2264 | ALFA | BİLİM | 10

101 Soruda Kuantum

KENNETH W. FORD

Princeton Üniversitesinden doktora alan fizikçi Kenneth W. Ford, çeşitli üniversitelerde ve enstitülerde görev yaptıktan sonra Massachusetts Üniversitesi Fizik bölümünden emekli olmuştur. Bir süre Amerikan Fizik Enstitüsünün başkanlığını yapmış olan Kenneth W. Ford, aldığı çok sayıda bilim ödülünün yanı sıra, bir çok popüler fizik kitabına da katkıda bulunmuştur.

BARIŞ GÖNÜLŞEN

1974 yılında İzmir'de doğdu. İzmir Bornova Anadolu Lisesi Almanca Bölümü ve Ortadoğu Teknik Üniversitesi İktisat Bölümü'nden mezun oldu. Serbest yazarlık ve çevirmenlik yapmaktadır.

101 Soruda Kuantum
© 2011, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

101 Quantum Questions
© 2011 by the President and Fellows of Harvard College

Kitabın Türkçe yayın hakları Akcalı Ajans aracılığıyla Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne aittir. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında hiçbir yöntemle çoğaltılamaz.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Kapak Tasarımı Ferah Perker
Grafik Uygulama

ISBN 978-605-106-405-5
1. Basım: Aralık 2011
2. Basım: Kasım 2012

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Ticarethane Sokak No: 53 34110 Cağaloğlu İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 10905

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 12088

101 SORUDA KUANTUM

GÖREMEDİĞİNİZ DÜNYA HAKKINDA BİLMENİZ GEREKENLER

KENNETH W. FORD

Çeviri
Barış Gönülşen

ALFA® | BİLİM

Joanne'a

ve

Paul, Sarah, Nina, Caroline, Adam, Jason ve Ian'a

ve

Charlie, Thomas, Nate, Jasper, Colin, Hannah, Masha, Ana, Daniel, Casey, Toby, Isaiah, Naima ve Steven'a;

ve

Ders verme ayrıcalığına sahip olduğum tüm öğrencilere,

Yaşamımın zenginleşmesine yardımcı olan herkese…

İÇİNDEKİLER

Önsöz
Kuantum Fiziğinin Büyük Fikirleri 13
Teşekkürler..... 15

I. Bölüm
Atom-Altı Dünya 17
1 Kuantum nedir? 17
2 Kuantum fizik yasaları nerede hüküm sürer? 20
3 Uyumluluk ilkesi nedir?..... 21
4 Bir atom ne kadar büyüktür? 23
5 Atomun içinde ne vardır? 24
6 Katı madde eğer çoğunlukla boş mekânsa neden katıdır?..... 28
7 Bir elektron ne kadar büyüktür? İçinde bir şey var mıdır?..... 30

II. Bölüm
Derine İnmek 35
8 Bir çekirdek ne kadar büyüktür? İçinde ne vardır?.. 35
9 Proton ve nötronun büyüklüğü nedir? İçlerinde ne vardır?..... 39
10 Planck sabiti nedir ve neden önemlidir? 42
11 Foton nedir? 45
12 Fotoelektrik etki nedir?..... 48

13 Hangi parçacıkların temel olduğu düşünülmektedir? Hangi parçacıklar bileşiktir? 49
14 Standart model nedir? 51

III. Bölüm

Küçük ve Çevik..... 53
15 Kuantum mesafe ölçekleri nelerdir?..... 53
16 Bir parçacık başka bir parçacığı etkilemek için ne kadar uzağa "uzanabilir"?..... 54
17 Parçacıklar hangi hızla hareket eder? 58
18 Kuantum zaman ölçekleri nelerdir?..... 59
19 $E=mc^2$'nin anlamı nedir? 60
20 Elektrik yükü nedir?..... 64
21 Spin nedir?..... 66

IV. Bölüm

Kuantum Öbekler ve Kuantum Sıçramalar..... 71
22 Neler öbeklidir, neler değildir? 71
23 "Hareket durumu" nedir? 74
24 Uyarılmış hareket durumundaki bir hidrojen atomu farklı durumdaki aynı atom mudur, yoksa başka bir atom mudur?..... 76
25 Kuantum sayıları nedir? Birleştirilme kuralları nedir?..... 78
26 Kuantum sıçrama nedir? 84
27 Kuantum fiziğinde olasılığın rolü nedir? 87
28 Kuantum dünyasında hiç belirlilik var mı? 91

V. Bölüm

Atomlar ve Çekirdekler..... 93
29 Çizgi spektrumu nedir? Bize atomlar hakkında ne öğretmektedir?..... 93
30 Element tablosu neden periyodiktir? 100

31 Ağır atomlar neden hafif atomlarla neredeyse aynı büyüklüktedir? 102
32 Protonlar ve nötronlar çekirdek içerisinde nasıl hareket ederler? 104
33 Atom numarası ve (bağıl) atom kütlesi nedir? 107

VI. Bölüm
Çekirdeklere Devam 111
34 Periyodik tablo niçin son bulur? 111
35 Radyoaktivite nedir? Biçimleri nelerdir? 114
36 Nötron çekirdek içerisinde kararlıyken, yalnız olduğunda neden kararsızdır? 119
37 Nükleer bölünme (fisyon) nedir? Neden enerji açığa çıkartır? 121
38 Nükleer birleşme (füzyon) nasıl gerçekleşiyor? 126

VII. Bölüm
Parçacıklar 129
39 Lepton nedir? Nitelikleri nelerdir? 129
40 Kaç farklı nötrino var? Nereden biliyoruz? 133
41 Nötrinoların kütlesi var mıdır? Neden "salınırlar"? ... 137
42 Parçacıkların gerçekten sadece üç nesli mi vardır? ... 144
43 Tüm elektronların özdeş olduğunu nereden biliyoruz? 146

VIII. Bölüm
Parçacıklara Devam 149
44 İsimler, isimler, isimler. Tüm bunlar ne anlama geliyor? 149
45 Kuarkların özellikleri nelerdir? Nasıl birleşirler? .. 151
46 Bileşik parçacıklar hangileridir? Sayıları nedir? 155
47 Her parçacığın bir fermiyon ya da bir bozon olması zorunlu mudur? Bu iki sınıfı ayıran nedir? 159
48 Bose-Einstein yoğunlaşması nedir? 163
49 Bozon ve fermiyonlar isimlerini nereden aldılar? .. 166

IX. Bölüm

Etkileşimler 171
50 Feynman diyagramı nedir? 171
51 Feynman diyagramlarının ana özellikleri nelerdir? 176
52 Feynman diyagramlarında yeğin, zayıf ve elektromanyetik etkileşimler nasıl gösterilir? 179
53 Hangi parçacıklar kararlıdır? Hangileri kararsızdır? Bir parçacığın bozunduğunu söylemek ne anlama gelmektedir? 184
54 Saçılım nedir? 186
55 Bir saçılım veya bir bozunumun öncesi ve sonrasında aynı kalan nedir? 187
56 Bir saçılım veya bozunum sırasında ne değişir? 189

X. Bölüm

Değişimdeki Sabitlik 191
57 Mutlak korunum yasalarının "dört büyükleri" kimler? 191
58 Kuantum dünyasında başka hangi mutlak korunum yasaları geçerlidir? 193
59 TCP teoremi nedir? 195
60 Sadece "kısmi" olan korunum yasaları hangileridir? 198
61 Hangi simetri ilkeleri sadece "kısmidir"? 201
62 Yasaklama ve zorunluluk yasaları nedir? 206
63 Simetri, değişmezlik ve korunum kavramları birbirleriyle nasıl ilişkilenmektedir? 209

XI. Bölüm

Dalgalar ve Parçacıklar 213
64 Dalgalar ve parçacıkların ortak noktaları nelerdir? Farkları nelerdir? 213
65 De Broglie denklemi nedir? Neden önemlidir? 215
66 Dalgaların kuantum öbekleriyle bağlantısı nedir? 218

67 Dalgaların atomların boyutlarıyla bağlantısı nedir?....222
68 Kırınım nedir? Girişim nedir? 224
69 Çift yarık deneyi nedir? Neden önemlidir? 226
70 Tünelleme nedir? 229

XII. Bölüm

Dalgalar ve Olasılık..... 231
71 Dalga fonksiyonu nedir? Schrödinger denklemi nedir? . 231
72 Dalgalar olasılıkları nasıl belirler? 235
73 Dalgalar parçacıkların sabit konuma sahip olmalarını nasıl engeller?..... 238
74 Belirsizlik ilkesi nedir? 240
75 Belirsizlik ilkesi, maddenin dalga doğası ile nasıl ilişkilenir?..... 242
76 Üst üste binme nedir? 246
77 Dalgalar gerekli mi? 249

XIII. Bölüm

Kuantum Fiziği ve Teknoloji 251
78 Parçacıklar ışık hızına yakın hızlara nasıl çıkartılıyorlar? 251
79 Yüksek enerjili parçacıkların algılanması nasıl gerçekleşir? 255
80 Lazer nasıl çalışır? 259
81 Bir metalde elektronlar nasıl davranır?..... 263
82 Yarı iletken nedir? 265
83 Bir p-n yüzey birleşimi nedir? Niçin diyottur?..... 267
84 Diyotlar nerelerde kullanılır?..... 269
85 Transistör nedir? 271

XIV. Bölüm

Tüm Ölçeklerde Kuantum Fiziği..... 275
86 Kara delikler neden buharlaşır? 275

87 Güneş'in merkezinde kuantum fiziği nasıl işler? ... 279
88 Süper iletkenlik nedir? ... 281
89 Süper akışkanlık nedir? ... 289
90 Josephson eklemi nedir? ... 285
91 Kuantum benek nedir? ... 288
92 Kuark-gluon plazması nedir? ... 289
93 Planck uzunluğu nedir? Kuantum köpüğü nedir?... 291

XV. Bölüm

Sınırlar ve Bulmacalar ... 295
94 Fizikçiler neden 137 sayısını severler? ... 295
95 Dolanıklık nedir? ... 298
96 Bell eşitsizliği nedir? ... 301
97 Kubit nedir? Kuantum hesaplama nedir? ... 305
98 Higgs parçacığı nedir? Neden önemlidir? ... 307
99 Sicim kuramı nedir? ... 309
100 "Ölçüm sorunu" nedir? ... 311
101 Niçin kuantum? ... 316

EK A ... 319
EK B ... 325
Dizin ... 329

ÖNSÖZ

Kuantum Fiziğinin Büyük Fikirleri

Kuantum fiziğindeki "büyük fikirlerin" kesin bir listesi yok. Ancak kuantum fiziğinin doğa kavrayışımıza kazandırdıklarının özünü yansıtan on iki fikir var. Bunların tümünün ortak noktası fiziksel dünyanın nasıl işlemesi gerektiğine dair gündelik deneyimimize dayanarak kazandığımız beklentilerle, bir diğer deyişle "sağduyuyla" çelişiyor olmaları.

Genel algı ile kuantum algı arasındaki bağlantı kopukluğunun basit bir nedeni var. İçinde yaşadığımız dünyada kuantum etkileri (ve görelilik etkileri) duyularımız üzerinde doğrudan bir etkide bulunmuyor. Dünyaya dönük (en azından fiziksel dünyaya dönük) yaklaşımımızı bizler gördüklerimiz, duyduklarımız, tadını aldıklarımız, kokladıklarımız ve dokundukularımız üzerine inşa ediyoruz. Bu dünya yaklaşımının, çok küçük ve çok hızlı olanların dünyası olan kuantum dünyasında da geçerli olduğu ortaya çıkabilirdi, ancak öyle olmadı. Dolayısıyla bize acayip ve olağanüstü görünen yeni fikirlerle karşı karşıya kaldık. Bu kitap boyunca bunlar anlatılacaktır. O yüzden tetikte olmalısınız.

Günlük yaşamlarını kuantum alanında sürdüren canlıların var olduğunu hayal edin. Onlar için aşağıda sıralanan fikirler

hiç heyecan verici olmaz, tersine apaçık olurdu. Biz dünyalılar için ise akla hayale sığmayan ürkütücü bir nitelik taşıyorlar.

Kuantum öbeklilik: Doğa, hem Dünya'yı oluşturan madde parçalarında hem de gerçekleşen değişimlerde esasen tanecikli veya öbekli bir yapıya sahiptir.

Olasılık: Küçük ölçekli dünyadaki olaylar, bizler olaylar hakkında bilenebilecek her şeyi biliyor olsak dahi, olasılık hükmeder.

Dalga-parçacık ikiliği: Madde hem dalga hem de parçacık özellikleri gösterebilir.

Belirsizlik ilkesi: Doğada, ölçümlerin hangi kesinliğe kadar yapılabileceğini belirleyen temel bir sınırlama bulunmaktadır.

İmha ve yaratım: Tüm etkileşimler parçacıkların yok olma ve var olmasını içerir ve gerektirir.

Spin: Görünür fiziksel uzama sahip olmayan "nokta parçacıklar" bile spin değerine sahiptir; spin (dönme) kuantize bir özelliktir.

Üst üste binme (süperpozisyon): Bir parçacık veya bir parçacık sistemi aynı anda iki veya daha fazla hareket durumunda olabilir.

Antisosyal parçacıklar: *Fermiyon* denen parçacıklar bir dışarlama ilkesine uyarlar. Özdeş iki fermiyon aynı anda aynı hareket durumunda olamazlar. Periyodik tablo dışarlama ilkesi sayesinde var olur.

Sosyal parçacıklar: *Bozon* denen parçacıklar aynı hareket durumunda toplaşabilirler (hatta bundan "hoşlanırlar"), bu *Bose-Einstein yoğunlaşması* adı verilen üst düzey bir "birlikteliği" mümkün kılar.

Korunum: Bazı nicelikler değişimin tüm süreçlerinde sabit kalırlar. Başka bazı nicelikler (kısmi korunumlu nicelikler) değişimin belirli bazı çeşitleri esnasında sabit kalırlar.

Hız sınırı: Işık hızı doğadaki hız sınırıdır. (Görelilik kuramının bu sonucu, en çarpıcı biçimiyle kuantum dünyasında ortaya çıkar.)

$E = mc^2$: Kütle ve enerji tek bir kavramda birleşir; böylelikle kütle enerjiye, enerji kütleye çevrilebilir. (Görelilik kuramının bir diğer sonucu, kendisini en etkileyici biçimde kuantum dünyasında gösterir.)

Teşekkürler

Bu kitabın hayata geçmesinde yardımları için özellikle üç dosta müteşekkirim: Diane Goldstein, soru-yanıt formunu önermesi ve uygulanmasında cesaretlendirdiği için; Jonas Schultz, taslağı dikkatle okuması ve çok sayıda değerli önerisi için Paul Hewitt, pedagojik kavrayışı ve çok sayıda şekli bu kitaptaki fikirleri hayata taşımaya yardım etti. David Mermin'e de şaşılacak ölçüde titiz incelemesi ve benimle paylaştığı kuantum fiziği kavrayışı için borçluyum.

Michael Fisher ve Anne Zarrella'nın dâhil olduğu Harvard University Press'teki ekibi ile çalışmak büyük bir zevkti. Westchester Book Group'taki Barb Goodhouse ve Carrie Nelkin'e çalışmaya yansıttıkları kararlı ancak nazik –ve etkili– emekleri için minnettarım.

Yolumu sonsuz mükâfatlarla döşeyenler karım Joanne, yedi çocuğum, on dört torunum ve sayısız harika öğrencim oldu. Bu kitabı onlara adıyorum.

I. Bölüm

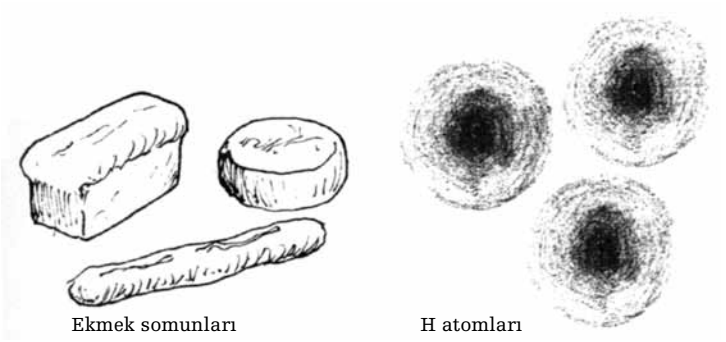
Atom-Altı Dünya

1. Kuantum nedir?

Sözlük anlamıyla kuantum bir öbektir, bir pakettir. Bizi çevreleyen gündelik yaşamda karşımıza belli büyüklükte "öbekler" biçiminde çıkan birçok şey vardır: Ekmek somunları, litrelik sütler, otomobiller gibi. Ancak bir ekmeğin, bir şişe sütün, bir otomobilin ne büyüklükte olacağını söyleyen bir doğa yasası yoktur. Ekmek ustası ekmeğine bir dilim, hatta bir kırıntı düzeyinde ekleme veya çıkartma yapabilir *(Şekil 1).* Sütçü, sütü yarım litrelik veya bir litrelik şişelerde satıp satmayacağına kendisi karar verir. Araba şirketi, ürününü bir miktar daha büyük veya daha küçük, daha ağır veya daha hafif yapabilir. Kuantum yasalarının hükmettiği küçük ölçekli dünyada ise işler böyle yürümez.[1]

Bir örnek verelim: Bir hidrojen atomu, belli bir çapa sahiptir (*başka* bir kuantum etkisi yüzünden hatlar keskin değildir).

1 *Kuantum* hem sıfat hem de isim olarak kullanılır. Kuantum fizik ve kuantum sıçramalardan bahsettiğimiz gibi, enerji kuantumu veya ışığın kuantumu da deriz. İsmin çoğulu ise *kuanta*'dır.

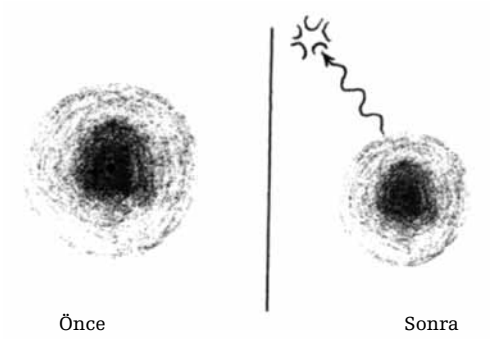


Şekil 1: Ekmek herhangi bir büyüklükte olabilir. Taban durumdaki hidrojen atomlarının tümü aynıdır.

Hidrojen atomunun çapı yaklaşık olarak nanometrenin onda biridir (Bir nanometre - nm, metrenin milyarda biri - 10^{-9} m' dir). Bundan daha küçük hale getirilemez. Bu onun taban durumu dediğimiz büyüklüğüdür. Bu büyüklükle bağlantılı olarak da belli bir enerji, onun taban durumu enerjisidir. Bundan daha az bir enerjiye sahip olması sağlanamaz. Bu, temel hidrojen atomu öbeğidir. Taban durumdaki *her* hidrojen atomu tam olarak aynı boyuta ve aynı enerjiye sahiptir; anlayacağınız bir evrensel hidrojen öbeğiyle karşı karşıya gelmekteyiz. Atom daha büyük ve daha enerjik hale getirilebilir, ancak bu da sadece belli kuantum artışları çerçevesinde mümkündür, herhangi bir seçili artış uygulanamaz. Böylesi daha büyük boyutlara, daha yüksek enerji durumlarına *uyarılmış durumlar* denir *(Şekil 2)*. Uyarılmış bir atom, bir ışık fotonu saldığı ve enerjisini daha yüksek bir değerden daha düşük bir değere düşürdüğü zaman, bir kuantum sıçraması yapıyor demektir.

Ortaya çıkan fotonun kendisi de bir kuantumdur, bir ışık "öbeği"dir. Foton, bir enerji kuantumunu üzerine alır ve bu enerji kuantumunu soğurulduğunda - örneğin retinanız tarafından - yaşamını sona erdirdiği noktada teslim eder.

Fotonun bize gösterdiği gibi, sadece *nesneler* değil, nesnelerin belli *özellikleri* de kuantum öbekleri biçiminde karşımıza çıkar. Örneğin enerji. Bir diğer örnek, elektrik yüküdür. Elektrik yükü, bir proton (veya onun negatif dengi olan bir elektron) ta-



Şekil 2: Uyarılmış durumdaki bir hidrojen atomu, bir foton salar ve taban durumdaki hidrojen atomuna dönüşür.

rafından taşınan miktarın sağlayabileceğinden daha iyi bir yolla ayarlanamaz. Elektrik yükünün 3,7 kuantum birimi gibi bir şey de mümkün değildir. Evrendeki her elektrik yükü, proton veya elektron yükünün tamsayı katıdır. (Bu kuralın bir istisnası vardır. Temel parçacıklar içerisinde kuarklar 1/3 ve 2/3 birim yükler taşırlar, ancak onlar da her zaman öyle bir biçimde birleşirler ki, tüm gözlenen veya ölçümlenmiş yükler proton veya elektron yüklerin tamsayısıdır.)

"Öbekli" özelliğe son bir örnek daha verecek olursak (ileride başka örnekler olacak), her bir parçacığın ve parçacıkların her bir kombinasyonunun spini ya sıfırdır veya en küçük spinin –ki bu elektronun spinidir- tamsayı katıdır. Detaya girmeden söylersek spin, dönme hareketinin etkinlik ölçüsüdür. Teknik olarak, *açısal momentum* dediğimiz niceliğin ölçümüdür. Bir çocuğun topu döner. Atlıkarınca da aynı şekilde döner. Her gün kendi ekseni etrafında bir kez dönen Dünya'mızda da durum aynıdır. Sıfır hariç en küçük spin miktarı elektronun spinidir. Bu en küçük kuantum miktarına proton da sahiptir. Foton, ilginç biçimde, elektron veya protonun iki katı spine sahiptir. Siz veya ben arkamıza dönersek, bunun ne kadar yavaş olduğunun önemi yok, bizim spinimiz astronomik derecede büyük sayıda kuantum birimi eder. Bu öyle büyüktür ki, bir kişinin spininin kuantum doğasını saptama ümidimiz yoktur.

Spin ölçümünde benimsenmiş olan birim, tarihsel nedenlerle fotonunkiyle aynı olmuştur. Buna 1 birim spin denmiştir. Elektronun spini, bu birimle, 1/2'dir. Böylelikle her parçacığın ve dünyadaki tüm varlıkların 0 veya 1/2 veya 1 veya 3/2 veya 2 veya 5/2, vs spini olur, ancak asla bu sayıların arasında bir değer olmaz, spin temel birimin tamsayı katı veya tek tamsayı bölü iki katı dışında bir değer alamaz.

2. Kuantum fizik yasaları nerede hüküm sürer?

"Her yerde" sorumuzun kısa yanıtıdır. Asıl sormak istediğimiz "Kuantum fiziğine nerede dikkat etmeliyiz?" sorusudur. Yanıt şudur: "Çok küçük şeyler dünyasında, yani moleküller dünyası ve onlardan daha küçük olan atomlar dünyasında, onlardan da küçük atomik çekirdekler ve daha da küçük temel parçacıklar dünyasında; atomlar da dâhil olmasına rağmen, genel olarak atom-altı dünya dediğimiz dünyada". İşte öbekliliğin önem kazandığı bu küçük ölçek âleminde dikkat etmeliyiz. Çakıllı bir nehir yatağında, kumlu bir sahilde, yumuşak bir çamur üzerinde yürüdüğünüzü düşünün. Bu yüzeylerin hepsi taneciklidir: çakıl parçaları, kum taneleri, çamur molekülleri… Çakıllı nehir yatağında adımlarınız tedbirli olur. Öbekliliğin bilincindesinizdir çünkü. Kumda granüllülüğün farkındasınızdır, ancak bunu hemen hiç önemsemezsiniz. Çamurda ise moleküler "öbekliliğin" bilincinden çok uzaksınızdır. Mevcut durum fark etme yetinizin çok ötesindedir.

Bir yudum suyu ele alalım. Suyun H_2O moleküllerinden oluştuğunu bilirsiniz, ancak sizin için bu moleküler öbeklilik önem taşımaz; suyun akışkanlığını, basıncını, kıvamlılığını, türbülansını vs ölçen bir fizikçi için de aynı şekildedir. *Klasik fizik* dediğimiz, kuantum öncesi fizik, bardaklar, borular, rezervler dolusu suyla ilgilenmek için tamamıyla uygundur. Tek bir H_2O molekülünü düşündüğümüzde ise işler farklılaşır. Klasik fizik bu meseleyi ele alamaz. Bu bir kuantum varlıktır, anlaşılması ve çalışılması ancak kuantum fiziğinin yardımıyla mümkün olabilir.

Dolayısıyla, sorun ölçek sorunudur. Kuantum fiziği büyük ölçekli dünyamızda da, atom-altı dünyada olduğundan daha az

geçerli değildir. Büyük hacimli maddelerin elektriği ne kadar iyi ilettiği, sıcaklığını 1 derece artırmak için ne kadar ısı gerektiği, renginin ne olduğu gibi birçok özelliği, sadece atomik ve moleküler bileşenlerinin kuantum özelliklerinin bilinmesi yoluyla anlaşılabilir. Yine de böylesi büyük ölçek davranışların kuantum temelleri, bizim doğrudan gözlemimizden uzak durmayı başarırlar. Kuantum fiziği sadece atomik ve atom-altı alanlarda gözümüze görünür.

Bu büyük ölçek / küçük ölçek ikiliğinin kuantum etkilerinin gündelik dünyamızda kendisini doğrudan hissettirdiği az sayıda istisna sözkonusudur. Bunların en dramatik olanlarından birisi de süper iletkenliktir. Çok düşük sıcaklıktaki bazı malzemelerde elektronlar direnç olmaksızın, kelimenin gerçek anlamıyla sürtünmesiz hareket ederler. Bu insan ölçekli dünyamıza dek ulaşan bir kuantum etkisidir. Elektronların sürtünmesiz hareketi, atomların ve moleküllerin çok daha küçük ölçekli dünyasında sıradan bir olaydır. Orada elektronlar sürekli hareket etmektedir. Enerjilerinin minimum bir değerin altına düşmesini engelleyen kuantum yasaları sayesinde yorulmaksızın sonsuza dek hareket edebilirler. Öte yandan bir kablo parçasında elektronlar normalde dirençle karşılaşırlar ve dış bir güçle itilmiyorlarsa akışları durur; tıpkı olağan dünyamızda itilmiyorsa duran diğer her şey gibi. Elektronların itilmeden durmaksızın döndüğü büyük süper iletken bir halka gördüğünüzde, bu kuantum fiziğinin izin verdiği sürtünmesiz hareketin atom-altından makroskobik alana kendisini geniştettiği anlamına gelir. Elektronlar bu büyük halka içerisinde aynen atomun içerisindeki gibi dönmektedirler.

3. Uyumluluk ilkesi nedir?

Kuantum etkileri küçük ölçekli dünyada önemli ve büyük ölçekli dünyada genelde önemsizse, ayrım çizgisi nerededir? Farklı şekilde söylersek, kuantum fiziğiyle klasik fizik arasındaki sınır nerededir? Bu aslında kimi fizikçilerin halen uğraştığı derin bir meseledir. Bazıları, "Evet, kuantum fiziği her yerde geçerlidir ve maddenin tüm hareketlerine hükmeder, ancak büyük sistemler için özel kuantum etkileri (kuantum öbekliliği

gibi) konu dışıdır" demektedir. Diğerleri "Atom-altı dünyada olan bir şeyi ölçtüğümüzde klasik dünyamızdaki büyük aletlerle bu ölçümü yaptığımız için, ölçüm eylemi iki dünyanın ayrılmaz biçimde birbirine bağlanmasına neden olur" tezini ileri sürer. Her iki görüş de klasik fiziğin büyük ölçekli dünyada neredeyse her şeyi başarılı biçimde açıkladığında ve kuantum fiziğin küçük ölçekli dünyada gerekli olduğunda birleşir. Yine her iki görüş de doğaya iki yolla bakmanın bir çelişki oluşturmadığında, kuantum fiziğinin – apaçık görülebilir olsun olmasın- her alanda etkili olduğunda hemfikirdir.

Bu noktada klasik fiziğin ne olduğuna dair birkaç hatırlatmada bulunalım. Esasen on yedinci, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyılda geliştirilen, kuvvet ve hareketin (mekanik); ısı, entropi ve hacimli maddenin (termodinamik); elektrik, manyetizma ve ışığın (elektromanyetizma) fiziğidir. Albert Einstein'ın yirminci yüzyıldaki -özel ve genel- görelilik teorilerine de kuantum dışı oldukları için *klasik* denmektedir. Bunlar, kuantum öbekleri ve kuantum sıçramalarıyla değil, düz değişimle ilgilidirler. Klasik teoriler uygulandıkları alanlarda - bu ister bir buhar makinesini güçlendirme, ister radyo sinyali iletme, isterse de Ay'a bir astronot indirme olsun - şaşırtıcı biçimde başarılıdırlar.

Büyük Danimarkalı fizikçi Niels Bohr, kuantum fiziğinin klasik fizikten tamamen farklı olmasına karşın, onu alaşağı etmediği yönündeki içinden çıkılması imkânsız gibi görünen problemle ilk boğuşanlardan birisi oldu. 1913'te *uyumluluk ilkesini* öne sürdü. Bu ilke, bir kuantum durumu ile sonraki durum arasında artışlar küçüldükçe, klasik fiziğin daha büyük ölçüde kesin hale geldiğini söylüyordu. Bohr'un prensibini ilk olarak uyguladığı hidrojen atomu örneğinde, taban durum ile ilk birkaç uyarılmış durum birbirlerinden dramatik biçimde farklılaşıyorlar ve klasik davranışla bir benzerlik bulunmuyordu; ancak uyarılmış durumun yüzde bir veya iki yüzde birine inersek kuantum ve klasik tanımlar birbirlerine ''uyumlu hale gelmeye" başlıyorlardı. Böylelikle elektron için gezegene benzer şekilde bir "yörünge"den söz etmek mümkün hale geliyor ve elektronun 200 durumundan 199 durumuna, 198 duru-

muna, 197 durumuna kuantum sıçramaları, radyasyonun klasik modelde öngörüldüğü gibi soğurulduğu, içe doğru düzgün bir helozonik harekete benzemeye başlıyordu. Gerçekte Bohr uyumluluk ilkesini henüz formüle etmemiş, sadece kullanmıştı. Kuantum ve klasik dünyaların yüksek uyarılmış durumlarda pürüzsüzce birleşmesi gerekliliği düşüncesiyle, taban durumuna dek tüm durumların özellikleri hakkında sonuçlara varabilmesi mümkün olmuştu.

Aslında görelilik için de bir uyumluluk ilkesi vardır. Kütleçekim alanlarının (kara deliğe yakın olanlarla karşılaştırmalı olarak) zayıf olduğu ve hızların (ışığın hızıyla karşılaştırmalı olarak) küçük olduğu yerlerde klasik, görelilik dışı fizik gayet iyi işler. Ancak aynı kuantum fiziği gibi, görelilik zayıf alanlarda ve düşük hızlarda doğru gibi durmamaktadır. Etkileri daha ziyade birçok nedenle göz ardı edilebilir derecede küçüktür.

4. Bir atom ne kadar büyüktür?

Eğer bir protonsanız atom çok büyüktür, sizin yaklaşık yüz binlerce katınız büyüklüğündedir. Öte yandan bir atom, bir insandan çok küçüktür, sizden yaklaşık on milyar kez küçüktür. Anlayacağınız, atomun büyüklüğü görelidir. Bir atom tanesi en iyi optik mikroskopla bile görülemeyecek kadar küçüktür,

Niels Bohr (1885–1962): Fotoğraftaki gençlik döneminde Bohr, çoğu Danimarkalı tarafından bir fizikçi olarak değil, futbolcu kimliğiyle tanınırdı. Yaşı ilerlediği dönemde yazlığının kapısında bir at nalı asılı olmasını bir arkadaşına şöyle açıkladığı rivayet edilir: " Elbette batıl inançlı değilim. At nalının şans getirdiğine inanmıyorum. Ama inanmıyor olsan da işe yaradığını söylediler."*Niels Bohr Archive, Copenhagen; Photo courtesy of AIP Emilio Segre Visual Archives*.