziğin ve kimyanın yasaları cinsinden açıklanabilip açıklanamayacağı konusunun araştırılmasını yüreklendirdi. O sıralarda biyolojik kopyalamanın mekanizması sorusu anlaşılamaz gibi görünüyordu, böylece Schrödinger genetik bilgilerin hangi yolla saklandığı ve bu bilginin nasıl olup da bir kuşaktan bir sonraki kuşağa değişmeden kaldığı bilmecesi üzerine odaklandı. Bir denge durumundan uzakta oldukça büyük istatistiksel iniş çıkışlardan kaçınmanın iyi bilinen bir yöntemi, sistemin son derece büyük sayılarda moleküllerden yapılmış olmasıyladır. Diyelim n tane gaz molekülünden oluşan bir birikim için, dengeden uzakta kayda değer bir iniş çıkışın şansı ya da olasılığı $1/\sqrt{n}$ düzeylerindedir. Bu nedenle, 100 tane molekülden oluşan bir sistem için oldukça büyük iniş çıkışların oluşması olasılığı $1/\sqrt{100}$ ya da %10 düzeylerindeyken, $n=10^6$ için bu olasılık 10^{-3} ya da %0,1 düzeylerinde olur. Bu özellik oldukça geneldir, bu nedenle eğer yüksek düzeyde bir kararlılık ya da güvenilirlik istersek, çok büyük bir sisteme gereksinim duyarız. Bununla birlikte Schrödinger, bir hücrenin çekirdeğinde bulunan ve genetik bilgiyi taşıyan genlerin en fazla birkaç milyon atomdan oluşabilecek kadar küçük olduklarını biliyordu. Klasik olarak beklenen iniş çıkışlar, genin yapısının yüksek derecedeki kararlılığını açıklamak için çok büyüktü. Schrödinger, fizikçi Max Delbrück (1906-1981) tarafından önerilen bir gen modelini kullanarak, hem genin kararlılığından hem de genin rasgele oluşan mutasyonlarından aynı mekanizmanın - bir başka deyişle, kuantum mekaniğinin - sorumlu olduğu yönünde akıl yürüttü. Geni oluşturan atomların kuantum doğası nedeniyle bu sistemin olası enerji seviyeleri sürekli değildir. Gen kararlılığını, ısıl enerjinin normal sıcaklıklarda gen yapısını genin moleküllerinin izin verilen başka bir biçimine dönüştürmesi yoluyla değiştirmek için yetersiz olması gerçeğinden kazanır. Genin kendisine X ışınları ya da γ ışınları tarafından sunulan enerjiyi bunun aracılığıyla kabul ettiği ya da reddettiği

özünde doğal olarak var olan kuantum mekaniksel rastlantısallık, meydana gelen şansa dayalı mutasyonların bir kaynağıdır.

Schrödinger öncülük eden aynı çalışmada *Yaşam Nedir?* sorusuna olan yanıtını verdi:

> Yaşamın ayırt edici özelliği nedir? Ne zaman bir madde parçasına canlı denir? Hareket etmek, çevresiyle madde değiş tokuşunda bulunmak ve bunun gibi 'bir şeyler yapmayı' sürdürdüğü ve bütün bunları benzer koşullar altındaki cansız bir madde parçasından 'yapmaya devam etmesini' beklediğimizden çok daha uzun bir zaman süreci için sürdürdüğü zaman.[13]

Ölümü, bir sistemin çevresiyle artık gözlenebilir hiçbir değişimin meydana gelmediği bir termodinamik denge içinde bulunduğu en yüksek derecede bir entropi durumu olarak tanımladı. Canlı bir organizma bu en yüksek derecede entropi durumundan ortaya yine enerji çıkaran son derece düzenli maddeler (yiyecek) biçimindeki 'negatif entropi' tüketerek kaçınır. Bir başka deyişle, çevresinden yalıtılmış bir canlı organizmadaki doğal süreçler entropiyi (ya da düzensizliği) arttırma eğilimi gösterdiğinden ve böylece sistemin bozulmasına neden olduğundan, Schrödinger canlı bir sistemi kendi toplam düzenini çevresinden negatif entropi (düzen) alarak (kendi net entropisini aşağıda tutarak) devam ettirebilen bir sistem olarak resmetti. Aşağıda yaşamla entropi arasındaki bağlantıya geri döneceğiz.

Delbrück'ün genin kuantum mekaniksel moleküler modeli, genetik bilginin kararlılığı için bir açıklama sağlarken, kendi içerisinde bu bilginin kopyalanması için bir açıklama sunmuyordu. Bununla birlikte, 1945'te New York'taki Cold Spring Harbor'ta biyofizik üzerine verdiği konferanslar en sonunda genetik şifrenin anlaşılmasına yol açan bir çalışma taslağını başlattı. Delbrück, bu çalışmaya olan katkılarının bir sonucu olarak 1969 Nobel Fizyoloji Ödülü'nü paylaştı. Genetik şifrenin esrarı en sonunda 1953 yılında Cavendish Laboratuvarı'nda çalışan James Watson (1928-) ve Francis Crick (1916-) tarafından çözüldü, bunun için bu ikisi 1962 Nobel Fizyoloji Ödülü'nü paylaştılar. Genetik kopyalama kuramı üzerine olan çalışmaları için 1965 Nobel Fizyoloji Ödülü'nü kazanan Jacques Monod (1910-1976) *Rastlantı ve Zorunluluk* adlı kitabında, kalıtımın yalnızca organik kimyayı ve kuantum mekaniğini temel alan fiziksel kuramını açıkladı. Canlı organizmaların davranışlarının bu ilk ilkelerden tümdengelim ile çıkartılamazlarken, bu ilkeler ile açıklanabildikleri konusunu vurgulamakta dikkatlidir. Watson, canlı organizmaların fiziksel temeli hakkındaki görüşünde çok daha açıktır:

> Hücrelerin büyümesi ve bölünmesi, moleküllerin hücrelerin dışındaki davranışlarını kontrol eden kimya yasalarıyla aynı yasaları temel alır. Hücreler yaşayan duruma özgü hiçbir atom içermezler; bir kimyacının esin dolu birçok çalışmanın sonucunda bir gün yapamayacağı hiçbir molekülü sentezlemezler. Böylece canlı hücrelerin hiçbir özel kimyası yoktur. Biyokimyacı, kimyasal yasaların eşsiz türlerini inceleyen biri değildir, tersine hücrelerin içerisinde bulunan moleküllerin (biyolojik moleküllerin) davranışları hakkında bir şeyler öğrenmekle ilgilenen bir kimyacıdır.[14]

Monod, canlı organizmaların ayırt edici üç özelliği - teleonomi (açık bir biçimde hedefe yönelik davranış), otonom morfojenesis (biçimin ve büyümenin içsel olarak belirlenmesi) ve üremeye yönelik değişmezlik (kendi cinsinin tam olarak kopyalanması) - içinde, diğer ikisinin de kendisi tarafından açıklandığı çoğalmaya yönelik değişmezliğin en temel özellik olduğu yönünde (bakınız Kısım 25.7) akıl yürüttü. Bu - her zaman daha önce söz edilen rasgele iniş çıkışlara ya da mutasyonlara konu olan - çoğalmaya yönelik değişmezlik, kendi kendini kopyalayan (çoğalmaya yönelik değişmezlik) ve RNA (ribonükleik asit) aracılığıyla şifrelenmiş genetik bilgiyi gelişmeye (otonom morfojenesise) neden olmak için hücrenin proteinleri üreten yapılarına aktaran DNA'nın (deoksiribonükleik asit) ikili sarmalında taşınan genetik şifre tarafından açıklanır. Bu olaylarda yer alan moleküllerin üç boyutlu yapıları tarafından betimlenen ve kendi içlerinde hiçbir yeni fiziksel ya da kimyasal yasanın geçerli olmadığı bu süreçler Dünya'nın biyoküresinde yaygın bir biçimde meydana gelirler:

> Günümüzde bakterilerden insana kadar (ç.n.: tüm canlılarda) kimyasal mekanizmanın hem yapısında hem de işleyişinde temel olarak aynı olduğunu biliyoruz.[15]

Monod'un bizim için boyadığı tabloda, kökleri kuantum mekaniğinde yatan küçük sapmalar ya da mutasyonlar rasgeledir (rastlantı), ancak bir kere neden olunduklarında genetik matrise kilitlenirler ve kopya edilirler (zorunluluk). Çevrenin doğal seçilimine konu edilenler, değişmez arka plan matrisindeki bu mutasyonlar ya da değişimlerdir, ki buradan da bir organizmanın ya da canlı türünün açık bir biçimde gelişimi ve hedefe yönelik etkinliği (teleonomi) ortaya çıkar. Tüm bu süreçler termodinamiğin yasalarıyla katı bir uyum içerisinde meydana gelirler. Özellikle, herhangi bir kapalı sistemin toplam entropisi asla azalmaz, böylece eğer canlı bir organizma düzenliliğini arttırırsa, o zaman çevresi düzensizlikte zorunlu olan artışa uğrar. Bu termodinamik ifadelerin doğruluğunun kesin, nicel ve deneysel

kanıtları vardır, böylece Schrödinger'in canlı bir organizmayı negatif entropinin bir tüketicisi olarak görüşü haklı çıkmış olur.

Bu temel üç bilim dalını birbirlerine bağlayan bir akıl yürütme zincirinin

fizik → kimya → biyoloji (canlı organizmalar)

olarak ana hatlarını vermiş olduk. Bu uslamlama doğrusuna verilen akla yatkınlığın derecesi, kendi özel düşünsel tutkularınıza (ç.n.: tercihlerinize) göre değişebilirken, bunun en iyimser destekleyicisi bile bu savın fiziğin daha önceki konularda ele aldığımız tipik örneklerindeki kadar sıkı ve eksiksiz (ç.n.: ya da gediksiz) olmadığını itiraf etmek zorundadır. Herhalde daha çekingen ya da tutucu olanlar, 1969 Nobel Fizyoloji Ödülü'nü kazananlardan biri olan Salvador Luria'nın (1912-1991) attığı bir sonraki, açık adımı atmak için duraksayacaklardır.

> Yaşam evrildi, günümüzdeki durumuna ulaştı ve genetik maddelerin kimyasal işleyişiyle şu an belli bir türün lehinde, yarın bir başkasının lehinde olacak olan, artan bir zindelik sağlayan herhangi bir biyokimyasal buluşun gelişmesine yardımcı olan doğal kuvvetlerin tarihsel işleyişi arasındaki karşılıklı yaratıcı etkileşimle daha da gelişecek. İnsanın beyni ve aklı gibi muazzam araçlar, böceklerin bunlarla eşit derecede muazzam olan sosyal örgütlenmesini oluşturanlar kadar meydan okuyucu ve onlar kadar gizemli biyokimyasal buluşlardır. Bir bilim adamının gözünde, insanın eşsizliği biyolojik olmayan bir şeylerin - ruh ya da tinsel öz - biyolojik evrimin işleyişi üzerine bir üst üste gelmesi olmak yerine tamamıyla biyolojik bir eşsizliktir. Bu son derece karmaşık olgulardan sorumlu olan mekanizmaların doğası hâlâ biyologun elinden kaçmaktadır, ancak o bunun her zaman böyle olmayacağına emindir.[16]

Luria burada 'şu an belli bir türün lehinde, yarın bir başkasının lehinde olacak olan doğal kuvvetlerin tarihsel işleyişinden' söz ediyor. Olayların bizi günümüzde içinde olduğumuz duruma getiren evrimsel zincirindeki belirsizliğin temel rolü, bir paleontolog ve evrimsel biyolog olan Stephen Gould (1941-) tarafından, yenilerde bu gezegen üzerindeki yaşamın evriminin yakın zamanlardaki kaydıyla ilgili anlayışımız üzerine yazdıklarında[17] da vurgulanır.

25.3 Bilimsel Sonuç ve Anlam Çıkarma Biçemleri

Tamamıyla indirgemeci bir çalışma taslağının uygulanabilirliği konusunda endişelerimiz olsun olmasın, hâlâ bilimin fizik gibi belirli bir alanda bize verdiği bilginin güvenilirliği hakkında sorular so-

rabiliriz. Başarılı bilimsel kuramlarımızı nasıl oluyor da sonuç olarak çıkarıyoruz ya da onların doğruluğunu kanıtlıyoruz? Kısım 3.5'te 'doğru' ifadelere ulaşmak için sonuç çıkarmanın dört genel modelinin ya da yöntembiliminin ana hatlarını çıkarmıştık.[18]

Sezgisel-tümdengelen (ya da *aksiyomatik*) yöntemde kanıt gerekmeksizin doğru ya da sezgisel olarak apaçık olduğu öne sürülen bir takım aksiyomlarla başlanır ve doğa ve gerçeklik hakkında geçerli sonuçlara ulaşmak için bunlara katı bir mantıksal tümdengelim uygulanır. Bu, sık sık Aristo (2. Konu) ve daha sonraki çağlarda da Descartes (1. ve 3. konular) ile ilişkilendirilen yöntemdir. Daha önceki konularda çeşitli kereler gördüğümüz gibi, bu yaklaşımdaki zorluk saf sezginin ve kanıt gerekmeksizin doğruluğun aslında tüm karmaşıklıklarıyla birlikte doğanın gerçekliklerine karşılık gelen kuramlar için güvenilmez birer rehber olduklarının kanıtlanmış olmasıdır. Belirli gözlemlerle ve verilerle başlanan ve sonrasında genel bir yasaya ulaşmak için yalnızca bu gerçeklerin kullanılmasına çalışıldığı *tümevaran* yöntem (ç.n.: Kısım 3.5'te 'ii' nolu maddenin başlığı yanlışlıkla *'tümdengelen'* olarak yazılmıştır; doğrusu *'tümevaran'* olacaktır) için de benzer eksikliklerin bulunduğu açığa çıkmıştır. 3. Konu'da Hume'un bu türden dosdoğru bir yol izleyen tümevarım çalışma taslağına olan itirazlarının bazılarını sunmuştuk.

Newton (7. Konu) kendisinin tümevarımı kullanışı konusunda oldukça açık ve emindi. Bununla birlikte, o da sonuç olarak yaptığı bilimde bunu açık olmayan bir biçimde modern bilimde kullanılan önemli araçlardan biri olduğu ortaya çıkan *retrodüktif* ya da *hipotetik-tümdengelimsel* strateji ile birleştirdi. Burada bir takım hipotezler kabul edilir ve bunlardan tümdengelim ile mantıksal sonuçlar çıkarılır. Doğal olarak böyle bir akıl yürütme, düşünce yapılarının doğruluğunu kanıtlayamaz olsa da, doğru öngörülerin hipotezlerin doğruluğu için bir garanti oluşturduğu kabul edilir. Akla yatkın bir biçimde Gilbert ve Harvey'in, Newton gibi en azından üstü kapalı bir şekilde bilimsel ilerleme için önemli bir araç olarak, hipotetik-tümdengelimsel yöntemi kullandıkları öne sürülebilir. Boyle, kesinlikle bu akıl yürütmeyi atomcu ve mekanik bir doğa felsefesini desteklemek için uyguladı.[19] Boyle'un etkisinin, More'un ve Barrow'un felsefesiyle birlikte bilimde neredeyse iki yüz yıl kadar egemen olan Newton'un doğa felsefesinde bulunduğunun açığa çıktığını, daha önce (11. Konu'da) gördük. Bu Newtoncu gelenekten ortaya çıkan gerçekliğin çok önemli bir öğesi, atomların yalın nicel özelliklere (kütle, konum, vb.) sahip olduğu ve belirli matematiksel yasalara ve hareket denklemlerine uygun olarak nedensel bir biçimde etkileştikleri mekanikçi bir

görüştü. Bu mekanikçi felsefe (12. Konu) Orta Çağların organizmacı felsefesinin (2. Konu) yerini aldı. Newtoncu fizik uygulamalı dünyada o kadar başarılı oldu ki, ortaya - bir anlamda düşünür Immanuel Kant'ın (1724-1804) da inandığı gibi - klasik fiziğin yasalarının mutlaka ya da a priori doğru olduklarını öne süren düşünsel bir bakış açısı çıkardı.[20] (Doğal olarak, Newtoncu mekaniğin ve kütleçekim kuramının sonuç olarak 'tahttan indirilmesi' bu tasarının fazla iyimser doğasını dramatik bir biçimde açığa çıkardı.)

Yanlışlamacı yöntembilim (3. Konu) bir kuramın anlamlı tek sınavının, öngörülerinin doğru olmadığının ortaya çıkabileceği bir biçimde gerçeklikle belirli karşılaştırmalara konu olabilme yeteneğine ne derecede sahip olduğunda yattığına inanır. Bir kuramın yanlışlığı bir kez gösterildiğinde, bir kenara bırakılır ve daha sonra sınamalara konu edilen bir başkası yerini alır. Bu şekilde bilim bir kuramdan daha fazla şeyi kapsayan bir diğer kurama doğru ilerler. Bu tür bir ölçüt soyut olarak açık ve kesin bir biçimde ortaya konmuş gibi görünse de, aslında bilim, bilim adamları bir kuramı bir kez tek bir deneysel veri setiyle çelişki içine düştüğü zaman bir an önce bir kenara atmadıklarından kesin bir yanlışlamacılık temelinde işlemez. (15. Konu'yu ve Kaufmann deneylerini anımsayınız.) Yine de, yanlışlama ölçütü bilimin (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulamasında diğerlerini dışarıda bırakan özel bir rol olmasa da önemli bir rol oynar.

Her şeye rağmen sonuç çıkarmanın bu genel yöntembilimlerinden hiçbirisi, şimdiye dek yasaları ya da kuramları tek bir biçimde diğerlerinden ayırmak ya da kesinlikle doğruluklarını kanıtlamak için yeterli bir araç sağlamamıştır. Bilimsel bir kuramı bir diğerine tercih etmek için ek rehberlere gereksinimimiz vardır. Oldukça sık bir biçimde bu rehberler estetik ölçütlerdir. Galilei'nin bilimin dilinin matematik olduğunu belirten ifadesine birden daha fazla sayıda dikkat çektik. Benzer bir biçimde, Kepler bağımsız bir şekilde - gezegenlerin Güneş çevresindeki yörüngelerinde periyotlarını ve ortalama yarıçaplarını birbirleriyle ilişkilendiren üçüncü yasasının (bakınız 5. Konu) da buna bir örnek olduğu gibi - gök cisimlerinin hareketinde matematiksel bir uyumun var olduğunu fark etti. Ona göre bu uyum evrenin akla yatkın bir yapısının ve tasarımının belirtisiydi ve doğanın olgularının nedenleriydi. Aynı zamanda şu ölçütü de açık biçimde ortaya koymuştu:

> Aynı gerçekler hakkındaki çeşitli sayıdaki değişik hipotezler arasında, - diğer hipotezlerde birbirleriyle ilişkili olmadan kalan - gerçeklerin niçin

> oldukları gibi olduklarını gösteren, bir başka deyişle bu gerçeklerin düzenli ve akla yatkın matematiksel bağlantısını (ç.n.: örneklerle) gösteren hipotez doğrudur.[21]

Kepler'e göre gerçek dünyada matematiksel bir düzen bulunuyordu. Bu, Aristoculuğun nitel betimlemelerinden ve açıklamalarından doğayı tanımlayan nicel ve kesin matematiksel ilişkilerle ifade edilebilen özelliklere doğru önemli bir geçişe işaret ediyordu. Doğanın kesin yasalarının doğruluğuna ve güvenilirliğine olan inancın üzerinde Galilei de ısrar etmişti. Bu tasarıda matematik yeni yasaların ve kuramların keşfedilmesinde bir diğer önemli yardımcı - ancak kuşkusuz ki bunların yapılmasında kendi başına yeterli olmayan bir araç - haline geldi.

On dokuzuncu yüzyılın sonuna gelindiğinde, klasik fizik kendine özel (örneğin 13. Konu'nun eteri gibi) zorluklarla karşı karşıya kalıyordu, öyle ki bazıları bilime eşlik eden mekanikçi felsefenin mutlak gerekliliğini sorgulamaya başladı. Fenomenolojik bir yöntembilim görüşüyle aynı düşüncede olan Kirchhoff, fiziğin görevinin, doğanın olgularının ister modeller cinsinden olsun isterse insan aklına a priori gerekli ya da kanıt gerekmeksizin doğru gelen ilkeler cinsinden olsun, anlaşılmasını değil, tersine tam, kesin ve yalın bir betimlemesini sağlamak olduğuna inanıyordu. Hertz de buna benzer bir görüşü paylaşıyordu. (Bu konu üzerinde, IX. Bölüm *(Geriye dönük bir bakış)* için olan ilk alıntıya bakınız.) Mach fiziksel yasaların yalnızca olguların uygun özetleri oldukları biçiminde bir düşünceyi açıkladı ve pozitivist bir ölçüt geliştirdi, bu ölçüte göre, gerçeklerin bilgisi konuyla ilgili olmayan herhangi bir kuramsal kavram olmaksızın yalnızca duyu deneyimlerinin 'pozitif' verilerini temel almalıdır. Bu tür bir pozitivist felsefede, her türlü olası gözlemi ya da duyu deneyimini aşıp geçen tüm doğa ötesi kavramlar doğayı betimleyişimizden çıkarılmalıdırlar. Mach Newton'un mutlak uzayını (11. Konu) bu temel üzerinde eleştirdi.[22]

Yaklaşık olarak aynı sıralarda Amerika Birleşik Devletleri'nde, yararcılığın (pragmatizm) kurucusu olan düşünür Charles Peirce (1839-1914), başkalarından bağımsız olarak pozitivist (ç.n.: gizli ve açık olmayan) anlamlar - genel kuramsal kavramların uygulamadaki ya da işlevsel anlamlarının daha da genel doğa ötesi ilkeler cinsinden tanımlanmaları yerine gözlemlenen gerçekleri temel alacak olmaları anlamında - içeren bir felsefe diye nitelendirilebilecek düşüncelerini açık ve kesin bir biçimde ortaya koydu. Benzer bir tutum içerisinde, mantıksal pozitivizmin ya da mantıksal ampirisizmin Viyana Çevresi olarak da bilinen önemli ekolü,

1920'lerde Viyana'da kuruldu. Bu hareket Moritz Schlick tarafından kurulmuştu ve Rudolph Carnap'ı, Philipp Frank'ı, Kurt Gödel'i, Carl Hempel'i (1905-) ve Hans Reichenbach'ı da içine almaktaydı.[23] Göreliliğin özel ve genel kuramları sık sık, Einstein'ın kendisi pozitivist dogmanın büyük bir kısmını kabul etmemiş olsa da, bu ekolün düşünce yapısını gösteren örnekler olarak hizmet etmişlerdir. Sonuç olarak ortaya çıkan bilimsel yöntembilim kuramı, bir kuramın mantıksal yapısının - tıpkı bir silojizmin (1. Konu) mantıksal yapısının içerdiği terimlerin ayrıntılarına bağlı olmaması gibi - özel olarak üzerine eğildiği konudan bağımsız olarak çözümlenebileceğini ve anlamlı önermelerin yalnızca, duyu deneyimlerini temel alanlar olduklarını ve böylece doğa ötesi kavramların savunulamaz hale geldiklerini öne sürdü.

Öte yandan Fransız matematikçisi ve kuramsal fizikçisi Poincaré çok farklı bir konum aldı. Newtoncu fiziğin düşünsel konumuna yönelik olarak Kirchhoff, Hertz ve Mach tarafından getirilen eleştirilerden etkilenmiş olsa da, fiziğin genel yasalarının yalnızca gözlemlerin ve verilerin doğrudan doğruya özetleri olamayacaklarını düşündü, çünkü hazır duyu algılarından bu soyut yasalara olan uzaklık çok büyüktür. Poincaré'nin bu konu üzerine yazdıkları yeterince etkili olmuştu ve adına *gelenekselcilik* denen akıma yol açtı. Bu, bilimin ilkelerini insan aklının a priori olarak ne doğru ne de yanlış olan, ancak bazıları gerçekliğin deneyimlerini düzenlemekte yararlı olabilen bağımsız yaratıları olarak görür. Örnek olarak, ister Öklit geometrisinin isterse belirli bir Öklit olmayan geometrinin aksiyomlarının gerçek dünyada doğru olmaları gerekmez (11. ve 18. konulara bakınız). Bununla birlikte, bir kere fiziksel bir ışık ışınının düzgün bir doğru (ya da bir jeodezik) boyunca yol aldığı kabulünün doğruluğunu kanıtladığımızda, o zaman bu sistemlerden birisi fiziksel olgular ile ilgili hale gelir. Benzer bir biçimde Poincaré mekanikteki eylemsizlik yasasını, düzenli ve düzgün doğrusal hareketin kuvvetten bağımsız hareket için bir ölçüt olmasını öngören (şart koşan) bir kabul ya da tanım olarak değerlendirdi. (Kısım 7.5'te Poincaré'nin klasik mekaniğin mantıksal yapısını çözümlemesini anımsayınız.)

> [Mekaniğin] ilkelerinin - her ne kadar daha doğrudan doğruya deneyimleri temel alsalar da - hâlâ geometrik aksiyomların geleneksel niteliğini paylaştıklarını göreceğiz.[24]

Poincaré, gerçekten de kabuller olan bu hipotezlerle ilgili olarak şunları yazdı:

> Bu tür kabuller, bu alanda hiçbir engel tanımayan aklın sınırsız etkinliklerinin bir sonucudur... Ancak bu yasaların *bizim* bilimimize zorla kabul ettirilirlerken, ... Doğa'ya zorla kabul ettirilmediklerini açık bir biçimde anlayalım. O halde bu yasalar nedensizce mi seçilmişlerdir? Hayır, çünkü eğer öyle olmuş olsalardı, verimli olmazlardı. Deneyimlerimiz bize seçme özgürlüğü bırakıyor, ancak bize izlenecek en uygun yolu (ç.n.: güçlükle de olsa) görmede yardımcı olarak rehberlik ediyorlar.[25]

24. Konu'da Fransız bir kuramsal fizikçi ve düşünür olan Duhem'in de fiziksel kuramların hedefinin, olguların 'doğru' kuramsal yapılar cinsinden bir açıklamasını vermek yerine olguların özetlenmiş bir temsilini sunmak olduğuna inandığını gördük.

> Fiziksel bir kuramın hedefinin, doğal bir sınıflandırmanın yerini almak ve çeşitli deneysel yasalar arasında kendisine göre gözümüzden kaçan gerçekliklerin düzenlendiği gerçek düzenin bir çeşit görüntüsü ve yansıması olarak hizmet eden mantıksal bir eşgüdüm kurmak olduğunu öne sürdük.[26]

Tüm bu yöntembilimleri, ölçütleri ve kısıtlamaları ele aldıktan sonra elimizde kalan, bilimsel girişimi daha ileriye götürmek için her biri değişik koşullarda şöyle ya da böyle yararlı olan, ancak yalnız başına hiçbirinin ya da bir arada kullanıldıklarında birkaçının bilimin yöntemini oluşturmadığı araçlardan oluşan bir 'alet çantasıdır'. Bir kere daha bilimsel bilginin yenilenebilirliği, düzeltilebilirliği açık bir biçimde görülür. Bu durumda akla yatkın bir biçimde, tatmin edici bir şekilde doğrulanmış diyebileceğimiz bilimsel bilgiye en azından nasıl ulaşabileceğimizi sormak akla uygun görünebilir.

25.4 Bir Doğrulama Paradoksu

Bununla birlikte, bilimsel bir kuramın kanıtlarla desteklenmesi için akla uygun nitel bir ölçütün kurulması bile kolay bir iş değildir. Şu ya da bu şekilde - sezgilerle, tümevarımla, iyi bir şansla ya da bunların ve daha fazlasının herhangi bir birleşimi ile - fiziksel bir kuramı ya da hipotezi açık ve net bir şekilde ortaya koyduğumuzu ve şimdi de bunun fiziksel gerçeklik tarafından desteklenip desteklenmediğini ortaya çıkarmak istediğimizi varsayın. Hipotezden tümdengelimle mantıksal sonuçlar çıkarırız ve bunları gerçekliğin verileriyle karşılaştırırız. Eğer bu öngörüler deneyimlerle uyum içinde olmazsa, o zaman hipotezin yanlış olduğunu biliriz. Ancak eğer öngörüler deneyimlerle uyum içinde olurlarsa ne de-

riz? Eğilimimiz, hipotezi terimin katı mantıksal anlamı içerisinde kanıtlamamış olsak da, verilerin hipotezi doğruladığını (haklı gösterdiğini, desteklediğini, vb.) öne sürmektir. Akla uygun bir ölçütün aşağıdaki gibi olduğu görülür. Eğer veriler öngörülerle uyum içindeyse, hipotezi doğrularlar; eğer öngörülerle uyum içinde değillerse, hipotezi doğrulamamış olurlar (aslında bu durumda yanlış olduğunu kanıtlarlar) ve eğer hipotez belli bir veri sınıfı hakkında hiçbir öngörüde bulunmazsa, o zaman bu veriler hipoteze göre tarafsızdırlar (ya da hipotezle ilgisizdirler). Bu tür bir ölçüt temel olarak alındığında, doğrulayan kanıtların çok olması, daha öncesinde de işaret edildiği gibi bu doğrulama derecesine yararlı ve gerçekçi nicel bir ölçü atayamasak bile daha iyidir.

Tüm bunlar her ne kadar akla uygun gibi görünüyor olsalar da, çağdaş bir bilim düşünürü olan Carl Hempel bir hipotezin doğrulanması için kullanılan bu tür bir ölçütün kafa karıştırıcı sonuçlara yol açtığını gösterdi.[27] Verdiği örnek sık sık aşağıda açıklandığı gibi kuzgunlarla denemeler paradoksu adıyla anılır. Elimizde 'Bütün kuzgunlar siyahtır' diyen bir önerme olduğunu varsayın. Bu önerme $p \Rightarrow q$ biçimine sahiptir, burada p kuzgunları ve q da siyahı gösterir. Yukarıdaki doğrulama ölçütümüze göre, eğer siyah bir kuzgun bulursak, bu önermeyi doğrulayan bir örneğe sahip oluruz; eğer siyah olmayan bir kuzgun bulursak, p hipotezi doğru olamaz; ancak eğer siyah olmayan, kuzgun olmayan bir canlı (diyelim yeşil bir kurbağa) bulursak, o zaman elimizde tarafsız bir veri parçası olur. Öte yandan, $p \Rightarrow q$ mantıksal olarak $\sim q \Rightarrow \sim p$ ile özdeştir: 'Siyah olmayan bütün şeyler kuzgun olmayan şeylerdir.' Bu ifadelerin her biri mantıksal olarak diğerini gerektirir. Şu halde doğrulama ölçütümüze göre yeşil bir kurbağanın var olması, $\sim q \Rightarrow \sim p$'yi - ve bundan dolayı $p \Rightarrow q$'yi - doğrulayan bir örnektir. Tüm bunlarda katı hiçbir mantıksal paradoks ya da çelişki bulunmazken, normal olarak yeşil bir kurbağanın var olmasının bütün kuzgunların siyah olduğunu belirten hipotezi doğruladığını onaylamayacağımızdan kesinlikle sezgilere son derece karşı bir şey gibi görünür. Hempel'in akıl yürütmesine göre görünüşte tarafsız olan çok büyük miktarda kanıtın, doğrulama yönünde bir kanıt haline geldiğini görürüz.

Tüm bunların yalnızca düşünsel bir tuhaflık parçası olmadığını açık hale getirmek için, bu düşünceleri fiziksel bir kuram hakkındaki bir ifade cinsinden yeniden sunalım. 1. Konu'da örnek olarak 'Güneş'in çevresinde dönen bir gezegen için Newton'un kütleçekim yasası geçerliyse gezegenin yörüngesi bir elipstir' önermesini aldık.

Diğer gezegenlerin etkileri yüzünden küçük sapmaların olduğu doğru olduğundan, buradaki hipotezimizi Güneş'in çevresinde dönen tek bir gezegenle sınırlandırıyoruz. Bu durumda, eğer Güneş'in çevresinde dönen bir gezegen görür, onun Newton'un kütleçekim yasası tarafından yönetilmesi gerektiğini bilir ve dahası yörüngesinin gerçekten de bir elips olduğunu belirleyebilirsek, o zaman hipotez olarak varsaydığımız önermemizi ($p \Rightarrow q$) doğrulayan bir örneğe sahibizdir. Benzer bir biçimde, eğer Güneş'in çevresinde dönen belirli bir gezegenin Newton'un kütleçekim yasası tarafından yönetilmesi gerektiğini bilir, ancak yörüngesinin bir elips olmadığını bulursak, o zaman önermemiz için doğrulayıcı olmayan (p ve $\sim q$) bir kanıt parçasına sahibiz. Şu ana dek hiçbir sorun yok. Öte yandan, tıpkı kuzgunlar paradoksunda olduğu gibi, $p \Rightarrow q$ mantıksal olarak $\sim q \Rightarrow \sim p$ ile özdeştir. Bu önerme, Güneş'in çevresinde eliptik bir yörünge izlemesi gerekmeyen herhangi bir şeyin (örnek olarak, diyelim başka bakımlardan boş bir evrende bir yerlerde yalnızca oturan yeşil bir kurbağa), Güneş'in çevresinde dönen ve Newton'un kütleçekim yasası tarafından yönetilen bir gezegen olmaması (yeşil kurbağa bu koşullar altında yine yeterli bir örnektir) gerektiğini de söyler. Doğal olarak, yeşil kurbağalar dışında birçok şey $\sim q \Rightarrow \sim p$ ve bundan dolayı - doğrulama ölçütümüz uyarınca - $p \Rightarrow q$ önermesini doğrulamak için kullanılabilir. Ancak bu, bilim bilimsel bir kuram için destekleyici yönde kanıt bulmaya çabalarken bu tür bir tarzda işlemediğinden tamamıyla saçma gibi görünür.

Tüm bunlardan çıkarılacak ders, gerçekte bilimde kullanılan doğrulama ölçütlerinin görünüşte son derece akla uygun duran toy ölçüt kadar yalın olmadıklarıdır. Hempel'in paradoksu bilim felsefesinde tartışılan tek doğrulama paradoksu değildir[28] ve bu soruları çözümleme çabası içerisinde şimdiye dek birçok şey yazılmıştır. Gerçekçi ve genel olarak kabul edilen bir doğrulama ölçütünün bulunması problemi hâlâ çözümsüz olarak durmaktadır. Bazı modern bilim felsefecileri, tam olarak bilimsel (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulamanın ve ilerlemenin karmaşık doğası nedeniyle, yalnızca nesnel kanıtların ve bilim kuramlarının değil, aynı zamanda bilim adamının bu kanıtla, bu kuramlarla ve diğer bilim adamlarıyla olan etkileşimini de göz önünde bulundurmanın gerekli olduğunu öne sürmüşlerdir. Bilgi sosyolojisinin bu ekolü, bilimsel bilginin içeriğinin ya da özünün ta kendisinde ondan ayrılamaz bir sosyolojik bile-

şenin bulunduğuna inanır.[29] (24. Konu bu soruyu kuantum mekaniği bağlamında inceledi.)

25.5 Bilimin Paradigma Modeli

Günümüzde bilim felsefesinin çabasının büyük bir kısmı, bilimin ne olduğunun ve aslında tarih boyunca nasıl işlediğinin oldukça aslına uygun bir modelini ya da betimlemesini kurmaya adanmıştır. Daha sonra, daha iyimser bir hedef kurallara dayalı (bundan önceki iki kısımda göz önüne alınan adaylar gibi) bir ölçütler kümesi olabilir, ki bunun sayesinde incelenmekte olan bilimsel bir kuram bir standarda göre değerlendirilebilir. Çok daha fazla şeyi boydan boya kaplayan (kurallara dayanan) tasarı olası olmasa da, (betimlemenin) daha önceki tasarısının yapılabilir olduğu ortaya çıkabilir. Yine de, bilim felsefecilerinin tümü bilimin gerçekten de dünyanın giderek daha da doğru bir resmine doğru ilerlediğiyle hemfikir değildir. Bazılarına göre, birbirini izleyen kuramlar yalnızca giderek daha fazla veriyi, bize bu verilerin gerçeklikteki daha temel varlıklar cinsinden bir açıklamasını vermesi gerekmeyen uygun bir tasarı içerisinde çevreler ya da düzenler. Bu nedenle, bu ve bundan sonraki kısımda bilimin en azından tanımlayıcı oldukları düşünülen iki güncel modelini ele alacağız.

Thomas Kuhn (1922–1996) çok etkili olan şemasında, bilim tarihini göreli olarak daha seyrek devrim dönemleri ile bölünmüş normal bilim çağlarına ayırışında bilimin kamusal ve sosyolojik yönlerini vurgular. Normal dönemler sırasında bilim adamlarının ezici bir çoğunluğu ortak bir paradigmayı (ya da bir resmi, kuramı, vb.) kabul eder, bununla problemler çözer, bu paradigmayı daha da doğrulayan örnekler arar ve öğrencilerine de bunu aşılar.

> Sanırım üç problem sınıfı - önemli gerçeğin belirlenmesi, gerçeklerin kuramla uyuşturulması ve kuramın açık bir şekilde dile getirilmesi - hem deneysel hem de kuramsal normal bilimin yazınını olduğu gibi tüketir.[30]

Doğruluğuna inanılan, yer etmiş ve 'saygı' duyulan bir paradigma ciddi bir meydan okumaya - Kuhn'un deyimiyle 'uymazlıklara' (ç.n.: İngilizcesi 'anomaly'; normal düzenden ya da kuraldan, vb. olan sapma) - karşı koymakta tekrar tekrar başarısız olunca ve bu konu üzerinde çalışan bilim adamlarının yeterince büyük bir kesimi güncel paradigmanın işe yaramayacağına ikna olunca, bilim bu sırada yeni bir pa-

radigmanın arandığı bir kargaşa ya da devrim dönemine girer. (Kuşkusuz kitabın daha önceki konularında bunun örneklerini gördük.) Bir kez başarılı başka bir paradigma açık ve net bir biçimde ortaya konduğunda, bilim normal çalışma tarzına geri döner. Bilim adamları, bir normal bilim döneminden bir sonrakine geçiş yapmak için sanki kendi toplu iradelerine karşı gelmeye zorlanırlar.

> Tıpkı bir fabrikadaki üretim hatlarının ve makinelerin yenilenmesi gibi, bilimde de yenilenme ve yeniden örgütlenme, onun ortaya çıkmasını gerektiren fırsat için saklanması gereken bir savurganlıktır. Bunalımların önemi, yenilenme için bir fırsatın ortaya çıktığının belirtisini sağlamalarıdır.[31]

Kuhn'un bilimin işleyişiyle ilgili modelinde, buluşun ve doğruluğun kanıtlanmasının mantığı ya da bağlamı - eğer en ufak bir derecede bu olası ise - birbirlerinden kolayca ayrılamaz.[32] Bilimsel buluşların yapılması süreci, çok yakın bir biçimde bu şekilde ulaşılan yasaların ve genellemelerin doğruluğunun kanıtlanması süreciyle bağlantılıdır, böylece kuram bilim adamının ve bilim dünyasının bilimin ürettikleri üzerindeki etkisine hak ettiği değeri vermeksizin soyut bir biçimde değerlendirilmeye kalkışılmamalıdır.

> Bu paradigma seçimi sorunu asla yalnızca mantık ve deney ile üzerinde bir kuşkuya ya da yanlış anlaşılmaya yer bırakmayacak bir biçimde çözülemez...[33]

Kuhn, bilimin düşünsel yönüne ek olarak sosyolojik ve psikolojik yönlerinin önemini vurgularken yalnız değildir. Yalnızca bir örnek olarak, modern bilimsel girişimin yapısına ve işleyişine karşı ilgi duyan kuramsal bir fizikçi, bilimi aşağıdaki gibi nitelendirmiştir:

> Bilimin amacı, olası en geniş alan üzerinde akla uygun bir görüş üzerinde ortak bir uzlaşıdır.[34]

> Bilimsel bilginin doğruluğu yalnızca mantık ile kanıtlanamaz ya da geçerli kılınamaz.[35]

Kuhncu bir bakış açısından bakıldığında, bilimin herhangi bir mutlak gerçeğe doğru ilerlediği öne sürülemez. Bir uzlaşı oluşturmak için iletişimde kullanılan dil, kendi başına kesin olan ve herhangi bir belirsizlik içermeyen matematiktir, ancak tek başına bu iletilen mesajın doğ-

ruluğunu garanti etmez. Günümüzdeki bilim felsefecilerinden kimileri bilimin, onun başlıca bileşenlerinden bazıları olarak insan aklının elindeki temel düşünce kalıplarını[36] ve kendilerini kullanarak dış dünyayı algıladığımız duyusal-motor araçlarını[37] göz önünde bulundurulmaksızın, herhangi bir anlamlı tarzda incelenemeyeceğini düşünür. Tıpkı Bohr'un kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumuyla ilgili daha aşırı bazı metinlerde gözlemcinin ya da 'her şeyi bilenin' bir deneyin sonucunun (ya da elde edilebilir bilginin) belirlenmesinde temel bir rol oynamasında olduğu gibi, insan aklının ve bedeninin işleyişi de ilke olarak dış dünyayla ilgili var olabilen olası bilginin başlıca saptayıcısı olabilir. Bilgiyi 'her şeyi bilenden' ayırmak ve onu bağımsız bir biçimde ele almak sonuç olarak olanaksız olabilir, ki böylece soyut, nesnel bilgi ideali bir hayalden öte bir şey olmayabilir.

Doğal olarak, bunlarla uyuşmayan farklı görüşler de vardır. 'Her şeyi bilen'-bilgi sisteminin bu kadar yakın bir biçimde birbirine bağlanmış olması olası iken, güncel bilim felsefesindeki diğer ekoller, bilimi gerçekte nesnel, akla uygun bir süreç olarak kabul eder ve bu mantıksız (ya da belki de yalnızca akla uygun olmayan), fazla-'mantıksal' öğelerin bilimsel girişimin dışında yer alan şeyler olduklarına ve bilimin ve onun ilerleyişinin tartışılmasında en aza indirgenebileceklerine inanırlar. Bu görüşün önemli bir yandaşı, daha öncesinde ele aldığımız yöntembilimsel yanlışlama ya da yanlışlanabilme ölçütü ile Karl Popper'dı.[38]

25.6 Bilimin Seçmeci Bir Tanımlaması

Şimdiye dek bu konuda bilimin önemli ayırt edici özelliklerinden bazılarının, bilimin hedeflerinin ve (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulamasının kısa bir özetini verdik ve düşünürlerin kendileri aracılığıyla bilimi anlamaya çalıştıkları modellerden birkaçını örneklerle gösterdik. Buradan bir kuramın değerlendirilişi için ortaya belirli hiçbir yöntembilim ya da ölçüt kümesi çıkmadı, çünkü özel olan ve gerekli her şeyi kapsayan bir küme varmış gibi görünmemektedir. Yine de bilimsel girişimin nitelendirilişi için akla yatkın bir özet verebiliyoruz.

Bilim, çok sayıdaki fiziksel olguyu birkaç temel, yalın soruya ya da probleme indirgemeye ve sonra da bu temel gerçekleri açıklayabilecek kuramlar kurmaya çalışır. Fizikte bir açıklama, bir olgular kümesini bir kuram ya da yasa cinsinden açıklayabilmekten oluşur. İyi bir kuram

kendi içerisinde tutarlı (mantıksal çelişkilerden bağımsız) olmalıdır, doğru olan (fiziksel gerçeklikle uyum içinde olan) sonuçlar ya da öngörüler oluşturmalıdır ve yapısında ve onu oluşturan yapılarda bir yalınlığa sahip olmalıdır. Hipotetik-tümdengelimsel yöntem (yanlışlanabilirlik aracılığıyla) kuramların değerlendirilişinde temel bir öneme sahiptir. Modeller ve benzerlikler (tümevarım aracılığıyla) yararlı hipotezlerin doğru olarak kestirilişine yardım etmekte büyük bir rol oynarlar. Bilimsel ilerleme ve bilginin büyümesi, giderek daha da az sayıda varsayımlar cinsinden daha da fazla sayıda olguları açıklayabilen gittikçe daha genel (daha soyut ve daha yalın) olan kuramların elde edilmesinden oluşur. Yine de, kuramlar ve bilimsel bilgi nitelik olarak geçici olmayı sürdürürler, tarihsel ve sosyolojik etmenler tarafından etkilenirler ve her zaman yeniden gözden geçirilişlere konu olurlar. Kuramlarımız gerçekliğin insan aklı tarafından yaratılmış uygun kavramlar ve kabuller (gelenekler) cinsinden bir betimlemesini verirler.

Bilim kuramlarının geçmişteki denemelerinin çeşitli anahtar konumundaki ayırt edici özelliklerini, bilimsel girişimin uygulamada nasıl işliyor göründüğünün birleşik bir betimlemesinin içine katabiliriz. Genel kavramsal bir matris olarak, bilimin (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulanışı, yöntemleri ve hedefleri diye üç ayrı düzeyden oluşan - bir başka deyişle hiyerarşik - bir taslağını öneriyoruz.[39] Burada en alt düzeye, bir diğer deyişle uygulanış düzeyine, bütün süreci bilimin hedeflerine doğru yönlendirmek amacıyla bilimin kabul edilen yöntemleri tarafından rehberlik edilir ya da bilgi verilir. Gerçekleri, yasaları ve kuramlarıyla bilimin uygulanışı teriminin içerisine, deneysel çalışmaları ve yasaların ve kuramların kurulmasını kapsayan bilimsel etkinliklerin akıl almaz derecede büyük gövdesini katıyoruz. Birçokları için bu, tam olarak neredeyse bilimin bütünü olarak görünebilir. Bu düzeydeki (klasik mekaniğin yerini göreliliğin ya da kuantum mekaniğinin alması gibi) değişiklikler yeterince tanıdıktır ve - eğer gerçekten de böyleleri varsa - çok az sayıda kişi bu düzeyde mutlak bir kararlılığın bulunduğunu tez olarak öne sürer. Bir sonraki düzey ya da tabaka, kendileri aracılığıyla kuramların ve yapıların değerlendirildiği yöntembilim ya da kurallar düzeyidir. Örnek olarak, hipotetik-tümdengelimsel yöntem, tümevarım, genel olarak kabul edilen açıklama biçimleri ve sonuç çıkarma kuralları burada bulunurlar. Biçimsel mantıksal yapı ve akla uygunluğun - nelerin 'iyi nedenler' olarak sayıldığı gibi - genel ilkeleri de burada yer alırlar. Bu düzey uygulanış düzeyiyle karşılaştırıldığında daha kararlıdır, ancak değiştirilemez değildir. En üst düzeyde ya da en içeride yer alan tabakada bilimin - geçmişte bir zamanlarda

gerçekliğin olması gibi - hedefleri ya da amaçları vardır. Bu kitabın başından sonuna dek bu üç düzeyin hepsinde de oluşan değişikliklerin örnekleriyle karşılaştık. (Yöntemler ve amaçlar düzeylerindeki değişiklik ve gelişme örnekleri - bu kitapta ele alınan diğer örnekler arasında - Kısım 3.6'da da gösterildiği gibi Platon ve Aristo'dan başlayıp Popper ve Quine'e dek uzanan 'zaman doğrusu' tarafından sağlanır.)

Bilimin bu modeli ya da temsili için temel olan, bu düzeylerin ya da bileşenlerin hiçbirisinin ne ilke olarak ne de gerçekte değişime karşı bağışık olduğudur.[40] Bu üçlü karşılıklı olarak birbirleriyle eşleşmiştir ve evrilmektedir. Bilimin uygulanışının dışarıda kalan katmanları daha hızlı değişime konu olurlar, ancak bu değişimler daha içeride yer alan özü de etkilerler. Bu birbirleriyle eşleşmiş uygulanış-yöntemler-hedefler ağı, gerçek dünyadan gelen kısıtlamaların (deneyler gibi) baskısı altında ve bunların yanı sıra dış (sosyolojik) etmenler için zaman içinde evrilir. Üçlümüzün birbirleriyle eşleşmiş birleşenlerinin bu evriminde, bilimin uygulanışı tipik olarak bu evrimin umursamaz ve en son belirleyicisidir. Bir diğer deyişle, yöntembilimdeki ve hedeflerdeki yeni buluşların (yeniliklerin) kökleri sık sık sonuç olarak başarılı bilimsel uygulamalarda bulunur. Bu, (bilime özgü) hiçbir yöntembilimsel ilkenin daha önceden buyurulamayacağı anlamına gelir. Bu ilkeler bilimde, bilim yapılırken keşfedilmeli ya da o sırada farklarına varılmalıdırlar. Dahası, tarihsel kayıtlar bu geçmiş (ya da güncel) bilimsel uygulamalardan soyutlama alıştırmasının, bilimin değişmeyen (ya da sonrasında sonsuza dek belirlenmiş) tam bir nitelendirilişine yol açmadığını gösterirler. Tersine, bilimin uygulanışının, yöntemlerinin ve hedeflerinin herhangi bir tarihsel varlığın da olduğu gibi şans eseri oldukları görünür.[41]

Tüm bilimin ayırt edici özelliği ya da özü olan tek bir akla uygunluk olmayabilir (ve olması da kesinlikle gerekmez). Bununla birlikte, yalnızca bizim bilim kadar, doğası gereği karmaşık bir etkinliğin, derli toplu, özlü bir betimlemesini veremiyor oluşumuz, bu evrilmekte olan uygulanış-yöntemler-hedefler ağının yararlı bilgiler oluşturmak için yeterli derecede tutarlı ve düzenli ilişkilere sahip olmadığı anlamına gelmez. Daha önceki konularda sunduğumuz fizik tarihinin bu yönlerine doğru atılan üstünkörü bir bakış bile, adma bilim denilen bu kusursuz olmayan aracın son derece büyük gücüne ve verimliliğine inandırıcı bir tanıklık sağlar.

Belki de kitabı bu notla bitirmek çok daha akılcı ve bilgece olurdu. Bunun yerine, bundan sonra gelen son kısımda, dünyanın modern bilimi temel alan başat bir görüşüne bir örnek vereceğiz. Bunu yapmanın problem oluşturan yanı, burada çözümsüz olarak bırakı-

lan çeşitli önemli sorunları bir araya getirerek ortaya çıkarmamızdır. Öte yandan, bu tür bir hareketin erdemi, modern bilimin bizi tartışmaya açık bir biçimde içinde bıraktığı ve bilimin onun için bir çözüm sağlamakta gücünün yetmez olabileceği kararsızlık üzerinde düşünüp taşınmayı okura bırakması olabilir.

25.7 Bilimi Temel Alan Modern Bir Dünya Görüşü

Çoğu kimsenin modern bilimle birlikte düşündüğü bir dünya resmini sunabilmek için, önce *dünya görüşü* terimiyle tam olarak ne anlatılmak istendiğini göz önüne alarak başlayalım. Sigmund Freud, *Psikoanaliz Üzerine Yeni Başlangıç Dersleri* adlı eserinde bir *Weltanschauung* (bir başka deyişle, (ç.n.: Almanca) bir dünya görüşü) sorusunu ve bunun bilimle olan ilişkisini ele alır.

> Korkarım ki 'Weltanschauung' Almanca'ya özgü bir kavramdır ve yabancı dillere çevrilmesi kolayca bazı zorluklara neden olabilir. Eğer size bu sözcüğün bir tanımını vermeye kalkarsam, bu tanımın size beceriksizce ve kaba geleceği kesindir. Bu durumda benim görüşüme göre bir *Weltanschauung*, var oluşumuzla ilgili tüm sorunları başka hiçbir şeyi umursamayan bir hipotezi temel alarak tek bir biçimde çözen entelektüel bir yapıdır, bu yüzden de yanıtlanmamış hiçbir soru bırakmaz ve ilgimizi çeken her şey onun içinde kendi değişmez yerini bulur. Bu tür bir *Weltanschauung*'a sahip olmanın insanoğlunun ideal dileklerinin arasında yer aldığı kolayca anlaşılacaktır. Buna inanarak, insan kendini yaşamda güvende hissedebilir, ne için çabalamak gerektiğini ve kendi duygularına ve ilgi duyduklarına (ç.n.: çıkarlarına) karşı en uygun biçimde nasıl davranacağını bilebilir.
>
> . . .
>
> Ancak bilimin *Weltanschauung*'u şimdiden dikkate değer bir biçimde tanımımızdan ayrılır. Onun da evrenin açıklamasının *tek bir biçimde olduğunu* varsaydığı doğrudur; ancak o bunu yalnızca tam olarak gerçekleştirilmesi geleceğe havale edilmiş bir çalışma taslağı (program) olarak böyle yapar. Bunun dışında olumsuz özellikleriyle, şu an içinde nelerin bilinebilir olduğu konusundaki sınırlılığıyla ve kendisine yabancı olan belirli öğeleri kesin bir biçimde reddetmesiyle göze çarpar. Evrenin bilgisi için dikkatli bir biçimde gözden geçirilmiş gözlemlerin üzerinde entelektüel bir çalışmadan – bir başka deyişle araştırma olarak adlandırdığımızdan – başka hiçbir kaynağın ve bunun yanında (ç.n.: Tanrı tarafından gizli şeylerin 'seçilmiş' insanlara gösterilmesi anlamında) birdenbire açığa vurulmalardan, sezgilerden ya da doğa üstü yollarla yapılan buluşlardan çıkarılan hiçbir bilginin olmadığını öne sürer. Bu görüşün

genel olarak onaylanma durumuna çok yaklaşmış hale gelmesi, geçen son birkaç yüzyıl süresince gerçekleşmiş gibi görünüyor.[42]

Freud'un, bilimin bize bu terimin klasik anlamı içinde her şeyi içine alan ve tam bir dünya görüşü vermediğine işaret ettiğine dikkat ediniz. Diyelim, Aristocu evrenin tamamıyla kaynaştırılmış dokusuna kadar geri gitmeyeceğiz. Bunun için ana neden, bütün bilimsel girişimler için temel olanın Jacques Monod'un nesnellik postülatı adını verdiği şeye olan inançtır. Bununla anlatmak istediği doğanın *nesnel* (herhangi bir kesin nedene ya da 'amaca' bağlı olmayan belirli yasalara uyan) olduğu, *izdüşümsel* (bizim tarafımızdan ya da başka bir akıl tarafından daha öncesinde tasarlandığı gibi bir plana uygun bir biçimde ya da belirli bir hedefe doğru evrilen) olmadığı ve bilgiye giden tek geçerli yolun doğanın nesnel bir karşılanışı olduğudur.[43] Bu postülata sıkı sıkıya bağlı kalmak (ki bunun kendisi de bir inanç davranışıdır) mantıksal olarak belirli sorular için belirli bir açıklamayı varsayan daha başka birçok inancın sorgulanmaksızın kabul edilmesinin önüne geçer. Monod, olguları kesin nedenler ya da (örneğin Aristo'nun yaptığı gibi) teleonomik bir ilke cinsinden yorumlamaya çalışarak doğa hakkında doğru bilgi kazanamayacağımızı öne sürer. Sorunun en önemli noktası, boydan boya her şeyi kaplayan dine dayalı ya da düşünsel bir kavramsal matrise a priori bir bağlılıkla - 10. Konu'da Galilei'nin yargılanmasında örnek olarak gösterildiği gibi - buna eşzamanlı bir biçimde açık entelektüel sorgulamaya olan bir bağlılık arasında bir gerilimin bulunmasıdır. Bu ikisinin birbirleriyle bağdaşabilir olduğu umut edilebilir; ancak bu umudun kendisi de bir akıl yürütme değil, bir inanç davranışıdır.[44]

Şimdi dikkatimizi Monod'un *Rastlantı ve Zorunluluk* adlı modern eserinde bulunan bilimsel bir dünya görüşünün kısa bir betimlemesine çeviriyoruz. Önce Monod'un kullandığı üç tane terimi tanımlayarak başlıyoruz.

nesnellik postülatı - 'doğru' bilginin olguların kesin nedenler - ya da bir 'amaç' - cinsinden yorumlanmasıyla elde edilebileceğinin sistemli bir biçimde yadsınması. Bir başka deyişle, nesnel bilgi şu an için geçerlidir ve metafizik ya da din yoluyla değil, yalnızca bilim yoluyla elde edilebilir.

vitalist kuramlar - canlı varlıklarla cansız dünya arasında köklü bir ayrımı gerektiren kuramlar.

animist kuramlar - baştan sona bütün evrende olduğu gibi, canlı şeylerin dünyası içerisinde de olan biten olayların izledikleri

yoldan sorumlu evrensel bir teleonomi ilkesini (bir başka deyişle, tüm varlıklara bir amaç ya da bir tasarı bağışlandığını ve bu nedenle de bir son için davrandıklarını) varsayan kuramlar.

Monod'un betimlemesinde vitalist kuramlar (ya da düşünsel sistemler), canlı varlıklara hükmeden farklı bir kuvvet ya da yasalar - cansız şeyler için olanlardan daha yukarıda ve üstün olan yasalar - kümesini varsayan (postüle eden) kuramlardır. Modern bilimdeki ilerlemelerin ışığında, bu tür sistemleri bir kenara atar ve dikkatini çok daha yaygın olan - canlıların dünyasına özgü hiçbir özel yasayı postüle etmezken, bütün etkinliklere ve gelişmelere bir hedefe ya da sona doğru yol gösteren, amaca yönelik bir kuvvet ya da bir ilkenin var olduğunu varsayan - animist sistemlere çevirir. Monod'un amaç cinsinden bir açıklama için ve geleneksel dine dayalı ve düşünsel sistemlerdeki ahlak değerleri için bir temel sağlıyor diye aldığı, bu hedefe yönelik olma durumu ya da teleonomik ilkedir. Bu konuda daha öncesinde gördüğümüz gibi, canlı organizmalardaki açık bir biçimde hedefe yönelik olma durumunu açıklayışı, rastlantı sonucu oluşan değişikliklerin biyolojik sistemlerin değişmeyen bir şekilde kopyalanmasının içinde kilitlenip kalması ve çevreye dayalı seçimden kurtulanların kopya edilmeye devam etmesi, bunun sonucu olarak ortaya amaca yönelik bir gelişme ya da zorunluluk (büyüme) anlamının çıkmasıdır. Tek rehber olarak nesnel bilgiye sahip olan bilim, bir değerler sistemi ya da yanıtını 'doğru' (Monod'a göre bilimsel) bilgiyi temel alarak kurmak yerine bu sistemi ya da yanıtı varsaydığından, bilimin bu animist geleneği yadsımak zorunda olduğunu da düşünür. Günümüzde bizim için temel bir çelişki aşağıdaki gibidir. Monod, animist kuramlar tarafından sağlanan her şeyi içine alan açıklamalar için (evrimin bir sonucu olarak) biyolojik ya da genetik bir gereksinime sahip olduğumuza inanır. Bilimin bilgisi, mutlak başlangıç ilkeleri tarafından garanti edilmek ya da bunları temel almak yerine, her zaman şu an için geçerli olduğundan, bilim bu açıklamaları veremez. (Freud'un yukarıda *Weltanschauung*'u ele alışını anımsayınız.) Bizim için ikilem, bilimin (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulanışını yeni ürünler ve teknolojiler üretmekteki başarısı nedeniyle (aklımızda) kabul edişimiz, ancak animist geleneğin reddedilişinin daha derin düşünsel anlamlarını (ç.n.: gerektirdiği sonuçları) (yüreğimizde) kabul etmeyişimizdir. Bununla birlikte, bir kez bu uygulanış kabul edildiğinde, bilimin temel varsayımı (nesnellik postülatı) aslında yalnızca tek bir doğruluk kaynağının var olduğu yönünde bir düşünce evrimi oluşturur. Monod, geleneksel dine dayalı ve düşünsel sistemleri bilimin bu özüne karşı mutlaka düşmanca

diye görür. Bu, günümüzde birçok kimse için bilime karşı bir sevgi-nefret ilişkisi yaratmıştır. Kendimizi kendi seçimlerimizi yapmaktaki ve var oluş için bir amaç yaratmaktaki son (temel) sorumluluğumuz içerisinde yalıtılmış hissederiz.[45] Monod'un kullandığı anlamda *angst* (ç.n.: eski Almanca kökenli, genellikle bunalımın eşlik ettiği endişe ya da korku duygusu) Bertrand Russell tarafından IV. Bölüm (*Bir bakış açısı*) için yapılan alıntılarda ifade edilene oldukça benzerdir.

Burada bir gerginlik var: Psikolojik ya da tinsel gereksinimlerimizle çelişki içinde olan bir şeyi maddi - hatta belki de entelektüel - bir yarar (bilimin ve teknolojinin meyveleri) olarak görüyoruz. Bir toplum, sonuç olarak birini bir diğerine tercih edemeyerek kendisini bu ikisi arasında kıstırılmış hissedebilir. Buna örnek olarak, oldukça yakın tarihte bilimden ve teknolojiden uzaklaşma çabasında bulunulan iki olaydan söz edeceğiz. Mahatma Gandhi (1869-1948) Hintlilerin Britanyalı dokuma tezgahlarında üretilenleri kullanmak yerine, kendi kumaşlarını kendilerinin elde dokumalarında ısrar etti, çünkü bir kültürün uygulamada kendisine rakip ve köklü bir biçimde farklı bir kültürden (Batıdan) yalnızca tek bir baskın özelliği ya da ürünü (burada, teknolojiyi) alıp hâlâ (materyalizm gibi) başka, istenmeyen yanları tarafından istila edilmekten kaçınamayacağının farkına vardı. Bilim ve teknoloji, onları kabul eden her kültür üzerinde kendi kaçınılmaz, daha geniş etkilerine sahiptirler. Benzer bir biçimde, I. Dünya Savaşı'nda uğranılan ezici yenilginin sonrasında Almanya'da Weimar Cumhuriyeti sırasında, (yetersizliği birçokları tarafından Almanya'nın yenilgiye uğramasının nedeni olarak görülen) bilime karşı bir tepki ve akıl dışılık akımında (irrasyonalizmde) bir yükseliş vardı. Matematik ve bilim öğretimi azaltılmıştı ve bunlar geleneksel 'kültürel' eğitime yapılan vurguya (günümüzde ABD'de olduğu gibi?) dönüş ile yer değiştirmişti. Bu, büyük oranda bilimi temel aldığı düşünülen bir topluma karşı güçlü bir şekilde hissedilen düş kırıklığı duygusundan sonuçlanmaktaydı.

Ve her şeye rağmen, Weimar Almanya'sında, Gandhi'nin Hindistan'ında ve günümüzde Batı dünyasında, bilim ve teknoloji 'ilerleme' için kendi açık bir biçimde karşı konulamaz momentumunu oluşturuyor. Bu tür bir 'ilerlemenin' insanoğlu için mutlaka iyi etkilere sahip olduğu hiçbir şekilde açık değildir. (Örneğin, modern yaşamın zaten telaşlı olan akışının bilgisayarların çok yaygın bir biçimde kullanılmasının neden olduğu ivmelenmesiyle daha mı huzurlu olduk?) Yine de, bir birey, bir şirket ya da bir ulus, olur da durgun suya doğru sürüklenirsem diye bu akıma kapılmamayı (koşturmacaya katılmamayı) kesinlikle göze alamaz. Bu, teknolojik belirlenimciliğin herhangi bir türünü destekleyen bir ifade

olması amacıyla söylenmemiştir, tersine - günümüzde Batıda teknolojiyi temel alan toplumlar göz önüne alındığında orada ve dünyanın geri kalan kısmının çoğunda daha da fazla - hissedilen 'psikolojik' ve 'sosyal' baskının bir yansımasını anlatmak istemektedir. İlke olarak başka seçimlerde bulunamamamız için kesinlikle hiçbir neden yoktur. Bununla birlikte, giderek daha da fazla miktarda maddi yararın ve eşyanın elde edilebilir duruma gelmesinin çekiciliğine toplu olarak karşı koyup koyamayacağımız daha görülecektir. Zorluklardan biri, teknolojik ilerlemelerin - net kazanç ya da kayıp için - uzun dönemdeki etkilerinin çoğunlukla, bunların üzerimizdeki sonuçları artık neredeyse geriye döndürülemez hale gelmeden önce öngörülemez olmalarıdır.

Fiziksel bilimi temel alan bu dünya görüşünü felsefeyle bilim arasındaki şu ana dek görülen uzun etkileşim zincirinin - ki bu zincir eski çağlara dek uzamaktadır - bir başka örneği olarak sunuyoruz. Monod'un taslağının zincirin sonunu temsil ettiğini beklemek için çok az neden vardır.[46]

Yararlı Kaynaklar

Edwin Burtt'ın iyi bilinen *Modern Fiziksel Bilimin Doğa Ötesi Temelleri* adlı kitabı, modern fiziğin üstünde kurulu olduğu geniş düşünsel destekler üzerine, bir bilgi temeli oluşturmak açısından - biraz eskice olsa da - güzel bir eserdir. Joseph Kockelmans'ın *Bilim Felsefesi* adlı kitabındaki açıklamalar ve seçilmiş okuma parçaları, on altıncı yüzyılın sonlarından (Kant ile) yirminci yüzyılın başlarına (Whitehead ve Bridgman ile) dek olan tarihsel zemini sağlar. Albert Einstein'ın 'Araştırmanın İlkeleri' ve 'Fizik ve Gerçeklik' adlı denemeleri, bilimin doğası ve hedefleri hakkında - bazı zamanlar neredeyse şiirsel bir dille - çok güzel bir biçimde yazılmış, düşünsel açıdan duyarlı ifadelerdir.[47] Arthur Fine'ın *Çürük Oyun* adlı kitabının 6. Konu'su olan 'Einstein'ın Gerçekçiliği' adlı yazısı, Einstein'ın fiziksel kuramlarımızın temsil ettikleri dünyayla olan ilişkisi üzerine olan görüşlerinin dikkatli ve kavrayışa yönelik bir tartışmasını verir. Janet Kourany'nin *Bilimsel Bilgi* adlı eseri, günümüz bilim felsefesindeki temel sorunlar üzerine yazılmış bazı denemelerin çok yararlı bir derlemesidir. Thomas Kuhn'un *Bilimsel Devrimlerin Yapısı* adlı kitabı, on yıllar boyunca bilim felsefesindeki en etkili tek kitap olarak kalmıştır ve bu alanda modern bilimsel çalışmaların çoğunun yüzünü çevirdiği sosyolojik yönelimin biraz anlaşılması için okun-

ması gerekli bir kaynaktır. Dolaysız bir şekilde Karl Popper'ın yanlışlama yöntembiliminden gelen ve bilimin akla uygunluğunu bu geleneğe bağlı kalarak vurgulamayı deneyen bir yöntembilim, Imre Lakatos'un bilimsel araştırma programlarının yöntembilimidir (ç.n.: İngilizce başlığından dolayı kısaca 'MSRP' diye anılır); bu yöntembilim Imre Lakatos'un 'Yanlışlama ve Bilimsel Araştırma Programlarının Yöntembilimi', 'Bilim Tarihi ve Bilim Tarihinin Akla Yatkın Bir Biçimde Yeniden Kuruluşları' adlı denemelerinde ve *Bilimsel Araştırma Programlarının Yöntembilimi* adlı kitabındaki, Imre Lakatos ve Alan Musgrave'in *Eleştiriler ve Bilginin Büyümesi* adlı eserindeki, Colin Howson'un *Fiziksel Bilimlerde Yöntem ve Değerlendirme* adlı kitabındaki ve Gerard Radnitzky ile Gunnar Andersson'un *Bilimde İlerleme ve Akla Uygunluk* adlı eserindeki yararlı denemelerde ve durum incelemelerinde ustalıkla öne çıkarılmıştır. Larry Laudan'ın *Bilim ve Değerler* adlı kitabı bilim felsefesindeki hem Kuhncu hem de Popper-Lakatos ekollerini eleştirir ve kendisine ait (Kısım 25.6'da ana hatlarını çizdiğimiz) bilimsel uygulamanın 'daha küçük hücreler ağına bölünmüş' modelini sunar. Erwin Schrödinger'in *Yaşam Nedir?* adlı eseri, yaşamı yalnızca fizik yasalarını temel alarak açıklamak için eski ve etkili bir girişimdir. Jacques Monod'un (ç.n.: biraz küçük düşürücü anlamda) Fransızlara özgü bir canlılıkla yazılmış *Rastlantı ve Zorunluluk* adlı kitabı, yaşamın tamamıyla fiziksel bir açıklamasını akla uygun - ve aynı zamanda da derin bir coşkuyla dolu - bir biçimde savunur. Hiçbir temel tasarımı olmayan bir evreni öne süren Darwinciliğin modern bir savunması için Richard Dawkins'in *Kör Saatçi* adlı eserine bakınız. Christian De Duve'un *Yaşamsal Toz* adlı kitabı, yaşamın doğanın temel fiziksel yasalarının gerekli ve kaçınılmaz bir sonucu olduğunu güçlü bir biçimde öne sürer, ancak yine de tuhaf bir biçimde Monod'un evren üzerine soğuk ve tanrıtanımaz görüşünden uzak durur. Son olarak, Gerald Holton'un *Einstein, Tarih ve Diğer Tutkular* adlı eseri bilim ve bilimin yirminci yüzyılın sonlarındaki dünyayla olan ilişkisi üzerine bazı makalelerin bir derlemesidir.

Notlar

Genel Refesanslar

Dizin

Notlar

BBS, BK ve M alıntı kısaltmaları kitabın *Genel Referanslar* kısmında açıklanmıştır.

V. BÖLÜM

Russell 1917, 33-4.

13. KONU

1 Bu, günümüzde güneş gözlüklerinin birçoklarında kullanılanlarda olduğu gibi belirli filtrelerle oluşturulan bir çeşit 'perdeleme' etkisidir. Kutuplanma kavramı, az sonra enine dalgaların doğasını ele aldığımız zaman daha açık hale gelecektir.

2 McMullin 1978a, 4.5 ve 4.6 kısımları.

3 Boyuna bir dalga, iletim ortamının dalganın kendisinin yayıldığı yönde küçük (genellikle salınım hareketi şeklinde) konum değişikliklerine uğradığı bir dalgadır.

4 Enine bir dalga, iletim ortamının dalganın kendisinin yayıldığı yöne dik bir düzlemde küçük (genellikle salınım hareketi şeklinde) konum değişikliklerine uğradığı bir dalgadır.

5 Faraday 1952, 'Manyetik Kuvvetin Fiziksel Çizgileri Üzerine,' 816. (BK *45*, 816) (M, 506)

6 Faraday 1952, 'Manyetik Kuvvetin Fiziksel Çizgileri Üzerine,' 818. (BK *45*, 818) (M, 510)

7 Faraday 1952, par. 1729, 530. (BK *45*, 530)

8 Faraday 1952, par. 3075, 759. (BK *45*, 759)

9 Faraday 1952, par. 1164 ve 1165, 441. (BK *45*, 441)

10 Faraday 1952, par. 3302, 831. (BK *45*, 831)

11 Whittaker'da (1973, I. Cilt, 241-2) alıntı olarak verilmektedir.

12 Maxwell 1954, viii-ix.

13 Cardwell 1972, 176-82. Bizim Şekil 13.7'miz Cardwell'de (1972, 177) Şekil 33'ten uyarlanmıştır.

14 Whittaker'da (1973, I. Cilt, 250) alıntı olarak verilmektedir.

15 Maxwell 1890, II. Cilt, 775.

16 Maxwell 1890, I. Cilt, 489-90.

17 Maxwell 1890, II. Cilt, 331, 312, 313, 320-1.

14. KONU

1 Maxwell 1954, II. Cilt, Madde 786, 435-6. Burada ε_0 ve μ_0 az önce geçen tartışmadaki sırasıyla k_1 ve k_2 sabitleriyle ilişkilidirler. Buradaki çeşitli sabitler arasındaki kesin ilişkiler Jackson'da (1975, 813-17) bulunabilir. Kısım 14.A'ya da bakınız. Tarihsel olarak, elektrik ve manyetizmada kullanılan birkaç farklı birim kümesi vardı ve bu da gösterimlerdeki değişimleri açıklar.

2 Burada yaptığımız su yüzüne çıkarım Bork'a (1963) ve Bromberg'e (1967) dayanmaktadır. Buchwald (1985, 20, 23, 29), Maxwell'in kendi anlayışında elektrik yükü ve akımın elektrik alanı tarafından üretildiğini öne sürer, oysa günümüzde bunlara bakışımızda elektrik alanı elektrik yükü ve akımı tarafından üretilir.

3 Maxwell 1954, I. Cilt, Madde 111, 166.

4 İçerisinden geçen bir cismin hareketi yüzünden onunla birlikte kısmen ya

da bütünüyle sürüklenen bir eterde olduğu gibi diğer olasılıkların uzun ve ilgi çekici bir tarihi vardır. Öte yandan, bunların tümü deneylerle çelişki oluşturan öngörülere yol açtı. Michelson–Morley deneyinin zamanında, hiç hareketsiz bir eter geriye kalan tek olasılık olarak görünüyordu.

5 Zahar 1976, özellikle 221–30.

6 Lorentz (tarihi belirsiz), 5–6.

7 Whittaker'da (1973, II. Cilt, 30) alıntı olarak verilmektedir.

8 Lorentz 1952, 229–30.

9 {} ile gösterilen parantezler içerisinde elektrik ve manyetizma yasalarını ayrı ayrı $1/4\pi\varepsilon_0 = 9\times10^9$ 'elektrostatik' sabitini ve $\mu_0/4\pi = 10^{-7}$ 'manyetostatik' sabitini açık bir şekilde gösterecek bir biçimde de listeliyoruz, burada $1/\mu_0\varepsilon_0 = 9\times10^{16}\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2 = (3\times10^8\,\mathrm{m/s})^2$'dir. (Burada, MKSA birimlerini kullanıyoruz; bakınız Jackson (1975, 817).) ε_0 ve μ_0 gösterimleri tam olarak Maxwell'de (1954) bulunan gösterimler değildir, ama bunun dışında burada yapılan özdeşleşmeler doğrudur.

10 Lorentz on dokuzuncu yüzyılda Maxwell'den daha sonra yaşadığından, Lorentz'in kuvvet yasasını Maxwell denklemleriyle birlikte listelemek aslında tarihsel olmaz. Bununla birlikte, bu denklemin içerdikleri Maxwell tarafından biliniyordu.

11 (14.13c) denklemi, $\nabla\times(\nabla\times A) = \nabla(\nabla\cdot A) - \nabla^2 A$ vektör özdeşliği ve (14.13b) denklemi, (14.14) denklemine yol açar.

12 Bu, $r = x - ct$ ve $s = x + ct$ diye tanımlanarak ve sonrasında da (14.16) denklemini $\partial^2 f/\partial r\partial s = 0$'a dönüştürerek kolayca görülebilir. Doğrudan doğruya yapılan bir (kısmi) integre etme $f(r,s) = g(r) + h(s)$ olduğunu gösterir. Benzer bir tartışma, (14.15) denklemindeki özgün üç boyutlu problem için de geçerlidir.

13 Önemli olan nokta, herhangi bir A vektör alanı için dönülünün (İngilizcesi 'curl') ıraksamasının (İngilizcesi 'divergence') her zaman sıfıra özdeş olmasıdır:

$$\nabla\cdot(\nabla\times A) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\nabla\times A)_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_{ijk}\frac{\partial A_k}{\partial x_j}\right)$$
$$= \varepsilon_{ijk}\frac{\partial^2 A_k}{\partial x_i\partial x_j} = \varepsilon_{ijk}\frac{\partial^2 A_k}{\partial x_j\partial x_i} = -\varepsilon_{ijk}\frac{\partial^2 A_k}{\partial x_i\partial x_j} = 0.$$

15. KONU

1 Şekil 15.1, Boorse ve Motz'un (1966, 511) Şekil 34-2'sinden uyarlanmıştır.

2 Miller 1981, 48.

3 Miller 1981, 107.

4 (14.10) denkleminden ötürü $\boldsymbol{B} = (q/(4\pi c))\times(\mathbf{v}\times\mathbf{r}/r^3)$ olur, böylece (Şekil 15.2'deki geometri cinsinden) $B = ev\sin\theta/(4\pi cr^2)$, $r > a$ bulunur. Özgün makalelerle karşılaştırma yapmayı kolaylaştırmak bakımından bu konuda tüm elektrodinamik ifadeleri Heaviside–Lorentz birimlerinde yazıyoruz. Bu birimlerin MKSA sistemiyle karşılaştırması için Jackson'a (1975, 818) bakınız.

5 Bu şekil ve bu konuda bundan sonra gelen şekiller Cushing'den (1981) uyarlanmıştır.

6 Bu konuda ele alınan hesaplamaların ve diğer konuların ayrıntılarının yanında tam bir referans seti de Cushing'de (1981) bulunabilir.

7 Goldberg 1970–1, 7–25, özellikle 15; Miller 1981, 1. Konu.

8 Bir kez daha bu deneylerin özel ayrıntıları için Miller'a (1981, 226–35, 335–52) ve Cushing'e (1981) başvurulmalıdır.

9 Lorentz kuvveti ((14.13f) denklemi) ρ yarıçapındaki bir çember üzerindeki hareket için gerekli merkezcil kuvveti $mv^2/\rho = e(v/c)B$ diye sağlar, böylece $\rho = (mcv)/(eB)$ olur.

10 Bu bir önceki nottaki son denklemin ve $\bar{z}\propto 1/\rho$ gerçeğinin (bakınız Cushing (1981, (3.11) ve (3.27) denklemleri)) ardından gelir. $\bar{z}$ ile ρ arasında ters orantı elde edilir çünkü ρ deney düzeneğinin boyutlarıyla kıyaslandığında büyüktür (ve bu da sırasıyla v hızının büyük değerinin bir sonucudur). Bu durumda Şekil 15.5'teki (0, 0, 0) orijini cinsinden

elektron için dairesel yörüngenin denklemi $(x-(x_1/2))^2+(z-\rho)^2=\rho^2$ olur. Bu, $(x_2,\ \bar{z}\ )$ noktası için (aynı derecede bir yaklaşıklık için) $(x_2-(x_1/2))^2=2\bar{z}\rho$ 'ya iner. Burada ve sonrasında elektronun m kütlesinin yalnızca v hızına bağlı olduğunu fark ediniz, böylece v sabit kaldığı sürece yörünge boyunca - m'nin v'ye olan özel bağlılığı her ne olursa olsun - $m(v)$ sabit olarak kalır.

11 Elektrik alanının E büyüklüğü cinsinden burada hareket denklemi olarak elimizde $d^2y/dt^2=(e/m)E$ vardır.

12 $dy/dt=\dot{x}\,dy/dx=v\,dy/dx$ ilişkisinin kullanılması bir önceki notta verilen dinamik denklemin integre edilebilmesini ve (bakınız Şekil 15.6) kondansatör plakaları arasındaki bölgede $y=(eE)/(2mv^2)x(x-x_1)$ ve son olarak fotoğraf levhaları arasındaki konumda da $\bar{y}=(eE)/(2mv^2)x_1(x_2-x_1)$ elde edilebilmesini sağlar. Bu sonucu çıkartırken y'nin x'e göre fonksiyonunun $x_1\le x\le x_2$ için düz bir doğruyu betimlediğini akılda tutmak önemlidir.

13 Burada $\beta=v/c$ olduğunun farkında olunuz. (Buradaki β 'yı ' β ışını' ifadesindekiyle karıştırmayınız.)

14 Bir kez daha ayrıntılar için Cushing'e (1981) bakınız.

15 Bu tablo ve bu konudaki diğer tablolar Kaufmann'ın yayınlanmış tablolarının kısaltılmış biçimleridir. Daha ayrıntılı tablolar için Cushing'e (1981) bakınız. Burada Bucherer'i atlıyoruz.

16 Kaufmann 1902, 56. (Kendi çevirim.)

17 Kaufmann'ın Tablo 15.2'de ilk kutucuktaki sayıyı (1/2) çarpanıyla ve son iki kutucuktaki sayıların her birini de (1/4) çarpanıyla çarptığını not etmek önemlidir.

18 Kaufmann 1905, 956. (Kendi çevirim.)

19 Planck'ın yeniden değerlendirişinin mantıksal ve düşünsel açıdan gerektirdiği sonuçlar Zahar (1978) tarafından dikkatli ve şık bir biçimde ele alınmıştır.

20 Planck 1906a. Newton'un ikinci yasasının uygun bir şekilde değiştirilmiş biçimi burada $\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)=q\left(\boldsymbol{E}+\frac{\mathbf{v}}{c}\times\boldsymbol{B}\right)$ diye verilir.

21 Planck 1906a, 136. (Kendi çevirim.)

22 Planck 1906b.

23 Bu ayrıntılar için Cushing'e (1981) bakınız.

24 Cushing'e (1981, (4.36) denklemine ve bu denkleme ulaşılmasına yol açan tartışmaya) bakınız.

25 Yukarıda 10. Not'ta ve ona eşlik eden metinde gördüğümüz gibi $\bar{z}$ tek başına ρ eğrilik yarıçapını belirlediğinden ve bu da sonrasında (yukarıda 9. Not'ta gösterildiği gibi) $p=m(v)v$ 'ye yol açtığından, bunu anlamak zor değildir.

26 Bu, elektromanyetik birimler cinsinden $e/m_0=1{,}878\times10^7\ emu/g$ idi.

27 Bunun açıkça görülebilir olduğunu demek istemiyoruz, ancak (15.4) denkleminden böyle olduğu akla yatkındır. Planck'ın çözümlemesinin ayrıntıları için Cushing'e (1981, 1143-5, özellikle (4.34) ve (4.35) denklemlerine) bakınız.

28 (15.3) ve (15.4) denklemleri bile, $\bar{z}/\bar{y}\propto\beta$ olmasını gerektirdiklerinden bunun böyle olduğunu oldukça açık hale getirirler.

29 Planck 1907. Burada α , $\mathrm{V/cm}$ cinsindendir.

30 $e/m_0=1{,}72\times10^7\ emu/g$ idi.

31 Einstein 1907, 439. (Kendi çevirim.)

32 Bestelmeyer 1907.

33 Bucherer 1909.

34 Neumann 1914.

35 Şekil 15.8 Neumann'ın (1914) Şekil 18'ine dayanmaktadır.

36 Guye ve Lavanchy 1915.

37 Çok daha yakın zamanlarda benzer şeyler olmuştur. Örneğin Feynman'ın β 'nın bozulması için kuramı dramatik bir durumdur; kuram ilk kez öne sürüldüğünde en azından üç tane deneyle uyum içinde değildi, ancak bunların tümünün daha sonrasında doğru olmadıkları kanıtlanmıştı. Feynmann ve Gell-Mann'a (1958) bakınız.

38 Verilerin anlamının ya da öneminin (verilerin çözümlenmesinde kullanılan) kuramsal bir zemine olan

bu bağlılığından bazen gözlemlerin 'kuramla doluluğu' diye söz edilir.

39 Hem boylamasına hem de enlemesine kütlelerin kullanılması nedeniyle ortaya çıkan karışıklığın bütün tartışmasını burada atlıyoruz. Ayrıntılar için Cushing'e (1981) bakınız.

40 Burada yalnızca Abraham'ın ve Lorentz'in modellerini ele alıyoruz, ancak Bucherer'inkini işe karıştırmıyoruz, çünkü bu sonuncusu daha çok uzun zaman öncesinden ciddi çekişmeden elenmişti.

VI. BÖLÜM

Kelvin 1901, 1-2.
Einstein 1949a, 31, 33.

16. KONU

1 Clark'ta (1972, 32) alıntı olarak verilmektedir.
2 Frank 1947, 49-50.
3 Einstein 1949a, 9, 11.
4 Einstein 1982.
5 Frank 1947, 75.
6 Frank 1947, 232.
7 Einstein 1949a, 21.
8 Einstein 1949a, 53.
9 Bir başka deyişle, eğer yalnızca x'in fonksiyonu olan, ama aynı zamanda t'nin fonksiyonu olmayan rasgele seçilmiş bir $f(x)$ alınır ve (14.16) denkleminde yerine konulursa, ($f(x)$, x'e de bağlı olmadığı sürece) bir çelişki oluşur.
10 Einstein 1905a, 891-2. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz a, 37-38) alınmıştır.
11 Einstein 1905a, 893-4. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz a, 39-40) alınmıştır.
12 Selleri (1994) bu soruyu yakın zamanda yeniden öne çıkarmıştır.
13 Selleri'ye (1994) bakınız. Özellikle, olası bir set aşağıda (16.5) denkleminde verilen Lorentz dönüşümleriyle neredeyse özdeştir, ancak son denklem $t' = \gamma^{-1}t$ ile değiştirilmiştir; böylece şimdi bütün eylemsizlik çerçeveleri arasında mutlak bir eşzamanlılık söz konusudur.
14 Örneğin Tangherlini'ye (1961) ya da Mansouri ve Sexl'a (1977a, 1977b, 1977c) bakınız.
15 Einstein 1905a, 895. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz a, 41) alınmıştır.
16 Zahar 1989, 28.
17 Einstein 1905a, 921. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz a, 65) alınmıştır.
18 Einstein 1954d, 228.
19 $(c\Delta t'/2)^2 = \ell^2 + (v\Delta t'/2)^2$ eşitliğinden (bakınız Şekil 16.4) $\Delta t' = (2\ell/c)/\sqrt{1-(v/c)^2} = \Delta t/\sqrt{1-(v/c)^2}$ elde ederiz.
20 Bu arada, hızla hareket eden bir cismin görsel görünüşünün kısalmış olduğu değil döndürülmüş olduğu ortaya çıkar (Weisskopf 1960).
21 Frisch ve Smith 1963,
22 Fock 1959, 12-14.
23 Bir başka deyişle, $u'_x = dx'/dt' = (dx'/dt)/(dt/dt')$ ve $u'_y = dy'/dt' = (dy'/dt)/(dt/dt')$. (16.5) denklemlerinin türevlerinin doğrudan doğruya alınması sonrasında (16.6) denklemlerine yol açar.
24 Burada $B(r)$ çubuk mıknatıs tarafından (mıknatısın kendi durgun çerçevesinde) üretilen statik manyetik alandır.

17. KONU

1 $\lambda\nu = c$ olduğundan, $1/t = (1-(v/c))\nu$ olduğu ortaya çıkar.
2 (16.1) denkleminden $t'/t = \sqrt{1-(v/c)^2}$ olur. Bununla ve bir önceki Not'un sonucu ile (17.1) denklemi hemen elde edilir.
3 Daha önceki akıl yürütmedeki tek değişiklik, birbirini izleyen iki dalga cephesinin hareket eden B gözlemcisini geçmesi için gereken (A tarafından belirlenen) t süresinin şimdi $t = (\lambda + v(\cos\theta)t)/c$ olmasıdır.
4 Doğal olarak, (17.4) denklemi klasik olarak A kaynağının ortama (etere) göre hareketsiz olarak kaldığı durum için çıkartılır. Eğer hem A kaynağı

hem de B alıcısı (her biri etere göre ölçülürken) hareket ederse, o zaman Doppler kayması için – v, A'nın B'ye göre hızı olmak üzere (v/c)'nin birinci kuvvetine kadar – olan klasik ifade birinci kuvvete kadar görelilikle uyuşan ifade ile uyum içinde olur. Öte yandan bu, bir kez $(v/c)^2$ gibi daha yüksek kuvvetler tutulduğunda artık doğru olmaz.

5. Kısım 16.4'te zamanın genişlemesi etkisine bir düşünce-deneyi tezi aracılığıyla ulaştık, ancak (16.1) denklemini doğrudan doğruya (16.5) denklemlerinin sonuncusundan da elde edebilirdik.

6 Burada bu sonucu hiçbir şekilde çıkarmaya çalışmadan yalnızca belirtiyoruz. (Ayrıntılar için Einstein'a (tarihi belirsiz a, 51–4) ya da Jackson'a (1975, (11.149) ve (7.11) denklemlerine) bakınız.) Yine de, bir kez daha önemli olan nokta (17.5) denklemlerinin sonuçlarının Maxwell denklemlerinin biçimlerinin değişmeden kalmasının – bir başka deyişle, göreliliğin iki aksiyomundan birinin – istenmesini izlemeleridir.

7 Jackson'a (1975, 236) bakınız.

8 Kolaylık olması bakımından burada göz önüne aldığımız düzlem dalga düzenlemesi için $|E| = |B|$ olan (Gauss birimleri gibi) birimleri kullanıyoruz.

9 Einstein 1905a, 914. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz a, 58) alınmıştır.

10 Newton'un ikinci yasasının daha çok bilinen $F=ma$ hali yalnızca m kütlesi $\mathbf{v}$ hızı ile değişmediği zaman geçerlidir.
p momentumu $\boldsymbol{p} = m\mathbf{v}$ ve a ivmesi de $\boldsymbol{a} = \mathrm{d}\mathbf{v}/\mathrm{d}t$ diye tanımlandığından, bu durumda $F=ma$ ve $F=dp/dt$ denklemleri özdeştir. Bununla birlikte, göreliliğin geçerli olduğu durumda olduğu gibi $m=m(v)$ olduğunda, o zaman doğru olan $F=dp/dt$ biçimidir. (17.9) denkleminde $\mathbf{v}\times\boldsymbol{B}$ iki vektörün vektör çarpımıdır, burada $(\mathbf{v}\times\boldsymbol{B})_x = v_yB_z - B_yv_z$'dir ve bu vektörün y ve z bileşenleri, sırasıyla (x, y, z)'nin periyodik permütasyonları alınarak bulunur.

11 Einstein 1905b, 640–1. Verilen referans Einstein'adır (tarihi belirsiz , b, 70–1).

12 Einstein 1905b, 641. Buradaki alıntı Einstein'dan (tarihi belirsiz b, 71) alınmıştır.

13 Chang 1933. Bu problemin özellikle anlaşılır bir açıklaması için Debs ve Redhead'e (1996) bakınız.

14 Özel göreliliğin ortak bir eylemsizlik çerçevesinde saatlerin eşzamanlı hale getirilmesine izin verdiğini anımsayınız. (Einstein'ın bu konu üzerindeki kabullerine göre) yapılmasına izin vermediği, farklı eylemsizlik çerçeveleri arasında mutlak bir eşzamanlılığın kurulmasıdır.

15 İkizler paradoksu üzerine çok farklı (küçük bir azınlıkça benimsenen) bir görüş için Sachs'a (1971) ve aldığı konuma karşı daha sonrasında verilen güçlü (olumsuz) yanıtın (ç.n.: sayıca) üstünlüğüne bakınız.

16 Miller 1981, 261–2.

17 Fock 1959, 212–14. Aslında Fock'un ifadesini (onun (62.16) denklemini) (17.16) denklemini – (17.15) denklemimizle kolayca karşılaştırılabilmesi açısından – elde edebilmek için yeniden yazdık. Fock'un akıl yürütmesi $(v/c)^2$ kuvvetini içerecek kadar verilmiştir ve bu nedenle yalnızca (17.17) denklemi kesin olarak geçerlidir.

18 Hafele (1972); Hafele ve Keating (1972).

19 Kısım 16.3'te de işaret ettiğimiz gibi, eylemsizlik çerçeveleri arasında mutlak bir eşzamanlılığa sahip olacak şekilde düzenleme yapmak tamamıyla tutarlıdır.

20 Bu konu üzerinde farklı görüşler için, örneğin Maxwell'e (1985) ve Stein'a (1991) bakınız.

18. KONU

1 Doğal olarak, kesin olarak konuşacak olursak, bu denklemin sağ tarafındaki M'nin sağ alt köşesinde de bir 'g' harfi bulunmalıdır, ancak burada konuyla ilgili noktayı vurgulamak için tartışmayı m üzerinde odaklıyoruz.

2 Einstein 1907. Pais (1982, 9. Konu), Einstein'ın özdeşlik ilkesini buluşunu anlatır ve bu 1907 makalesinin içerdiklerini ele alır.

3 Einstein ve Infeld 1938, 214-22.

4 Einstein'ın bu (Einstein 1911) makalesi ve bu konuda sözünü ettiğimiz Einstein'ın genel görelilik üzerine olan diğer önemli makalelerinden bazıları, Lorentz *et al.*'de (tarihi belirsiz) bulunabilir.

5 Clark'ta (1972, 222) alıntı olarak verilmektedir.

6 Clark'ta (1972, 252) alıntı olarak verilmektedir.

7 Hon 1996.

8 Harrison 1981, 183. Bu de Sitter (1917) çözümü sıfır olmayan bir evrenbilimsel (kozmolojik) sabit (aşağıda Kısım 18.4'e bakınız) içindir.

9 Doğal olarak, bu benzerliğin kusurlarından birisi daha büyük olan topun (şekli bozulmamış olan çarşafın düzlemine dik yönde, aşağıya doğru etki eden) ağırlığını, çarşaf üzerindeki hareketin etkisini geometrik terimlerle 'açıklamak' amacıyla kullanmasıdır. Yine de, bu benzerlik görsel olarak yardımcı olabilir.

10 Clark'ta (1972, 493-4) alıntı olarak verilmektedir; Whitrow'a (1973, xii) da bakınız.

11 Einstein 1911, 908. Bu referans Einstein (tarihi belirsiz c, 108)'e karşılık gelmektedir.

12 Einstein 1916, 822. Bu referans Einstein (tarihi belirsiz d, 163)'e karşılık gelmektedir. Bu sonucun modern bir çıkarımı için Fock'a (1959, 200-2) bakınız.

13 Bu ölçümlerin ve sonuçların duyurulduğu toplantının dramatik bir öyküsü Eddington'da (1920, 114-16) ve Whitehead'de (1967, 10-11) bulunabilir.

14 Holton'da (1968, 653) ve Bernstein'da (1976, 144) alıntı olarak verilmektedir.

15 Bir başka deyişle,

$$h\Delta\nu = -\Delta\varepsilon = \Delta V = (GM/r)/(\varepsilon/c^2).$$

Bu, frekanstaki önemsiz değişiklik küçük olduğundan yalnızca yaklaşık değerdir.

16 Pound ve Rebka 1960.

17 Clemence 1947.

18 Newton 1952, III. Kitap, 28. ve 31. Sorular, 529 ve 542. (BK **34**, 529, 542)

19 Harrison 1986.

20 Koyré 1957, 187-8.

21 Newton 1952, III. Kitap, I. Bölüm, 28. Soru, 529. (BK **34**, 529)

22 Newton 1934, III. Kitap, Genel *Scholium*, 544. (BK **34**, 370)

23 Thayer 1953, 50-1.

24 Newton 1934, III. Kitap, XIV. Önerme, II. Sonuç, 422. (BK **34**, 287)

25 Thayer 1953, 57.

26 Enerjinin korunumundan $\left[\frac{1}{2}mr^2 - (GMm/r) = -(GMm/r_0)\right]$, $r = \mathrm{d}r/\mathrm{d}t$ 'yi çözebiliriz ve (18.3) denklemine ulaşmak için çıkan sonucu r_0'dan 0'a dek integre ederiz.

27 Einstein 1917b.

28 Shipman 1976, 268-78; Gott *et al.* 1977, 86; Bose 1980, 91-2; Harrison 1981, 298.

29 Shipman 1976, 268-78; Gott *et al.* 1977, 90; Bose 1980, 92.

30 Model evrenimizdeki bütün maddenin, m kütlesinin (diyelim, bir yıldız) ötesindekiler de dahil genişlediğinin farkında olunuz.

31 Bu r yarıçapındaki kürenin içerisindeki kütle tam olarak ρ yoğunluğu kere bu kürenin hacmi olduğundan ve kaçış hızı da $\sqrt{2GM/r}$ diye verildiğinden, (18.4) denklemini hemen elde ederiz. Kaçış hızı, parçacığın toplam enerjisinin (kinetik enerjisi ile kütleçekimsel potansiyel enerjisinin toplamı) sıfır olması koşulu ile tanımlanır, böylece (kütleçekimsel potansiyel enerjinin de sıfır olduğu) sonsuzda anca hareketsiz hale gelir.

32 Gott *et al.* 1977, 83; Harrison 1981, 89-92.

33 Harrison 1981, 10. Konu.

34 Küçük (v/c) değerleri için (17.1) denkleminden $(\lambda_0/\lambda) \approx 1 - (v/c)$ buluruz. (18.6) denkleminde λ_0 ışığın uzakta bir gökadadan (uzun zaman önce) yayıldığı zamanki ve λ da burada Dünya'da alındığı zamanki dalga boyudur. (Bu kabul genellikle evrenbilim kitaplarında kullanılandan farklıdır.)

35 Bunun niçin akla uygun olduğunu görmek için yine klasik bir benzerini kullanabiliriz. Belirli bir O

gözlemcisine göre gökyüzündeki bütün cisimlerin O'dan bir **v** hızıyla - O'dan cisme olan **r** (vektörel) uzaklığına orantılı ($\mathbf{v} = a\mathbf{r}$) bir hızla - uzaklaştığını varsayın. Şimdi bu şekilde uzaklaşan *A* ve *B* diye iki cismi göz önüne alınız, öyle ki $\mathbf{v}_A = a\mathbf{r}_A$ ve $\mathbf{v}_B = a\mathbf{r}_B$ olsun. Bu durumda *A*'nın *B*'ye göre hızı tam olarak

$$\mathbf{v}_{AB} \equiv \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B = a(\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B) = a\mathbf{r}_{AB}$$

olur. Ancak bu akıl yürütme seçeceğimiz her O başlangıç noktası hakkında yapılabilir.

36 Bose 1980, 92.

37 Waldrop 1991.

38 Bu noktaların bir tartışması için ve alışılmış parlak gökyüzü paradoksunu bozan diğer etmenler için Harrison'a (1981, 255-9) bakınız.

39 Shipman 1976, 132. Bu ve özellikle de daha uzaktaki cisimlere olan uzaklıklar yalnızca yaklaşık uzaklıklardır ve aynı gökada için farklı referanslarda birbirinden iki ya da üç katı kadar farklı sayılar bulunur.

40 Eddington'da (1926, 6) alıntı olarak verilmektedir.

41 Bose 1980, 77; Harrison 1981, 361.

42 Bu, homojen, izotropik bir evreni betimleyen ve

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$$

$$\rightarrow c^2dt^2 - R^2(t)dr^2 \equiv c^2dt^2 - d\ell^2$$

olan Robertson-Walker metriği diye anılan metrikten çıkarılır. (Aslında bu, yalnızca özel bir durum için Robertson-Walker metriğidir, ancak burada açıklamayı amaçladıklarımız için iş görecektir. Daha fazla ayrıntı için Bose'a (1980, 79-87) bakınız.) Bu denklemde *t* evrenin genişlemesiyle birlikte giden belirli bir çerçevedeki uzay-zaman için kozmik bir zamandır (Bose 1980, 81; Harrison 1981, 216). Işık ışınları için jeodezikler $ds = 0$ ile tanımlanırlar.

43 Bir başka deyişle,

$$\dot{\ell} = \dot{R}r = (\dot{R}/R)\ell \equiv H\ell$$

ve sonrasında

$$R(t) \approx R(t_0)[1 + H_0(t - t_0)]$$

olur, burada

$H_0 \equiv \dot{R}(t_0)/R(t_0)$'dır.

44 Işığın jeodezikleri için $ds = 0$ olduğundan, $(t - t_0) \approx \ell/c$ elde ederiz. Bu, bir önceki notta verilen açılım ve $\lambda_0/\lambda = R(t_0)/R(t)$ ilişkisi sonrasında (18.8) denklemine yol açar.

45 Genişleyen bir evrendeki çeşitli ufuk tiplerinin dikkatli bir tartışması için Harrison'a (1981, 19. Konu) bakınız.

VII. BÖLÜM

Einstein 1949b, 667.
Bohr 1949, 210, 232-3.
Clauser ve Shimony 1978, 1881.

19. KONU

1 Doğal olarak, saçılan bu ışıma enerjisinin frekansının soğurulan ışımanınkiyle aynı olması gerekmez. Böylece, eğer sıcaklık Şekil 19.1'deki eğrinin tepe noktası görülebilir bölgenin çok altında olabilecek şekilde olsaydı ve görülebilir bölgeden ışık bir kara cisim üzerine tutulmuş olsaydı, bu durumda bu kara cisim gerçekten de kara görünürdü.

2 Şekil 19.1'imiz Leighton'un (1959, 61) Şekil 2-1'inden uyarlanmıştır. Bu şekil (Şekil 19.3 gibi) burada kara cisim ışıması eğrilerinin nitel davranışını göstermek amacında olduğundan, ρ ve λ 'nın birimleri açık olarak gösterilmemiştir.

3 Bir başka deyişle, yarım dalga boylarının $(\lambda/2)$ bir tamsayı katı (n), ℓ uzunluğuna uygun gelmek zorundadır.

4 Jammer 1989, 11.

5 ν frekansı ve λ dalga boyu arasında $\lambda\nu = c$ ilişkisi vardır, burada c ışık hızıdır.

6 Kuhn 1978.

7 Ayrıntılar için Jammer'a (1989, 7-18) ve Klein'a (1962) bakınız. Planck'ın özgün makalelerinin konuyla en çok ilgili olanlarından bazıları İngilizce'ye çevrilmiş olarak ter Haar'da (1967) bulunabilir. Planck'ın çalışmalarının çok farklı - ve biraz tartışmaya açık - bir yorumu için Kuhn'a (1978) bakınız. Aslında, Planck'ın uzun dalga boylarındaki kovuk ışıması için deneysel verilerden haberi olsa da o

sırada Rayleigh-Jeans formülünden habersiz olduğu görünüyor.

8 Klein'da (1962, 468) alıntı olarak verilmektedir.

9 Klein (1962) ve Kuhn (1978), Planck'ın ileri sürüldüğüne göre Boltzmann'ın istatistiksel mekanikteki yöntemini izlediği göz önünde bulundurulduğunda, Planck'ın sayma yordamının rasgeleliği üzerinde (ve kendi içindeki tutarlılığı üzerinde bile) çok farklı görüştedirler.

10 Clark'ta (1972, 95) alıntı olarak verilmektedir.

11 Planck 1949, 45.

12 Bunun ayrıntılı bir tarihsel durum incelemesi Heilbron ve Kuhn'da (1969) bulunabilir.

13 Dairesel bir yörüngenin kararlılığı $mv^2/r = e^2/r^2$ olmasını gerektirir, böylece $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}e^2/r$ olur ve bu nedenle $E = K + V = -\frac{1}{2}e^2/r$'dir. Bu daha sonrasında doğrudan doğruya (19.4) denkleminde belirtilen sonuca yol açar. (19.4) denkleminin (aslında Bohr tarafından göz önüne alınan durum olan) eliptik yörüngeler için de geçerli olarak kaldığına dikkat ediniz, ki bu sonuç her ikisi de klasik mekanikteki standart sonuçlar olan (bakınız Goldstein (1950, 79-80)) - Kepler'in üçüncü yasasından çıkan - $\tau = 2\pi a^{3/2} m^{1/2}/e$ ve $a = -e^2/(2E)$ bağıntısından elde edilir.

14 Bohr 1913, 7.

15 Bohr'un (19.6) denkleminden (19.2) denklemiyle verilen Balmer formülüne giderken izlediği asıl yol, kendisinin (19.5) denklemiyle verilen kuantumlama koşulu - ki bu koşul, (spektrum çizgilerinin gözlemlenen desenini açıklamak için gerektiği gibi) frekansı $n(\nu/2)$olan tek bir kuantum yerine her birinin frekansı $(\nu/2)$ olan n kuantayı temsil ediyordu - ile oluşturduğu tutarsızlık nedeniyle bundan daha dolaylıydı. Heilbron ve Kuhn'a (1969, 269-77) bakınız.

16 Jammer'da (1989, 77) alıntı olarak verilmektedir.

17 Bohr 1913, 15. Bohr, aynı makalenin daha sonraki kısımlarında (sayfa 24-25) yörüngesel açısal momentumu 'kuantumlamak' için genel kuralını en sonunda verdi.

18 Yukarıda 13. Not'un başlarında verilen ilişkilere bakınız.

19 Kuantum mekaniğinin bu iki yorumunun keşfedilişlerinin daha tam bir öyküsü için Jammer'a (1989, 5. Konu) ve Cushing'e (1994, 6. Konu) bakınız.

20 Jammer 1989, Kısım 4.2.

21 Faye 1991.

22 Beller 1983a, 155 ve sonrası.

23 Pauli 1981, özellikle 4, 206.

24 Burada - metinde daha öncesinde de olduğu gibi - 'işlemsel tanımlar' sözü ile bir niceliğin, aracılıklarıyla ölçülebildiği ya da belirlenebildiği asıl işlemler ya da yordamlar cinsinden tanımlarını anlatmak istiyoruz.

25 Bu tür değişme özelliğinin bulunmaması için bilinen bir örnek, $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B} = -\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A} \neq \boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}$ olduğundan $\boldsymbol{A}$ ve $\boldsymbol{B}$ diye iki vektörün vektör çarpımı ile sağlanır. Sonucun iki işlemin hangi sırayla yapıldığına bağlı olması durumuna (günlük olgular dünyasından) yalın bir örnek olarak, önce içi dolu bir tabancanın tetiğini çektiğiniz ve sonrasında da silahı başınıza dayadığınız durumu göz önüne alıp, bütün bunları tam tersinden yaptığınız durumla karşılaştırınız.

26 Doğal olarak, Einstein için 'nedensel' yerel olarak nedensel anlamına geliyordu. Bir başka deyişle, Einstein yerel olma özelliğine fiziğin temel bir ilkesi olarak kesinlikle bağlıydı, böylece anlık bir uzaklıkta etkiyi onaylamıyordu.

27 Klein 1964, 5.

28 Einstein 1917a, 128. Buradaki alıntı van der Waerden'den (1967, 76) alınmıştır.

29 Jammer'da (1989, 258) alıntı olarak verilmektedir. De Broglie'nin önemli olduğuna inandığı bir benzerlik aşağıdaki gibidir. Klasik optiğe egemen olan dalga denklemi, uygun bir limitte geometrik optiğe yol açan bir biçimde yazılabilir. Optikle ilgili denklemlerin bu limit alındıktan sonraki biçimi, matematiksel olarak parçacık mekaniğindeki denklemlere (Hamilton-Jacobi biçimine) (bir başka deyişle, Newton'un ikinci hareket

yasasına) benzerdir. Geometrik optik (ya da ışın optiği) dalga optiğinin bir limit alındıktan sonraki durumu olarak ortaya çıktığı için, de Broglie ve - daha sonra - Schrödinger klasik parçacık mekaniğinin aradıkları dalga mekaniğinin bir limit alındıktan sonraki durumu olarak ortaya çıkacağını umut ettiler. Optikle parçacık mekaniği arasındaki benzerlik ve bunun dalga mekaniğinin biçimlendirilmesinde oynadığı rol için Goldstein'e (1950, Kısım 9-8) ve Cushing'e (1994, 106 ve orada söz edilen referanslara) bakınız.

30 Klein 1964, 4.

31 Klein 1964, 43.

32 Hendry 1984, 7.

33 Bohr 1985, xix.

34 Beller 1985, özellikle 340.

35 Beller 1983b; Cassidy 1992, 11. Konu.

36 Cushing 1994, 118-23. De Broglie'nin burada ve Cushing'de (1994) dolayısıyla anlatılan bilinen kuramdan yeterince çok fark eden daha önceki pilot dalga kuramının bir değerlendirmesi için Valentini'ye (1997) bakınız.

37 Heilbron 1988, 203-4.

38 Heilbron 1988, 211. Burada alıntı olarak verilen söz Nathan Rosen tarafından söylenmişti.

39 Heilbron 1988, 219.

20. KONU

1 Bu, $E=m_0c^2+K$ ile (17.11) ve (17.12) denklemlerinden çıkar.

2 Şimdiye kadar verdiğimiz örneklerde, bilinen potansiyel enerjinin uzaysal sonsuzda sıfır olmak zorunda olduğu kabulünü benimsemiştik. Bu, potansiyel enerjiyi kendi seçtiğimiz herhangi bir referans noktasında sıfır olarak tanımlayabildiğimizden fiziksel olarak gerçekçi durumlarda her zaman olasıdır. Bununla birlikte, şimdi ele almakta olduğumuz sonsuz büyüklükte duvarlar arasındaki bir potansiyel kuyu için 'kutunun' içerisinde $V=0$ diye ve duvarlarda da $V\to\infty$ diye almak çok daha uygundur. Bu kabulle, izin verilen, sınırlı durum enerjileri pozitif olur.

3 Şekil 20.5'imiz Goldberg *et al.*'ın (1967, 184) Şekil 5'inden uyarlanmıştır.

4 Born 1926, 863.

5 P ve ψ genel olarak uzamsal değişkenlere olduğu gibi t zamanına da bağlı olsa da, gösterimi kolaylaştırmak için sık sık zaman bağımlılığını saklı tutarız. Kolaylık olması bakımından (x,y,z) uzamsal değişkenlerinin tüm kümesini temsil etmek için de sık sık yalnızca x'i kullanırız.

6 Şekil 20.8'imiz Eisberg'in (1961, 306) Şekil 10-2'sinden uyarlanmıştır.

7 Dirac 1958, 3.

8 Dirac 1958, 3.

9 Dirac 1958, 3-4.

10 Dirac 1958, 4.

11 Planck 1949, 135-8.

12 A ve B diye iki işlemci eğer $AB=BA$ eşitliğini sağlıyorsa *sıra değişme özelliğine sahipler* denir. Bu özelliği bu operatörlerin $[A,B]$ *komütatörü* cinsinden tanımlayabiliriz, burada $[A,B]\equiv AB-BA$'dır. Eğer A ve B sıra değişme özelliğine sahipseler, o zaman $[A,B]=0$ olur; değilseler $[A,B]\neq 0$'dır. Örneğin, kuantum mekaniğinde p_x, $-\mathrm{i}\,\mathrm{d}/\mathrm{d}x$ işlemcisi ile temsil edilir, böylece $f(x)$, x'in herhangi bir türevlenebilir fonksiyonu iken $[x,p_x]f=\mathrm{i}f$ olur. Hem Δp_x'in hem de Δx'in sıfır olduğu hiçbir olası durumun (ya da derlemenin) olmadığı, (burada yalnızca belirttiğimiz ancak kanıtlamadığımız) anlaşılması kolay bir matematiksel sonuçtur. Bu, (20.11) denklemi için matematiksel bir temel oluşturur.

13 Eğer $[A,B]=C$ (burada C'nin kendisi de genel olarak bir işlemcidir) ise, o zaman (20.10) denkleminin matematiksel açıdan kesin ifadesi $\Delta A\,\Delta B\geq|\langle C\rangle|/2$'dir. Metinde (20.10) denklemindeki b'nin (bir ψ kuantum durumu için) hiç sıfır olup olamayacağı, C'nin biçimine bağlıdır. C, $[x,p_x]=\mathrm{i}$'de olduğu gibi yalnızca bir sayı olduğunda (aslında, birim işlemcinin sabit bir katı olduğunda), o zaman b asla sıfır olamaz ((20.11) denklemine bakınız).

14 Kuantum mekaniğinin Kopenhag ekolünün çeşitli üyelerince yapılan farklı yorumlarının bir tartışması için Cushing'e (1994, 27-32) bakınız.

15 Örnek olarak, Leighton'a (1959, 86-8) ya da Eisberg'e (1961, 156-9) bakınız.

16 Aslında Heisenberg (1927), 'belirsizlik' makalesinde şimdi artık ünlü olan bir 'süper mikroskop' düşünce deneyi kullandı, ancak akıl yürütmesinin genel doğası burada kullandığımızla aynıdır. (Wheeler ve Zurek'e (1983, 62-84, özellikle 64) bakınız.)

17 Dirac 1958, 7-8.

18 Şekil 20.10 son derece şematiktir ve bir ışının ayrıldığı, iki farklı yol boyunca yollandığı ve sonrasında (bir 'ekran' ya da algılayıcı üzerinde) belirli bir noktada tekrar bir araya getirildiği herhangi bir düzenlemeyi temsil etmek amacındadır. Şekil 20.11'de kabaca resmedilende olduğu gibi bir çift-yarık düzenlemesi, bu düşüncenin genel bir uygulamasıdır.

19 Dirac 1958, 8.

20 Bu tip düşünce deneyi Feynman'da (1965, 127-48) da ele alınır. Şekil 20.11'imiz Feynman'ın (1965, 136) Şekil 30'undan uyarlanmıştır.

21 Bu 'çift yarık' deneyinin modern ve arıtılmış bir biçimi yakın zamanda yapılmıştır ve bir kez daha tek foton girişim etkisini göstermiştir (Godzinski'ye (1991) bakınız).

21. KONU

1 Jammer'da (1989, 366) alıntı olarak verilmektedir.

2 Heisenberg 1958, 55-6.

3 Born 1971, 91.

4 Hughes 1990.

5 Fiziksel gözlenirleri temsil eden bu işlemciler üzerindeki her zamanki kısıtlama Hermitik ($A = A^{\dagger}$) olmalarıdır:, böylece özdeğerleri gerçel nicelikler olur.

6 (21.1) denklemine bir örnek olarak, $A=-\mathrm{i}\,\mathrm{d}/\mathrm{d}x$ diferansiyel işlemcisini, $\psi=\mathrm{e}^{\mathrm{i}px}$ özdurumunu ve $\lambda=p$ özdeğerini göz önüne alınız.

7 Şekil 21.3'ümüz Cushing'in (1994, 35) Şekil 3.1'inden uyarlanmıştır.

8 Bu çarpım biçimi, birbirleriyle etkileşimde bulunmayan (1 ve 2 ile gösterilen) iki sistem için olan Schrödinger denklemindeki $(\mathrm{i}\partial\Psi/\partial t = H\Psi)$ H Hamilton fonksiyonunun, değişme özelliğine sahip olan iki terimin toplamı $(H = H_1 + H_2)$ olması gerçeğinden çıkar. Burada - sık sık örneklerde de olduğu gibi - Planck sabitinin $\hbar = 1$ değerine sahip olduğu birimleri seçtik.

9 Elektronun spininin büyüklüğü $\hbar/2$ olarak ölçülür. Eğer uygun birimler seçersek, bunu 1 değerine düşürebiliriz. Bu spinin herhangi bir yönde ölçülen değerinin her zaman ya $+1$ (yukarı) ya da -1 (aşağı) olması, doğanın (kuantum mekaniğinin formalizminin içine katılmış) bir gerçeğidir. Bunlar, bu spin için izin verilen tek özdeğerlerdir, böylece yalnızca iki tane özdurum bulunur: $\lambda_+ = +1$ 'e karşılık gelen ψ_+ ve $\lambda_- = -1$ 'e karşılık gelen ψ_-.

10 $\mathrm{i}\partial\Psi/\partial t = H\Psi$ denkleminin genel çözümü $\Psi(t) = \mathrm{e}^{-\mathrm{i}Ht}\Psi(0)$ olarak verilir. Bu genel çözümün kanıtının anlaşılması (bu çözümün doğrudan doğruya türevinin alınması ve Schrödinger denkleminde yerine konması ile) kolaydır ve kuantum mekaniği üzerindeki neredeyse her standart kitapta bulunabilir. Bununla birlikte, burada amaçladıklarımız bakımından gereksindiğimiz tek şey böyle bir çözümün var olmasıdır. Bu çözümün fonksiyonlar, matrisler ve sütun vektörleri cinsinden açık bir biçimde temsil edilmesine gereksinimimiz yoktur.

11 Bir başka deyişle,

$$H(\Psi+\Phi) = H\Psi + H\Phi$$
$$= \mathrm{i}\partial\Psi/\partial t + \mathrm{i}\partial\Phi/\partial t = \mathrm{i}\partial(\Psi+\Phi)/\partial t$$

olur. Bu, iki çözümün toplamının kendisinin de bir çözüm olduğu anlamına gelir. Genel olarak, eğer tüm ϕ ve ψ ve için $A(\phi+\psi) = A\phi + A\psi$ ise, A işlemcisine doğrusal (lineer) işlemci adı verilir.

12 Schrödinger 1935. Kedi paradoksunun özgün ifadesi için sayfa 812'ye (ya da

Wheeler ve Zurek'e (1983, 157)) bakınız.

13 Przibram 1967, 35-6.

14 Şekil 21.4'ümüz Cushing'in (1994, 38) Şekil 3.2'sinden uyarlanmıştır.

15 (21.12) denklemindeki $\langle u|v\rangle$ gösterimi, u durum vektörünün v durum vektörü üzerine izdüşümünü belirtir. Bu, u'nun v tarafından kapsanan bileşenini verir. Bu, $\hat{\imath}\ x$ yönündeki birim vektör, r konum vektörü ve x de r'nin x yönündeki bileşeni iken, $\hat{\imath}\cdot r = x$ skaler (nokta ya da iç) çarpımına benzer. Burada, çekirdeksel bozunma sürecinin bu türden kendi kendine gelişen parçalanmalar için olan her zamanki üstel $N(t) = N_0\exp(-t/\tau_0)$ bozunma yasasına uyduğunu basit bir şekilde varsayıyoruz ya da bunun böyle olduğunu hiç düşünmeden kabul ediyoruz, burada τ_0 aslında örneğin yarı ömrüdür. (Teknik olarak, yarı ömür 0,693 τ_0 olarak tanımlanır.) Kısım 16.4'te μ - mezonunun bozulmasıyla ilgili tartışmaya bakınız.

16 Dirac 1958, 8-9.

17 Dirac 1958, 9.

18 Dirac 1958, 9-10.

19 Dirac 1958, 11, 13.

VIII. BÖLÜM

Feynman 1965, 129.
Gell-Mann 1981, 169-70.
Bohr 1934, 53.
Heisenberg 1958, 46, 129.
Born 1951, 155, 163-4.
Moore 1989, 228.
von Neumann 1955, 325.
Einstein 1949b, 666.
Landau ve Lifshitz 1977, 2.
Bell 1987, 160.

22. KONU

1 Einstein *et al.* 1935, 777.

2 Bohr 1935.

3 Born 1971, ix-x.

4 Born 1971, 158.

5 Born 1971, 164-5.

6 Born 1971, 164.

7 Einstein 1917a.

8 Jammer'da (1989, 344) alıntı olarak verilmektedir.

9 Okur, bu kısımda yapılan çözümlemeye geçmeden önce makalenin kendisini (Einstein *et al.* 1935) okumayı yararlı bulabilir.

10 Einstein *et al.* 1935, 777.

11 Bu, kuantum mekaniğinde p_x 'in $-\mathrm{i}\,\mathrm{d}/\mathrm{d}x$ işlemcisi ile temsil edildiği ve böylece $f(x)$, x'in herhangi bir türevlenebilir fonksiyonu iken $[x, p_x]f = \mathrm{i}f$ olduğu anımsanırsa kolayca görülebilir. Hem Δp_x 'in hem de Δx 'in sıfır olduğu hiçbir olası durumun olmadığını hatırlayınız, böylece hem p_x hem de x eşzamanlı olarak kesin değerlere sahip olamazlar. 20. Konu'nun 12. ve 13. notlarına da bakınız.

12 Einstein *et al.*'daki (1935) (9)-(18) denklemlerine de bakınız.

13 Bunu özlü bir matematiksel biçimde aşağıdaki gibi görebiliriz. $[x_j, p_i] = \mathrm{i}\delta_{ij}$ olduğu gerçeğini kullanınız, $P = p_1 + p_2$ ve $X = x_1 - x_2$ diye iki işlemci tanımlayınız ve sonra da doğrudan doğruya hesaplama yaparak $[X, P] = 0$ olduğunu gösteriniz. Bu nedenle, hem X hem de P eşzamanlı olarak ölçülebilir ya da öngörülebilir. Böylece (birbirleriyle değişme özelliğine sahip olan) p_1 ve x_2'yi, p_2 ve x_1'i öngörebilmek için ölçebiliriz, böylelikle birbirleriyle değişme özelliğine sahip olmayan gözlenirlerin (p_1 ve x_1 çifti ya da p_2 ve x_2 çifti) değerlerinin bilgisini elde edebiliriz.

14 Eğer kuantum mekaniği tam diye kabul edilir ve bu nedenle sistemin durumunun aslında ne ölçüleceği konusunda uzakta yapılan seçim tarafından (istenildiği kadar kısa bir zaman süreci içerisinde) değiştirildiği seçeneği ciddiye alınırsa, o zaman EPR'nin akıl yürütüşünün kuantum mekaniğinin tamlığının bu kuramın yerel olmama özelliğine sahip olması gerektiğini gösterdiğinin farkında olunuz.

15 Bunun bir tartışması için Cushing'e (1994, 8. Konu) bakınız.

16 Belirlenimci bir dünya bu tür bir durum için bir örnek oluştururdu.

17 Asıl deneysel durum, bu yalın demecin öyle bir sonuç çıkarılmasına yol açabileceğinden daha karmaşıktır. Söz konusu sorunların ayrıntılı bir tartışması için Clauser ve Shimony'e (1978) bakınız.

18 Clauser ve Shimony 1978, 1883.

19 Stapp (1989; 1990) yerel olmama özelliğinin Bell eşitsizliğinin çiğnenmesi sonucu zorunlu kılındığını öne sürer. Clifton *et al.* (1990) ve Dickson (1993) Stapp'ın kanıtının geçersiz olduğu yönünde akıl yürütürler. Maudlin (1994, 121; 1996, özellikle 285–6) *Bell eşitsizliğinin* gözlemlenen çiğnenişlerini açıklayan herhangi bir fiziksel olarak yeterli kuramın, yerel olmama özelliğine sahip olması gerektiği yönünde akıl yürütür. Bunlar, bu soru üzerindeki makalelerin yalnızca bir örneğini temsil ederler – daha fazlası için, burada sözü geçen bu çalışmaların içerdiği referanslara bakınız.

20 Maudlin 1994, 135–40. Örneğin, çeşitli olayların oluşma olasılıklarını temel diye ve bir yerel olarak gizli değişkenler kümesi tarafından belirleniyor diye almak da kuantum mekaniğinin öngörüleri ile çelişkilere yol açar.

2 Maudlin (1994, 121; 1996, özellikle 285–6).

22 Bohm 1951, 614–23.

23 Şekil 22.2'miz Cushing ve McMullin'in (1989, 4) Şekil 3'ünden uyarlanmıştır.

24 Bu tartışmada elektronların kullanılmasının hiçbir özel yanı yoktur. Aslında, gerçekte yapılan deneylerin çoğunda fotonlar kullanılır.

25 Peres 1978.

26 Bir başka deyişle, bu ikilem diğer istasyonda her ne ayar seti seçilmiş olursa olsun istasyonların birinde belirli (ve sabit) bir sonucun olduğunun (en azından açıkça söylenmeden) varsayılması ile oluşturulmuştur.

27 $R_{KM}(\phi) = |1 + 2\cos\phi - \cos(2\phi)|$
$= 2|1 + \cos\phi - \cos^2\phi|$

Şekil 22.3'te verilen grafiği tüm $0 \le \phi \le 2\pi$ aralığına genişletmek için, $R(\phi)$'nin 0° ve 180° etrafında simetrik olduğu gerçeğini kullanabiliriz: $R(\phi) = R(-\phi) = R(2\pi - \phi)$.

23. KONU

1 Bu kısmın daha sonra gelen bölümlerinde bir kuramın hangi bağlamda formalizm ve yorum diye bölümlere ayrıldığını ve bunlar arasındaki ilişkiyi gösterirken, burada yalnızca Bohm yorumundan söz etmek yerine Bohm kuramından söz etmeliyiz. Bir başka deyişle, formalizmler hem Kopenhag hem de Bohm için aynı olabilse de, yorumları ve bu nedenle kuramları da farklıdır. Bununla birlikte, Bohm yorumundan ve Kopenhag yorumundan söz etmek bilimsel yazın dünyasında o kadar çok kullanılır olmuştur ki, biz de basitçe bu standart uygulamayı izliyoruz.

2 Bu ve bundan sonraki konuda ortaya konan sorunlar için ayrıntılı referanslar ve bu sorunların daha ayrıntılı tartışması Cushing'de (1994, özellikle 5–7. ve 11. Konular) verilmektedir. Chicago Üniversitesi Yaymevi'ne daha öncesinde yayınlanan metinlerin üzerinde bu konuda kullanılmak amacıyla değişiklikler yapılmasına izin verdiği için teşekkür ederim.

3 Daha doğrusu, ψ (bir $\mathcal{H}$ Hilbert uzayında) fiziksel sistemin durumunu temsil eden bir vektördür.

4 Daha öncesinde de belirttiğimiz gibi, bu $i\hbar\,\partial\psi/\partial t = H\psi$ 'dır, burada Hamilton fonksiyonu – K sistemin kinetik enerjisi ve V de potansiyel enerjisi olmak üzere – $H = K + V$ 'dir.

5 Bu a fiziksel gözlenirleri yalnızca a_j özdeğerlerine sahip olabilirler, burada $A\psi_j = a_j\psi_j$ 'dir.

6 Bu, A'nın beklenen değeri olarak – bir başka deyişle, $\langle\psi|A|\psi\rangle$ diye – verilir.

7 Bu, tıpkı (21.9) denkleminde olduğu gibi $\psi = \sum_k a_k\psi_k \to \psi_j$ 'dir.

[8] Bohm 1952.

[9] Burada ∇, bileşenleri $\nabla_j = \partial/\partial x_j$ olan gradyan (ç.n.: İngilizcesi 'gradient') işlemcisidir, böylece örnek olarak (ii)'de $v_x = (1/m)\,\partial S/\partial x$ olur, burada $S = S(x,y,z,t)$'dir.

[10] Bohm 1953. Bu soru üzerinde daha yeni bazı çalışmaların bir tartışması için Cushing'e (1994, 9. Konu) bakınız.

[11] Bohm 1952, 171.

[12] Bohm 1952; Bohm *et al.* 1987. Bohm ve Hiley'e (1993), Holland'a (1993) ve Cushing'e (1994) de bakınız.

[13] Bohm'un ölçüm öyküsü için Cushing'e (1994, 4. Konu) bakınız.

[14] Bazen, Ehrenfest'in teoreminin Newton'un ikinci hareket yasasının $(m\boldsymbol{a} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{r}))$ kuantum mekaniğinden ve Schrödinger denkleminden yeniden elde edilmesine izin verdiği öne sürülür. Bununla birlikte, bu teorem yalnızca $m\left(\mathrm{d}^2\langle \boldsymbol{r}(t)\rangle/\mathrm{d}t\right) = \langle \boldsymbol{F}(\boldsymbol{r})\rangle$ olduğunu belirtir, burada $\langle \boldsymbol{r}\rangle = \langle \psi | \boldsymbol{r} | \psi \rangle$'dir. Genel olarak $\langle \boldsymbol{F}(\boldsymbol{r})\rangle = \boldsymbol{F}(\langle \boldsymbol{r}\rangle)$ olduğu doğru değildir. Böylece, $\langle \boldsymbol{r}(t)\rangle$'nin beklenen (ya da 'ortalama') değerinin zaman içinde evrilişi için bile klasik hareket denklemini yeniden elde edemeyiz.

[15] Bohm 1952, 166.

[16] Bohm 1952, 168.

[17] Bohm 1952, 169.

[18] Bohm kuramında, tüm ölçümler sonuç olarak konumun ölçümleridir. Örneğin, deney araçlarında okunan değerler sonunda bir ölçüm aletindeki iğnenin konumu gibi bir şeylere düşer.

[19] Shimony 1984. Bohm'un kuramında görelilik sorusunun yeri üzerine Cushing'e (1994, özellikle Kısım 10.4.2) de bakınız.

[20] Maudlin 1994, 220.

[21] Fine 1986a, 87.

[22] Bu konu üzerinde ayrıntılı referanslar Cushing'de (1991) bulunabilir.

[23] Bu, kuşkusuz Kepler'in ikinci yasası tarafından özetlenen deneysel verilerin son derece 'yeniden kurulmuş' bir biçimidir. Bununla birlikte, bunun vurgulamak istediğimiz nokta için yeterince dürüst bir yalınlaştırma olduğuna inanıyoruz.

[24] Bell eşitsizliğini test etmek için deneyler yapılmıştır ve bu gerçek deneylerin ayrıntılı bir çözümlemesi oldukça karmaşık olsa da, ezici bir biçimde alınan ortak karar deneysel sonuçların Bell eşitsizliğini çiğnediklerini. Bu deneylerden en önemli olanlarından birinin ayrıntıları için Aspect *et al.*'a (1982) bakınız.

[25] Fine 1982a.

[26] (Kopenhag ve Bohm yorumlarının dışında) biçimsel olarak son derece gelişmiş birkaç - burada ele almayacağımız 'çok sayıda dünya', tutarlı tarihler, eşevresizlik (ç.n.: birbiriyle eşevreli olmama hali), kipsel ve kendiliğinden oluşan çöküş gibileri - deneme daha vardır. Bu kısımdaki amacımız herhangi bir yorumun yanıt vermek zorunda olduğu anahtar konumundaki kavramsal sorulardan bazılarını göstermektir. Biraz önce sözü edilen tüm bu diğer taslaklar, bu kısımda ortaya koyduğumuz zorlukları tartışılır bir biçimde tatmin edici bir şekilde çözmekte başarısız olurlar. Bu denemelerin bazılarının tartışması için Albert'a (1992) ve Baggott'a (1992, 5. Konu) bakınız.

[27] 'Genellikle varsayılan' diyoruz çünkü bu tür tartışmalarda tipik olarak kabul edilen arka plan varsayımlarından biri, özel görelilik kuramının uzaysal olarak birbirlerinden ayrılmış olaylar arasındaki anlık bağlantıları mutlaka dışladığıdır. Bu kuantum yerel olmama özelliği sorusunun aydınlatıcı ve dikkatli bir çözümlemesi için Maudlin'e (1994) bakınız.

[28] Fine 1982b, 740. Burada kullanılan 'öngörmek' bizim 'açıklamak'ımıza ve bu 'açıklamak' da bizim 'anlama'mıza benzerdir.

[29] Bohm'un kuramının teknik ayrıntılarının güzel birer özeti Dürr *et al.*'da (1996) ve Valentini'de (1996) verilmektedir.

[30] Bu hız, alışılmış kuantum mekaniksel $P = |\psi|^2$ olasılık yoğunluğu ve $\boldsymbol{j} = (\mathrm{i}\hbar/2m)(\psi\nabla\psi^* - \psi^*\nabla\psi)$ akım

yoğunluğu cinsinden tam olarak $v = j/\rho$ 'dir.

31 Bu tanımı yapmak için gereken kurallara uygun işlemler

$$\frac{d}{dt}p = v_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\nabla S) + \frac{\partial}{\partial t}(\nabla S)$$

$$= -\frac{1}{m}\nabla S \cdot \nabla(\nabla S) + \frac{\partial}{\partial t}(\nabla S) = \nabla\left[\frac{1}{2m}(\nabla S)^2 + \frac{\partial S}{\partial t}\right]$$

artı (23.3) denkleminin kullanılmasıdır.

24. KONU

1 Okur, bu konuda açıklanan bazı görüşlerin kitapta şimdiye dek bulunanların çoğundan daha kuramsal ya da daha tartışmaya açık olduklarının farkında olmalıdır. Bu konunun büyük bir kısmı, Cushing'de (1994, özellikle 8-11. konular) bulunabilecek kapsamlı bir durum incelemesinin bir özetidir. Chicago Üniversitesi Yayınevi'ne daha öncesinde yayınlanan metinlerin üzerinde bu konuda kullanılmak amacıyla değişiklikler yapılmasına izin verdiği için teşekkür ederim.

2 Aslında Duhem'in, Quine'in ve kesin olarak belirlenememe tezlerinin arasında yapılması gereken ayırımlar vardır (örnek olarak Harding'e (1976) bakınız). Bununla birlikte, biz burada basit bir şekilde 'Duhem-Quine tezi' ifadesini ve 'kesin olarak belirlenememe' terimini kayıtsızca kullanıyoruz. Yuri Balashov'a bu nokta üzerinde beni sıkıştırdığı için teşekkür ederim.

3 Duhem 1974, 180.

4 Duhem 1974, 190.

5 Duhem 1974, 217.

6 Duhem 1974, 217.

7 Quine 1951, 39.

8 Quine 1951, 39-40.

9 Quine 1951, 40.

10 Quine 1951, 41.

11 Quine 1951, 41.

12 Quine 1951, 43.

13 Ben-Menahem 1990.

14 Laudan ve Leplin (1991) bu türden bir köktenci ve evrensel belirlenemezciliğe karşı akıl yürütürler.

15 Ben-Menahem 1990, 267.

16 Einstein 1954e, 226.

17 Heisenberg 1971, 76.

18 van Frassen 1980.

19 McMullin 1984.

20 Hanle 1979, 268.

21 Harmke Kamminga beni Russell'ın (1917, IX. Konu, özellikle 199-208) da belirlenimcilik ile belirlenemezcilik arasındaki epistemolojik (ve deneysel) ayırt edilemezliğin lehinde akıl yürüttüğü ve bu ayırt edilemezliği kullanarak Laplaceçı belirlenimciliğin saçma olduğunu öne sürdüğü konusunda nazikçe bilgilendirdi. Ona bu ilginç ve konuyla ilgili referansı için teşekkür ederim.

22 Bu sorunun ayrıntılı bir tarihsel incelemesi için Cushing'e (1994, özellikle 11. Konu) bakınız.

23 Heilbron 1988, 219.

24 Heilbron 1985, 391.

25 Beller 1983b; Cassidy 1992, 12. ve 13. Konular.

26 Selleri 1990; Cushing 1994.

27 Hamilton-Jacobi kuramı yalnızca Newton'un ikinci hareket yasasının farklı ve daha genel bir biçimidir. Klasik mekaniğin dinamik denklemleri Hamilton-Jacobi biçiminde ifade edildiklerinde, Bohm'un kuantum mekaniği için elde ettiği denklemlerle göze çarpan bir benzerlik taşırlar. De Broglie de bu benzerliğin farkındaydı. Ayrıntılar için 19. Konu'daki 29. Not'a ve ayrıca Cushing'e (1994, 5. Konu, 2. Ek) bakınız.

28 Bu (göreliliğe uygun davranan parçacıklar için ve kuantum alanları için olan) kuramlar kovaryant olmadıkları (bir başka deyişle, tüm eylemsizlik çerçevelerinde aynı biçime sahip olmadıkları) halde, gözlemler için bulundukları öngörüler standart görelilikle bağdaşan kuantum mekaniğinin ve kuantum alan kuramının öngörüleriyle özdeştir. (Cushing'e (1994, Kısım 10.4) bakınız.)

29 Nelson 1966; 1967. Nelson'un stokastik mekaniği ile standart kuantum mekaniği arasındaki ilişki üzerine Cushing'e (1994, 159-62) bakınız.

30 Einstein 1950c; 1908; 1926.

31 Bu, kuantum mekaniğinin denklemlerinin farklı tabanlarda ya da

gösterimlerde (ki bunlardan biri Heisenberg'in matris mekaniği ve diğeri de Schrödinger'in dalga mekaniğidir) ifade edilmesine izin veren matematiksel kurallara uygun bir tekniktir.

32 Einstein'm belirli fiziksel olmayan yerel olmama özellikleri nedeniyle reddettiği kendi 1927 tarihli gizli değişkenler kuramı için Cushing'e (1994, Kısım 8.3 ve oradaki referanslar) bakınız.

33 Bu, kuantum durumlarının birbirlerine dolanması özelliğinden söz etmektedir; bu özellik (22.6a) ve (22.16b) denklemlerindekiler gibi uzun erimli ilintilerden sorumlu iken, bu kunatum mekaniksel ilintiler aracılığıyla bilgi gönderilmesinde kullanılamaz. Cushing'e (1994, 10. Konu, 2. Ek) bakınız.

34 Einstein 1949a, 85.

35 Bohm 1952; Bohm *et al.* 1987.

36 Cushing 1990b, 10. Konu.

37 van Woodward 1986, 3.

38 Butterfield 1965. Yuri Balashov'a Butterfield'ın konumunun bu konudaki tartışmayla olan ilgisine dikkatimi çektiği için teşekkür ederim.

39 Butterfield 1965, 11.

40 Hiç kuşkusuz okur, bu kitapta benim tam da bu türden bir tuzağa düşüşümün sayısız örneğini bulmuştur.

41 Butterfield 1965, 5.

42 Bacon 1952, 45. ve 46. Özdeyişler. (BK 30, 110)

IX. BÖLÜM

Hertz 1900, 21.
Einstein 1934, 36-7, 60 (1954b, 274; 1954c, 266).
Einstein 1949b, 684.

25. KONU

1 Frank 1949, 350.

2 Einstein 1954e, özellikle 225-6.

3 Ziman 1978, 9.

4 Ziman 1978, 28.

5 Einstein 1954f, 282.

6 Born 1971, 170.

7 Einstein 1954b, özellikle 272, 274.

8 Einstein 1954b, 274.

9 Einstein 1954g, özellikle 322; 1954e, özellikle 226.

10 Burada bilim felsefesinin tanımlayıcı yanlarına karşı standart oluşturan yanlarından söz ediyoruz.

11 Bu bile fizik tarihinde her zaman görülen bir durum değildir.

12 Einstein 1954e, özellikle 225-6.

13 Schrödinger 1944, 74.

14 Watson 1970, 68.

15 Monod 1971, 102.

16 Luria 1973, 7.

17 Gould 1989.

18 McMullin 1978b, özellikle 232-3.

19 Laudan 1981, 9, 25, 34-44.

20 Friedman 1992, 143, 171.

21 Burtt 1927, 54.

22 Frank 1947, 36-44.

23 Kesin olarak konuşmak gerekirse, Hempel ve Reichenbach 1920lerde Viyana'daki özgün grubun üyesi değildiler, ancak o sıralarda Berlin'de aynı kökten gelen bir grubun üyesiydiler. Bununla birlikte, 1920'lerin sonlarına gelindiğinde kesinlikle bu 'hareketin' bir parçasıydılar.

24 Poincaré 1952, xxvi.

25 Poincaré 1952, xxiii.

26 Duhem 1974, 31.

27 Hempel 1945.

28 Goodman 1946; 1965, 72-83.

29 Bloor 1976; Pickering 1984.

30 Kuhn 1970, 34.

31 Kuhn 1970, 76.

32 Kuhn 1970, 8-9.

33 Kuhn 1970, 94.

34 Ziman 1978, 3.

35 Ziman 1978, 99.

36 Holton 1973.

37 Weimer 1975.

38 Popper'ın izinden gidenlerden birisi olan Imre Lakatos, özellikle basit bir yanlışlamacı modelde olduğu gibi tek başlarına bilimsel kuramların yerine bilimsel araştırma programının (ki bu aslında yanlışlama ile biçimlendirilmiş, birbirini izleyen ve birbirleriyle ilgili kuramlar dizisidir) bilimde doğru değerlendirme birimi olarak önemini vurgulamıştır. Lakatos'un bilimsel araştırma programlarının yöntembilimi (MSRP)

üzerine olan çalışmalarının kapsamlı tartışmaları için Howson'a (1976) ve Lakatos'a (1978) bakınız.

39 Burada verdiğimiz taslağın büyük bir kısmı, Larry Laudan'ın daha küçük hücreler ağına bölünmüş ya da üçlü bilim modelinin (Laudan 1984, özellikle 3. Konu; Cushing 1990b, 10. Konu, özellikle 287-8) üzerine açıklayıcı bir yazıdır.

40 Dilersek, bu tür değişimlerden bilimsel (ç.n.: doktorluk, vs. gibi bir iş olarak) uygulama ve akıl yürütme üzerindeki, daha öncesinde (tümdengelen akıl yürütmenin alışılmış kuralları gibi) günlük yaşamdaki tezlere yerleştirilen normal, ortak aklın isteklerinde var olan kısıtlamaları dışarıda tutabiliriz. Bu tür özellikler değişmez olarak alınmış olsalar da, kesinlikle bilimin yöntemine özgü değildirler ve bu nedenle bilimin tekil bir ayırt edici özelliği olarak kullanılamazlar (Cushing 1990a).

41 Fine 1986b.

42 Freud 1965, 158-9.

43 Monod 1971, 21. Monod burada 'nesnel' sözcüğü ile, - bilim adamı açısından - sezdirilenlerin ya da gerektirilenlerin evrenin işleyişinin belirli bir toplam amacı ya da hedefine göre ne 'olmak zorunda oldukları' yönünde daha öncesinde hiçbir bağlılığa sahip olunmamasını anlatmak istiyor.

44 Doğanın nesnel olarak incelenmesinin zorunluluğunun altı, bir Nobel Fizik Ödülü sahibi olan Richard Feynman (1965, 147-8) tarafından da çizilmiştir.

45 Bu görüşler, Monod (1971, 169-72) tarafından güçlü bir şekilde ifade edilmişlerdir.

46 Yaşamın ortaya çıkışının 'rastlantıya' karşı 'zorunluluk' yanları üzerine Monod'un yaptığından çok farklı bir şekilde ağırlık veren bir görüş için De Duve'ye (1995) bakınız.

47 Telif haklarıyla ilgili zorluklar olmasaydı, Einstein tarafından yazılmış bu önemli denemelerin birer kopyası bu kitapta yer alacaktı.

Genel Referanslar

Genel olarak geri planla ilgili bilgi ve tarih üzerine başlıca kaynak kitaplar için, kolayca elde edilebilir referanslardan birkaçını burada anıyoruz.

Yeni Britannica Ansiklopedisi, 15. Baskı (Britannica Ansiklopedisi, Chicago, 1977). *Mikropedia*, düşünürler ve bilim adamları üzerine biyografik malzemeler için erişilmesi kolay bir kaynaktır.

Robert M. Hutchins (editör), *Batı Dünyasının Büyük Kitapları* (Britannica Ansiklopedisi, Chicago, 1952). Bu (İngilizce) elli dört ciltlik eserde, Batı geleneğindeki en büyük düşünürlerin birçoğunun en önemli çalışmaları bulunabilir. Bu kitapta, olası her seferde verilen doğrudan alıntıların kaynağı olarak bu eseri kullandık. *Notlar* kısmında bu kaynak, ilgili cilt ve sayfa sayıları hemen ardından belirtilmek üzere, BK olarak kısaltılmıştır.

Charles C. Gillispie (editör), *Bilimsel Biyografi Sözlüğü*, 14 cilt, (Charles Scribner's Sons, New York, 1970-6). Bu kaynak, bilim tarihindeki büyük-küçük hemen hemen herkes üzerine ayrıntılı ve güvenilir biyografik malzeme sağlıyor ve her birinin bilime katkılarını özetliyor. *Notlar* kısmında bu kaynak, ilgili cilt ve sayfa sayıları hemen ardından belirtilmek üzere, BBS olarak kısaltılmıştır.

Morris R. Cohen ve I. E. Drabkin (editörler), *Yunan Biliminde Kaynak Bir Kitap* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA, 1948). Matematik, gökbilim ve fizikle ilgili kısımları, eski Yunanlıların bu konular üzerine olan çalışmaları için yararlı bir referans sağlar.

William F. Magie, *Fizikte Kaynak Bir Kitap* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA, 1963). Bu, yaklaşık olarak 1600'den 1900 yılına kadar yaşamış olan bilimsel açıdan önemli birçok kişinin çok kısa biyografik öyküsünü olduğu gibi, bu kişilerin çalışmalarından alıntılar da içerir. Bu önemli zaman aralığı için özgün tarihi malzemelere ulaşımı arttırmak amacıyla, başlıca kaynakları ayrıntılı olarak belirtmenin yanında, olası her yerde bu esere de referans verdik. Bunlar, ilgili sayfa sayıları hemen ardından belirtilmek üzere, parantez içerisinde M ile listelenmişlerdir.

Konularda alıntılandıkları halleriyle metinler, ara sıra asıllarından yapılan çevirilerdeki değişimlerden ötürü Magie'ye danışıldığında bulunanlardan bir parça da olsa farklı olacaktır.

Paul Edwards (editör), *Felsefe Ansiklopedisi*, 8 cilt, (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York, 1967). Burada, günümüzün uzmanları tarafından yazılmış denemelerde antik çağlardan modern çağa dek yaşamış önemli düşünürler üzerine biyografik bilgiler ve bu kişilerin konumları için özet görüşler bulunabilir.

Anton Pannekoek, *Gökbilim Tarihi* (Dover Yayımcılık, New York, 1989). Bu kitap, antik çağlardan modern çağa dek gökbilimdeki gelişmeler için iyi bir özet verir.

Shmuel Sambursky, *Socrates Öncesi Düşünürlerden Kuantum Fizikçilerine Değin Fiziksel Düşünce* (Pica Basımevi, New York, 1975). Bu kitap, çeşitli tarihi dönemler üzerine tanıtıcı denemelerle felsefi yazılardan alıntılar içerir.

Sir Edmund Whittaker, *Eter ve Elektrik Kuramlarının Tarihi*, 2 cilt, (Humanities Basımevi, New York, 1973). Bu, elektrik ve manyetizmanın, atom fiziğinin ve çekirdek fiziğinin, kütleçekimin ve kuantum mekaniğinin eski çağlardan 1925 yılına dek tarihinin konuya egemen ve titiz bir sunumudur. Whittaker öne çıkan bir kuramsal fizikçiydi ve çeşitli tarihi gelişmeler önemli teknik ayrıntılarıyla ele alınmıştır.

Henry A. Boorse ve Lloyd Motz (editörler), *Atomun Dünyası*, 2 cilt, (Basic Books, New York, 1966). Bu iki harika referans cildinin temel ilgi merkezi atomik, nükleer ve kuantum kuramının içeriği ve tarihidir. Bu kitaplarda, yaklaşık olarak 1600 yılından günümüze dek yaşamış birçok bilim adamı üzerine biyografik denemeler, çalışmalarının betimlemeleri, çözümlemeleri ve yazılarından (tümü İngilizce) alıntılar vardır.

Bibliyografya

Adams, C. ve Tannery, P. (editörler) (1905), *Descartes'ın Eserleri* (Fra. özgün eser '*Oeuvres de Descartes*'), (Leopold Cerf, Paris).

Adler, C. G. ve Coulter, B. L. (1978), Galilei ve Pisa Kulesi Deneyi, *American Journal of Physics 46*, 199-201.

Albert, D. Z. (1992), *Kuantum Mekaniği ve Deneyim* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Arşimet (1987), *Kum Hesapçısı* (aşağıda Heath'de (1897), sayfa: 221-32).

Aristo (1942a), *Birinci Çözümlemeler* (aşağıda Ross, I. Cilt).

Aristo (1942b), *Fizik* (aşağıda Ross, II. Cilt).

Aristo (1942c), *Gökler Üzerine* (aşağıda Ross, II. Cilt).

Aristo (1942d), *Nikomakhos'a Etik* (aşağıda Ross, V. Cilt).

Armitage, A. (1938), *Kopernik: Modern Gökbilimin Kurucusu* (George Allen & Unwin, Londra).

Aspect, A., Dalibard, J. ve Roger, G. (1982), Zamanla Değişen Çözümleyiciler Kullanılarak Bell Eşitsizliklerinin Deneysel Testi, *Physical Review Letters 49*, 1804-7.

Bacon, F. (1952), *Yeni Organon* (Hutchins'te I. Kitap), 30. Cilt.

Baggott, J. E. (1992), *Kuantum Kuramının Anlamı* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

Ball, R. S. (1921), *Zaman ve Gelgit, Ay'ın Aşkı* (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Barone, M. ve Selleri, F. (editörler) (1994), *Temel Fiziğin Sınırları* (Plenum Yayımcılık, New York).

Becker, R. A. (1954), *Kuramsal Mekaniğe Giriş* (McGraw-Hill Şirketleri, New York).

Beer, A. (editör) (1968), *Gökbilimde Manzaralar*, 10 Cilt (Pergamon Yayınları, New York).

Bell, J. S. (1987), *Kuantum Mekaniğinde Söylenebilenler ve Söylenemeyenler* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Beller, M. (1983a), *Kuantum Fiziğinin Yorumlarının Başlangıcı, 1925-1927.* Yayınlanmamış Doktora tezi, Maryland Üniversitesi.

Beller, M. (1983b), Schrödinger'den Önce Matris Kuramı, *Isis 74*, 469-91.

Beller, M. (1985), Pascual Jordan'ın Heisenberg'in Kesin Olarak Belirlenememe İlkesini Buluşu Üzerine Olan Etkisi, *Archive for History of Exact Sciences 33*, 337-49.

Beller, M. (1992), Bohr'un Tamamlayıcılığının Doğuşu: Bağlam ve Söyleşiler, *Studies in History and Philosophy of Science 23*, 147-80.

Ben-Menahem, Y. (1990), Özdeş Betimlemeler, *British Journal for the Philosophy of Science 41*, 261-79.

Bernstein, J. (1976), *Einstein* (Penguin Kitapları, New York).

Bestelmeyer, A. (1907), Spezifische Ladung und Geschwindigkeit der durch Röntgenstrahlen erzeugten Kathodenstrahlen, *Annalen der Physik 22*, 429-47.

Biagioli, M. (1993), *Saray Adamı Galilei: Mutlakiyet Kültüründe Bilimin Uygulaması* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Bitbol, M. ve Darrigol, O. (editörler) (1992), *Erwin Schrödinger: Felsefe ve*

Kuantum Mekaniğinin Doğuşu (Editions Frontiers, Gif-sur-Yvette Cedex, Fransa).

Blackwell, R. J. (1977), Christian Huygens'in *Çarpışan Cisimlerin Hareketi*, *Isis 68*, 574-97.

Blake, R. M., Ducasse, C. J. ve Madden, E. H. (editörler) (1960), *Bilimsel Yöntemin Kuramları: On Dokuzuncu Yüzyıla Dek Rönesans* (Washington Üniversitesi Yayınları, Seattle, WA).

Bloch, F. (1976), Heisenberg ve Kuantum Mekaniğinin İlk Günleri, *Physics Today 29* (12), 23-27.

Bloor, D. (1976), *Bilgi ve Sosyal Söz Sanatları* (Routledge & Kegan Paul, Londra).

Bohm, D. (1951), *Kuantum Kuramı* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).

Bohm, D. (1952), Kuantum Kuramının 'Gizli' Değişkenler Cinsinden Önerilen Bir Yorumu, I ve II, *Physical Review 85*, 166-93.

Bohm, D. (1953), Kuantum Kuramının Nedensel Yorumunda Olasılık Yoğunluğunun $|\emptyset|^2$'e Yaklaştığının Kanıtı, *Physical Review 89*, 458-66.

Bohm, D. ve Hiley, B. J. (1993), *Bölünmemiş Evren: Kuantum Kuramının Ontolojik Bir Yorumu* (Routledge, Londra).

Bohm, D., Hiley, B. J. ve Kaloyerou, P. N. (1987), Kuantum Kuramı İçin Ontolojik Bir Temel, *Physics Reports 144*, 321-75.

Bohr, N. (1913), Atomların ve Moleküllerin Yapısı Üzerine, *Philosophical Magazine 26*, 1-25.

Bohr, N. (1934), *Atomik Kuram ve Doğanın Betimlemesi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Bohr, N. (1935), Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekaniksel Betimlemesi Tam Diye Düşünülebilir mi?, *Physical Review 48*, 696-702. (Wheeler ve Zurek'te (1983, 145-51) yeniden basılmıştır).

Bohr, N. (1949), 'Einstein'la Atomik Fiziğin Epistemolojik Sorunları Üzerine Tartışma' (Schilpp'te, sayfa: 199-241).

Bohr, N. (1985), *Bütün Eserleri*, 6 Cilt (North-Holland Yayımcılık Şirketi, Amsterdam).

Boorse, H. A. ve Motz, L. (editörler) (1966), *Atomun Dünyası*, I. ve II. Ciltler (Basic Books, New York).

Bork, A. M. (1963), Maxwell, Sürülme Akımı ve Simetri, *American Journal of Physics 31*, 854-9.

Born, M. (1926), Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge, *Zeitschrift für Physik* 37, 863-7. (İngilizce çevirisi Wheeler ve Zurek'te (1983, 52-5), Türkçe başlığı 'Çarpışmaların Kuantum Mekaniği Üzerine').

Born, M. (1951), *Huzursuz Evren* (Dover Yayımcılık, New York).

Born, M. (1971), *Born-Einstein Mektupları* (Walker ve Ortakları, New York).

Bose, S. K. (1980), *Genel Göreliliğe Giriş* (Wiley Eastern Limitet, Yeni Delhi).

Brackenridge, J. B. (1995), *Newton'un Dinamiğinin Anahtarı* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Briggs, K. (1987), Kaotik Dinamikte Kolay Deneyler, *American Journal of Physics 55*, 1083-9.

Brody, B. A. (editör) (1970), *Bilim Felsefesinde Okunacak Metinler* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).

Bromberg, J. (1967), Maxwell'in Sürülme Akımı ve Kendi Işık Kuramı, *Archive for History of Exact Sciences 4*, 218-34.

Bucherer, A. H. (1909), Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips, *Annalen der Physik 28*, 513-36.

Buchwald, J. Z. (1985), *Maxwell'den Mikrofiziğe* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Buchwald, J. Z. (1989), *Işığın Dalga*

Kuramının Yükselişi (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Burtt, E. A. (1927), *Modern Fiziksel ilimin Doğa Ötesi Temelleri* (Harcourt Brace & Co., New York).

Butterfield, H. (1965), *Tarihin Whig Yorumu* (W. W. Norton & Co., New York).

Cardwell, D. S. L. (1972), *Batının Teknolojisindeki Dönüm Noktaları* (Bilim Tarihi Yayımcılık, New York).

Caspar, M. (editör) (1937), *Johannes Keplers Gesammelte Werke* (C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, Münih).

Casper, B. M. (1977), Galilei ve Aristo'nun Düşüşü: Tarihsel Bir Adaletsizlik Durumu Mu?, *American Journal of Physics 45*, 325-30.

Cassidy, D. C. (1992), *Belirsizlik: Werner Heisenberg'in Yaşamı ve Bilimi* (W. H. Freeman ve Ortakları, New York).

Chang, H. (1993), Yanlış Anlaşılmış Bir Baş Kaldırı: İkizler Paradoksu Anlaşmazlığı ve Herbert Dingle'ın Bilime Bakışı, *Studies in History and Philosophy of Science 24*, 741-90.

Clagett, M. (1959), *Orta Çağda Mekanik Bilimi* (Wisconsin Üniversitesi Yayınları, Madison, WI).

Clark, R. W. (1972), *Einstein: Yaşamı ve Çağı* (Avon Kitapçılık, New York).

Clauser, J. F. ve Shimony, A. (1978), Bell Teoremi:Deneysel Testler ve Anlamları, *Reports on Progress in Physics 41*, 1881-927.

Clemence, G. M. (1947), Gezegenlerin Hareketlerinde Göreliliğin Etkisi, *Reviews of Modern Physics 19*, 361-4.

Clifton, R. K., Butterfield, J. N. ve Redhead, M. L. G. (1990), Lokal Olmayan Etkiler ve Olası Dünyalar - Yanlış Yöne Atılan Bir Stapp, *British Journal for the Philosophy of Science 41*, 5-58. (ç.n. Başlıkta İng. adım anlamındaki 'step' yerine eleştirdikleri H. P. Stapp'ın soyadını kullanarak bir sözcük oyunu oynanmış.)

Cohen, I. B. (1970), 'Isaac Newton' (Gillispie'de X. Cilt, sayfa: 42-101).

Cohen, I. B. (1971), *Newton'un 'Principia'sına Giriş* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Cohen, I. B. (1980), Newton'un Kütleçekimi Keşfi, *Scientific American 244* (3), 166-79.

Cohen, M. R. ve Drabkin, I. E. (1948), *Yunan Biliminde Kaynak Bir Kitap* (McGraw-Hill Şirketleri, New York).

Cooper, L. (1935), *Aristo, Galilei ve Pisa Kulesi* (Cornell Üniversitesi Yayınları, Ithaca, NY).

Kopernik, N. (1952), *Gökteki Kürelerin Dönüşleri Üzerine* (Hutchins'te 16. Cilt).

Kopernik, N. (1959), Rosen'de *Commentariolus*.

Crowe, M. J. (1990), *Antik Çağlardan Kopernik Devrimine Kadar Dünya Kuramları* (Dover Yayımcılık, New York).

Crowe, M. J. (1994), *Modern Evren Kuramları: Herschel'den Hubble'a* (Dover Yayımcılık, New York).

Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Packard, N. H. ve Shaw, R. S. (1983), Kaos, *Scientific American 255* (6), 46-57.

Cushing, J. T. (1975), *Fiziksel Bilimciler İçin Uygulamalı Analitik Matematik* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Cushing, J. T. (1981), Elektromanyetik Kütle, Görelilik ve Kaufmann Deneyleri, *American Journal of Physics 49*, 1133-49.

Cushing, J. T. (1982), Newton'un *Principia*'sında Kepler'in Yasaları ve Evrensel Kütleçekim, *American Journal of Physics 50*, 617-28.

Cushing, J. T. (1990a), Bilimsel Yöntembilim İlginç Bir Biçimde Zamandan Bağımsız Mıdır?, *British Journal for the Philosophy of Science 41*, 177-94.

Cushing, J. T. (1990b), *Modern Fizikte*

Kuramın Kurulması ve Seçimi: S Matrisi (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Cushing, J. T. (1991), Kuantum Kuramı ve Açıklayıcı Söylev: Anlayış İçin Oyunun Sonu Mu?, *Philosophy of Science 58*, 337–58.

Cushing, J. T. (1994), *Kuantum Mekaniği: Tarihsel Belirsizlik ve Kopenhag Egemenliği* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Cushing, J. T., Fine, A. ve Goldstein, S. (editörler) (1996), *Bohm Mekaniği ve Kuantum Kuramı: Bir Değerlendirme* (Kluwer Akademik Yayımcılık, Dordrecht).

Cushing, J. T. ve McMullin, E. (editörler) (1989), *Kuantum Kuramının Düşünsel Sonuçları: Bell Teoremi Üzerine Düşünceler* (Notre Dame Üniversitesi Yayınları, Notre Dame, IN).

Darrigol, O. (1992), *c-Sayılarından q-Sayılarına* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Darwin, G. H. (1898), *Gelgit Dalgaları ve Güneş Sistemi'ndeki Aynı Türden Olaylar* (Houghton, Mifflin & Co., Boston).

Daston, L. (1988), *Klasik Olasılık ve Aydınlanma* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Dawkins, R. (1986), *Kör Saatçi* (W. W. Norton & Co., New York).

Debs, T. A. ve Redhead, M. L. G. (1996), İkizler 'Paradoksu' ve Eşzamanlılığın Geleneksel Niteliği, *American Journal of Physics 64*, 384–92.

De Duve, C. (1995), *Yaşamsal Toz* (Basic Books, New York).

Defant, A. (1958), *Gel ve Git: Toprağın, Havanın ve Suyun Gelgit Dalgaları* (Michigan Üniversitesi Yayınları, Ann Arbor, MI).

Densmore, D. (1995), *Newton'un* Principia'*sı: Temel Akıl Yürütme* (Yeşil Aslan Yayımcılık, Santa Fe, NM).

Descartes, R. (1905), *Principia Philosophiae* (Adams ve Tannery'de VIII. Cilt).

Descartes, R. (1977a), *Aklın Yönü İçin Kurallar* (Haldane ve Ross'ta).

Descartes, R. (1977b), *Felsefenin İlkeleri* (Haldane ve Ross'ta).

Diacu, F. ve Holmes, P. (1996), *Gökyüzündeki Karşılaşmalar: Kaosun ve Kararlılığın Kökenleri* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Dickson, M. (1993), Gerçeklere Aykırı Bağlılıklar Olmaksızın Stapp'in Teoremi: Herşeye Rağmen Niçin Başarısız Oluyor?, *Studies in History and Philosophy of Science 24*, 791–814.

Dijksterhuis, E. J. (1986), *Dünyanın Betimlemesinin Makineleştirilişi* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Dirac, P. A. M. (1958), *Kuantum Mekaniğinin İlkeleri* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

Dobbs, B. J. T. (1975), *Newton'un Simyasının Temelleri* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Donne, J. (1959), *Gelişen Fırsatlar Üstüne Düşkünlük* (Michigan Üniversitesi Yayınları, Ann Arbor, MI).

Drake, S. (editör) (1957), *Galilei'nin Keşifleri ve İnançları* (Anchor Kitapçılık, Garden City, NY).

Drake, S. (1967), 'Galilei: Bir Biyografik Taslak' (McMullin'de (1967a), sayfa: 52–66).

Dresden, M. (1992), Kaos: Yeni Bir Bilimsel Model – ya da Halkla İlişkiler Yoluyla Bilim?, I. ve II. Bölümler, *The Physics Teacher 30* (1), 10–14, (2), 74–80.

Dugas, R. (1988), *Mekanik Tarihi* (Dover Yayımcılık, New York).

Duhem, P. (1969), *Olguları Kurtarmak* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Duhem, P. (1974), *Fiziksel Kuramın Hedefi ve Yapısı* (Atheneum, New York).

Dürr, D., Goldstein, S. ve Zanghi, N. (1996), 'Kuantum Mekaniğinin Temeli Olarak Bohm Mekaniği' (Cushing *et al.*'de, sayfa: 21-44).

Earman, J. (editör), (1983), *Bilimsel Kuramların Sınanması* (Minnesota Üniversitesi Yayınları, Minneapolis, MN).

Earman, J. (1986), *Belirlenimcilik Üzerine Bir İlk Okuma Kitabı* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Earman, J. ve Norton, J. (editörler) (1997), *Bilimin Evreni: Araştırmalar Üzerine Denemeler* (Pittsburgh Üniversitesi Yayınları, Pittsburgh).

Eddington, A. S. (1920), *Uzay, Zaman ve Kütleçekim* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Edwards, P. (editör) *Felsefe Ansiklopedisi*, 8 Cilt (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Einstein, A. (tarihi belirsiz a), 'Hareket Eden Cisimlerin Elektrodinamiği Üzerine' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 37-65).

Einstein, A. (tarihi belirsiz b), 'Bir Cismin Eylemsizliği İçerdiği Enerjiye Bağlı Mıdır?' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 67-71).

Einstein, A. (tarihi belirsiz c), 'Kütleçekimin Işığın Yayılmasına Olan Etkisi Üzerine' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 97-108).

Einstein, A. (tarihi belirsiz d), 'Genel Görelilik Kuramının Temeli' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 109-64).

Einstein, A. (tarihi belirsiz e), 'Genel Görelilik Kuramında Evrenbilimsel Hususlar' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 174-88).

Einstein, A. (1905a), Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik 17*, 891-921. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (tarihi belirsiz a) bulunmaktadır.) Miller'a (1981, 392-415) da bakınız.

Einstein, A. (1905b), Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?, *Annalen der Physik 17*, 639-41. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (tarihi belirsiz b) bulunmaktadır.)

Einstein, A. (1905c), Die von molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik 17*, 549-60. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (1926) bulunmaktadır.)

Einstein, A. (1907), Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4*, 411-62.

Einstein, A. (1908), Elementare Theorie der Brownschen Bewegung, *Zeitschrift für Elektrochemie 14*, 235-9. (İngilizce çevirisi Boorse ve Motz'da (1966, 587-96), Türkçe başlığı 'Brownian Hareketin Basit Bir Kuramı').

Einstein, A. (1911), Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, *Annalen der Physik 35*, 898-908. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (tarihi belirsiz c) bulunmaktadır.)

Einstein, A. (1916), Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik 49*, 769-822. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (tarihi belirsiz d) bulunmaktadır.)

Einstein, A. (1917a), Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Zeitschrift 18*, 121-8. (İngilizce çevirisi van der Waerden'de (1967, 63-77) ve ter Haar'da (1967, 167-83), Türkçe başlığı 'Işımanın Kuantum Kuramı Üzerine').

Einstein, A. (1917b), Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*

1917, Bölüm I, 142-52. (İngilizceye çevrilmiş olarak Einstein'da (tarihi belirsiz e) bulunmaktadır.)

Einstein, A. (1926), *Brownian Hareketin Kuramı Üzerine Araştırmalar* (Methuen & Co., Londra).

Einstein, A. (1934), *Dünyaya Bakış* (Covici Friede Yayımcılık, New York).

Einstein, A. (1949a), 'Otobiyografik Notlar' (Schilpp'te, sayfa: 1-95).

Einstein, A. (1949b), 'Bu Yardımcı Ciltte Bulunan Denemeler Üzerine Görüşler' (Schilpp'te, sayfa: 663-88).

Einstein, A. (1954a), *Fikirler ve Görüşler* (Crown Yayımcılık, New York).

Einstein, A. (1954b), 'Kuramsal Fiziğin Yöntemi Üzerine' (Einstein'da (1954a), sayfa: 270-6).

Einstein, A. (1954c), 'Maxwell'in Fiziksel Gerçeklik Düşüncesinin Evrimi Üzerindeki Etkisi' (Einstein'da (1973a), sayfa: 266-70).

Einstein, A. (1954d), 'Görelilik Kuramı Nedir?' (Einstein'da (1954a), sayfa: 227-32).

Einstein, A. (1954e), 'Araştırmanın İlkeleri' (Einstein'da (1954a), sayfa: 224-7).

Einstein, A. (1954f), 'Fizikte Uzay, Eter ve Alan Problemi' (Einstein'da (1954a), sayfa: 276-85).

Einstein, A. (1954g), 'Fizik ve Gerçeklik' (Einstein'da (1954a), sayfa: 290-323).

Einstein, A. (1982), Görelilik Kuramını Nasıl Yarattım?, *Physics Today* 35 (8), 45-7.

Einstein, A. ve Infeld, L. (1938), *Fiziğin Evrimi* (Simon ve Schuster, New York).

Einstein, A., Podolsky, B. ve Rosen, N. (1935), Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekaniksel Betimlemesi Tam Olarak Düşünülebilir Mi?, *Physical Review 47*, 777-80. (Wheeler ve Zurek'te (1983, 138-41) yeniden basılmıştır).

Eisberg, R. M. (1961), *Modern Fiziğin Temelleri* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Ellis, G. F. R. ve Williams, R. M. (1988), *Düz ve Eğri Uzay-Zamanlar* (Clarendon Yayımcılık, Oxford).

d'Espagnat, B. (1979), Kuantum Kuramı ve Gerçeklik, *Scientific American 241* (5), 158-81.

Fahie, J. J. (1903), *Galilei, Yaşamı ve Eserleri* (John Murray Yayımcılık, Londra).

Faraday, M. (1952), *Elektrikte Deneysel Araştırmalar* (Hutchins'te), 45. Cilt.

Faye, J. (1991), *Niels Bohr: Mirası ve Kalıtı* (Kluwer Akademik Yayımcılık, Dordrecht).

Feinberg, G. (1965), Cisimlerin Dünya'ya Yakınken Düşüşleri, *American Journal of Physics 33*, 501-2.

Feynman, R. (1965), *Fiziksel Yasanın Karakteri* (MIT Yayınları, Cambridge, MA).

Feynman, R. P. ve Gell-Mann, M. (1958), Fermi Etkileşiminin Kuramı, *Physical Review 109*, 193-8.

Field, J. V. (1988), *Kepler'in Geometrik Kozmolojisi* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Fine, A. (1982a), Gizli Değişkenler, Birleşik Olasılık ve Bell Eşitsizlikleri, *Physical Review Letters 48*, 291-5.

Fine, A. (1982b), Birbirine Dolanma Özelliğinin Çelişkileri: Dolanmış İstatistiğin Şaşırtıcı Durumu *The Journal of Philosophy 79*, 733-47.

Fine, A. (1986a), *Çürük Oyun: Einstein, Gerçekçilik ve Kuantum Kuramı* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Fine, A. (1986b), Doğal Olmayan Tutumlar: Bilime Gerçekçi ve Yararlılıkçı (Enstrümentalist) Bağlılıklar, *Mind 95*, 149-79.

Finocchiaro, M. A. (1989), *Galilei Olayı* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Fock, V. (1950), *Uzay Zaman ve Kütleçekim Kuramı* (Pergamon Yayınları, New York).

Ford, J. (1983), Bir Yazı Tura Atışı Ne Kadar Rastlantısaldır?, *Physics Today 36* (4), 40-7.

Frank, P. (1947), *Einstein: Yaşamı ve Dönemi* (Alfred A. Knopf, New York).

Frank, P. (1949), Einstein'ın Bilim Felsefesi, *Reviews of Modern Physics 21*, 349-55.

Frank, P. (1957), *Bilim Felsefesi* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).

Franklin, A. (1976), *Orta Çağda Eylemsizlik İlkesi* (Colorado Associated Üniversitesi Yayınları, Boulder, CO).

Freud, S. (1965), *Psikoanaliz Üzerine Yeni Başlangıç Dersleri* (W. W. Norton & Co., New York).

Friedman, M. (1992), *Kant ve Kesin Bilimler* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Frisch, D. H. ve Smith, J. H. (1963), Görelilikle Uyuşan Zaman Genişlemesinin _-Mezonlar Kullanılarak Ölçülmesi, *American Journal of Physics 31*, 342-55.

Galilei, G. (1946), *İki Yeni Bilim Üzerine Söyleşiler* (Northwestern Üniversitesi Yayınları, Evanston, IL).

Galilei, G. (1967), *Başlıca İki Dünya Sistemi Üzerine Söyleşi - Ptolemaios & Kopernik* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Gardner, M. R. (1983), 'Newton Öncesi Gökbiliminde Gerçeklik ve Yararlılık (Enstrümentalizm)' (Earman'da, sayfa: 201-65).

Gell-Mann, M. (1981), 'Gelecek İçin Sorular' (Mulvey'de, sayfa: 169-86).

Gershenson, D. E. ve Greenberg, D. A. (editörler) (1964), *Doğal Düşünür*, 3. Cilt (Blaisdell Yayımcılık Şirketi, New York).

Gillispie, C. G. (1960), *Nesnelliğin Ucu* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Gillispie, C. G. (1970-6), *Bilimsel Biyografi Sözlüğü*, 14 Cilt (Charles Scribner'in Oğulları, New York).

Gingerich, O. (editör) (1977), *Evrenbilim + 1* (W. H. Freeman ve Ortakları, San Fransisco).

Gleick, J. (1987), *Kaos: Yeni Bir Bilimin Yapılışı* (Viking Yayımcılık, New York).

Godzinski, Z. (1991), Işığın Girişiminin Son Derece Düşük Şiddetlerdeki Araştırması, *Physics Letters A 153*, 291-8.

Goldberg, A., Schey, H. M. ve Schwartz, J. L. (1967), Bir Boyutlu Kuantum Mekaniksel İletim ve Yansıma Olgularının Bilgisayarla Oluşturulmuş Filmi, *American Journal of Physics 35*, 177-86.

Goldberg, S. (1970-1), Abraham'ın Elektron Kuramı: Deneyle Kuramın Simbiyozu, *Archive for History of Exact Sciences 7*, 7-25.

Goldreich, P. (1972), Gelgit Dalgaları ve Dünya-Ay Sistemi, *Scientific American 226* (4), 43-52.

Goldstein, H. (1950), *Klasik Mekanik* (Addison-Wesley Yayımcılık Şirketi, Reading, MA).

Goodman, N. (1946), Doğrulama Üzerine Bir Soru, *Journal of Philosophy 43*, 383-5.

Goodman, N. (1965), *Gerçek, Kurgu ve Öngörü* 2. Baskı (Bobbs-Merrill Şirketi, Indianapolis, IN).

Gott, J. R., Gunn, J. E., Schramm, D. N. ve Tinsley, B. M. (1977), 'Evren Sonsuza Dek Genişleyecek Mi?' (Gingerich'te, sayfa: 82-93). (Özgün olarak *Scientific American 234* (3) (1976), 62-79'da çıkmıştır.)

Gould, S. J. (1989), *Harika Hayat: Burgess Yumuşak Kayası ve Tarihin Doğası* (W. W. Norton & Co., New York).

Green, A. W. (1966), *Sir Francis Bacon* (Twayne Yayımcılık, New York).

Guckenheimer, J. ve Holmes, P. (1983), *Doğrusal Olmayan Salınımlar, Dinamik Sistemler ve Vektör Alanlarının*

Dallanmaları (Springer-Verlag, New York).

Guye, C.-E. ve Lavanchy, C. (1915), Vérification expérimentale de la formule de Lorentz-Einstein par les rayons cathodiques de grand vitesse, *Comptes Rendus 161*, 52-5.

Hacking, I. (1975), *Olasılığın Ortaya Çıkışı* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Londra).

Hafele, J. C. (1972), Dünyanın Çevresinde Yapılan Yolculuklardaki Görelilikle Uyuşan Zaman, *American Journal of Physics 40*, 81-5.

Hafele, J. C. ve Keating, R. E. (1972), Dünya'nın Çevresinde Yolculuk Eden Atomik Saatler, *Science 177*, 166-70.

Haldane, E. S. ve Ross, G. R. T. (editörler) (1977), *Descartes'in Düşünsel Eserleri*, I. Cilt (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Hanle, P. A. (1979), Heisenberg'den Önce Kesin Olarak Belirlenememe: Franz Exner ve Erwin Schrödinger Olayı, *Historical Studies in the Physical Sciences 10*, 225-69.

Harding, S. G. (editör) (1976), *Kuramlar Çürütülebilirler Mi?* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Harman, P. M. (1982), *Enerji, Kuvvet ve Madde: On Dokuzuncu Yüzyıl Fiziğinin Kavramsal Gelişimi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, New York).

Harrison, E. R. (1981), *Evrenbilim, Evrenin Bilimi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Harrison, E. R. (1985), *Evrenin Maskeleri* (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Harrison, E. R. (1986), Newton ve Sonsuz Evren, *Physics Today* 39 (2), 24-32.

Harvey, W. (1952), *John Ruilan'a İkinci Bir Yazılı Söylev* (Hutchins'te, 28. Cilt).

Heath, T. L. (editör) (1896), *Pergeli Apollonyus: Konik Kesitler Üzerine Ayrıntılı Bir İnceleme* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Heath, T. L. (editör) (1897), *Arşimet'in Eserleri* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Heath, T. L. (1981a), *Samos'lu Aristarchus* (Dover Yayımcılık, New York).

Heath, T. L. (1981b), *Yunan Matematiğinin Tarihi*, I. ve II. Ciltler (Dover Yayımcılık, New York).

Heilbron, J. L. (1985), Jagdish Mehra ve Helmut Rechenberg'in '*Kuantum Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi*' Kitabının Eleştirisi, *Isis* 76, 388-93.

Heilbron, J. L. (1988), 'Kopenhag Ruhunun İlk Misyonerleri' (Ullmann-Margalit'te, sayfa: 201-33).

Heilbron, J. L. ve Kuhn, T. S. (1969), Bohr Atomunun Başlangıcı, *Historical Studies in the Physical Sciences 1* (Pennsylvania Üniversitesi Yayınları, Philadelphia), sayfa: 211-90.

Heisenberg, W. (1927), Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik 43*, 172-98. (İngilizce çevirisi Wheeler ve Zurek'te (1983, 62-84), Türkçe başlığı 'Kuantum Kinematiğinin ve Mekaniğinin Fiziksel İçeriği').

Heisenberg, W. (1958), *Fizik ve Felsefe* (Harper & Row, New York).

Heisenberg, W. (1971), *Fizik ve Ötesi* (Harper & Row, New York).

Hempel, C. G. (1945), Doğrulama Mantığında İncelemeler, *Mind* 54, 1-26 ve 97-121. (Hempel'de (1965) de yeniden basılmıştır.)

Hempel, C. G. (1965), *Bilimsel Açıklamanın Yönleri* (The Free Yayımcılık, New York).

Hendry, J. (1984), *Kuantum Mekaniğinin Yaratılışı ve Bohr-Pauli Söyleşisi* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Herivel, J. (1965), *Newton'un* Principia'*nın Arka Planı* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

Herschel, J. F. (1830), *Doğa Felsefesinin İncelemesi Üzerine Yazılı Bir Ön Söylev* (Longman, Rees, Orme, Brown & Green, Londra).

Hertz, H. (1900), *Elektrik Dalgaları* (Macmillan Yayımcılık Şirketi, Londra).

Holland, P. R. (1993), *Hareketin Kuantum Kuramı* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Holton, G. (1968), Mach, Einstein ve Gerçekliğin Aranışı, *Daedalus 97* (2), 636-73.

Holton, G. (1973), *Bilimsel Düşüncenin Tematik Kökenleri* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Holton, G. (1978), *Bilimsel Hayal Gücü: Durum İncelemeleri* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Holton, G. (1996), *Einstein, Tarih ve Diğer Tutkular* (Addison-Wesley Yayımcılık Şirketi, Reading, MA).

Hon, G. (1996), 'Gödel, Einstein, Mach: Fiziksel Kuramın Tamlığı' (Schimanovich *et al.*'de).

Howard, D. (1997), 'Maya Peçesinin Ardından Bir Bakış: Einstein, Schopenhauer ve Fiziksel Sistemlerin Bireyselleştirilmesi İçin Bir Zemin Olarak Uzay Kavramının Tarihsel Arka Planı' (Earman ve Norton'da).

Howson, C. (editör) (1976), *Fiziksel Bilimlerde Yöntem ve Değerlendirme* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Hughes, R. J. (1990), 'Enerjinin Tartılması' Üzerine Bohr-Einstein Arasındaki Tartışma ve Özdeşlik İlkesi, *American Journal of Physics 58*, 826-8.

Hume, D. (1902), *İnsan Anlayışıyla İlgili Bir Soruşturma* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

Hutchins, R. M. (editör) (1952), *Batı Dünyasının Büyük Kitapları* (Brittannica Ansiklopedisi, Chicago).

Huygens, C. (1920), *Christiaan Huygens'in Tüm Eserleri* (Fra. özgün eser '*Ouvres Complètes de Christiaan Huygens*'), 14. Cilt (Martinus Nijhoff, Hague).

Huygens, C. (1934), *Christiaan Huygens'in Tüm Eserleri* (Fra. özgün eser '*Ouvres Complètes de Christiaan Huygens*'), 18. Cilt (Martinus Nijhoff, Hague).

Huygens, C. (1952), *Işık Üzerine Ayrıntılı Bir İnceleme* (Hutchins'te 34. Cilt).

Jackson, J. D. (1975), *Klasik Elektrodinamik*, 2. Baskı (John Wiley ve Oğulları, New York).

Jaki, S. L. (1966), *Fiziğin İlgisi* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Jammer, M. (1957), *Kuvvet Kavramları* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Jammer, M. (1961), *Kütle Kavramları* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Jammer, M. (1969), *Uzay Kavramları*, 2. Baskı (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Jammer, M. (1974), *Kuantum Mekaniğinin Felsefesi* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Jammer, M. (1989), *Kuantum Mekaniğinin Kavramsal Gelişimi*, 2. Baskı (Tomash Yayımcılık Şirketi, New York).

Jefferson, T. (1952), *Bağımsızlık Bildirisi* (Hutchins'te 43. Cilt).

Jensen, R. V. (1987), Klasik Kaos, *American Scientist 75* (2), 168-81.

Kudüs İncili (1966), (Doubleday & Co., Garden City, NY).

Jevons, W. S. (1958), *Bilimin İlkeleri: Mantık ve Bilimsel Yöntem Üzerine Bir İnceleme* (Dover Yayımcılık, New York).

Jowett, B. (editör) (1892), *Platon'un Söyleşileri*, I.-V. Ciltler (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Kamefuchi, S., Ezawa, H., Murayama, Y., Namiki, M., Nomura, S., Ohnuki, Y., ve Yojima, T. (editörler) (1984), *Yeni Teknolojinin Işığı Altında Kuantum Mekaniğinin Temelleri Üzerine Uluslararası Sempozyumun Tutanakları* (Japonya Fizik Derneği, Tokyo).

Kaufmann, W. (1902), Die elektromagnetische Masse des Elektrons, *Physikalische Zeitschrift 4*, 54-7.

Kaufmann, W. (1905), Über die Konstitution des Elektrons, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 45*, 949-56.

Kellert, S. H. (1993), *Kaostan Sonra* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Kelvin, Lord (1901), Isının ve Işığın Dinamik Kuramının Üstündeki On Dokuzuncu Yüzyıl Bulutları, *Philospobical Magazine 2*, 1-40. (Kelvin'de (1904) yeniden basılmıştır.)

Kelvin, Lord (1904), *Moleküler Dinamik ve Işığın Dalga Kuramı Üzerine Baltimore Konferansları* (C. J. Clay & Oğulları, Londra)

Kepler, J. (1937), *Astronomia Nova* (*Yeni Gökbilim*) (Caspar'da, 3. Cilt).

Kepler, J. (1952a), *Kopernik'in Gökbiliminin Kısa Özeti* (Hutchins'te, 16. Cilt).

Kepler, J. (1952b), *Dünyanın Armonileri* (Hutchins'te, 16. Cilt).

Kepler, J. (1992), *Yeni Gökbilim* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Keynes, J. M. (1963), 'Newton, the Man' ('İnsan Newton') (*Essays in Biography*'de, (W. W. Norton & Co., New York) sayfa: 310-23).

Klein, M. J. (1962), Max Planck ve Kuantum Mekaniğinin Başlangıcı, *Archive for History of Exact Sciences 1*, 459-79.

Klein, M. J. (1964), 'Einstein ve Dalga-Parçacık İkiliği' (Gershenson ve Greenberg'de, sayfa: 1-49).

Kockelmans, J. J. (editör) (1968), *Bilim Felsefesi* (The Free Yayımcılık, New York).

Koestler, A. (1959), *Uyurgezerler* (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Kourany, J. A. (editör) (1987), *Bilimsel Bilgi* (Wadsworth Yayımcılık Şirketi, Belmont, CA).

Koyré, A. (1957), *Kapalı Dünyadan Sonsuz Evrene* (Johns Hopkins Üniversitesi Yayınları, Baltimore, MD).

Kuhn, T. S. (1957), *Kopernik Devrimi* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Kuhn, T. S. (1970), *Bilimsel Devrimlerin Yapısı*, 2. Baskı (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Kuhn, T. S. (1978), *Kara Cisim Kuramı ve Kuantum Süreksizliği: 1894-1912* (Clarendon Yayımcılık, Oxford).

Kuntz, P. G. (editör) (1968), *Düzen Kavramları* (Washington Üniversitesi Yayınları, Seattle, WA).

Lakatos, I. (1970), 'Yanlışlama ve Bilimsel Araştırma Programlarının Yöntembilimi' (Lakatos ve Musgrave'de, sayfa: 91-196).

Lakatos, I. (1976), 'Bilim Tarihi ve Bilim Tarihinin Akla Yatkın Bir Biçimde Yeniden Kuruluşları' (Howson'da, sayfa: 1-39).

Lakatos, I. (1978), *Bilimsel Araştırma Programlarının Yöntembilimi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Lakatos, I. ve Musgrave, A. (editörler) (1970), *Eleştiriler ve Bilginin Büyümesi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Londra).

Lakatos, I. ve Zahar, E. (1978), 'Kopernik'in Araştırma Programı Niçin Ptolemaios'unkinin Yerini Aldı?' (Lakatos'ta (1978), sayfa: 168-92).

Landau, L. D. ve Lifshitz, E. M. (1977), *Kuantum Mekaniği: Göreliliğe Uyarlanmamış Kuram*, 3. Baskı (Pergamon Yayınları, Oxford).

Laplace, P. S. (1886), *Théorie Analytique des Probabilités* (*Laplace'ın Tüm Eserleri*'nde, VII. Cilt (Fra. özgün eser '*Ouevres-Complétes de Laplace*')) (Gauthier-Villars, Paris).

Laplace, P. S. (1902), *Olasılıklar Üzerine Düşünsel Bir Deneme* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Laudan, L. (1981), *Bilim ve Hipotez* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Laudan, L. (1984), *Bilim ve Değerler* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Laudan, L. ve Leplin, J. (1991), Deneysel Özdeşlik ve Kesin Olarak Belirlenememe, *The Journal of Philosophy 88* (9), 449–72.

Leighton, R. B. (1959), *Modern Fiziğin İlkeleri* (McGraw-Hill Şirketleri, New York).

Leplin, J. (editör) (1984), *Bilimsel Gerçekçilik* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Livingston, D. M. (1973), *Işığın Efendisi: Albert A. Michelson'un Biyografisi* (Charles Scribner'in Oğulları, New York).

Longair, M. (1984), *Fizikte Kuramsal Kavramlar* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Lorentz, H. A. (tarihi belirsiz), 'Michelson'un Girişim Deneyi' (Lorentz *et al.*'de, sayfa: 3–7).

Lorentz, H. A. (1952), *Elektron Kuramı* (Dover Yayımcılık, New York).

Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H. ve Weyl, H. (tarihi belirsiz), *Görelilik İlkesi* (Dover Yayımcılık, New York).

Lovejoy, A. O. (1936), *Varoluşun Büyük Zinciri* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Lucretius (1952), *Şeylerin Doğası Üzerine* (Hutchins'te, 12. Cilt).

Luria, S. E. (1973), *Yaşam – Bitmemiş Deney* (Charles Scribner'in Oğulları, New York).

Mach, E. (1960), *Mekanik Bilimi*, 6. Baskı (Open Court Yayımcılık Şirketi, La Salle, IL).

MacKinnon, E. M. (1982), *Bilimsel Açıklama ve Atomik Fizik* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Magie, W. F. (1963), *Fizikte Bir Kaynak Kitap* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Mansouri, R. ve Sexl, R. U. (1977a), Özel Göreliliğin Bir Test Kuramı: I. Eşzamanlılık ve Saatlerin Senkronize Olması, *General Relativity and Gravitation 8*, 497–513.

Mansouri, R. ve Sexl, R. U. (1977b), Özel Göreliliğin Bir Test Kuramı: II. Birinci Düzeydeki Testler, *General Relativity and Gravitation 8*, 515–24.

Mansouri, R. ve Sexl, R. U. (1977c), Özel Göreliliğin Bir Test Kuramı: III. İkinci Düzeydeki Testler, *General Relativity and Gravitation 8*, 809–14.

Manuel, F. E. (1968), *Isaac Newton'un Bir Portresi* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Maudlin, T. (1994), *Kuantum Lokal Olmama Özelliği ve Görelilik* (Basil Blackwell Yayımcılık, Oxford).

Maudlin, T. (1996), 'Kuantum Dünyasında Uzay-Zaman' (Cushing *et al.*'de, sayfa: 285–307).

Maxwell, J. C. (1890), *James Clerk Maxwell'in Bilimsel Makaleleri* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Maxwell, J. C. (1954), *Elektrik ve Manyetizma Üzerine Ayrıntılı Bir İnceleme* (Dover Yayımcılık, New York).

Maxwell, N. (1985), Olasılıkçılık ile Özel Görelilik Bağdaşmaz Mı?, *Philosophy of Science 52*, 23–43.

McCauley, J. L. (1993), *Kaos, Dinamik ve Fraktallar* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

McMullin, E. (editör) (1967a), *Galilei, Bilim Adamı* (Basic Books, New York).

McMullin, E. (1967b), 'Giriş: Galilei, Bilim Adamı' (McMullin'de (1967a), sayfa: 3-51).

McMullin, E. (1968), 'Platon ve Aristo'da Kozmik Düzen' (Kuntz'da, sayfa: 63-76).

McMullin, E. (1978a), *Newton'un Madde ve Etkinlik Üzerine Düşünceleri* (Notre Dame Üniversitesi Yayınları, Notre Dame, IN).

McMullin, E. (1978b), 'Bilim Felsefesi ve Bunun Akla Uygun Olarak Yeniden Oluşturulması' (Radnitzky ve Andersson'da, sayfa: 221-52).

McMullin, E. (1984), 'Bilimsel Gerçekçilik İçin Bir Dava' (Leplin'de, sayfa: 8-40).

Melchior, P. (1966), *Dünya Gelgitleri* (Pergamon Yayınları, Oxford).

Meyerson, E. (1930), *Özdeşlik ve Gerçeklik* (George Allen & Unwin, Londra).

Mill, J. S. (1855), *Mantığın Sistemi* (Harper & Kardeşleri, New York).

Miller, A. I. (1981), *Albert Einstein'ın Özel Görelilik Kuramı: Ortaya Çıkış (1905) ve Baştaki Yorumu (1905-11)* (Addison-Wesley Yayımcılık Şirketi, Reading, MA).

Monod, J. (1971), *Rastlantı ve Zorunluluk* (Alfred A. Knopf, New York).

Moore, W. (1989), *Schrödinger: Yaşam ve Düşünce* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

More, L. T. (1934), *Isaac Newton, Bir Biyografi* (Charles Scribner'in Oğulları, New York).

Moulton, F. R. (1914), *Gök Cisimlerinin Mekaniğine Giriş* (Macmillan Yayımcılık Şirketi, New York).

Mulvey, J. H. (editör) (1981), *Maddenin Doğası* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

Nelson, E. (1966), Schrödinger Denkleminin Newton Mekaniğinden Çıkartılışı, *Physical Review 150*, 1079-85.

Nelson, E. (1967), *Brownian Hareketin Dinamik Kuramları* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Neugebauer, O. (1968), 'Kopernik'in Gezegenlerle İlgili Kuramı Üzerine' (Beer'de, sayfa: 89-103).

Neugebauer, O. (1969), *Antik Çağlardaki Kesin Bilimler* (Dover Yayımcılık, New York).

Neumann, G. (1914), Die träge Masse schnell bewegter Elektronen, *Annalen der Physik 45*, 529-79.

Newton, I. (1934), *Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri ve Dünyanın Düzeni* (Kaliforniya Üniversitesi Yayınları, Berkeley, CA).

Newton, I. (1952), *Optics* (Hutchins'te, 34. Cilt).

Pais, A. (1982), *Tanrı'yı Anlaması Güçtür* (Clarendon Yayımcılık, Oxford).

Park, D. (1988), *Nasıl ve Niçin* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Pauli, W. (1981), *Görelilik Kuramı* (Dover Yayımcılık, New York).

Peacock, G. (editör) (1855), *Rahmetli Thomas Young'ın Çeşitli Eserleri*, I. Cilt (John Murray Yayımcılık, Londra).

Pederson, O. (1993), *İlk Zamanlarda Fizik ve Gökbilim*, gözden geçirilmiş baskı (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Peres, A. (1978), Yapılmamış Deneylerin Sonuçları Olmaz, *American Journal of Physics 46*, 745-7.

Petruccioli, S. (1993), *Atomlar, Eğretilemeler (Metaforlar) ve Paradokslar* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Pickering, A. (1984), *Kuarkları Kurmak: Parçacık Fiziğinin Sosyolojik Bir Tarihi* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Planck, M (1906a), Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 8*, 136-41.

Planck, M (1906b), Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der _-Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 8*, 418-32.

Planck, M (1907), Nachtrag zu der Besprechung der Kaufmannschen Ablenkungsmessungen, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 9*, 301-5.

Planck, M (1949), *Bilimsel Otobiyografi ve Diğer Makaleler* (Felsefe Kütüphanesi, New York).

Platon (1892), *Timaeus* (Jowett'te III. Cilt, sayfa: 437-515).

Poincaré, H. (1952), *Bilim ve Hipotez* (Dover Yayımcılık, New York).

Popper, K. R. (1965), *Bilimsel Buluşun Mantığı* (Harper & Row, New York).

Popper, K. R. (1968), *Varsayımlar ve Çürütmeler* (Harper & Row, New York).

Pound, R. V. ve Rebka, G. A. (1960), Fotonların Görünürdeki Ağırlığı, *Physical Review Letters 4*, 337-41.

Prigogine, I. ve Stengers, I. (1984), *Kaostan Çıkan Düzen* (Bantam Books, New York).

Przibram, K. (editör) (1967), *Dalga Mekaniği Üzerine Kısa Makaleler* (Felsefe Kütüphanesi, New York).

Ptolemaios (1952), *Almagest* (Hutchins'te, 16. Cilt).

Quine, W. V. (1951), Ampirisizmin İki Dogması, *The Philospobical Review 60*, 20-43.

Quine, W. V. (1990), *Gerçeğin Peşinde* (Harvard Üniversitesi Yayınları, Cambridge, MA).

Quirino, C. (1963), *Filipinlerin Haritacılığı* (N. Israel, Amsterdam).

Radnitzky, G. ve Andersson, G. (editörler) (1978), *Bilimde İlerleme ve Akla Uygunluk* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Rasband, S. N. (1990), *Doğrusal Olmayan Sistemlerin Kaotik Dinamiği* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Redhead, M. L. G. (1987), *Tam Olmama, Lokal Olmama ve Gerçekçilik* (Clarendon Yayımcılık, Oxford).

Reitz, J. R. ve Milford, F. J. (1967),*Elektromanyetik Kuramın Temelleri*, 2. Baskı (Addison-Wesley Yayımcılık Şirketi, New York).

Rohrlich, F. ve Hardin, L. (1983), Kanıtlanmış Kuramlar, *Philosophy of Science 50*, 603-17.

Ronan, C. A. (1974), *Galilei* (G. P. Putnam'ın Oğulları, New York).

Rose, V. (1886), *Aristotelis Fragmenta* (B. G. Teubner, Leipzig).

Rosen, E. (editör) (1959), *Kopernik'in Üç Ayrıntılı İncelemesi* (Dover Yayımcılık, New York).

Rosenfeld, L. (1965), Newton ve Kütleçekim Yasası, *Archive for History of Exact Sciences 2*, 365-86.

Ross, W. D. (editör) (1942), *Öğrenciler İçin Oxford Aristo'su*, I.-VI. Ciltler (Oxford Üniversitesi Yayınları, New York).

Russell, B. (1917), *Mistiklik ve Mantık*, 2. Baskı (George Allen & Unwin, Londra).

Sachs, M. (1971), Saat Paradoksunun Bir Çözümü, *Physics Today 24* (9), 23-9. (Saat 'Paradoksunda' Yanıtlar - Çoğunluğun Görüşü, *Physics Today* 25 (1) (1972), 9-15, 47-51.)

Sambursky, S. (1975), *Socrates'in Öncesindekilerden Kuantum Fizikçilerine Dek Fiziksel Düşünce* (Pica Yayımcılık, New York).

de Santillana, G. (1955), *Galilei'nin Suçu* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Schilpp, P. A. (editör) (1949), *Albert Einstein: Düşünür-Bilim Adamı; Yaşayan Düşünürlerin Kütüphanesi*, 16. Cilt (Open Court Yayımcılık Şirketi, La Salle, IL).

Schimanovich, W., Buldt, B, Köhler, E. ve Weibel, P. (editörler) (1996), *Wahrheit und Beweisbarkeit. Leben und Werk Kurt Gödels* (Hölder-Pichler-Tempsky, Viyana).

Schrödinger, E. (1935), Die Gegenwartige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften 23*, 807-12, 823-8, 844-9. . (İngilizce çevirisi Wheeler ve Zurek'te (1983, 152-67), Türkçe başlığı 'Kuantum Mekaniğinde Şu Andaki Durum'.)

Schrödinger, E. (1944), *Yaşam Nedir?* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Schuster, H. G. (1988), *Belirlenimci Kaos*, 2. gözden geçirilmiş baskı (VCH, New York).

Segre, M. (1980), Galilei'nin Fiziğinde Deneyin Rolü, *Archive for History of Exact Sciences 23*, 227-52.

Segre, M. (1989), Galilei, Viviani ve Pisa Kulesi, *Studies in History and Philosophy of Science 20*, 435-51.

Selleri, F. (1990), *Kuantum Paradoksları ve Fiziksel Gerçeklik* (Kluwer Akademik Yayımcılık, Dordrecht).

Selleri, F. (1994), 'Özel Göreliliğe Özdeş Kuramlar' (Barone ve Selleri'de, sayfa: 181-92).

Shimony, A. (1984), 'Kontrol Edilebilir ve Kontrol Edilemez Lokal Olmama Özelliği' (Kamefuchi *et al.*'de, sayfa: 225-30).

Shipman, H. L. (1976), *Kara Delikler, Kuazarlar ve Evren* (Houghton Mifflin Şirketi, Boston, MA).

Smith, A. J. (ediör) (1974), *John Donne, Tüm İngilizce Şiirleri* (Allen Lane, Londra).

de Sitter, W. (1917), Einstein'ın Kütleçekim Kuramı ve Bu Kuramın Gökbilimsel Sonuçları Üzerine, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 78*, 3-28.

Stapp, H. A. (1989), 'Kuantum Lokal Olmama Özelliği ve Doğanın Betimlemesi' (Cushing ve McMullin'de, sayfa: 154-74).

Stapp, H. A. (1990), 'Lokal Olmayan Etkiler ve Olası Dünyalar' Üzerine Yorumlar, *British Journal for the Philosophy of Science 41*, 59-72.

Stein, H. (1991), Görelilik Kuramı ve Geleceğin Açıklığı Üzerine, *Philosophy of Science 58*, 147-67.

Stewart, I. (1989), *Tanrı Zar Atar Mı?* (Basil Blackwell Yayımcılık, Oxford).

Tangherlini, F. R. (1961), Genel Görelilik Kuramına Giriş, *Supplemento del Nuovo Cimento 20*, 1-86.

Taylor, E. F. ve Wheeler, J. A. (1966), *Uzay-zaman Fiziği* (W. H. Freeman ve Ortakları, San Fransisco).

ter Haar, D. (1967), *Eski Kuantum Mekaniği* (Pergamon Yayınları, Londra).

Thayer, H. S. (editör) (1953), *Newton'un Doğa Felsefesi* (Hafner Yayımcılık, New York).

Thompson, J. M. T. ve Stewart, H. B. (1986), *Doğrusal Olmayan Dinamik ve Kaos* (John Wiley ve Oğulları, New York).

Tolstoy, I. (1982), *James Clerk Maxwell* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Truesdell, C. (1960-2), Akıl Çağının Rasyonel Mekaniğini Yeniden Keşfetmeye Yönelik Bir Program, *Archive for History of Exact Sciences 1*, 3-36.

Ullmann-Margalit, E. (editör) (1988), *Derin Düşüncedeki Bilim* (D. Reidel Yayımcılık Şirketi, Dordrecht).

Valentini, A. (1996), 'Alanların, Kütleçekimin ve Evrenbilimin Pilot Dalga Kuramı' (Cushing *et al.*'de, sayfa: 45-66).

Valentini, A. (1997), *Klasik, Kuantum ve Kuantum Altı Fiziğin Pilot Dalga Kuramı Üzerine* (Springer-Verlag, Berlin).

van der Waerden, B. L. (editör) (1967), *Kuantum Mekaniğinin Kaynakları* (North-Holland Yayımcılık Şirketi, Amsterdam).

van Fraassen, B. C. (1980), *BilimselGörüntü* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford).

van Woodward, C. (1986), Rüzgar Gibi Geçti, *The New York Review of Books*, 33 (12), 3-6.

Vogt, E. (1996), Kepler'in Yasalarının Kolay Çıkartılışı, *American Journal of Physics 64*, 392-6.

von Neumann, J. (1955), *Kuantum Mekaniğinin Matematiksel Temelleri* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Waldrop, M. M. (1991), Evrenbilimciler Boşlukları Doldurmaya Başlıyor, *Science 251*, 30-1.

Watkins, J. (1978), 'Bilimsel Bilgiye Popperci Yaklaşım' (Radnitzky ve Andersson'da, sayfa: 23-43).

Watson, J. D. (1970), *Genlerin Moleküler Biyolojisi*, 2. Baskı (W. A. Benjamin, New York).

Weimer, W. (1975), Sonuç Çıkarmanın ve Beklentinin Psikolojisi: Bazı Ön Düşünceler, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, VI. Cilt (Minnesota Üniversitesi Yayınları, Minneapolis, MN), sayfa: 430-86.

Weinberg, S. (1977), *İlk Üç Dakika* (Basic Books, New York).

Weinstock, R. (1982), Yüzyıllardır Süren Bir Mitin Parçalara Ayrılması: Newton'un *Principia*'sı ve Ters-Kare Yörüngeler, *American Journal of Physics 50*, 610-17.

Weisskopf, V. F. (1960), Hızla Hareket Eden Bir Cismin Görsel Görünüşü, *Physics Today 13* (9), 24-7.

Westfall, R. S. (1962), Newton'un Doğa Felsefesinin Temelleri, *British Journal for the Philosophy of Science 1*, 171-82.

Westfall, R. S. (1971), *Newton'un Fiziğinde Kuvvet* (American Elsevier, New York).

Westfall, R. S. (1980a), Newton'un Buluşlar Yaptığı Harika Yıllar ve Bunların (Kötü) Yan Etkileri: Mite Karşı El Yazmaları, *Isis 71*, 109-21.

Westfall, R. S. (1980b), *Never at Rest. Isaac Newton'un Bir Biyografisi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge). (Bu kitabın başlığıyla ilgili olarak 7. Konu'nun sonunda Yararlı Kaynaklar kısmındaki nota bakınız.)

Westfall, R. S. (1989), *Galilei'nin Yargılanması Üzerine Denemeler* (Notre Dame Üniversitesi Yayınları, Notre Dame, IN).

Wheeler, J. A. ve Zurek, W. H. (editörler) (1983), *Kuantum Kuramı ve Ölçüm* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, NJ).

Whitaker, A. (1995), *Einstein, Bohr ve Kuantum İkilemi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

White, H. E. (1934), *Atomik Spektruma Giriş* (McGraw-Hill Şirketleri, New York).

Whitehead, A. N. (1967), *Bilim ve Modern Dünya* (The Free Yayımcılık, New York).

Whiteside, D. T. (1964), Newton'un Gezegenlerin Hareketi Üzerine başlangıçtaki Düşünceleri: Taze Bir Bakış, *British Journal for the Philosophy of Science 2*, 117-37.

Whiteside, D. T. (editör) (1967-76), *Isaac Newton'un Matematiksel Makaleleri*, I.-VII. Ciltler (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Whitrow, G. (editör) (1973), *Einstein: İnsan Olarak Einstein ve Başardıkları* (Dover Yayımcılık, New York).

Whittaker, E. (1973), *Eter ve Elektrik Kuramlarının Tarihi*, I. ve II. Ciltler (Humanities Uluslararası Yayınları, New York).

Wylie, F. E. (1979), *Gelgit Dalgaları ve Ay'ın Çekimi* (Stephen Greene

Yayımcılık, Brattleboro, VT).

Young, T. (1845), *Doğa Felsefesi Üzerine Bir Dizi Konferans*, I. Cilt (Taylor & Walton, Londra).

Zahar, E. (1976), 'Niçin Einstein'ın Programı Lorentz'inkinin Yerini Aldı?' (Howson'da, sayfa: 211–75).

Zahar, E. (1978), "'Çok Önemli" Deneyler: Bir Durum İncelemesi' (Radnitzky ve Andersson'da, sayfa: 71–97).

Zahar, E. (1989), *Einstein'ın Devrimi: Kendi Kendine Öğrenme Yönteminde Bir İnceleme* (Open Court Yayımcılık Şirketi, La Salle, IL).

Ziman, J. (1978), *Güvenilir Bilgi* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge).

Yazar Dizini

Bu dizin, yalnızca yazarlara göre listelenmiş atıf referanslarını içermektedir. Metinde ortaya çıkan gerçek isimler ya da aslında aynı şekilde Notlar kısmında ele alınanlar, bundan sonra gelen konu dizininde bulunmaktadır.

A

Adler, C. G., 71
Andersson, G., 288
Aristo, 157, 271, 282
Armitage, A.,
Aspect, A., 302

B

Bacon, F., 255
Baggott, J., 160, 182, 193, 219
Ball, R. S.,
Becker, R. A., 43
Bell, J. S., 159, 202, 210
Beller, M., 160
Ben-Menahem, Y., 303
Bernstein, J., 88, 295
Bestelmeyer, A., 56
Biagioli, M.,
Bitbol, M., 160
Blackwell, R. J.,
Blake, R. M.,
Bloor, D., 304
Bohm, D., 202, 213, 221
Bohr, N., 135, 142, 145
Boorse, H. A., 291
Bork, A. M., 290
Born, M., 152, 205
Bose, S. K., 132, 295
Brackenridge, J. B.,
Bromberg, J., 290
Bucherer, A. H., 42
Buchwald, J. Z.,, 21, 290
Burtt, E. A., 287, 304
Butterfield, H., 254

C

Cardwell, D. S., 290
Cassidy, D. C., 298, 303
Chang, H., 104
Clark, R. W. , 88
Clauser, J. F., 135
Clemence, G. M., 295
Clifton, R. K., 301
Crowe, M. J., 131
Cushing, J. T., 61, 160, 219

D

Darrigol, O., 160
Dawkins, R., 288
Debs, T. A., 104, 294
Descartes, R., 5, 271
Dickson, M., 301
Dirac, P. A. M., 156, 170
Dobbs, B. J. T.,
Duhem, P., 241
Dürr, D., 302
De Duve, C., 288, 305

E

Eddington, A. S., 125
Einstein, A., 36, 43, 44, 51-55, 58, 61, 65, 67-113, 115,119,121,123, 125,126,135,145,154-160, 184, 187,192,198, 202-206, 211,219, 230-234,245, 252,253,259-265, 287, 292-298, 300, 303-305
Eisberg, R. M., 298
Ellis, G. F. R., 132
Yeni Britannica Ansiklopedisi,18
d'Espagnat, B., 198

F

Faraday, M., 3, 10, 15, 38, 75
Faye, J., 297
Feynman, R. , 182, 201
Fine, A., 219, 287, 302

Fock, V., 293
Frank, P ., 88, 262, 274
Freud, S., 283
Friedman, M. , 119, 121
Frisch, D. H., 293

G

Galilei, G., 272, 284
Gell-Mann, M., 201, 292
Gingerich, O., 131
Godzinski, Z., 299
Goldberg, S., 61
Goldstein, S., 240
Goodman, N., 304
Gott, J. R., 295
Gould, S. J., 270, 304
Guye, C.-E., 292

H

Hafele, J. C., 294
Hanle, P. A., 303
Harding, S. G., 303
Harman, P. M.,21
Harrison, E. R., 131
Harvey, W., 271
Heilbron, J. L.,160,297
Heisenberg, W.,152, 170, 174, 185, 201, 205, 227
Hempel, C. G., 274, 277
Hendry, J.,298
Hertz, H., 3, 69, 259, 273
Hiley, B. J., 240
Holland, P. R., 34
Holton, G., 288
Hon, G., 295
Howson, C., 288, 305
Hughes, R. J., 299
Hume, D., 72, 73, 264, 271
Huygens, C., 7

I

Infeld, L., 295

J

Jackson, J. D., 40, 290, 291, 294
Jammer, M., 160, 198, 296,297, 299, 300

K

Kaufmann, W., 41-47, 49-55, 58, 79, 242, 272, 292
Keating, R. E., 294
Kepler, J., 6,14, 119, 233, 272, 273, 297, 302
Klein, M. J., 296-298
Kockelmans, J. J., 287
Kopernik, N., 127
Kourany, J. A., 287
Koyré, A., 295
Kuhn, T. S., 278, 279, 287, 288, 296,297, 304

L

Lakatos, I., 288, 304,305
Landau, L. D., 202, 300
Laplace, P.-S., 103, 129, 303
Laudan, L., 288, 303-305
Lavanchy, C., 292
Leighton, R. B., 296, 299
Leplin, J., 303
Lifshitz, E. M., 202, 300
Lorentz, H. A., 34-38, 42-44, 50-58, 61, 73, 75-79, 81, 84,86, 91-94, 98-101, 233, 291-295
Luria, S. E., 270, 304

M

Mach, E., 72, 73, 108,109, 263,273,274
MacKinnon, E. M., 198
Mansouri, R., 293,
Maudlin, T., 301, 302
Maxwell, J. C., 3, 5, 10,12-27, 34, 37-40, 45, 65, 69, 73, 74,77,78, 92,94, 139, 144, 150, 161, 213,227,259,290, 294
McCauley, J. L.,
McMullin, E., 219, 290, 301, 303, 304
Meyerson, É., 251
Milford, F. J., 40
Miller, A. I., 61, 88, 291
Minkowski, H., 69
Monod, J., 268, 269, 284-288, 304, 305
Moore, W., 300
More, L. T., 271
Motz, L., 291
Musgrave, A., 288

N

Nelson, E., 303
Newton, I., 5-9, 13, 14, 23-25, 29, 34,52, 58, 59, 65, 67, 72, 77, 78, 86, 87, 89,105, 107, 111, 113-119,127, 129, 131, 144, 161-164, 177, 184, 223, 226, 233,251, 265, 271-277, 292, 295, 297, 302, 303

P

Pais, A., 88, 295
Pauli, W., 152,153,157, 158, 202, 249, 250, 266, 297
Peres, A., 217, 301
Petruccioli, S., 182
Pickering, A., 304,
Planck, M., 42-44, 51-55, 58, 72, 93,94, 113,142-147, 149, 150, 154, 163, 173, 177, 235, 262-265, 292, 296-299
Platon, 282
Podolsky, B., 192, 203, 211

Poincaré, H., 35,36, 72, 105, 151, 263,274, 304
Popper, K., 153, 280, 282, 288, 304
Pound, R. V., 295
Przibram, K., 300
Ptolemaios, C., 127, 235

Q

Quine, W. V., 241, 243, 244, 282, 304

R

Radnitzky, G., 288
Rebka, G. A., 295
Redhead, M. L. G., 104, 219, 294
Reitz, J. R., 40
Rosen, N., 192, 203, 211, 298
Rosenfeld, L., 202
Russell, B., 3, 286, 290, 303

S

Sachs, M., 294
Schilpp, P. A., 88
Schrödinger, E., 154-156, 169, 170, 173, 176, 190-195, 202, 204-206, 224-226, 237, 238, 247-253, 266-270, 288, 298, 299, 302, 304
Selleri, F., 256, 293, 303
Sexl, R. U., 293
Shimony, A., 135, 296, 301, 302
Shipman, H. L., 132, 295, 296
Smith, A. J., 293,
Stapp, H. P., 301
Stein, H., 294

T

Tangherlini, F. R., 293
Taylor, E. F.,88, 104
ter Haar, D., 296
Thayer, H. S., 295
Thompson, J. M., 13, 43, 141, 145
Thomson, W. (Lord Kelvin), 12, 13, 15, 65
Tolstoy, I., 40

V

Valentini, A., 240, 298, 302
van der Waerden, B. L., 297
van Fraassen, B. C.,
van Woodward, C., 304
Vogt, E.,

W

Waldrop, M. M., 296
Watkins, J.,
Watson, J. D., 268, 304
Weimer, W., 304
Weinberg, S., 132
Weisskopf, V. F., 293
Westfall, R. S.,
Weyl, H.,
Wheeler, J. A., 88, 104, 299, 300
Whitaker, A., 198
Whitehead, A. N., 282, 295
Whiteside, D. T.,
Whitrow, G., 295
Whittaker, E., 21, 290, 291
Williams, R. M., 132

Y

Young, T., 8, 65

Z

Zahar, E., 291-293
Zanghi, N.,
Ziman, J., 304
Zurek, W. H., 299, 300

Konu Dizini

A

a priori, bu tür akıl yürütmenin örnekleri, 69, 272, 284
Abraham, M., ; elektron modeli, 43, 60
açıklamaya karşı anlaşılma, 233 ; ve EPRB, 234; ve kuantum mekaniği, 236
açısal momentum, 149 *Bkz* Bohr
ad hoc, bu tür anlatımların örnekleri, 55, 59, 143, 147, 192, 227
Adler, F.,71
alan kuramı, 12; birleşik, 72,110;. *Bkz* Maxwell
alfa parçacığı saçılımı,141
Ampère yasası,26, 38
anakaraların kayması, 266
Andromeda Bulutsusu, 128
animist kuram, 284
anlayış (anlama).236, *Bkz* açıklamaya karşı anlaşılma
Arago, D.,8
Aristo, ; ilk ilkeler üzerine, 268, 271
ayrılabilirlik. 236, *Bkz* ayrılamama özelliği
ayrılamama özelliği, 236 *Bkz* dalga fonksiyonu; dolaşık

B

Bacon, F., bilim üzerine, 255
Balashov, Y., 303
Balmer, J., ; formülü,140
Barrow, I.,271
belirlenemezcilik, ; kuantum mekaniğinde, 151, 221. *Bkz* nedensellik;
belirlenimcilik, 224, 247 ; ve Bell teoremi, 210; Bohm'un kuramında, 202 ; de Broglie'nin kuramında, 206; Kopenhag yorumunda, 173,. *Bkz* nedensellik
belirsizlik bağıntısı,; Bohm'un kuramında, 230 ve Einstein, 233
belirsizlik ilkesi.156 *Bkz* belirsizlik bağıntısı
belirsizlik, ; ve Kierkegaard, 151, 156. *Bkz* belirsizlik bağıntısı
Bell teoremi, 210 ; ve Bohm'un kuramı 213, ; ve deney213, .*Bkz* EPR paradoksu; gizli değişkenler
Bell, J., ; Bohm yorumu üzerine, 212. *Bkz* Bell teoremi
Bentley, R.,6, 116
Besso, M.,70
Bestelmeyer, A.,56
bilim: hedefleri, 261; -deki iç etmenlere karşı dış etmenler, 282. *Bkz* Monod; bilimsel yöntem
bilimde iç ve dış etmenler karşı karşıya. 254, 282 *Bkz* bilim
bilimin hedefleri. 281, *Bkz* bilim
bilimin nesnelliği: -ne olan inanç, 284; -nin sorgulanması,285
bilimin paradigma modeli, 278; normal bilim, 278; devrimci bilim, 284
bilimin üçlü (üç düzeyden oluşan) modeli, 281
bilimsel araştırma programı,154, 288
bilimsel bilgi, 261, 281 . *Bkz* bilimin nesnelliği; bilimsel yöntem
bilimsel gerçekçilik.212, 236, *Bkz* gerçekçilik
bilimsel yöntem, ; -de sonuç çıkarma tarzları, 274. *Bkz* Duhem; Einstein; Mach; Monod; Planck; Popper
Biot-Savart yasası, 23, 37
bir arada var oluş. 100, *Bkz* eşzamanlılık
bir uzaklıkta etki: elektrostatikte, 6; kütleçekimde 5, *Bkz* Faraday; yerel olmama özelliği; Thomson, W.

birbirine dolaşıklık özelliği. 191, *Bkz* dalga fonksiyonu
blok evren. *Bkz* eşzamanlılık, *102*
Bohm yorumu, ; ve klasik limit, 225 ; Kopenhag yorumuyla deneysel özdeşliği, 225; dalga fonksiyonunun bu yorumdaki anlamı,226 ; ve ölçüm, 228 ; yerel olmama özelliği, 230; kuantum potansiyeli, 226, 239; ve kuantum olasılığı, 229; ve gerçekçilik, 231, 251; ve görelilik, 230; belirsizlik ilişkisinin bu yorumdaki konumu, 227. *Bkz* de Broglie; kaos; belirlenimcilik; tarihsel belirsizlik; ölçüm problemi; olasılıksal mekanik; yörünge
Bohm, D., ; alternatif bir yorumun değeri üzerine, 221 ; EPR paradoksunun Bohm biçimi, 213. *Bkz* Bohm yorumu
Bohr, N., ; gözlemin bağlamı üzerine, 185; ve Kopenhag yorumu, 156, 159 ; ve Høffding, 151; ve ölçüm, 184 ; ve pozitivizm/işlemselcilik, 151; açısal momentumun kuantumlanması,147, ; kuantum aksiyomu, 185; ve gerçeklik, 185,; yarı klasik model, 145,.*Bkz* Bohr-Einstein karşı karşıya gelişleri; nedensellik; tamamlayıcılık; dalga-parçacık ikiliği
Bohr-Einstein karşı karşıya gelişleri, 186
Boltzmann, L., 69; sabiti, 139 .*Bkz* eşbölüşüm teoremi
Bolyai, J.,120
Born, M.,152 ; ve Kopenhag yorumu, 249; ve dalga fonksiyonunun anlamı, 166; olasılık yorumu, 166 .*Bkz* nedensellik
boşluk, 5 ; Aristo fiziğinde, 5; erken dönem elektromanyetik kuramında, 18, 24, 27 ; Kaufmann deneylerinde, 46; bir 'plenum'a karşı,5 ; genel görelilikte - çözümü, 110
Boussinesq, J.,10
Boyle, R.,271
Bradley, J.,8
Brown hareketi, 70, 251
Bucherer, A., 42; elektron modeli, 43
Butterfield, H.,254
büyük patlama kuramı. *Bkz* genişleyen evren 121, 126

C, Ç

Carnap, R.,265, 274
Cauchy, A.-L.,9
Compton, A., 155
Coulomb yasası, 5, 37
Crick, F., 268
Curie, M.46
Curie, P., 46
Cyngus X-1, 130
çekirdek atom.145, *Bkz* Bohr; Rutherford; Thompson, J.
çift çözüm. *Bkz* de Broglie158
çift yarık deneyi, 177, 187
çürütme, 58, 272. *Bkz* yanlışlama; Popper

D

dalga denklemi. 38, 162, *Bkz* Maxwell; Schrödinger
dalga fonksiyonu: üzerine Bohm, 226; Bohm'un kuramında, 226; üzerine Born, 166; -nun çöküşü, 194, 195; tanımı, 161; dolaşık, 239 ; örneği, 168; üzerine Heisenberg, 174; üzerine Planck, 173; ve olasılık, 166, 173 ; üzerine Schrödinger, 166 . *Bkz* tamlık; kuantum mekaniği; üst üste gelme; ölçüm problemi
dalga fonksiyonunun çöküşü., 188, 194, *Bkz* ölçüm problemi; dalga fonksiyonu
dalga mekaniği.155, *Bkz* kuantum mekaniği
dalga: boylamasına, 7; duran -, 138, ; enine, 9. *Bkz* eter; elektromanyetik dalga; girişim; dalga fonksiyonu; dalga-parçacık ikiliği
dalga-parçacık ikilemi, 163. *Bkz* tamamlayıcılık
Darwin, C. G., 141
de Broglie, L., 154; çift çözüm, 158 ;

dalgalarla madde arasındaki ikilik, 163; pilot dalga kuramı, 158; ilişkisi, 176; ve Solvay Toplantısı, 158.*Bkz* Bohm yorumu; tarihsel belirsizlik
de Broglie-Bohm programı, 222 .*Bkz* Bohm yorumu; de Broglie
de Fermat, P., 6
de Sitter, W., 108 . *Bkz* genel görelilik kuramı
değişme özelliği. 208, *Bkz* işlemci
değişmeme özelliği.153 *Bkz* işlemci
Delbrück, M., 267
deney (bilimdeki rolü), ; üzerine Einstein, 263. *Bkz* bilimsel yöntem
deneysel yeterlilik. 235, 248, 253, *Bkz* açıklamaya karşı anlaşılma
Descartes, R.: ışık üzerine, 6; ve plenum, 5
devrimci bilim.278, *Bkz* bilimin paradigma modeli
Dirac, P., ; ve Kopenhag yorumu, 176; büyüğe karşı küçük üzerine, 170; ölçüm üzerine, 195; üst üste gelmeler üzerine,178, 180, 201; dönüşüm kuramı, 252 . *Bkz* nedensellik
doğru (gerçek) (bilimin bir amacı olarak), ; üzerine Einstein, 284; üzerine Kuhn, 278, 279
doğrulama paradoksu, 277
doğrulama paradoksu, 277
Doppler kayması, 90 ; maviye kayma, 91; kırmızıya kayma, 103, 113 ; göreliliğe uyumlu, 90. *Bkz* Hubble yasası
Doppler, C., 89
Duhem, P., 241 . *Bkz* Duhem-Quine tezi
Duhem-Quine tezi, 241. *Bkz* kesin olarak belirlenememe
durağan hal kuramı, 129
duran dalgalar, 138, 139
durum vektörü.161, 190, 218, *Bkz* dalga fonksiyonu
durum, 167, . *Bkz* tamlık; dalga fonksiyonu
durumun indirgemesi.188, 194 *Bkz* dalga fonksiyonunun çöküşü; ölçüm problemi
duyu deneyimi, 273; üzerine Mach, 273
dünya görüşü. *Bkz Weltanschauung*283
Dünya merkezli model, 118

E

e/m 'nin belirlenişi, 42. *Bkz* Kaufmann deneyleri
Eddington, A., 113, 125
Ehrenfest teoremi, 302
Einstein, A., 67; eter üzerine, 74, 78; ve de Broglie, 155; Brown hareketi, 252; evrenbilimsel (kozmolojik) sabit, 120; evrenbilimsel ilke, 123; Doppler kayması, 89; başlardaki düşünce deneyleri, 74; gizli değişkenler kuramı, 159; ve Hubble yasası,125; ve Kaufmann deneyleri, 55; Lorentz dönüşümleri, 76; kütle-enerji özdeşliği, 91 ; ölçüm üzerine, 205; ve yerel olmama özelliği, 204; fizik üzerine, 73, 79, 262; ve pozitivizm, 72; -'ın özel görelilik için aksiyomları, 77; kuanta, 154; ve kuantum mekaniği, 186, 204; ve Schrödinger, 155; bilim ve hedefleri üzerine, 262; eşzamanlılık üzerine, 76; klasik fizik hakkında kuşkuculuk, 72; kesin olarak belirlenememe üzerine, 187 ; birleşik alan kuramı, 72 . *Bkz* Bohr-Einstein karşı karşıya gelişleri; nedensellik; Einstein-Lorentz kuramı; EPR paradoksu; genişleyen evren; tarihsel belirsizlik; Kaufmann deneyleri; Michelson-Morley deneyi; genel görelilik kuramı; özel görelilik kuramı
Einstein-Lorentz kuramı, 44
Einstein-Podolsky-Rosen paradoksu.205, *Bkz* EPR paradoksu
elektrodinamik dünya görüşüne karşı mekanik dünya görüşü, 3
elektromanyetik dalga, 24; enerjisi, 44; *E* ve *B* alanlarıyla ilişkisi, 92. *Bkz* Maxwell
elektromanyetik kuram, 10 ; ve kuanta, 144. *Bkz* Maxwell

elektron: bulunuşu, 42; elektromanyetik kütlesi, 44
en yüksek/en düşük olma ilkesi, 269, 284; *Bkz* teleonomi
en yüksek/en düşük olma ilkesi, 6
enerjinin kuantumlanması.144, 146, *Bkz* kuantum mekaniği
entropi, 143, 268
epistemolojik, 135, 159, 243, 259, . *Bkz* ontoloji
EPR paradoksu, 205 ; EPR'nin akıl yürütüşünün çözümlemesi, 207 ; -nun Bohm biçimi (EPRB), 213; Bohr'un -na yanıtı, 204 . *Bkz* Bell teoremi; kedi paradoksu; tamlık; açıklamaya karşı anlaşılma
EPRB.213 *Bkz* EPR paradoksu
eski kuantum kuramı, 153,
eşbölüşüm teoremi, 138
eşzamanlılık, 14 ; mutlak, 77; ve blok evren, 102; ve bir arada var oluş, 102; -ın kabullere bağlılığı, 77. *Bkz* Einstein
eter: mutlak bir koordinat sistemi olarak, 10, 25, ; modelleri, 5; *Bkz* Aristo; Descartes; Einstein; Lorentz; Maxwell; Michelson-Morley deneyi; Newton; Poincaré; Thomson, W.
evren modelleri. 102, 118, 121, 123, 124, 127, *Bkz* genişleyen evren; Güneş merkezli model; genel görelilik kuramı; klasik evrenin kararlılığı;
evrenbilimsel (kozmolojik) ilke, 123
eylemsizlik çerçevesi, 101 ; ve özel görelilik, 101; ve ikizler paradoksu, 96

F

Faraday, M., eter üzerine düşüncelerine karşı bir uzaklıkta etki, 11; indüksiyon yasası, 11; kuvvet çizgileri.11 . *Bkz* Maxwell
Feynman, R., ; kuantum mekaniği üzerine, 201
FitzGerald, G., 33, 43, 81
Fizeau, A.-H., 9
formalizme karşı yorum, 157, 222; *Bkz* kuram
foton: ve Bohr, 146, ; ve de Broglie, 155, 163; ve tamamlayıcılık, 184, 222; üzerine Dirac, 170, 200; ve Einstein, 155; ve görelilik, 95 ; ve Schrödinger, 163
Foucault, J.-B., 9
Frank, P., 262
Fresnel, A.-J., 9, 65
Freud, S., 283
Friedmann, A., 119, 121 . *Bkz* genel görelilik kuramı

G

Galilei, G., 272 ; matematik üzerine,
Gandhi, M., 286
Geiger, H., 141
genel görelilik kuramı 69, 99, 105, 188
genel görelilik kuramı, ; kara delik 130, ; Einstein çözümü, 119; özdeşlik ilkesi, 106; -nın deneysel testleri, 111 ; Friedmann çözümü, 120; ve kütleçekimin geometrizasyonu, 109; Gödel çözümü, 109; ve Mach ilkesi, 108; de Sitter çözümü, 108; ve Güneş tutulması yolculukları, 112; uzayın -ndaki yapısı, 118. *Bkz* genişleyen evren; uzay; uzay-zaman
genetik kod, 267
genişleyen evren: kozmik art alan ışıması; 128; kritik yoğunluk, 121 ; -de kara madde, 126; -de ufuk, 131 ; başlangıçtaki büyük patlama, 121, 126; bir model olarak, 118 . *Bkz* Hubble yasası; Olbers paradoksu; kırmızıya kayma
gerçek uzunluk, 80
gerçek zaman, 80
gerçekçilik karşıtlığı, 246
gerçekçilik: nesnel bir gerçekliğin var oluşu, 212, 246; bilimsel, 236, 241. *Bkz* kesin olarak belirlenememe
gerçeklik öğesi, 210. *Bkz* EPR paradoksu
Gilbert, W., 271

girişim: ışığın -i, 8 ; dalga fonksiyonlarının -i, 32, 33 ;
gizli değişkenler, 159, 184, 206; üzerine Bell, 212 ; üzerine Bohm, 228; üzerine Einstein, 206 ; üzerine von Neumann, 159 . *Bkz* yerel olma özelliği; yerel olmama özelliği
Gould, S., 270
Gödel, K., 109
görelilik ilkesi, 74. *Bkz* Einstein
görelilik kuramı.77, *Bkz* görelilik ilkesi; özel ve genel görelilik kuramları
gözlem.188, 191, *Bkz* ölçüm; ölçüm problemi
gözlenir. 208, *Bkz* işlemci
Green, G., 13
Grossmann, M., 69
günberi, ; Merkür'ün -sindeki kayma, 114
Güneş: ve ışığın bükülmesi, 111

H

Hamilton-Jacobi kuramı, 251
Harvey, W., 271
Heisenberg, W., 152 ; Kopenhag yorumu, 156; formalizm ve yorum üzerine, 157; matris mekaniği, 152, 157, ; ve dalga fonksiyonunun anlamı, 160; ve pozitivizm/işlemselcilik, 151; *potentia*, 237; kuantum mekaniğinde olasılık üzerine, 201. *Bkz* nedensellik; belirsizlik bağıntısı
Helmholtz, H. von, 69
Hempel, C., 274
Hertz, H., 3, 69, 259
hiç işaret göndermeme teoremi, 252
hipotetik-tümdengelimsel yöntem, 271, 281
hipotez, 58 . *Bkz* ilk ilkeler
Høffding, H., 151
Homer, 243
homojen, 18, 84, 118, 125, 148
Hooke, R., 6 ; ışık üzerine, 6
Hubble, E., 123, -yasası, 123 ; -yarıçapı, 125
Hume, D., .72, 271 *Bkz* tümevarım
Huygens, C., 7; ışık üzerine,
Hydra II, 128

I, İ

ışığın ağırlığı, 111
ışığın bükülmesi. *Bkz* ışık 8, 111
ışık: bükülmesi, 111; parçacık ve dalga kuramları, 154; - hızı (*c*), 25 . *Bkz* foton; genel görelilik kuramı
ikilik. *Bkz* dalga-parçacık ikiliği163
ikizler paradoksu, 96; ve genel görelilik, 96
ilinti; ; EPRB deneyi için -nin hesaplanışı, 214
ilk ilkeler, 268. *Bkz* hipotez
ilke kuramı. 78 *Bkz* yapıcı kuram
imleşim.230, *Bkz* hiç işaret göndermeme teoremi
indirgemecilik: tanımı, 232; ve biyoloji, 232, 244; ve kimya, 232, 244; ve yerbilim, 232, 244; ve fizik, 232, 244
işlemci: sıra değişme özelliğine sahip olmayan, 153; ve fiziksel gözlenirler, 175, 188. *Bkz* dalga fonksiyonu
işlemselcilik, 152. *Bkz* mantıksal pozitivizm; uygulayıcılık
izotropik, 18, 123

J

Jeans, J., 139, 140
jeodezik, 109, 120, 274
Jordan, P., 152

K

kabul (bilimdeki). 72, *Bkz* Poincaré
kaçış hızı, 122
Kamminga, H., 303
Kant, I., 69, 272
kaos, 184 ; ve Bohm'un kuramı, 226
kapsayan yasa modeli.232, *Bkz* tümdengelen-nomolojik model
kara cisim ışıması, 128; ve genişleyen evren, 129; ve kuantum kuramı, 137, 143 *Bkz* Einstein; Planck

kara delik. *Bkz* genel görelilik kuramı 129
kara madde, 126
Kaufmann, W., 41; elektromanyetik kütle üzerine, 44; deneyleri, ;41, Einstein-Lorentz kuramı üzerine, 51; -'dan yöntembilimsel dersler, 58. *Bkz* Planck
kedi paradoksu. *Bkz* Schrödinger192
Kepler, J., 119, ve nedenler, 272; ve matematiksel uyum, 272
kesin olarak belirlenememe, 236. *Bkz* bilimsel gerçekçilik
kırmızıya kayma: Doppler, 124; ve uzayın genişlemesi, 124 ; kütleçekimsel, 113
Kierkegaard, S., 151
Kirchhoff, G., 69, 142, 273
klasik evrenin kararlılığı, 116
Kopenhag yorumu, ; ve klasik limit, 165; -na giden yol, 151, 156, . *Bkz* Bohm; Bohr; Born; Dirac; Heisenberg; tarihsel belirsizlik; belirlenemezcilik; ölçüm; ölçüm problemi; Pauli; yörünge
kozmik art alan ışıması.128 *Bkz* kara cisim ışıması
kuanta, 70, 143, . *Bkz* foton
kuantum aksiyomu.185, *Bkz* Bohr
kuantum kuramı. 137, 145, 185, 228, *Bkz* Bohr; tamamlayıcılık; Planck; kuantum mekaniği
kuantum mekaniği: matris mekaniğine karşı dalga mekaniği, 152, ; -ne giden yollar, 137, 151; enerjinin kuantumlanmasının yalın bir örneği, 156. *Bkz* Bohm yorumu; Bohr; Born; de Broglie; tamlık; Kopenhag yorumu; Dirac; çift yarık deneyi; Einstein; EPR paradoksu; Heisenberg; belirlenemezcilik; Pauli; Schrödinger; spin; yörünge; belirsizlik bağıntısı; anlayış; dalga fonksiyonu
kuantum mekaniğinin alternatif yorumu. 221 *Bkz* Bohm yorumu
kuantum mekaniğinin yorumları. 156, 170, 183, 207, 221, 224, *Bkz* Bohm yorumu; Kopenhag yorumu
kuantum potansiyeli. 226, *Bkz* Bohm yorumu
kuasar, 129
Kuhn, T., 278
kuram (yasa), 156, 223. *Bkz* formalizme karşı yorum
kuramla doluluk, 153
Kurlbaum, F., 138
kutuplanma, 6, 9, 14, 27
kuvvet çizgileri.10, 11, *Bkz* Faraday
kuzgunlar paradoksu.277 *Bkz* doğrulama paradoksu
küçük sapmalar: ; ve Merkür, 114
kütle, 5; eylemsizlik ve kütleçekim kütlelerinin karşılaştırılması, 105,
kütle-enerji özdeşliği.91, *Bkz* özel görelilik kuramı

L

Lakatos, I., 288
Lamb, H., 13
Landau, L., 202
Laplace, P.-S., 103, 129
Larmor, J., 13
Laudan, L., 288
Laue, m. von, 98
Leibniz, G., ve sonsuz bir evren, 117
Lemaître, G., 121, 125
Lenard, P., 71
Lesage, G.-L., 7
levha tektoniği kuramı, 265
Lifshitz, E., 202
Lobachevski, N., 120
Lord Kelvin.12, 65, 139, *Bkz* Thomson, W.
Lord Rayleigh. 13, 36, 139, *Bkz* Strutt
Lorentz dönüşümü, 84; hızlar toplamı yasası, 86
Lorentz, H., 34 ; ve eter, 35; Einstein'ın görelilik kuramı üzerine, 36; kuvvet yasası, 38 ; ve Kaufmann deneyleri, 51; elektron modeli, 43; moleküler kuvvet hipotezi, 35; elektron kuramı, 36, 43
Lorentz-FitzGerald kısalma hipotezi, 34
Love, A., 13
Lummer, O., 138
Luria, S., 270

M

MacCullagh, J., 9
Mach ilkesi.108 *Bkz* Mach
Mach, E., ; mutlak uzay üzerine, 108, 273; klasik mekanik üzerine, 72, 278; ve Einstein, 72, 108; ve pozitivizm, 263 ; ilkesi, 108; bilim üzerine, 274
Madelung, E., 253
mantıksal pozitivizm, 273. *Bkz* yararlılık; işlemselcilik
Maric, M., 70,
Marsden, E., 141
matris mekaniği. 150, 156, *Bkz* kuantum mekaniği
maviye kayma, 91
Maxwell, J., ; bir uzaklıkta etki üzerine, 18, 19 ; eter üzerine, 18 ; sürülme akımı, 26; denklemleri, 26; kuvvet çizgileri üzerine, 16; eter modelleri, 16; ışık hızı, 25;
Maxwell-Boltzmann yasası, 65; *Bkz* eşbölüşüm teoremi
mekanikçi felsefe, 272
Merkür, ; günberisindeki kayma, 114
Meyerson, É., 251
Michelson, A., 28
Michelson-Morley deneyi, 28; ve Einstein, 77
Milne, E., 123
Minkowski, H., 69
momentum, 52, 59, 94, 161, 174, 176, 239
Monod, J., , yaşamın temeli üzerine, 269; bilime karşı geleneksel değerler üzerine, 284
mor ötesi yıkım, 139
More, H., 271
Morley, E., 28, 29
muon, 81

N

Navier, C.-L., 9
neden: ortak -, ; ve sonuç, 161, 173 ; son -, .*Bkz* nedensellik; teleonomi
nedensellik: Born'un, 201;Bohr'un, 135 ;Dirac'ın, 172, Heisenberg'in - üzerine görüşleri, 185 ; ve Einstein, 154; ve açıklama, 233, 236; ve kuantum mekaniği, 137, 152 ; ve görelilik, 154, 234; istatistiksel, 173, 225 .*Bkz* Bell teoremi; Bohm yorumu; neden; belirlenimcilik; belirlenemezcilik
nesnellik aksiyomu, 284, . *Bkz* bilimin nesnelliği
Newton, I., ; eter üzerine, 6, 29; hareket yasaları, 14, 25, 59, 116; ışık üzerine, 6; Sorular (*Optics*), 116; *Akıl Yürütme Kuralları*, 271; ve evrenin kararlılığı üzerine, 116, 117
normal bilim.278 *Bkz* bilimin paradigma modeli
nötrino, 82

O, Ö

olasılık (kuantum).167, *Bkz* belirlenemezcilik; dalga fonksiyonu
olasılıksal mekanik, 169
Olbers, H., ; paradoksu, 118, 126
ontoloji, 156, 223, 244, . *Bkz* epistemolojik
organizma, 18, 268
Orta Çağ, 272
Öklit olmayan.132, *Bkz* uzay
Öklit uzayı. 116, 120, *Bkz* uzay
ölçüm problemi, ; Bohm'un kuramında, 228. *Bkz* ölçüm
ölçüm: üzerine Bohm, 228; üzerine Bohr, 184, 204; üzerine Dirac, 195; üzerine Heisenberg, 201 ; üzerine Pauli, 249
öngörü, 58, 281; üzerine Einstein, 113 . *Bkz* yanlışlama
özdeğer, 162, 189, 208. *Bkz* operatör; dalga fonksiyonu
özdeşlik ilkesi. 91, *Bkz* genel görelilik kuramı
özdurum, 188, 208. *Bkz* işlemci; dalga fonksiyonu
özel görelilik kuramı, ; - için aksiyomlar, 77; -nın öncüleri, ; ve Lorentz kuramına özdeşlik, 43 ; kütle-enerji

özdeşliği, 91;ve kuantum mekaniğiyle gerilim, 204; *Bkz* Bohm yorumu; Doppler kayması; Einstein; Kaufmann deneyleri; uzunluk kısalması; Lorentz; Lorentz dönüşümü; zamanın genişlemesi; ikizler paradoksu
özel görelilik. 89, *Bkz* özel görelilik kuramı

P

Pauli, W., ; ve Bohm'un kuramı, 202; ve Kopenhag yorumu, 158 ; ölçüm üzerine153; ve pozitivizm/işlemselcilik, 152; ve Solvay Toplantısı, 158
Peirce, C., 273
Penzias, A., 128
Peres, A., 217
pırıltı sayacı, 83
pilot dalga kuramı.158, 250 *Bkz* Bohm; de Broglie
Planck, M., ; -'ın Kaufmann deneylerini çözümlemesi, 44, 51; kara cisim ışıması formülü, 163 ; nedensellik üzerine, 173; sabiti, 113, 144, 177; yasası, 144; bilimin doğası üzerine, 143; Newton'un ikinci yasasının göreliliğe uyarlanmış biçimi, 94
plenum, 5
Podolsky, B., 192, 203
Poincaré, H.: eter üzerine, 35; -'nin kavramsal etkisi, 274; bilimdeki kabuller üzerine, 274 ; Einstein üstündeki etkisi, 73 ; klasik mekaniğin mantıksal yapısı üzerine, 274; görelilik ilkesi, 36
Poisson, S.-D., 9, 12
Popper, K: yanlışlama üzerine, 288; ve bilimin akla yatkınlığı, 282; sosyal çevre üzerine, 282
*potentia.*237, *Bkz* Heisenberg
pozitivizm. 72, 151, 263, 273, *Bkz* mantıksal pozitivizm
Pringsheim, E., 138
pusula yönleri. *Bkz* Güneş

Q

Quine, W., 241 . *Bkz* Duhem-Quine tezi; kesin olarak belirlenememe

R

Rayleigh-Jeans yasası, 138
rehberlik koşulu, 226, 239, . *Bkz* Bohm yorumu
Reichenbach, H., 265, 270
Riemann, B., 10, 120
Roosevelt, F., 72
Rosen, N., 203
Rosenfeld, L., 202
Rossi, B., 83
Rubens, H., 138
Rutherford, E., ; atom modeli, 141
Rydberg, J., ; sabiti, 140; formülü, 140

S

Samanyolu, 128
Schlick, M., 274
Schrödinger, E., 154; kedi paradoksu, 176, 192; belirlenimciliğe karşı belirlenemezcilik üzerine, 247 ; denklemi, 162, 238; ve yaşamın açıklaması, 263; dalga fonksiyonunun yorumu, 169; dalga mekaniği, 157 . *Bkz* tarihsel belirsizlik; kuantum mekaniği
sezgi, 100, 203, 223, 233, 271
Shapley, H., 123
Slipher, V., 123
Solvay Toplantısı, 158, 186, 206, 250
Sommerfeld, A., 108, 148
sonuç. *Bkz* neden 172
Sorular. 116, *Bkz* Newton (*Optics*)
spektrum, 33, 123, 128, 138
spin: ve Bohm kuramı, 190; ve EPRB deneyi, 213; kuantum mekaniğinde, 215
Stapp, H. P., 301
Stern-Gerlach aleti, 189
Strutt, W. (Lord Rayleigh), 13
sürekli olmama özelliği, 159
sürülme akımı.26 *Bkz* Maxwell

T

tam olmama.188, 194, 203 *Bkz* tamlık
tamamlayıcılık, 184, 222, 225. *Bkz* dalga-parçacık ikiliği
tamlık, 194, 207
tarihin whig yorumu, 254
tarihsel belirsizlik: ve Bohm yorumuna karşı Kopenhag yorumu, 241 ; ve Kopenhag yorumu, 241
teleonomi, 269, 284. *Bkz* neden; en yüksek/en düşük olma ilkesi
teleskop, 8, 112
Thomson, J., ; atom modeli, 141
Thomson, W. (Lord Kelvin), ; eter üzerine, 65
tutarlılık (bir kuram için), 156, 245
tümdengelen-nomolojik model, 232

U, Ü

uygulayıcılık, 151 . *Bkz* mantıksal pozitivizm; işlemselcilik
uzay: mutlak, ; -ın eğriliği, 109, 111; Öklit, 116, 119; Öklit olmayan, 132. *Bkz* genişleyen evren; plenum; genel görelilik kuramı; uzay-zaman
uzay-zaman: kuantum mekaniğinde arka plandaki oyun alanı olarak, 205, 212, 247 ; klasik fizikte, 72; genel görelilikte, 105 ; özel görelilikte, 77 . *Bkz* uzay; zaman
uzunluk kısalması, .34, 80, 81 *Bkz* Lorentz-FitzGerald kısalma hipotezi
üst üste gelme, 163, 178, 180, 191, . *Bkz* ölçüm problemi

V

varyasyon ilkesi.6, *Bkz* en yüksek/en düşük olma ilkesi
verimlilik, 150, 248
Virgo (Başak), 128
vitalist kuram, 284
Viyana Okulu (Ekolü), 273
Volta, A., 184
von Neumann, J., 159

W

Watson, J., 268
Wegener, A., 265
Weltanschauung (dünya görüşü), ; ve bilim, 283
Whewell, W., 233
Wien, W., 143, 202
Wilson, R., 126

Y

yanlışlama, 280. *Bkz* Popper; çürütme
yapıcı kuram, 78, 233
yarı klasik model.145, *Bkz* Bohr
yarı ömür, 82
yasa., 77, 149, 156, 233 *Bkz* kuram
yaşam (biyokimya olarak), 267
Yerel Grup, 128
yerel olma özelliği, 158, 204, 225; ve Bell teoremi, 211; üzerine Einstein, 158; ve EPR paradoksu, 210. *Bkz* Bell teoremi;yerel olmama özelliği
yerel olmama özelliği: ve Bell teoremi, 212; ve Bohm kuramı, 230; üzerine Bohr, 204; üzerine Einstein, 252; ve EPR, 204. *Bkz* yerel olma özelliği; ayrılmama özelliği
yıldız paralaksının ölçümü, 123
yıldız sapması, 111
yıldız sapması, 112
yorum (bilimsel bir kuramın).223, *Bkz* formalizme karşı yorum
Young, T., 8
yörünge: kuantum mekaniğinde, 145

Z

zaman: kozmik, 80. *Bkz* zamanın genişlemesi
zamanın genişlemesi, 80; -nin deneysel olarak kanıtlanışı, 81

μ mezon. 81 *Bkz* muon

1. Cilt için Düzeltmeler

Kitabın ilk cildinde göze çarpan önemli hataların düzeltilmiş halleri aşağıdakiler gibi olacaktır:

1) Kısım 3.5'te (sayfa 53) "ii" ile gösterilen maddenin başlığı "*tümdengelen*" değil, "*tümevaran*" olacaktır.

2) Sayfa 105'te (5.4) denkleminin doğrusu

$$\frac{R_1^3}{\tau_1^2} = \frac{R_2^3}{\tau_2^2} \qquad (5.4)$$

olacaktır.

3) Kısım 5.A'nın (sayfa 106) 7. satırındaki eşitliğin doğrusu

$e_{\text{Merkür}} = 0{,}2056$

olacaktır.

4) Kısım 7.3'te sayfa 148'in 9. satırında "VIII. Kısım ..." diye başlayan cümlenin içindeki "r_0" ve "v_0" terimleri vektörel büyüklüklerdir, bu nedenle aslında - sırasıyla - "$\boldsymbol{r}_0$" ve "$\boldsymbol{v}_0$" olmalıdırlar. 7. Konu'da hızı anlatan "$\boldsymbol{v}$" vektörü bazen tutarsız bir biçimde "$\boldsymbol{v}$" diye yazılmıştır.

5) Sayfa 184'te (9.6) denkleminin doğrusu

$$\frac{m\upsilon^2}{\rho} = |f(r)| \cos\gamma \qquad (9.6)$$

olacaktır.

6) 11. Konu'nun tamamında "Kopernik" yanlışlıkla "Kopenrik" olarak yazılmıştır.

7) Sayfa 271'de (12.3) denkleminde "f", "x", hemen ardından gelen satırdaki "$x(t)$" terimi ve sonrasındaki eşitliğin sol tarafındaki "x" ile sayfa 272'de 2. satırdaki "f" terimlerinin hepsi vektörel büyüklüklerdir, bu nedenle aslında bu nicelikler, vektörleri temsil eden "$\boldsymbol{f}$" ve "$\boldsymbol{x}$" şeklinde kalın harflerle yazılmalıdırlar.

8) Sayfa 275'in başında "ii" ile gösterilen maddenin başı

ii $a > 1 \Rightarrow x = 0$

olmalıdır.

9) *Dizin* (Sayfa 295) "61 Cygni" maddesinde sayfa yeri belirtilmemiştir; doğrusu "61 Cygni, 74" olacaktır.



Fizikte Felsefi Kavramlar, bilimdeki ilerlemeleri, oluştukları tarihsel ve düşünsel ortamları göz önünde tutarak ele alıyor. Bilimsel bilgi, zaman içinde kabul edilegelen kesinliği ve nesnel keşif yöntemi yüzünden, özünde diğer bilgi çeşitlerinden farklı olarak algılanır. Birçokları tarafından anlaşılan haliyle fizik ve felsefe, herhangi iki entelektüel disiplinin birbirlerinden uzak olabileceği kadar ayrı durdukları izlenimini verir. Bununla birlikte kitapta, fizik ve felsefenin bugüne dek gösterdikleri ve hâlâ da sürdürdükleri, gelişimleriyle ilgili karşılıklı etkiler örnekleriyle açıklanıyor. Temel düşünsel sorunlar, tarihsel bağlamda ve konuyla ilgili bilimsel etkinliğin asıl içeriğine sadık kalınarak ele alınıyor. Kitabın önemli amaçlarından biri de düşünsel olarak göz önünde tutulanların, bilimin asıl uygulamasında ve bilimsel kuramların yapımında oynadıkları esas rolün okuyucunun zihnine kazınması.

ISBN: 975-8362-57-7

9 789758 362578

Fiyatı: 20 YTL (KDV Dahil)