

RICHARD P. FEYNMAN

"Kendi kuşağının en özgün beyni"
– FREEMAN DYSON

ALTI KOLAY PARÇA

ALFA | BİLİM

Altı Kolay Parça
© 2012, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

Six Easy Pieces
© 1963, 1989, 1995, 2011, California Institute of Technology
İlk olarak ABD'de Perseus Books grubuna bağlı Basic Books tarafından yayımlanmıştır.

Kitabın Türkçe yayın hakları Nurcihan Kesim 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 Uğur Uluç
Sayfa Tasarımı Mürüvet Durna

ISBN 978-605-106-799-5
1. Basım: Aralık 2013

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa - İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 12088

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

Robert B. Leighton ve
Matthew Sands'ın
katkılarıyla

RICHARD P. FEYNMAN

"Kendi kuşağının en özgün beyni"
– FREEMAN DYSON

Çeviri
Zekeriya Aydın

6 ALTI KOLAY PARÇA

ALFA® | BİLİM

İçindekiler

Yayıncının Notu, 7
Giriş, 9
Özel Önsöz, 19
Feynman'ın Önsözü, 25

1. HAREKETLİ ATOMLAR 31
Giriş 31
Madde Atomlardan Oluşmaktadır 34
Atom Süreçleri 41
Kimyasal Tepkimeler 45

2. TEMEL FİZİK 53
Giriş 53
1920'den Önceki Fizik 57
Kuantum Fiziği 63
Çekirdekler ve Parçacıklar 68

3. FİZİĞİN DİĞER BİLİMLERLE İLİŞKİSİ 77
Giriş 77
Kimya 78
Biyoloji 79
Astronomi 89
Jeoloji 91
Psikoloji 93
Bu Duruma Nasıl Geldi? 94

4. ENERJİNİN KORUNUMU 99
Enerji Nedir? 99
Kütleçekimsel Potansiyel Enerji 102
Kinetik Enerji 111
Diğer Enerji Biçimleri 112

5. KÜTLEÇEKİM KURAMI 119
Gezegen Hareketleri 119
Kepler Yasaları 120
Dinamiğin Geliştirilmesi 123
Newton'un Kütleçekim Yasası 124
Evrensel Kütleçekimi 129
Cavendish Deneyi 136
Kütleçekim Nedir? 138
Kütleçekim ve Görelilik 143

6. KUANTUM DAVRANIŞI 147
Atom Mekaniği 147
Kuantum Davranışı 149
Mermilerle Bir Deney 149
Dalgalarla Bir Deney 152
Elektronlarla Bir Deney 155
Elektron Dalgalarının Girişimi 157
Elektronları İzleme 160
Kuantum Mekaniğinin Temel İlkeleri 166
Özet 167
Belirsizlik İlkesi 169

Dizin, 173

YAYINCININ NOTU

Altı Kolay Parça, mümkün olduğunca geniş bir okuyucu kitlesine temel fizik bilgilerini Richard Feynman'ın bilimine dayalı olarak çok teknik olmayan bir tarzda verebilme ihtiyacından doğmuştur. Feynman'ın hâlâ en ünlü yayını olarak duran tarihsel anıt niteliğindeki ünlü "*Feynman'ın Fizik Dersleri*" kitabından (özgün olarak 1963'te basılmıştır) en kolay altı bölümü seçtik. Feynman belli ana konuları, akademik matematiği kullanmaksızın, çok nitel terimler cinsinden sunma yolunu seçtiği için genel okuyucu şanslı sayılır; *Altı Kolay Parça* için bunlar bir araya getirilmiştir.

Yeniden oluşturulan bu derleme kitaba yazmış olduğu derinlikli Giriş için Paul Davies'e teşekkür ederiz. Bu Giriş'in arkasına *Feynman'ın Fizik Dersleri*'ndeki iki önsözü de tekrar ekledik; bunların birisi Feynman'ın kendisine, diğeriyse onun iki meslektaşına aittir; kitaptaki parçaları kaleme de alan bu iki meslektaş, Richard Feynman'a ve bilimine derinlik katmışlardır.

Son olarak, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsünün Fizik Bölümüne ve Enstitü Arşivlerine, özellikle de Dr. Judith Goodstein'a ve bu projenin tüm aşamalarında yaptığı önemli önerilerinden ötürü Dr. Brian Hatfield'e teşekkür ederiz.

GİRİŞ

Bilimin kişisel olmayan, tarafsız ve baştan aşağı nesnel bir girişim olduğu şeklinde bir yanlış anlama vardır. Diğer pek çok insan etkinliği moda, gelenekler ve kişilikler tarafından biçimlenirken, bilimin herkesçe benimsenmiş kurallar ve katı sınırlamalarla sınırlı olduğu düşünülür. Değerli olan sonuçlardır, onları üreten kişiler değil.

Kuşkusuz, bunun anlamsız olduğu apaçıktır. Bilim, tüm insan davranışları gibi, moda ve hevese bağlı olarak, insanların sürdürdüğü bir etkinliktir. Bu durumda, moda pek de konu seçimiyle değil de, bilim adamlarının dünya hakkındaki düşünce tarzlarıyla oluşturulur. Her çağ, genellikle hem gündemi belirleyen ve hem de problemlerin üstesinden gelecek en iyi yöntemleri tanımlayan bazı baskın kişilerce çizilmiş yolu izleyerek, bilimsel problemlere karşı kendi özel yaklaşımını seçer. Arada sırada bilim adamları kamuoyunun dikkatini çekmeye yetecek derecede gelişme gösterirler ve bir bilim adamı olağanüstü yeteneğiyle tüm bilimsel camia için bir ikon haline gelebilir. Önceki yüzyıllarda Isaac Newton bir ikondu. Newton, beyefendi bilim adamının canlı örneği olmuştu: iyi ilişkilere sahip, içten bir dindar, telâşsız ve çalışmalarında yöntemli biri. Onun bilim yapma tarzı iki yüzyıl boyunca standart oluşturmuştu. Yirminci yüzyılın ilk yarısında, popüler bilim adamı ikonu olarak Newton'un yerini Albert Einstein almıştı. Eksantrik, dağınık, Alman tarzında, unutkan, çalışırken tümüyle işine dalan ve özgün bir

soyut düşünür olarak, Einstein, konuyu tanımlayan birçok düşünceyi sorgulayarak fizik yapma tarzını getirmişti.

Yirminci yüzyılın son yarısındaysa Richard Feynman bir fizik ikonu haline gelmiştir; bu unvana ulaşan ilk Amerikalı. 1918'de New York'ta doğmuş ve Batı Kıyısında okumuştu; bu yüzyılın ilk otuz senesinde görelilik kuramı ve kuantum mekaniği gibi iki devrimle dünya görüşümüzü değiştirmiş olan fiziğin Altın Çağına katılmak için çok geç kalmıştı. Bu kapsamlı gelişmeler, artık Yeni Fizik dediğimiz yapının temellerini oluşturdu. Feynman bu temellerle başladı ve Yeni Fiziğin zemin katının yapımına yardım etti. Onun katkıları konunun neredeyse her köşesine erişti ve fizikçilerin fiziksel evren hakkındaki düşünme yolları üzerine derin ve sürekli etkileri oldu.

Feynman mükemmel bir kuramsal fizikçiydi. Newton eşit ölçüde hem deneyci hem de kuramcıydı. Einstein saf düşünceye güvenmeyi yeğleyerek deneyi düpedüz küçümseyen biriydi. Feynman doğanın kuramsal olarak derinlemesine kavranmasını geliştirmeye girişmişti, fakat deneysel sonuçların gerçek ve genelde kirli dünyasına daima yakın durmuştu. *Challenger* uzay mekiği faciasının nedenini buzlu suya bir lâstik şerit daldırarak açıklayan yaşlı Feynman'ı izleyen hiç kimse oradakinin hem bir şovmen ve hem de iş-bilir bir düşünür olduğundan kuşku duymazdı.

Başlangıçta, Feynman atomaltı parçacıkların kuramı, özellikle kuantum elektrodinamiği ya da kısaca QED denen konudaki çalışmalarıyla kendine bir isim yapmıştı. Aslında, kuantum kuramı bu konuyla başlamıştı. 1900'de Alman fizikçi Max Planck, o zamana dek dalga sayılmış olan ışığın ve diğer elektromanyetik ışınımın, maddeyle etkileşirken, çelişkili bir şekilde, küçük enerji paketçikleri ya da "kuantumları" gibi davrandığı önerisinde bulunmuştu. Bu özel kuantumlar, fotonlar adıyla bilinir oldu. 1930'ların başlarında, yeni kuantum mekaniğinin mimarları, elektron gibi elektrik yüklü parçacıklar tarafından fotonların yayınlanmasını ve soğurulmasını betimlemek için bir matematiksel şema bulup çıkarmaya çalıştılar. QED'nin bu erken formülasyonu sınırlı

bir başarı sağladıysa da, kuram açıkça kusurlar içeriyordu. Birçok durumda hesaplamalar, iyi sorulmuş fiziksel sorulara tutarsız ve hatta sonsuz yanıtlar vermekteydi. 1940'ların sonlarına doğru genç Feynman dikkatini QED'nin tutarlı bir kuramını kurma problemine çevirmişti.

QED'yi sağlam bir temele oturtmak için, kuramı sadece kuantum mekaniğinin ilkeleriyle tutarlı kılmak yetmiyordu, ayrıca özel görelilik kuramıyla da tutarlı olmalıydı. Bu iki kuram, kendi ayırt edici matematiksel mekanizmasıyla – QED'nin doyurucu bir betimlenişini vermek için birleşip uzlaşabilen karmaşık denklem sistemleriyle– birlikte gelirler. Bunu yapmak, çok üst düzeyde matematiksel beceri isteyen çetin bir girişimdi ve Feynman'ın çağdaşları tarafından izlenen bir yaklaşımdı. Bununla birlikte, Feynman'ın kendisi köklü şekilde farklı bir yol seçmişti; aslında o kadar köklü ki, yanıtları dosdoğru hiç matematik kullanmadan az çok yazabilir durumdaydı!

Feynman, bu olağanüstü sezgi becerisine yardımcı olsun diye, kendi adıyla anılan basit bir diyagramlar sistemi icat etmişti. Feynman diyagramları, elektronlar, fotonlar ve diğer parçacıklar birbirleriyle etkileştikleri zaman neler olduğunu güçlü bir şekilde bulup anlamaya yönelten sembolik bir resimleme yoludur. Günümüzde Feynman diyagramları hesap yapmada standart bir destektir, fakat 1950'lerin başlarında geleneksel yolla kuramsal fizik yapmaktan korkunç sapmayı gösteriyordu.

Kuantum elektrodinamiği için tutarlı bir kuram kurma problemi, fiziğin gelişmesinde bir kilometre taşı olmakla birlikte, sadece bir başlangıçtı. Bu ayırt edici bir Feynman tarzı tanımlama işiydi; fizik biliminde geniş bir konu bölgesinden önemli sonuçlar dizisi üretmeye yönelik bir tarz. Feynman tarzı, en iyi şöyle betimlenebilir: Yaygın bilgeliğe karşı saygı ile saygısızlığın bir karışımı.

Fizik bir tam bilimdir ve mevcut bilgi toplamı, noksan olsa da, basitçe omuz silkerek bir kenara atılamaz. Feynman fiziğin benimsenmiş ilkelerini çok genç yaşında müthiş

şekilde kavramıştı ve neredeyse tamamen geleneksel problemler üzerine çalışmayı seçmişti. Bilim dalının durgun sularında yalnız başına arı gibi çalışacak ve son derece yeni şeyleri rastlantı sonucu bulacak türden bir deha değildi o. Onun özel yeteneği, esas ana yönelime kendine özgü bir şekilde yaklaşmaktı. Bu, mevcut formalizmlerden uzak durup kendi son derece sezgisel yaklaşımını geliştirmek demekti. Pek çok kuramsal fizikçi, onları bilinmeyen bölgelere taşımak üzere bir kılavuz ve bir dayanak sağlamak için özenli matematiksel hesaplamalara güven duyarken, Feynman ise neredeyse bir şövalye gibi davranıyordu. Doğayı sanki bir kitap gibi okuyor ve bulduklarını –karmaşık çözümlemelerle bunaltmadan– basitçe rapor ediyor izlenimi veriyordu.

Gerçekten de, Feynman ilgi duyduğu şeylerin peşinde bu tarzda koşarken, tam doğru formalizme karşı iyi niyetli bir küçümseme sergiliyordu. Bu tarz çalışmada gerekli olan deha derinliğini taşımak zordur. Kuramsal fizik, hayal edilmesi olanaksız olan soyut kavramlar ile aşırı matematiksel karmaşıklığı birleştiren en zor düşünsel alıştırmadır. Fizikçiler ancak zihinsel disiplinin en yüksek standartlarını benimseyerek bu yolda ilerleme sağlayabilirler. Ama Feynman bu kesin uygulama yasasını çiğneyip geçiyor ve Bilgi Ağacından hazır meyve yağmalar gibi yeni sonuçlar topluyordu.

Feynman tarzı, bu yapısını büyük ölçüde onun kişiliğine borçludur. Mesleğinde ve özel yaşamında, Feynman dünyayı büyük bir eğlenceli oyun olarak görürdü. Fiziksel evren ona büyülü bir bilmeceler ve meydan okumalar dizisi sunmuştu ve sosyal çevresini de böyle oluşturmuştu. Ömür boyu alaycı biri olarak, otoriteye ve akademik teşkilâta karşı da, can sıkıcı matematiksel formalizme gösterdiği aynı patavatsız tavrıyla davranmıştı. Asla aptallıklara katlanan biri değildi; keyfi ve saçma bulduğu kuralları yıkardı. Özgeçmişiyle ilgili yazılanlar, savaş sırasında atom-bombası güvenlik hizmetlerini tiye alan Feynman, kasaları açan Feynman, edepsizce cesur davranışlarıyla kadınların silahını alan Feynman gibi hoş öykülerle doludur. QED üzerine yaptığı çalışmalarla ka-

zandığı Nobel Ödülünü, benzer bir "ister al-ister alma" havasında karşılamıştı.

Formalitelerden hoşlanmayışı yanında, Feynman tuhaf ve anlaşılmaz bir büyüye sahipti. Çoğu kimse, ölümüne yakın zamanda nefis şekilde çekilmiş bir belgeselde Orta Asya'daki kayıp Tuva ülkesiyle ilgili saplantısını anımsayacaktır. Onun diğer tutkuları arasında, bongo davulları (ikili davul) çalması, resim yapması, sık sık striptiz kulüplerine gitmesi ve Maya metinlerini deşifre etmesi sayılabilir.

Feynman kendi ayırt edici kişiliğini oluşturmak için çok uğraşmıştı. Kalem oynatmayı pek sevmese de, konuşmada üstüne yoktu; düşünce ve maceraları hakkında öyküler anlatmaya bayılırdı. Yıllarca biriken bu efsaneler, onun gizemli havasına eklenmeye ve kendi yaşamında herkesçe bilinen bir söylence olmasına yardım etmişti. Onun hoşa giden tavrı, onu öğrencilere, özellikle genç olanlara, çok sevdirmişti; pek çoğu ona tapar hale gelmişti. Feynman 1988'de kanserden öldüğünde, meslek hayatının büyük kısmını geçirdiği Caltech'teki öğrenciler şu basit mesajı içeren bir pankart açtılar: "Seni seviyoruz Dick."

Feynman'ın genelde yaşama ve özelde fiziğe kaygıdan uzak yaklaşımı, onu böylesine muhteşem bir iletişimci yapmıştı. Ders vermek ya da doktora öğrencilerine danışmanlık yapmak için çok az zamanı vardı. Bununla birlikte, işine geldiğinde, tüm parıldayan zekâyı düzenleyerek, işin iç yüzüne nüfuz ederek ve araştırmalarının etkilenmesine neden olan saygısızlıkla çok parlak dersler verirdi.

1960'ların başlarında Feynman Caltech'in birinci ve ikinci sınıflarına bir giriş fizik dersi okutmaya razı edilmişti. Bunu, belirgin bir gösteriş içinde ve onun resmiyetten uzak, zevkli ve alışılmadık mizahının eşi bulunmaz karışımıyla yapmıştı. Neyse ki, bu paha biçilmez dersler gelecek kuşaklar için kitap şeklinde korunmaktadır. Geleneksel ders kitaplarından tarz ve sunuş olarak çok uzak olsalar da, *Feynman'ın Fizik Dersleri* çok büyük bir başarıydı ve tüm dünyada bir öğrenci kuşağını coşturmuş ve esinlendirmişti. Bu ciltler otuz yıldır

parıltı ve akıcılıklarından hiçbir şey kaybetmediler. *Altı Kolay Parça*, doğrudan doğruya *Feynman'ın Fizik Dersleri*'nden seçilip bir araya getirilmiştir. Bunun amacı, bu anıt eserin pek teknik olmayan ilk bölümlerini toplayarak genel okuyucuya Eğitimci Feynman'dan hakiki bir tat sunmaktır. Sonuçta, hem bilim adamı olmayanlar için fizik üzerine bir giriş ve hem de Feynman'ın kendisi hakkında bir başlangıç olarak hizmet edecek nefis bir kitap ortaya çıkmıştır.

Feynman'ın özenle yapılmış seriminde en etkileyici olan, çok az kavram kullanıp matematiksel ve teknik dili de minimumda tutarak geniş kapsamlı fiziksel fikirleri geliştirebilme yoludur. Feynman, derin bir ilkenin esasını ortaya çıkarmak için, onu önemsiz ya da ilgisiz ayrıntılarla boğmaksızın, tam doğru benzetmeyi ya da olağan resmi bulmanın püf noktasını bilirdi.

Bu kitapta içerilen konuların seçimi, çağdaş fiziğin kapsamlı olarak gözden geçirilişini amaçlamaz; ancak Feynman yaklaşımını size tadı damağınızda kalacak kadar tattırır. Feynman'ın kuvvet ve hareket gibi günlük konuları yeni anlayışlarla nasıl açıklayabileceğini hemen keşfederiz. Temel kavramlar günlük yaşamdan ya da eski çağlardan alınmış örneklerle açıklanır. Fizik, sürekli olarak diğer bilimlerle ilişkilendirilir, ama okuyucu, hangisinin temel disiplin olduğu hususunda da kuşkuda kalmaz.

Altı Kolay Parça'nın hemen başlangıcında tüm fiziğin yasa kavramına ne kadar sıkı tutunduğunu –akılcı bir uslamlama uygulayarak anlaşılabilen düzenli bir evrende olduğumuzu– anlarız. Bununla birlikte, fizik yasaları doğrudan doğa gözlemlerimizde size apaçık görünmüyorlar. Onlar incelediğimiz olaylarda iyice gizlenmiş, ustaca kodlanmıştır. Temeldeki bu yasa-türü gerçekliği ortaya çıkarmak için, fizikçinin gizemli yöntemlerine –dikkatlice tasarlanmış denemelerinin ve matematiksel kuramların bir karışımına– gereksinim duyulur.

Fiziğin belki de en iyi bilinen yasası, burada 5. Bölümde tartışılan, Newton'un kütleçekimle ilgili ters kare yasası-

dır. Konu, güneş sistemi ve Kepler'in gezegenlerin hareketi yasaları çerçevesi içinde sunulmaktadır. Fakat kütleçekim tüm evren boyunca uygulanabilir, dolayısıyla evrenseldir; Feynman'a hesabını astronomi ve kozmolojiden örneklerle tatlandırma olanağı vermiştir. Görünmeyen kuvvetlerle bir şekilde bir arada tutulan gök cisimleri kümesinin resmi üzerine yorumda bulunurken, Feynman duygusallaşır: "Burada etkili olan kütleçekimini anlayamayan kişi, ruhsuz biri demektir."

Doğada madde parçacıklarının birbirleriyle nasıl etkileştiklerini betimleyen kütleçekim-dışı çeşitli kuvvetlerle ilgili diğer yasalar da bilinmektedir. Ama bu kuvvetlerin sayısı çok azdır ve tarihte, bazı atomaltı parçacıkların davranışını etkileyen bir zayıf çekirdek kuvvetiyle ilgili, yeni bir fizik yasası keşfeden birkaç fizikçiden biri olarak Feynman oldukça ayrıcalıklıdır.

Yüksek-enerji parçacık fiziği, devasa hızlandırıcı makineleri ve yeni keşfedilmiş atomaltı parçacıkların görünürdeki upuzun listesiyle, savaş sonrası bilim tacında, korkunç ve büyüleyici bir mücevherdi. Feynman'ın araştırması daha ziyade bu girişimin sonuçlarını anlamlı kılmaya yönelikti. Atomaltı parçacıklar dünyasına bir düzen getirme çabasında, simetrinin rolü ve korunum yasaları, parçacık fizikçileri arasında büyük birleştirici tema olmuştu.

Şansa bakın ki, parçacık fizikçilerinin bildiği simetrilerin çoğu, zaten klasik fizikte biliniyordu. Bunlar arasında başlıcaları, uzay ve zamanın tekdüzeliğinden kaynaklanan simetrilerdi. Zamanı alın: zamanın başlangıcını işaretleyen büyük patlamalı kozmoloji bir yana, fizikte bir zaman ânını bir sonrakinden ayırt edecek hiçbir şey yoktur. Fizikçiler buna "dünya, zaman ötelenmeleri altında değişmezdir" derler; bu da, "ölçümlerinizde zamanın sıfırını ister gece yarısı isterse gün ortası olarak alın, fiziksel olayların betimlemesi fark etmez" anlamına gelir. Fiziksel süreçler zamanın mutlak sıfırına bağlı değildir. Zaman ötelenmesi altındaki bu simetrinin, doğrudan doğruya en temel ve ayrıca en yararlı fizik

yasalarından birini ifade ettiği anlaşılır: enerjinin korunumu yasası. Bu yasaya göre, enerjiyi etrafta dolaştırabilir ve biçimini değiştirebilirsiniz, fakat onu yaratamazsınız ya da yok edemezsiniz. Feynman bu yasayı, oyuncak bloklarını annesinden çeşitli şekillerde hınzırca gizleyen afacan Deniz'in eğlenceli öyküsüyle berrak hale getiriyor (Bölüm VI).

Bu kitaptaki en düşündürücü ders, kuantum mekaniğinin bir serimi olan sonuncusudur. Kuantum mekaniği yirminciyüzyıl fiziğine egemen olmuştur ve hiç kuşku yok ki en başarılı tek bilimsel kuramdır demek abartı olmaz. Atomaltı parçacıkları, atom ve çekirdekleri, molekül ve molekül bağlarını, katıların yapısını, süperiletken ve süperakışkanları, metallerin ve yarı-iletkenlerin elektriksel ve ısıl iletkenliklerini, yıldızların yapısını ve daha pek çok şeyi anlamak için vazgeçilmezdir. Lazerden mikroçiplere kadar uzanan pratik uygulamaları vardır. İlk bakışta –ve ikincide de– tüm bunların bir tek kuramdan çıkması kesinlikle çılgınca görünmektedir! Kuantum mekaniğinin kurucularından biri olan Niels Bohr, bir keresinde, bu kuram tarafından çarpılmayan bir kimse onu anlamamış demektir yorumunda bulunmuştu.

Sorun, kuantum düşüncesinin, sağduyusal gerçeklik dediğimiz şeyin tam kalbine saldırmasıdır. Özellikle, elektron ya da atom gibi fiziksel nesnelerin –fiziksel özelliklerinin tüm cümlesiyle– bağımsız varlıklarını sürdürmesi fikri kuşku yaratmaktadır. Örneğin bir elektron aynı anda iyi-tanımlı bir hız ile birlikte uzayda kesin bir konuma sahip olamaz. Bir elektronun nerede yerleştiğini ararsanız, onu belli bir yerde bulursunuz ve onun hızını ölçerseniz, belli bir yanıt bulursunuz; fakat her iki gözlemi bir kerede yapamazsınız. Tam bir gözlemler cümlesi var olmadıkça, bir elektrona konumu ve hızı için belirli ama henüz bilinmeyen değerler vermenin hiçbir anlamı yoktur.

Atom parçacıklarının gerçek doğasında var olan bu belirlenemezlik, Heisenberg'in ünlü belirsizlik ilkesiyle kısaca anlatılır. Bu ilke, konum ve hız gibi özelliklerin aynı anda bilinmesiyle ilgili doğruluk derecesi üzerine kesin sınırlar ko-

yar. Konumun kesin bir değeri, hızın olası değerler bölgesini bulanıklaştırır ve aynı şekilde tersi de doğrudur. Kuantum bulanıklığı, elektronların, fotonların ve diğer parçacıkların hareket tarzında da ortaya çıkar. Belli deneyler bu parçacıkları uzayda aldıkları belirli yollarla görünür kılar; mermilerin hedefe doğru izledikleri yörüngeler gibi. Fakat diğer deneysel düzenlemeler, tipik kırınım ve girişim örüntüleri göstererek, bu nesnelerin dalgalar gibi de davranabildiklerini ortaya çıkarır.

Feynman'ın "şaşırtıcı" dalga-parçacık ikiliğini en katı haliyle didik didik eden şu ünlü "çift-yarık" deneyini ustalıkla çözümlemesi, bilimsel sergileme tarihinde bir klasik haline gelmişti. Çok basit birkaç düşünceyle, Feynman okuyucuyu, kuantum gizeminin tam kalbine götürmeyi becerir ve bizi gerçekliğin çelişkili doğasıyla büyülenmiş olarak bırakır.

1930'ların başlarında artık kuantum mekaniği için ders kitapları yazılmaya başlandıysa da, genç biri olarak, Feynman'ın bu kuramı kendisi için tamamıyla yeni bir tarzda yeniden biçimlendirmeyi yeğlemesi ancak ondan beklenir. Feynman'ın yöntemi, bizi doğada işleyen kuantum kurnazlığının canlı bir resmiyle donatan bir niteliğe sahiptir. Yöntemdeki düşünce, bir parçacığın uzaydaki yolunun kuantum mekaniğinde iyi tanımlanmamış olmasıdır. Serbest hareket eden bir elektron düşünelim; sağduyu, bunun A ve B arasında sadece düz çizgi boyunca gitmediğini, çeşitli dalgalı yolları izleyeceğini akla getirir. Feynman elektronun bir şekilde olası tüm yolları yokladığını düşünmeye çağırır bizi ve hangi yolun izlendiği gözlenmediği durumlarda, tüm bu seçenekli yolların gerçekliğe bir şekilde katkıda bulunduğunu var saymalıyız der. Böylece bir elektron uzayda bir noktaya –diyelim ki hedefteki ekrana– ulaştığında, bu bir olayı doğurmak için pek çok farklı geçmişler bir araya toplanmalıdır.

Feynman'ın kuantum mekaniğine yol-integrali ya da geçmişler-üzerinden-toplam denen yaklaşımı, bir matematiksel işlem olarak bu olağanüstü kavramı düzenler. Bu bir dereceye kadar bir merak olarak yıllarca beklemişti, fakat fizikçiler

kuantum mekaniğinin sınırlarını –onu kütleçekime ve hatta kozmolojiye uygulayarak– zorlayınca, Feynman yaklaşımının kuantum evrenini betimlemek için en iyi hesaplama aracı olduğu anlaşıldı. Tarih, fiziğe birçok önemli katkı arasında, kuantum mekaniğinin yol integrali formülasyonunun pekâlâ bunların en önemlisi olduğu kararını verebilir.

Bu ciltte tartışılmış olan pek çok fikir, derinlemesine felsefidir. Feynman ise felsefecilerden hep kuşku duyardı. Bir keresinde, matematiğin doğası ve fizik yasaları hakkında ve bağımsız bir Platonik varoluştan hoşlanmak için soyut matematiksel yasaların dikkate alınıp alınamayacağı konusunda onu alt etme fırsatı yakalamıştım. Bunun gerçekten neden böyle göründüğüne dair canlı ve hünerli bir betimleme vermiş, fakat ben onu özel bir felsefi konum almaya zorlayınca hemen geri çekilmişti. Onu indirgemecilik konusundan dışarı çekmeye giriştiğimde, benzer biçimde dikkat kesiliyordu. Bir şeyin nitelik ve önemini anlamayla, Feynman her şeyden sonra felsefe sorunlarına karşı kendini beğenmiş olmadığına inanıyorum. Fakat o sistematik matematiksiz çok iyi matematiksel fizik yapabildiği gibi, sistematik felsefesiz de bir takım iyi felsefi kavrayışlar üretiyordu. Onun hoşlanmadığı formalizmdi, içerik değil.

Dünyanın bir diğer Richard Feynman görmesi olanaksızdır. O tam da zamanının adamıydı. Feynman tarzı, bir devrimi sağlamlaştırma ve onun sonuçlarını kapsamlı olarak incelemeye girişme süreci konusunda çok iyi işlemişti. Savaş sonrası fiziği kendi temelleri üzerinde güvence altındaydı, kuramsal yapısı olgunlaşmıştı, sadece her şeye burnunu sokup onlardan yararlanmaya karşı çok açıktı. Feynman soyut kavramlardan oluşan bir hârikalar diyarına girmiş ve bu kavramların pek çoğu üzerine kendi kişisel düşünme damgasını vurmuştu. Bu kitap, olağanüstü bir insanın beynine eşsiz bir bakış sağlamaktadır.

Eylül 1994 Paul Davies

ÖZEL ÖNSÖZ

(Feynman'ın Fizik Dersleri'nden)

Yaşamının sonlarına doğru, Richard Feynman'ın ünü bilimsel topluluğun sınırlarını aşmıştı. *Challenger* uzay mekiği faciasını araştırma komisyonunun bir üyesi olarak kahramanlıkları onu iyice halk önüne çıkarmış; benzer şekilde, onun mizah içerikli destansı maceraları hakkındaki çok satan kitabı onu neredeyse Albert Einstein ölçeğinde bir halk kahramanı yapmıştı. Fakat ta 1961'de, Nobel Ödülünden önce de, halkın çoğu onu tanır olmuştu. Feynman sadece bilim camiasının üyeleri arasında ünlü olmanın ötesinde biriydi; o bir efsaneydi. Hiç kuşkusuz, onun olağanüstü öğretme gücü, Richard Feynman efsanesinin yayılmasına ve zenginleşmesine yardımcı olmuştu.

O gerçekten de büyük bir öğretmendi, belki kendi çağının ve bizimkinin en büyüğü. Feynman için konferans salonu bir tiyatroydu; ders veren, olayları ve figürleri olduğu kadar tiyatro eserini ve havai fişekleri sağlamaktan da sorumlu olan bir sanatçı. Sınıfın önünde kollarını sallayarak etrafı kolaçan ederdi; *The New York Times* onun için "tüm beden hareketleri ve ses efektleriyle birlikte, bir kuramsal fizikçi ile bir sirk çığırtkanının olanaksız birleşimi" diye yazmıştı. İster öğrencilere, ister meslektaşlarına, isterse halktan dinleyicilere hitap etsin, bizzat bir Feynman dersi görme şansına erenler için, bu deneyim, genelde alışılmadık ve asla unutulmaz olurdu; tıpkı kendisi gibi.

O büyük bir tiyatro ustasıydı, ders salonundaki her dinleyicinin ilgisini çeken bir üstat. Yıllar önce, birkaç kayıtlı lisansüstü öğrenci ile çoğunluğu Caltech fizik fakültesinden olan büyük bir sınıfa İleri Kuantum Mekaniği dersini okutmuştu. Derslerin birinde, Feynman, bazı karmaşık integrallerin diyagramlarla nasıl temsil edileceğini açıklamaya başladı: bu eksen üzerinde zaman, şu eksende uzay, bu düz çizgi, şu dalgalı çizgi vb. Fizik dünyasında "Feynman diyagramı" olarak bilinen bu diyagramları betimledikten sonra, hınzırca sırıtarak yüzünü sınıfa döndü ve "buna DİYAGRAM denir!" dedi. Feynman oyunun sonuna ulaşmıştı ve salonda kendiliğinden bir alkış tufanı koptu.

Bu kitabı oluşturan derslerin verilmesinden yıllar sonra, Feynman, birinci sınıf dersini vermek üzere Caltech'e konuk hoca olarak gelmişti. Doğal olarak, onun gelişleri gizli tutulmalıydı, bu nedenle salonda kayıtlı öğrenciler için bırakılmış boş yer olurdu. Böyle bir derste konu eğri uzayzamandı ve Feynman kendine özgü nitelikte olağanüstü zekâya ve meziyete sahipti. Fakat dersin başlangıcında unutulmaz bir an yaşandı. 1987 süpernovası daha yeni keşfedilmişti ve Feynman bundan ötürü çok heyecanlıydı. "Tycho Brahe'nin süpernovası vardı, Kepler'in de vardı; sonra 400 yıl boyunca başka hiçbir tane olmadı. Fakat şimdi benim var," dedi. Sınıf sessizliğe büründü ve Feynman devam etti. "Bizim gökadamızda 10^{11} tane yıldız var. Bu *devasa* bir sayıydı. Fakat o sadece yüz milyardır. Ulusal bütçe açığından daha az! Onlara astronomik sayılar derdik. Şimdi onlara ekonomik sayılar demeliyiz." Sınıf kahkahaları koyuverdi ve Feynman artık dinleyicileri avucuna almıştı, dersine devam etti.

Şovmenliği bir yana, Feyman'ın pedagojik yöntemi basitti. Öğretme felsefesinin bir özeti, Caltech arşivlerindeki makaleler arasında 1952'de Brezilya'dayken kendisinin çalakalem yazdığı bir notta bulunmuştu:

> Öğrencilerinizin bu konuyu neden öğrenmelerini istiyorsunuz ve onların ne bilmelerini arzuluyorsunuz,

> önce bunları düşünün; yöntem, bir dereceye kadar sağduyuyla ortaya çıkacaktır.

"Sağduyu" vasıtasıyla Feynman'ın ulaştığı şey, çoğu kez amacının esasını mükemmelen yakalayan zekice kıvırmalardı. Bir keresinde, bir halk konferansı sırasında, bir fikri doğrulamak için neden o fikri ilk akla getiren verinin kullanılmaması gerektiğini açıklamaya çalışıyordu. Feynman, konudan ayrılıyormuş gibi görünerek, araba plakalarından söz etmeye başlamıştı. "Biliyor musunuz, bu gece çok garip bir şey oldu. Buraya derse geliyordum, park yerine girdim. Ne olduğuna inanamayacaksınız. Plakası ARW 357 olan bir araba gördüm. Düşünebiliyor musunuz? Ülkedeki milyonlarca plakadan bu gece bu özel plakayı görebilme şansım ne kadardı? Şaşırtıcı!" Pek çok bilim adamının bile kavramakta başarısız kalacağı bir husus, Feynman'ın çarpıcı "sağduyu"suyla açıklığa kavuşmuştu.

Caltech'teki 35 yılda (1952'den 1987'ye kadar) 34 derslik rekorun hocası olarak listeye girmişti. Bunlardan yirmi beşi, kesin olarak sadece lisansüstü öğrencilerle sınırlı, ileri lisansüstü dersiydi; lisans öğrencilerinin bu dersleri almaları için izin gerekirdi (çoğu da isterdi ve izin neredeyse her zaman garantiydi). Geri kalanlar esas olarak giriş nitelikli lisansüstü derslerdi. Feynman sadece bir kez sırf lisans öğrencileri için dersler verdi; bunlar, ünlü *Feynman'ın Fizik Dersleri* haline getirilmiş olan 1961-62 ve 1962-63 akademik yıllarında –ve 1964'te kısa bir tekrarda– verilmiş olan derslerdir.

O zamanlar Caltech'te birinci ve ikinci sınıf öğrencileri iki yıllık zorunlu fizik derslerine yüklenmeleri şöyle dursun, fiziğe olan ilgilerini yitiriyorlardı. Durumu iyileştirmek için, Feynman'dan, önce birinci sınıflara ve daha sonra ikinci sınıflara verilmek üzere, iki yıllık bir ders dizisi tasarlaması rica edildi. Feynman bu öneriyi kabul edince, hemen derslerin basım için yazılması gerektiği kararlaştırıldı. Bu işin düşünüldüğünden çok daha zor olduğu anlaşıldı. Basılabilir

kitaplara dönüştürme, hem her bölümün son düzeltmelerini yapan Feynman'ın ve hem de ona yardım eden meslektaşlarının çok çalışmalarını gerektiriyordu.

Ayrıca bir dersi yürütmenin temel öğelerinden de söz edilmelidir. Feynman derslerin içine neleri koymak istediğini sadece belli belirsiz ana hatlarıyla tasarlamıştı; bu da işi büyük ölçüde karmaşık hale sokuyordu. Bu da, Feynman'ın öğrencilerle dolu ders salonunun önünde belirip anlatmaya başlayıncaya kadar, ne söyleyeceğini kimsenin bilmediği anlamına geliyordu. Ona yardım eden Caltech profesörleri, ev ödevi problemlerini hazırlamak gibi günlük ayrıntıları en iyi şekilde yapabilmek için çırpınıp çabalıyorlardı.

Feynman başlangıç fiziğini devrim yapıcı bir tarzda öğretmek için hayatının iki yıldan daha uzun bir süresini neden bu işe adamıştı? Sadece tahmin de olsa, herhalde bunun üç temel nedeni vardı. Birinci neden, büyük bir dinleyici topluluğu önünde olmayı severdi, bu ona lisansüstü derslerde olduğundan daha büyük bir tiyatro ortamı sağlardı. İkincisi öğrencilere gerçekten çok önem verirdi ve birinci sınıf dersi anlatmanın yapılacak önemli bir iş olduğunu düşünürdü. Üçüncü ve belki de en önemli neden, fiziği –onun anladığı gibi– yeniden formüle etmenin ve genç öğrencilere o şekilde sunmanın katıksız mücadelesiydi. Bu onun özelliğiydi; bir şeyin gerçekten anlaşılıp anlaşılmadığını ölçtüğü standardı buydu. Bir gün bir Caltech öğretim üyesi Feynman'dan ½ spinli parçacıkların neden Fermi-Dirac istatistiğine uyduğunu açıklamasını istemişti. Dinleyicilerini iyice tartmış ve "bu konuda bir birinci sınıf dersi hazırlayacağım" demişti. Fakat birkaç gün sonra geri gelmiş ve " Biliyor musun, onu yapamıyorum. Onu birinci sınıf düzeyine indiremiyorum. Demek ki onu gerçekte anlamıyoruz" demişti.

Bu derin düşünceleri basit, anlaşılabilir ifadelere indirgeme özelliği, *Feynman'ın Fizik Dersleri*'nde baştan sona apaçıktır; fakat hiçbir yerde kuantum mekaniğini ele alışındaki kadar açık değildir. Kendini adamış olarak yaptığı açıktır. Fiziğin en derin problemlerinden bazılarını çözmeyi

sağlayan kendi bulduğu bir yöntemi, yol integrali yöntemini, başlangıç düzeyindeki öğrencilere sunmuştu. Diğer başarılarıyla birlikte, yol integrallerini kullanarak yaptığı kendi çalışması, ona –Julian Schwinger ve Sin-Itero Tomanaga ile paylaştığı– 1965 Nobel Ödülünü getirmişti.

Derslere katılan öğrencilerin ve öğretim üyelerinin çoğu, anıların belirsiz örtüsü içinde, Feynman'la geçen iki yıllık fizik serüveninin bir yaşam deneyimi olduğunu söylediler. Fakat o zamanki görünüm böyle değildi. Öğrencilerin pek çoğu sınıfta korku içindeydi ve dersler ilerledikçe kayıtlı öğrencilerin katılımı korkunç şekilde düşmeye başlamıştı. Fakat aynı zamanda, derslere gitgide daha fazla öğretim üyesi ve lisansüstü öğrenci katılmaya başladı. Salon hep dolu oluyordu ve Feynman istediği dinleyicilerin bazılarını kaybettiğini belki de asla anlayamadı. Ama Feynman'ın gözünde bile onun pedagojik çabası başarıya ulaşamadı. 1963'te *Fizik Dersleri* kitabının önsözünde şunları yazmıştı: "Öğrencilere çok özen gösterdiğimi sanmıyorum." Kitapları tekrar okurken, insan bazen sanki Feynman'ı şöyle omuzu üzerinden, genç dinleyicilere değil de, doğrudan meslektaşlarına bakarak şunları söylerken yakalar: Şuna bakın! Hele bakın, şu noktayı ne büyük ustalıkla açıklamışım! Zekice değil mi?" Fakat konuları birinci ve ikinci sınıflara berrak olarak açıkladığını düşündüğünde bile onun yaptıklarından en çok yararlananlar aslında onlar değildi. Richard Feynman'ın muhteşem başarısından, diğer bir deyişle fiziği en azından onun taze ve dinamik bakış açısından izlemekten asıl yararlananlar kendi emsalleri olan bilim adamları, fizikçiler ve profesörlerdi.

Feynman büyük bir öğretmenden daha büyüktü. Onun yeteneği, onu öğretmenlerin olağanüstü öğretmeni yapıyordu. *Feynman Fizik Dersleri*'ni vermekten amaç, bir oda dolusu lisans öğrencisini fizik sınav sorularını çözmeye hazırlamak olsaydı, onun bunu özellikle iyi başardığı söylenemezdi. Dahası, amaç, kolejlerin giriş niteliğindeki ders kitapları olarak hizmet görecek kitaplar olsaydı, amacına ulaştığı söylenemezdi. Bununla birlikte, bu kitaplar on yabancı dile çevrildi

ve dört tane de çift dilde baskısı var. Feynman'ın kendisi, fiziğe en önemli katkısının QED (Kuantum Elektro Dinamiği), ya da süper akışkan helyum kuramı veya polaronlar ya da partonlar olmadığına inanıyordu. Onun en önemli katkısı üç kırmızı kaplı şu *Feynman Fizik Dersleri* olabilirdi. Bu ünlü kitapların bu anmalık baskısı, bu inancı tam anlamıyla doğrulamaktadır.

David L. Goodstein
Gerry Neugebauer
Nisan 1989 California Institute of Technology

FEYNMAN'IN ÖNSÖZÜ

(*Feynman'ın Fizik Dersleri*'nden)

Bunlar, geçen yıl ve önceki yıl Caltech'te üniversite birinci ve ikinci sınıf öğrencilerine verdiğim fizik dersleridir. Sınıfta anlattığım bu kısımlar, kuşkusuz, derslerin harfi harfine tamamı değildir; bazıları oldukça fazla, bazılarıysa daha az olmak üzere gözden geçirilip baskıya hazırlanmışlardır. Sınıfta anlatılanlar, asıl tam dersin ancak bir bölümüdür. 180 öğrencilik tüm grup büyük bir konferans salonunda bu dersleri dinlemek üzere haftada iki kez toplanmakta ve sonra bir asistanın rehberliğinde 15 ile 20 kişilik küçük uygulama gruplarına ayrılmaktaydı. Ayrıca haftada bir kez bir laboratuvar uygulaması vardı.

Bu derslerde ulaşmaya çalıştığımız özel amaç, liselerden mezun olup Caltech'e gelmiş olan çok hevesli ve oldukça zeki öğrencilerin ilgisini çekebilmekti. Onlar fiziğin ne kadar ilginç ve heyecan verici olduğuna dair pek çok şey duydular: görelilik kuramı, kuantum mekaniği ve diğer çağdaş düşünceler. Daha önceki iki yıllık dersimizin sonunda, öğrencilerin çoğunun cesareti kırılmış olurdu, çünkü onlara gerçekten de çok az, büyük, yeni ve çağdaş fikirler sunulurdu. Eğik düzlemleri, elektrostatiği ve benzeri rutin şeyleri çalışmak durumunda kalırlar ve iki yıl sonra aptallaşırlardı. Sorun, onların heveslerini besleyerek çok daha ileri düzeyde ve heyecanlı öğrenciler kazandıracak bir ders yapmayı acaba başarabilir miydik?

Buradaki derslerin hiçbir şekilde bir gözden geçirme dersi olduğu sanılmasın; onlar çok ciddi biçimde hazırlanmıştır. Onları sınıftaki en zeki öğrenciye anlattığımı düşündüm ve bundan emin olmak için de, mümkünse, en zeki öğrencinin bile derslerdeki her şeyi tam olarak kavrayamayacağı şekilde, düşünce ve kavramların ana çizginin dışındaki çeşitli yönlere uygulanması önerilerini de katarak sundum. Gene bu nedenle, denklemlerin ve düşüncelerin fiziğin bünyesine uyduğu her durumu ve –daha çok bilgi edinildiğinde– onların nasıl değişebileceğini göstermek için, tüm beyanları mümkün olduğunca doğru yapmaya özen gösterdim. Böyle öğrenciler için –eğer yeterince akıllılarsa– neyin daha önce söylenenlerden çıkarılması gerektiğini ve neyin yeni bir şey olarak önlerine konulduğunu anlamalarının önemli olduğunu hissettim. Yeni düşünceler ortaya çıktıkça, onları çıkarılabilecek durumdaysalar çıkarmaya; aksi halde bilinen şeyler cinsinden hiçbir temele dayanmayan yeni bir düşünce olduğunu ve kanıtlanabileceğinin beklenmediğini –fakat sadece içeriye eklendiğini– açıklamaya çalıştım.

Bu derslere başlarken, öğrencilerin liseden mezun olduklarında geometrik optik, basit kimya fikirleri ve benzeri şeyler bildiklerini varsaydım. Dersleri belirli bir sırada vermenin herhangi bir nedeni olduğunu da görmedim; şu anlamda ki, bir şeyi ayrıntılı olarak anlatmaya hazır olmadıkça ona değinmek istemem. Pek çok konuya tam olarak tartışmaksızın değinmek gerekiyordu. Daha tam tartışmalara, daha sonra hazırlıklar iyice geliştiği zaman sıra geliyordu. İndüktans ve enerji düzeyi tartışmaları örnek olarak verilebilir; bunlar önce nitel biçimde gündeme getirilir ve daha sonra ayrıntılarıyla geliştirilir.

Daha çalışkan öğrencileri hedeflemekle birlikte, ek tartışmaları ve yan uygulamaları sıkıcı bulan ve derslerdeki malzemenin çoğunu öğrenemeyeceğini düşünen öğrencilere de özen gösterdim. Derslerde, böyle öğrenciler için de, en azından onların alabilecekleri temel ve öz bilgiler olsun istedim. Her şeyi anlamadılarsa bile umarım sinirlenmemişlerdir.

Her şeyi anlamış olduklarını sanmıyorum, gene de işin özünü ve en dolaysız yanlarını anlamışlardır. Kuşkusuz, nelerin esas teoremler ve merkezi fikirler ve nelerinse çok ileri konular ve uygulamalar olduğunu görmeleri onların zekâsına kalmıştır; belki bunu ancak sonraki yıllarda anlarlar.

Bu dersleri verirken ciddi bir zorluk şu oldu: Dersin veriliş biçimiyle ilgili olarak, öğrencilerden öğretim görevlisine dersin nasıl geçtiğini gösterecek hiçbir tepki gelmedi. Bu gerçekten de önemli bir sorundur ve ben derslerin gerçekten ne kadar iyi geçtiğini anlayamadım. Bütün her şey esasında bir deneydi. Aynı şeyi tekrar yapsaydım, aynı biçimde yapmazdım. Umarım onu tekrar yapmak zorunda kalmam! Gene de sanırım ilk yılda fizikle ilgili her şey oldukça doyurucu şekilde halledildi.

İkinci yıl pek tatmin olmadım. İkinci yılın ilk kısmında elektrik ve manyetizmayı işlerken, gerçekten eşsiz ya da farklı hiçbir anlatım yolu –alışılmışın dışında özel olarak daha heyecan verici bir yol– düşünemedim. Böylece elektrik ve manyetizma derslerinde pek bir şey yaptığımı sanmıyorum. İkinci yılın sonuna doğru, elektrik ve manyetizmadan sonra, esas olarak temel kipler, difüzyon denkleminin çözümleri, titreşen sistemler, dik fonksiyonlar gibi şeylere başlayıp genelde "fiziğin matematiksel yöntemleri" denen ilk aşamaları geliştirerek maddenin özellikleri üzerine biraz daha fazla dersler vermeyi daha başlangıçta kafama koymuştum. Geçmişe bakarak, sanırım ki, bu dersi gene verseydim, gene bu özgün düşünceye geri giderdim. Fakat bu dersi tekrar vermem planlanmadığı için, bir kuantum mekaniğine giriş dersi vermeyi denememin iyi bir fikir olabileceği önerildi; bunu III. Cilt'te bulacaksınız.

Ana dalı fizik olan öğrencilerin kuantum mekaniği için üçüncü yıllarına kadar beklemeleri gerekir. Öte yandan, bizim derslerimizdeki öğrencilerin çoğu, fiziği, esas ilgi alanları olan diğer dallara temel olsun diye okurlar. Ama kuantum mekaniğini öğrenmenin olağan yolu uzunca zaman istediği için, bu öğrencilerin büyük çoğunluğu bu konuyu

neredeyse alamayacak durumdadır. Yine de gerçek kuantum uygulamalarında –özellikle de, elektrik mühendisliği ve kimya gibi daha karmaşık uygulamalarda– diferansiyel denklem yaklaşımının tam mekanizması zaten kullanılmaz. Bu nedenle kuantum mekaniğinin ilkelerini parçalı diferansiyel denklemlerin bilinmesini gerektirmeyecek şekilde anlatmaya çalıştım. Bir fizikçiye bile kuantum mekaniğini böyle ters tarzda sunmak –derslerin kendilerinde görünebilecek çeşitli nedenlerle– sanırım ilginç bir deneyimdir. Bununla birlikte, kuantum mekaniği kısmındaki deneylerin tam başarılı olmadığını zannediyorum; büyük ölçüde bunun nedeni, sonunda yeterli zamanımın olmamasıydı (örneğin enerji bantları ve genliklerin uzaysal bağımlılığı gibi konularla tam anlamıyla uğraşmak için üç ya da dört ders daha yapmam gerekirdi). Üstelik, daha önce bu konuyu bu şekilde hiç sunmamıştım; bu nedenle öğrenciden tepki gelmemesi de özellikle ciddiydi. Şimdi kuantum mekaniğinin daha sonra verilmesi gerektiğine inanıyorum. Belki bu dersi bir gün tekrar verme şansını yakalarım. O zaman onu daha doğru yaparım.

Problemlerin nasıl çözüleceği hakkında derslerin olmayışının nedeni, uygulama saatlerinin var oluşudur. Gerçi ilk yılda problemlerin nasıl çözüleceğine dair üç ders koymuştum, ama onlar kitaba eklenmedi. Dönen sistemler dersinin ardından mutlaka gelen eylemsiz güdüme ait (roket vb için) bir ders de vardı; ama o ne yazık ki atlandı. Beşinci ve altıncı derslerse, benim şehir dışında olduğum sırada, Matthew Sands tarafından verilmiştir.

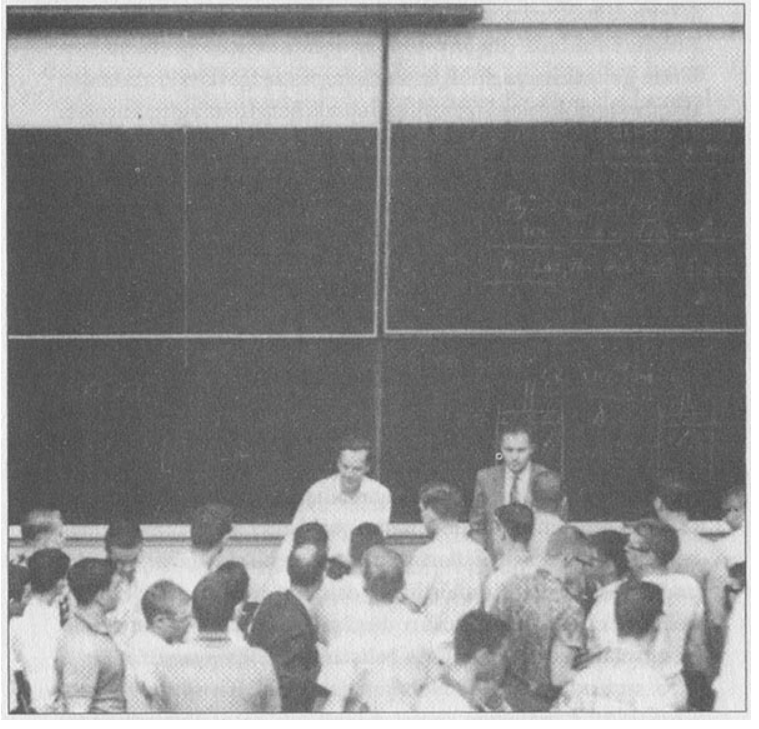
Kuşkusuz asıl soru, bu deneyimin ne denli başarılı olduğudur. Öğrencilerle çalışmış olan arkadaşlarımın çoğu bana katılmasalar da, benim kendi görüşüm kötümserdir. Öğrencilere çok özen gösterdiğimi sanmıyorum. Öğrencilerin çoğunluğunun sınavlardaki soruları halletme tarzlarına bakınca, sistemin başarısız kaldığını düşünüyorum. Kuşkusuz, arkadaşlarımın belirttiğine göre, tüm derslerde hemen hemen her şeyi anlayan, konuların işlenişinde çok aktif rol alan ve pek çok konuda müthiş heyecan ve ilgi gösteren bir

ya da iki düzine kadar öğrenci vardı. Bunlar şimdi sanırım fizikte birinci-dereceden temel bilgiye sahipler ve benim de zaten ulaşmak istediklerim bunlardı. Ama o zaman, "öğretim gücünün etkinliği pek nadir görülür; ancak şu mutlu yeteneklilere yarar, ki onlara da öğretim neredeyse gereksizdir." (Gibbon)

Yine de hiçbir öğrenciyi tamamıyla arkada bırakmak istemedim. Öğrencilere yararlı olmanın bir yolu, sanırım derslerdeki bazı düşünceleri aydınlatabilecek problem setlerini geliştirmeye daha fazla özen göstermektir. Problemler, derslerde anlatılanları tamamlamak, sergilenen düşünceleri daha gerçekçi, daha tam ve daha akılda kalıcı kılmak için iyi bir fırsattır.

Bununla birlikte, sanıyorum ki bu eğitim problemine, bir öğrenciyle iyi bir öğretmen arasında sadece doğrudan kişisel bir ilişki olduğu zaman –öğrencinin düşünceleri tartıştığı, konuları düşündüğü ve konular hakkında konuştuğu bir ortamın oluşması halinde– en iyi öğretimin yapılabileceğini anlamanın dışında başka hiçbir çözüm yoktur. Derste sadece oturarak ya da sadece verilen problemleri çözerek çok şey öğrenmek olanaksızdır. Fakat bizim modern çağımızda yetiştirilecek o kadar çok öğrencimiz var ki ideal yöntemin yerine konacak bir başka yol bulmaya çalışmamız gerekiyor. Belki benim derslerim buna bir katkı yapabilir. Belki bireysel öğretmenlerin ve öğrencilerin bulunduğu bazı küçük yerlerde, bu öğrenciler derslerden biraz esin ya da bazı fikirler edinebilirler. Belki de konuları düşünürken eğlenecekler ya da bazı düşünceleri daha fazla geliştirmeye başlayacaklardır.

Haziran 1963
Richard P. Feynman



1

HAREKETLİ ATOMLAR

Giriş

Bu iki yıllık fizik dersi, siz okuyucunun fizikçi olacağı görüşüyle verilmektedir. Kuşkusuz bunun mutlaka böyle olması gerekmez; ama her konuda her profesör bunu böyle varsayar! Fizikçi olacaksanız, öğreneceğiniz çok şey vardır: en hızlı gelişen bilim dalının iki yüz yıllık geçmişi. Aslında bu bilgi o kadar çoktur ki tümünü dört yılda öğrenemeyeceğinizi düşünebilirsiniz ve gerçekten de öğrenemezsiniz; lisansüstü öğretim de yapmanız gerekir!

İki yüz yıl boyunca yapılmış olan bu denli çok çalışmaya karşın, elde edilen bu muazzam sonuçlar topluluğunu, gene de, büyük ölçüde bir araya sıkıştırmak, diğer bir deyişle tüm bilgimizi özetleyecek yasalar bulmak mümkündür. Bununla birlikte, bu yasaların kavranması o kadar güçtür ki bu muazzam bilim konusunun bir parçasının diğeriyle ilişkisini gösteren bir harita ya da taslak olmaksızın incelenmesi size büyük haksızlık olur. Dolayısıyla bu ön uyarıları izleyerek, konu hakkında içimizde bir "his" uyandırmaya yardımcı olur düşüncesiyle, ilk üç bölümde fiziğin diğer bilimlerle olan ilişkileri, bilimlerin birbirleriyle ilişkileri ve bilimin anlamı özetlenecektir.

Öklit geometrisinde aksiyomları belirterek her şeyi bunlardan çıkardığımız gibi, fiziği de niçin temel yasaları ilk sayfada verip mümkün olan her durumda bunların nasıl çalıştıklarını göstererek öğretmediğimizi sorabilirsiniz. (Fiziği dört yılda öğrenmek yetmiyor da, dört dakikada mı öğrenmek istiyorsunuz?) İki nedenle böyle bir yol izleyemeyiz. Önce, henüz tüm yasaları bilmiyoruz: Bilgisizlik ufkumuz gitgide genişliyor. Sonra, fizik yasalarını doğru ifade etmek için, betimlenmeleri çok ileri matematik gerektiren pek alışık olmadığımız bazı kavramlara muhtacız. Bu nedenle, sözcüklerin anlamlarını öğrenmek için bile oldukça uzun bir hazırlık eğitimine gerek duyarız. Hayır, öyle bir yol izlemek mümkün değil. Onu ancak parça parça yapabiliriz.

Doğanın tümünün her parçası ya da her bir kısmı, ancak tam gerçeğe ya da tam gerçeğin bizim bildiğimiz kadarına bir yaklaştırmadır. Aslında *henüz tüm yasaları bilmediğimizi bildiğimiz için*, bildiğimiz her şey bir tür yaklaştırmadır. Bu nedenle, bilgiler sadece sonradan unutulmak ya da, daha doğrusu, düzeltilmek üzere öğrenilmelidir.

Bilimin ilkesi, tanımı, aşağı yukarı şöyledir: *Tüm bilgi deneyle sınanır*. Deney, bilimsel "gerçek"in *tek yargıcı*dır. Fakat bilginin kaynağı nedir? Sınanacak yasalar nereden gelir? Bu yasaların ortaya çıkmasına, bize ipuçları vererek, bizzat deneyin kendisi yardım eder. Fakat bu ipuçlarından büyük genellemeler yaratmak, onların altında yatan harika, basit ama çok garip örüntüleri tahmin etmek ve sonra doğru tahminler yapıp yapmadığımızı tekrar deneylerle sınamak için *hayal gücü*ne de gerek olur. Bu hayal etme süreci o kadar zordur ki fizikte bir iş bölümü bile yapılır: *Kuramsal fizikçiler* yeni yasaları hayal ederler, çıkarımlar yaparlar ve tahminlerde bulunurlar, ama onlar deney yapmazlar; *deneysel fizikçiler*se deney yaparlar, hayal ederler, çıkarımlar yaparlar ve tahminlerde bulunurlar.

Doğa yasalarının yaklaşık olduklarını söylemiş; önce "hatalı" olanları buluruz ve sonra "doğru" olanlarını demiştik. Şimdi, bir deney nasıl "hatalı" olabilir? Önce gayet basit bir

şekilde, düzeneğimizde dikkatimizden kaçan bir hata olabilir. Fakat bu gibi şeyler kolayca onarılır ve tekrar tekrar sınanır. Öyleyse böyle küçük şeylere takılmadan, bir deneyin sonuçları nasıl yanlış olabilir?, ona bakalım: Sadece hassas olmayarak. Örneğin bir cismin kütlesi asla değişmez gibi görünür: Dönen bir topacın ağırlığı, dururken ki ağırlığıyla aynıdır. Böylece bir "yasa" bulunmuş olur: Kütle sabittir, hızdan bağımsızdır. Bu "yasa"nın hatalı olduğu anlaşılmıştır. Kütlenin hız ile arttığı bulunmuştur; fakat hatırı sayılır artmalar, ışık hızına yakın hızları gerektirir. Doğru yasa şudur: Bir cisim saniyede yüz altmış kilometreden daha düşük bir hızla hareket ediyorsa, kütlesi milyonda bir doğrulukla sabittir. Böyle bir yaklaşık yapıda, bu, doğru bir yasadır. Dolayısıyla yeni yasa pratik açıdan önemli bir fark yaratmaz. Demek ki, evet de denir, hayır da... Olağan hızlar için yeni yasayı kesinlikle unutur ve basit sabit-kütle yasasını iyi bir yaklaştırma olarak kullanabiliriz. Fakat yüksek hızlar için hatalıyızdır ve hızlar arttıkça hatamız da artar.

Son olarak ve daha da ilginci, *felsefi açıdan* yaklaşık yasa kullanmak *tümden yanlış*tır. Kütle azıcık değişse bile bizim doğayı görüş tarzımız tümden değişmelidir. Bu, yasaların ardındaki felsefe ya da fikirlere özgü bir şeydir. Bazen çok küçük bir etki bile düşüncelerimizde derin değişiklikler gerektirir.

O halde önce ne öğretmeliyiz? Önce, örneğin özel görelilik kuramı, dört boyutlu uzayzaman vb gibi garip ve zor kavramsal düşünceler içeren doğru fakat alışılmamış yasayı mı öğretelim? Yoksa yaklaşık olan, ama böyle zor düşünceler içermeyen, basit "sabit-kütle" yasasını mı? Birincisi daha heyecan verici, daha harikulâde ve daha eğlencelidir, fakat ikincisi daha ilk bakışta kolayca anlaşılır ve birincinin anlaşılmasında ilk adımı oluşturur. Bu nokta fizik öğretiminde tekrar tekrar karşımıza çıkar. Bunu farklı zamanlarda değişik şekillerde halletmemiz gerekecektir; fakat her durumda şimdi bilinenleri, bunların ne derecede doğru olduklarını, diğerleriyle nasıl bağdaştıklarını ve bilgimiz arttıkça nasıl değiştiklerini öğrenmek yararlı olacaktır.

Şimdi genel haritamız ya da taslağımızla, bugünün bilimi (özellikle fizik, fakat aynı zamanda onun çevresinde olan diğer bilimler) hakkındaki anlayışımızı görmeye devam edelim; böylece daha sonra dikkatimizi belirli bir konuya topladığımızda, bu konunun arkaplanı, diğer bir deyişle neden ilginç olduğu ve büyük ana yapıya ne kadar uyduğu hakkında bir fikrimiz olur. Öyleyse, bütün olarak bizim gördüğümüz doğa resmi nedir?

Madde Atomlardan Oluşmaktadır

Bilimsel bilgimizin tümü büyük bir felakette yok olsa ve gelecek kuşak yaratıklarına sadece tek bir cümle iletilebilseydi, en az sözcükle en çok bilgi içeren ifade ne olurdu? Bunun *atom varsayımı* (ya da atom *olgusu* veya nasıl adlandırırsanız o) olduğuna inanıyorum: *Her şey atomlardan yapılmıştır; sürekli hareket halinde dolanıp duran, aralarında biraz mesafe varken birbirlerini çeken, fakat birbirleri üzerine iyice sıkıştırıldıklarında birbirlerini iten küçük parçacıklardan.* Sadece biraz hayal gücü ve biraz da düşünmeyle, bu tek cümlenin doğa hakkında ne kadar çok bilgi içerdiğini görürsünüz.

Atom düşüncesinin gücünü göstermek için, altı milimetre çapında bir su damlasını ele alalım. Bu damlaya çok yakından bakarsak, sudan –pürüzsüz, sürekli sudan– başka bir şey görmeyiz. Damlayı en iyi optik mikroskopla –kabaca iki bin kez– büyütsek bile çapı 12 metreye yaklaşacak, diğer bir deyişle büyük bir odayı dolduracak kadar olacak ve dikkatlice baktığımızda *hâlâ* oldukça pürüzsüz bir su, fakat orada burada ileri geri yüzen yumurtaya benzer şeyler görülecektir. Çok ilginç! Bunlar tek hücreli terliksi hayvanlardır. Bu noktada durabilir ve kıpırdayan kirpiksi uzantıları ve kıvrılan gövdeleriyle terliksilere o kadar merak salabilirsiniz ki daha ileriye gitmeyip belki sadece bir terliksiyi daha da büyütüp onun içini görürsünüz. Bu, kuşkusuz, biyolojinin konusudur. Fakat biz işimizi sürdürüp su damlamızın ken-

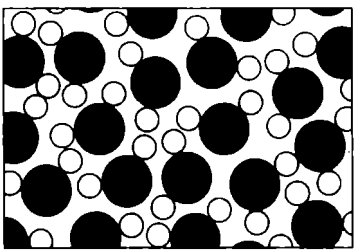
disini daha yakından incelemek üzere, onu yine iki bin kez daha büyütelim. Şimdi su damlasının çapı yirmi beş kilometre kadardır ve ona dikkatlice bakarsak, artık pürüzsüz olmayan bir şey, futbol maçı seyreden bir kalabalığın çok uzaktan görünümüne benzeyen bir topluluk görürüz. Bu topluluğun ne olduğunu anlamak için, onu iki yüz elli kez daha büyüttüğümüz takdirde Şekil 1-1'de gösterilene benzer bir durumla karşılaşırız. Bu şekil, suyun bir milyar kez büyütülmüş, fakat çeşitli bakımlardan idealleştirilmiş bir resmidir. Her şeyden önce, parçacıklar keskin kenarlı basit bir tarzda çizilmişlerdir, ki bu doğru değildir. Sonra, kolaylık olsun diye, parçacıklar iki boyutlu bir düzende neredeyse şema şeklinde gösterilmişlerdir; ama aslında üç boyutta hareket etmektedirler. Oksijen (siyah) ve hidrojen (beyaz) atomlarını temsil etmek üzere iki tür daire olduğu ve her oksijene iki hidrojenin bağlandığı görülmektedir. (Bir oksijen ve ona bağlı iki hidrojenli her küçük gruba bir molekül denir.) Bu resim, doğadaki gerçek parçacıkların sürekli hareket halinde olmaları, birbirlerine çarpmaları ve birbirleri etrafında dönüp dolaşmaları bakımından da idealleştirilmiştir. Bunu, statik olmaktan çok dinamik bir resim olarak düşününüz. Bu resimde gösterilmeyen diğer bir husus da, parçacıkların "birbirlerine yapışık" olmaları gerçeğidir: onlar birbirlerini çekerler, bu parçacık şu parçacık tarafından çekilir vb. Tüm grup, deyim yerindeyse, "tutkal ile birbirine yapıştırılmış"tır. Diğer taraftan, parçacıklar birbirleri içine sıkıştırılamazlar. Onlardan ikisini bir araya sıkıştırmaya çalışırsanız, birbirlerini iterler.

Atomların yarıçapları yaklaşık 2×10^{-8} cm'dir. 10^{-8} cm'ye bir *angström* (Å) denir (tıpkı herhangi bir isim gibi); bu nedenle atomların yarıçapları 1 ya da 2 angströmdür deriz. Bu büyüklük şöyle de akılda tutulabilir: Bir elma dünya büyüklüğüne çıkarılırsa, elmadaki bir atom da gerçek elma kadar olur.

Şimdi birbirlerine yapışık olarak hareket halinde kaynaşan parçacıklarıyla bu büyük su damlasını düşünelim. Su

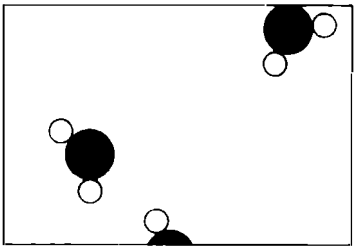
hacmini korur; moleküller birbirlerini çektikleri için damla parçalanmaz. Damla bir eğik düzlem üzerindeyse, orada bir yerden başka bir yere hareket edebilecek, su akacak fakat asla yok olmayacaktır; nesneler, moleküller arası çekim nedeniyle, durdukları yerde parçalanıp dağılmazlar. Moleküllerin hareketlerini biz *ısı* olarak adlandırırız: sıcaklığı arttırdığımızda, hareketi arttırmış oluruz. Suyu ısıtırsak, moleküllerin hareketi artar ve atomlar arasındaki hacim büyür; ısıtmaya devam edilirse, öyle bir an gelir ki moleküller arası çekim onları bir arada tutmaya yetmez ve birbirlerinden ayrılarak uzaklaşırlar. Kuşkusuz, sudan su buharını böyle –sıcaklığı arttırarak– elde ederiz; artan hareket nedeniyle parçacıklar birbirlerinden uzaklaşırlar.

Şekil 1-2'de bir su buharı resmi görüyoruz. Bu su buharı resmi şu bakımdan yanlıştır: Olağan atmosfer basıncında bu şekil içinde üç molekül bulunamaz. Bu büyüklükteki karelerin çoğunda hiç su buharı bulunmaz, fakat bu resme tesadüf eseri iki buçuk ya da üç tane girmiş (resim tamamıyla boş kalmasın diye). Şimdi su buharındaki karakteristik molekülleri sudakilere göre çok daha açık olarak görmekteyiz. Moleküller, basit olsun diye, hidrojen atomlarının arasında 120 derecelik açı olacak şekilde çizilmişlerdir. Aslında bu açı 105° 3′ kadardır ve bir hidrojenin merkezi ile oksijenin merkezi arasındaki uzaklık 0, 957 Å'dür; öyle ki bu molekülü çok iyi tanıyoruz diyebiliriz.



Bir milyar kez büyütülmüş su

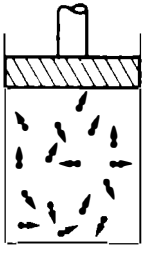
Şekil 1–1



Buhar

Şekil 1–2

Şimdi su buharının ya da herhangi bir gazın bazı özelliklerini görelim. Moleküller, birbirlerinden ayrılmış olarak, duvarlara çarpıp sekeceklerdir. Bir oda ve içinde sürekli hareket ederek oraya buraya çarpıp seken çok sayıda (yüz kadar) tenis topu düşünelim. Toplar duvara çarptıkça, duvarı iterler. (Bizim de kuşkusuz duvarı geri itmemiz gerekir.) Bu demektir ki, gaz duvara darbeli bir kuvvet uyguladığı halde, bizim kaba hislerimiz (kendimizi bir milyar kez büyütemediğimiz için) onu sadece *ortalama bir itme* olarak duyar. Bir gazı kapalı bir yerde tutmak için ona bir basınç uygulamalıyız. Şekil 1-3'de gazları hapsetmede kullanılan (tüm ders kitaplarında vardır) standart bir kap –içinde bir piston olan bir silindir– görülüyor. Burada su moleküllerinin şeklinin ne olduğu hiç önemli değildir; bu nedenle işi basitleştirmek için onları tenis topları gibi ya da noktalar halinde çizeceğiz. Bu nesneler her yönde sürekli hareket halindedirler.



Şekil 1–3

Bunların pek çoğu da devamlı üstteki pistona çarpar; bu sürekli vuruşların etkisiyle pistonun silindirden dışarı fırlamaması için, pistonu *basınç* dediğimiz belirli bir kuvvetle aşağı doğru itmemiz gerekecektir (aslında kuvvet, basınç ile yüzey alanının çarpımıdır).

Kuvvetin yüzey alanıyla orantılı olduğu açıktır, çünkü alanı arttırıp bir santimetre küpteki molekül sayısını sabit tutarsak, pistona çarpan moleküllerin sayısını yüzey alanını arttırdığımız oranda arttırmış oluruz.

Şimdi yoğunluğu iki katına çıkarmak için silindirin içindeki moleküllerin sayısını iki katına çıkaralım ve moleküllere aynı hızı, aynı sıcaklığı verelim. O zaman, iyi bir yaklaşıklıkla, çarpma sayısı ikiye katlanacak ve her molekül tam önceki kadar "enerjili" olduğundan, basınç yoğunlukla orantılı olacaktır. Atomlar arası kuvvetlerin gerçek doğasını düşünürsek, atomlar arasındaki çekim nedeniyle basınçta çok az bir düşme ve atomların sonlu hacimleri nedeniyleyse basınçta çok az bir artma bekleriz. Bununla beraber, yoğunluk yeterince düşükse, dolayısıyla çok fazla atom yoksa, mükemmel bir yaklaşıklıkla, *basınç yoğunlukla orantılıdır.*

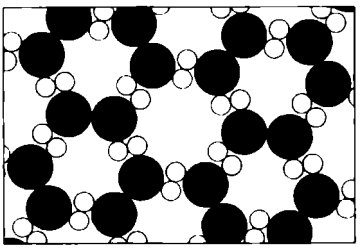
Başka bir şey daha görebiliriz: Gazın yoğunluğunu değiştirmeksizin atomların hızını artırarak, sıcaklığını yükseltirsek basınca ne olacaktır? Bu durumda, atomlar daha hızlı hareket edeceklerinden, pistona daha hızlı ve ayrıca daha sık çarparlar; böylece basınç artar. Atom kuramındaki düşüncelerin ne kadar basit olduklarını görüyorsunuz değil mi?

Başka bir durumu da ele alalım. Pistonun içeriye doğru hareket ettiğini, böylece atomların yavaşça daha küçük bir hacme sıkıştırıldığını düşünelim. Bir atom hareket eden pistona çarptığında ne olur? Çarpışmadan hız kazanacağı açıktır. Örneğin ileri doğru hareket etmekte olan bir rakete çarpıp geri dönen bir ping-pong topuyla deneyebilirsiniz bunu; topun rakete çarpmadan önceki hızından daha büyük bir hızla geri döndüğünü göreceksiniz. (Özel örnek: Bir atom yerinde durur ve piston ona çarparsa, atomun harekete geçeceği kesindir.) Böylece atomlar pistona çarpıp geri döndük-

lerinde çarpmadan önceki durumlarından "daha sıcak"tırlar. Dolayısıyla silindir içindeki tüm atomların hızları artmış olacaktır. Bu demektir ki, *bir gazı yavaş yavaş sıkıştırdığımızda, gazın sıcaklığı yükselir*; yavaş yavaş *genişlettiğimizdeyse sıcaklığı düşecektir.*

Şimdi su damlamıza geri dönelim ve ona başka bir açıdan bakalım. Damlamızın sıcaklığını azalttığımızı düşünelim. Sudaki atom moleküllerinin hareketinin gittikçe azaldığını varsayalım. Atomlar arasında çekim kuvvetlerinin var olduğunu ve bir süre sonra önceki kadar fazla hareket edemeyeceklerini biliyoruz. Çok düşük sıcaklıklarda ne olacağı Şekil 1-4 'de gösterilmektedir: moleküller, *buz* dediğimiz yeni bir örüntüye kilitlenmişlerdir. Buzun bu özel şematik diyagramı, iki boyutta olduğu için yanlıştır, ama nitel olarak doğrudur. Burada ilginç olan nokta, *bu malzemede her atomun kesin bir yerinin olmasıdır*; kolayca takdir edersiniz ki, şu ya da bu şekilde, damlanın bir ucundaki tüm atomları her biri belirli bir yerde olmak üzere belirli bir düzenlemede tutabilsek, atomlar arası bağlantıların esnemez olması nedeniyle damlanın kilometrelerce uzaktaki (ölçeği büyük aldığımız için) diğer ucu belirli bir yerleşime sahip olacaktır. Öyleyse bir buz iğnesini bir ucundan tutarsak, diğer uç onu yana itmemize direnç gösterir; oysa suda durum böyle değildir, orada yapı bozulur, çünkü hareket artar, atomların tümü farklı tarzlarda oraya buraya hareket ederler. O halde katılarla sıvılar arasındaki fark şudur: Katılarda atomlar, *kristal dizilimi* dediğimiz, bir tür dizilim şeklinde düzenlenirler, çok uzaklarda gelişigüzel yerlere sahip değildirler; kristalin bir kenarındaki atomların yerleri, kristalin öte kenarındaki diğer atomların yerleri, milyonlarca atomun yeri tarafından belirlenir. Şekil 1-4 buz için kurulmuş bir düzenlemedir; ama buzun doğru yanlarından birçoğunu içermekle birlikte, gerçek düzenleme değildir. Doğru özelliklerinden biri, altıgen bir simetrisinin olmasıdır. Resmi bir eksen etrafında 60° döndürürsek, resmin aynı kaldığını görebilirsiniz. O halde buzda, kar taneciklerinin altı kenarlı görünüşünden sorum-

lu bir *simetri* vardır. Buz eridiği zaman hacminin niçin küçüldüğünü de Şekil 1-4'te görebiliriz. Buzun burada görülen kendine özgü kristal deseni içinde, gerçek buz yapısında olduğu gibi, birçok "boşluk" vardır. Bu düzenleme bozulduğunda, bu boşluklar moleküller tarafından doldurulabilir. Su ve harf dökümünde kullanılan alaşım dışında, pek çok basit malzeme eriyince genişler, çünkü katı kristalde atomlar sıkışık bir şekilde bir araya gelmişlerdir ve eriyince gelişigüzel hareketleri için daha büyük bir hacme gereksinimleri olur; fakat buz eridiğinde, o açık yapı çöker.



Buz

Şekil 1-4

Buz "esnemez" bir kristal yapıya sahip olmakla birlikte, sıcaklığı değişebilir; buzun da ısısı vardır. İstersek onun ısı miktarını değiştirebiliriz. Buzda ısı dediğimiz şey nedir? Atomlar hareketsiz değildir; hareket etmekte ve titreşmektedirler. Kristalin belirli bir düzeni –belirli bir yapısı– olmakla birlikte, bütün atomlar "yerlerinde" titreşmektedirler. Sıcaklığı arttırdıkça, onlar da gitgide daha büyük genliklerle titreşerek sonunda yerlerinden koparlar. İşte buna *erime* deriz. Sıcaklığı düşürdüğümüzdeyse titreşim gittikçe azalır ve mutlak sıfırda atomların sahip olduğu titreşim miktarı bir minimuma iner, fakat sıfır olmaz. Atomların sahip olabilecekleri bu minimum hareket miktarı bir maddeyi eritmeye yetmez; yalnız Helyum elementi bunun dışındadır. Helyum olabildiğince atomlarının hareketlerini azaltır, fakat mutlak

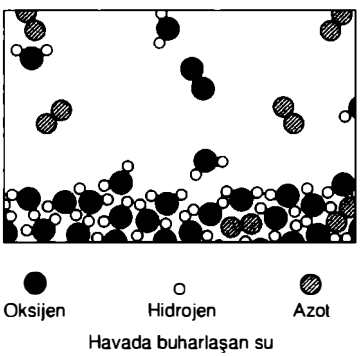
sıfırda bile donmasına engel olacak kadar hareket vardır. Atomları birbirlerine sıkıştırıp ezecek kadar büyük bir basınç uygulanmadıkça, helyum mutlak sıfırda bile donmaz. Onu, ancak basıncı iyice arttırarak katılaştırabiliriz.

Atom Süreçleri

Katılar, sıvılar ve gazlar hakkında atomik görüş açısından yeterince bilgi verdik. Atom varsayımı ayrıca süreçleri de açıklar; şimdi de birkaç sürece atomik açıdan bakacağız. İnceleyeceğimiz ilk süreç su yüzeyiyle ilgilidir. Suyun yüzeyinde ne olur? Şimdi yüzeyin havada olduğunu düşünerek, resmi daha karmaşık –ve daha gerçekçi– bir duruma getireceğiz. Şekil 1-5 havadaki su yüzeyini göstermektedir. Önceki gibi, su kütlesini oluşturan su moleküllerini görmekteyiz; fakat şimdi suyun yüzeyini de görüyoruz. Yüzeyin üzerinde birkaç şey daha görülüyor: Her şeyden önce, buharda olduğu gibi, su molekülleri var. Bu, sıvı haldeki suyun üzerinde daima bulunan *su buharı*dır. (Daha sonra betimleneceği gibi, su ile su buharı arasında bir denge vardır) Ayrıca bazı başka moleküller de görüyoruz: işte şurada birbirine yapışık iki oksijen atomunun oluşturduğu bir *oksijen molekülü*, oradaysa iki azot atomunun birbirine yapışmasıyla meydana gelmiş bir *azot molekülü*. Hava neredeyse tamamen azot, oksijen, biraz su buharı, daha az miktarda karbondioksit, argon ve diğer şeylerden oluşmuştur. Demek ki suyun yüzeyi üzerinde, hava dediğimiz ve bir miktar su buharı içeren bir gaz var. Şimdi bu resimde neler oluyor? Sudaki moleküller daima hareket halindedirler. Zaman zaman yüzeydeki bir molekül normalden biraz daha kuvvetli bir darbe yiyerek dışarı atılır. Bunun resimde görülmesi zordur, çünkü bu *hareketsiz* bir resimdir. Fakat yüzeye yakın bir molekülün bir darbe yiyip dışarı fırlamakta olduğunu, ya da belki bir başkasının bir darbeyle yüzeyden ayrılmakta olduğunu düşünebiliriz. Su böylece molekül molekül yok olur, buharlaşır. Fakat su kabının üstünü *kapatırsak*, biraz sonra hava moleküllerinin

arasında çok sayıda su molekülü buluruz. Zaman zaman bu buhar moleküllerinden biri suya geri girer ve suya bağlanır. O halde anlarız ki, ölü gibi görünen, ilginç olmayan bir durum –belki yirmi yıldan beri orada durmakta olan üstü kapalı bir bardak su– gerçekte durmaksızın süregelen dinamik ve ilginç bir olay içermektedir. Bizim gözlerimize, kaba gözlerimize göre hiçbir şey değişmemektedir; fakat onu bir milyar kez büyütülmüş olarak görebilseydik, durumun sürekli olarak değiştiğini –moleküllerin yüzeyden ayrıldıklarını ve moleküllerin geri döndüklerini– görürdük.

Niçin *hiçbir değişme görmüyoruz*? Çünkü yüzeyden ayrılan molekül sayısı kadar yüzeye geri dönen molekül vardır! Uzun bir süre içinde "hiçbir şey olmaz." Kabın üzerindeki örtüyü kaldırır ve nemli havayı üfleyip yerine kuru hava gelmesini sağlarsak, yüzeyden gene önceki kadar molekül ayrılır; çünkü bu, sudaki moleküllerin hareketine bağlıdır. Fakat su yüzeyinin üstünde pek az su molekülü bulunduğundan, geri dönen su molekülü sayısı büyük ölçüde azalmıştır. Bu nedenle dışarı giden içeri gelenden çoktur ve su buharlaşır. O halde, suyu buharlaştırmak istediğinizde, vantilatörü çalıştırınız!

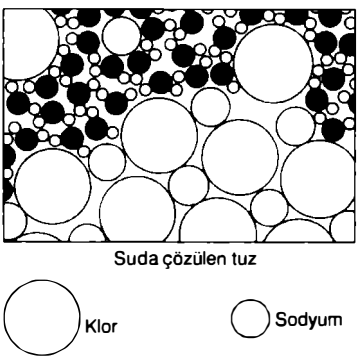


Şekil 1–5

İşte size başka bir şey daha: Sudan hangi moleküller ayrılır? Bir molekül, komşularının çekimlerinden kurtulabilmek için gerekli olan normalden biraz fazla enerjinin rastgele

kendi üzerinde toplanması nedeniyle sudan ayrılır. Dolayısıyla ayrılan moleküller ortalamadan daha fazla enerjiye sahip oldukları için, geride kalan moleküller daha önce sahip olduklarından daha az ortalama harekete sahiptir. Böylece sıvı buharlaşırsa, yavaş yavaş soğur. Kuşkusuz, bir buhar molekülü havadan suya doğru gelirken, suya yaklaştığında birden büyük bir çekime uğrar. Bu çekim molekülün hızını arttırarak ısı üretimine yol açar. Böylece moleküller sudan ayrıldıklarında ısı götürmekte; geri geldiklerindeyse ısı getirmektedirler. Kuşkusuz net bir buharlaşma olmayınca, sonuç sıfırdır; suyun sıcaklığı değişmez. Buharlaşan molekül sayısında sürekli bir artış sağlamak için su yüzeyine üflersek su soğur. Öyleyse çorbayı soğutmak için üzerine üfleyiniz!

Kuşkusuz yukarıda betimlenen süreçlerin bundan çok daha karmaşık olduklarını takdir edersiniz. Sadece su havaya çıkmakla kalmaz, fakat zaman zaman oksijen ya da azot moleküllerinden biri de suya girer ve su molekülleri topluluğu arasına karışarak "kaybolur." Böylece hava suda erir; oksijen ve azot molekülleri suya karışır ve su hava almış olur. Su kabının üzerindeki havayı birdenbire boşaltırsak, hava molekülleri suya girdiklerinden daha hızlı şekilde sudan ayrılacaklar ve bu sırada kabarcıklar oluşturacaklardır. Bu olayın dalgıçlar için çok kötü olduğunu belki bilirsiniz.

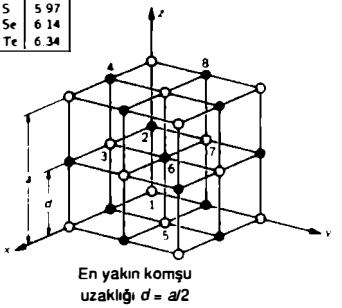


Şekil 1–6

Şimdi de bir başka sürece geçelim. Şekil 1–6'da bir katının suda eriyişini atomik açıdan görüyorsunuz. Bir tuz kristalini suya atarsak, ne olacaktır? Tuz bir katıdır; bir kristal, dolayısıyla "tuz atomları"nın düzenli bir dizilimidir. Şekil 1–7, bildiğimiz tuzun, başka bir ifadeyle sodyum klorürün üç boyutlu yapısını göstermektedir. Doğrusu, tuz kristali atomlardan değil de, iyon dediğimiz şeylerden oluşmuştur. İyon, ya birkaç fazla elektrona sahip ya da birkaç elektronu noksan olan bir atomdur. Tuz kristalinde klor iyonları (bir fazla elektronlu klor atomları) ve sodyum iyonları (bir eksik elektronlu sodyum atomları) bulunur. Katı tuzda tüm iyonlar elektriksel çekimle bir arada dururlar; fakat onları su içine koyduğumuzda, negatif oksijenin ve pozitif hidrojenin iyonları çekmesi nedeniyle, bazı iyonların ayrıldıklarını görürüz. Şekil 1–6'da, serbest kalan bir klor iyonu ile suda iyon yapısında yüzen diğer atomları görüyoruz. Bu resim epeyce özenle çizilmiştir. Örneğin dikkat ederseniz, su moleküllerinin hidrojen uçları daha çok klor iyonlarına yakın durmaktadır, sodyum iyonlarının yakınındaysa daha çok oksijen uçları vardır; çünkü sodyum iyonu pozitif ve suyun oksijen ucu negatif olduğundan birbirlerini elektriksel olarak çekerler. Bu resme bakarak tuzun suda *eridiğini* ya da sudan *kristalleşmekte olduğunu* söyleyebilir miyiz? Kuşkusuz söyleyemeyiz, çünkü bazı atomlar kristali terk ederken, bazılarıysa onunla birleşmektedir. Süreç, tıpkı buharlaşmada olduğu gibi *dinamik*tir ve bu, suda denge için gerekli olan tuz miktarından daha çok ya da daha az tuz bulunduğuna bağlıdır. Denge sözüyle, atomların kristalden ayrılma hızı ile kristale dönme hızının eşit olması halini kastediyoruz. Suda iyice az tuz varsa, ayrılan atomlar dönenlerden daha fazla olur ve tuz erir. Diğer yandan, suda aşırı miktarda "tuz atomu" varsa, ayrılanlardan daha çok dönen olur ve tuz kristalleşir.

Bu arada şunu da belirtelim ki bir maddenin *molekülü* yaklaşık bir kavram olup sadece belirli bir madde grubu için söz konusudur. Su halinde üç atomun gerçekten bir araya geldiği açıktır. Katı haldeki sodyum klorürdeyse bu hiç de

Kristal	●	O	a(Å)
Kaya tuzu	Na	Cl	5.64
Silvit	K	Cl	6.28
	Ag	Cl	5.54
	Mg	O	4.20
Galen	Pb	S	5.97
	Pb	Se	6.14
	Pb	Te	6.34



Şekil 1–7

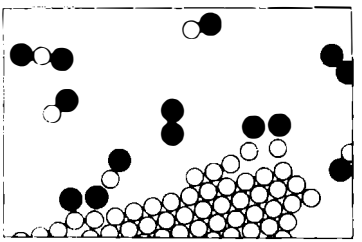
açık değildir. Sadece sodyum ve klor iyonları küp deseni şeklinde düzenlenmişlerdir. Onları "tuz molekülleri" olarak gruplamanın doğal bir yolu yoktur.

Çözelti ve çökelti tartışmamıza geri dönelim; tuz çözeltisinin sıcaklığını yükseltirsek, kristalden atomların ayrılma oranı artar, ama atomların geri dönme oranı da artar. İşin ne yöne gideceğini, katının daha çok mu, yoksa daha az mı çözüneceğini kestirmek genelde zordur. Sıcaklık yükseldiğinde, çoğu madde daha fazla çözünürse de, bazı maddelerse az çözünürler.

Kimyasal Tepkimeler

Şu ana kadar açıklanan süreçlerin tümünde, atomlar ve iyonlar eşlerini değiştirmemişti; fakat kuşkusuz atomların yeni moleküller oluşturmak üzere birleşimlerini değiştirdikleri durumlar vardır. Bu durum Şekil 1–8'de gösterilmektedir. Atomik eşlerin yeniden düzenlendiği bir sürece, biz *kimyasal tepkime* diyoruz. Şu ana kadar betimlenen diğer süreçlere fiziksel süreçler denir; fakat bu ikisi arasında keskin bir ayırım yoktur. (Doğa bizim o sürece hangi ismi verdiğimize bak-

maz, sadece süreci işletmeyi sürdürür.) Bu resim, karbonun oksijen içinde yanışını betimlemektedir. Oksijen molekülünde *iki* oksijen atomu birbirine çok sıkı olarak bağlıdır. (*Üçü*, hatta *dördü* neden bir araya bağlanmaz? Bu tür atomik süreçlerin kendilerine özgü karakteristiğidir bu. Atomlar çok özeldir: Belli özel eşleri, belli yönleri vb isterler. Her birinin istediği şeyi neden istediğini çözmek fiziğin işidir. Her nasılsa, iki oksijen atomu, halinden memnun ve hoşnut olarak bir molekül oluşturur.)



KARBONUN OKSİJEN İÇİNDE YANMASI

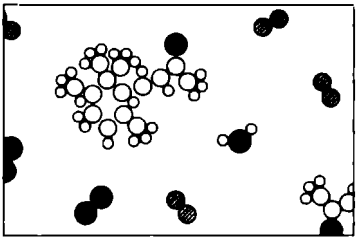
Şekil 1-8

Karbon atomlarının katı bir kristalde (grafit ya da elmas[1] olabilir) oldukları varsayılır. Şimdi, örneğin oksijen moleküllerinden biri karbonun üzerine gelir ve her oksijen atomu bir karbon atomu kaparak yeni bir birleşim –"karbon-oksijen"– halinde uçup gider; bu yeni birleşim, karbonmonoksit denen gazın bir molekülüdür. Ona CO kimyasal adı verilir. Çok basit: "CO" harfleri, âdeta bu molekülün bir resmidir. Fakat karbon oksijeni, oksijenin oksijeni ya da karbonun karbonu çekmesinden çok daha fazla çeker. Dolayısıyla bu süreçte oksijen karbona çok küçük bir enerjiyle gelebilir, fakat oksijen ve karbon şiddetli bir gürültü ve patırtıyla birleşirler; onlara yakın her şey enerji kazanır. Böylece büyük miktarda hareket enerjisi, diğer bir deyişle kinetik enerji üretilir. İşte buna

[1] Elmas havada yanabilir.

yanma denir; oksijen ve karbonun birleşmesinden ısı elde ederiz. Isı normalde sıcak gazın molekül hareketleri şeklindedir; fakat bazı durumlarda öylesine devasa olabilir ki *ışık* oluşturur. İşte *alev* böyle elde edilir.

Ayrıca karbonmonoksit tam doymuş değildir. İkinci bir oksijeni de kendine bağlayabilir; böylece çok daha karmaşık bir sürece şahit oluruz: Oksijen bir yandan karbonla birleşir, diğer yandan aynı zamanda bir karbonmonoksit molekülüyle bir çarpışma yapar. Bir oksijen atomu CO'ya bağlanır ve böylece bir karbon ve iki oksijen içerdiği için CO_2 ile gösterilen ve karbondioksit denen yeni bir molekül oluşturur. Karbonu çok az oksijenle çok hızlı bir tepkimede yakarsak, hatırı sayılır miktarda karbonmonoksit meydana gelir (örneğin bir otomobil motorunda, yanma o kadar hızlıdır ki oksijenin karbondioksit oluşturmasına zaman yoktur). Bu türden pek çok yeniden düzenlemede, tepkimelere bağlı olarak, patlama, alev vb şekillerde büyük miktarlarda enerji ortaya çıkar. Kimyacılar atomların bu düzenlenişlerini incelemişler ve her maddenin belli bir tarzda *düzenlenmiş atomlardan* ibaret olduğunu bulmuşlardır.



MENEKŞE KOKUSU

Şekil 1–9

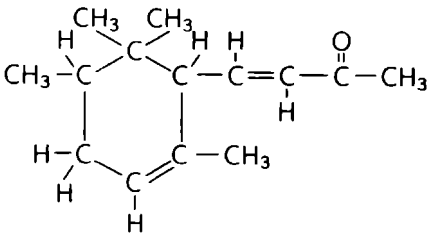
Bu düşünceyi açıklamak için, bir başka örneğe bakalım. Bir menekşe tarlasına girdiğimizde, "o koku"nun ne olduğunu biliriz. Burnumuza girmiş olan bir tür *molekül* ya da atomlar düzenidir. Her şeyden önce, burnumuza *nasıl* girer? Epeyce kolay. Koku, havada itilip kakılıp oraya buraya hare-

ket eden bir tür molekülse, *rastgele* burnumuza girmiş olabilir. Burnumuza girmek için kuşkusuz özel bir isteği yoktur. İtişip kakışan bir moleküller kalabalığının zavallı bir parçasıdır ve amaçsız dolaşması sırasında kendisini burnumuzun içinde bulmuştur.

İşte kimyacılar menekşe kokusu gibi özel molekülleri alarak onları çözümlerler ve atomların uzaydaki *tam düzenleniş* tarzını bize söylerler. Karbondioksit molekülünün düz ve simetrik olduğunu biliyoruz: O–C–O. (Bu fiziksel yöntemlerle de kolayca belirlenebilir.) Ama kimyada var olan çok daha karmaşık atomlar için bile uzun ve dikkate değer bir dedektiflik çalışmasıyla, onların atom dizilimlerinin bulunması olanaklıdır. Şekil 1–9 bir menekşenin yakınındaki havanın bir resmidir; havada yine azot ile oksijen ve su buharı vardır. (Neden su buharı da vardır? Çünkü menekşe *nemli*dir. Tüm bitkiler terler!) Ayrıca orada özel bir örüntü halinde karbon atomlarından, hidrojen atomlarından ve oksijen atomlarından oluşmuş bir "canavar" da görünüyor. O, karbondioksitten çok çok karmaşık bir dizilimdedir; aslında aşırı derecede karmaşık bir dizilim. Ne yazık ki, onun hakkında kimyasal olarak bilinen her şeyi resmedemeyiz, çünkü atomların üç boyuttaki düzenlenme şekli kesin olarak bilinmekle birlikte, bizim resmimiz sadece iki boyutludur. Bir halka oluşturan altı karbon düzlemsel bir halka yapısında olmayıp bir tür "buruşuk" halkadır. Tüm açılar ve mesafeler bilinmektedir. Bu nedenle böyle bir molekülün resmi olsa olsa bir kimyasal *formül* olur. Kimyacı tahtaya böyle bir şey yazdığında, aslında onu iki boyutta kabaca "çizmeye" çalışmaktadır. Örneğin altı karbondan oluşan bir halka görmekteyiz ve buna bir ucundan asılmış bir karbonlar "zinciri", sondan ikinci karbonda bir oksijen, bu karbona bağlı üç hidrojen, şurada iki karbon ve üç hidrojen vb.

Kimyacı bu düzenlemeleri nasıl bulur? Şişeler içinde bir sürü şeyi karıştırır; kırmızıya dönerse, bu ona şurada bir hidrojen ve buraya bağlı iki karbon olduğunu söyler; diğer taraftan maviye dönerse, durum hiç de böyle değil demektir.

İşte bu, hep yapılan dedektif çalışmasının en şaşırtıcı parçalarından biridir: Organik kimya. Kimyacı bu aşırı karmaşık dizilimlerde atomların düzenlenişini keşfetmek için, farklı iki maddeyi karıştırdığında ne olacağına bakar. Fizikçi, kimyacının atomların düzenlenişini betimlediğinde ne dediğini bildiğine hiçbir zaman iyice inanmamıştır. Neredeyse yirmi yıldır, bazı durumlarda, böyle moleküllere (örneğimizdeki kadar karmaşık olmasa bile onun parçalarını içeren moleküllere) fiziksel yöntemlerle bakılabiliyor ve renklere göre değil de, *nerede oldukları ölçülerek* her atomun yeri belirleniyor. Ve hayret! Kimyacılar hemen hemen hep haklı çıkıyor.



Şekil 1-10 Resimdeki madde α-irone (süsen özü).

Aslında menekşe kokusunda yalnız hidrojen atomlarının düzenlenişi bakımından hafifçe farklı üç çeşit molekül bulunduğu anlaşılmıştır.

Kimyanın bir problemi, bir maddeye –onun ne olduğunu bilmemizi sağlayacak– bir isim takmaktır. O biçime uygun bir isim bulmak! İsim sadece o biçimi söylemekle kalmamalı, aynı zamanda burada bir oksijen atomu, şurada bir hidrojen atomu olduğunu da belirtmelidir: her atom tam olarak nedir ve nerededir? O halde, bir kimyasal ismin tam olması için karmaşık olması gerektiğini takdir edersiniz. Bu molekülün hem yapısını ve hem de atomlarının düzenlenişini daha tam anlatan ismi 4-(2,2,3,6 tetrametil 5-siklohekzenil)-3-bütan-2-one'dur. Kimyacıların karşılaştıkları güçlükleri takdir ediyor ve böylesine uzun isimlerin nedenini anlıyoruz.

Bu, onların gizemli kalmayı istediklerinden değil, fakat molekülleri sözcüklerle betimlemek gibi aşırı zor bir problemle karşı karşıya kaldıklarındandır.

Atomların varlığını nereden *biliyoruz*? Daha önce sözü edilen kurnazlıklardan biri vasıtasıyla: Atomların varlığını bir *varsayım* olarak kabul ederiz ve sonuçlar birer birer bizim öngördüğümüz şekilde, diğer bir deyişle nesnelerin atomlardan yapılmış olmasına uygun olarak ortaya çıkar. Biraz daha doğrudan kanıtlar da vardır; bunun güzel bir örneği şudur: Atomlar o kadar küçüktür ki onları bir ışık mikroskopuyla bile göremezsiniz; aslında, *elektron* mikroskopuyla da görünmezler. (Bir ışık mikroskobuyla ancak çok daha büyük cisimleri görebilirsiniz.) Şimdi atomlar, diyelim ki suda, sürekli hareket halindeyseler ve biz su içine atomlardan çok daha büyük bir top koyarsak, top oraya buraya hareket edecektir; tıpkı etrafındaki pek çok kişi tarafından itilen çok büyük bir topla oynanan top-itme oyununda olduğu gibi. Oyuncular topu çeşitli yönlerde iterler ve top oyun alanı içinde düzensiz şekilde hareket eder. Böylece sudaki "büyük top" da, bir andan diğerine, bir tarafındaki vuruşların diğer tarafındakilere eşit olmaması nedeniyle aynı şekilde hareket edecektir. Dolayısıyla mükemmel bir mikroskopla sudaki iyice küçük parçacıklara (kolloidler) bakarsak, atomların bombardımanı etkisiyle bu parçacıkların sürekli oraya buraya hareket ettiklerini görürüz. Buna *Brown hareketi* denir.

Kristallerin yapısında da atomlar için başka kanıtlar görebiliriz. X-ışınları analizlerinden çıkarılan kristal yapıları, uzaysal "biçimleri" açısından, birçok durumlarda, doğadaki kristallerin gösterdiği gerçek şekillerle uyuşurlar. Bir kristalin çeşitli "yüzleri" arasındaki açılar, kristalin atom tabakalarından meydana geldiği varsayımından çıkarılan açılarla yay saniyeleri mertebesine kadar uyuşmaktadır.

Her şey atomlardan oluşmuştur. Ana varsayım budur. Örneğin biyolojinin her yerinde en önemli varsayım, *hayvanları oluşturan her şeyin atomlardan yapılmış olmasıdır*. Baş-

ka bir deyişle, *Canlı varlıkların yaptıkları hiçbir şey yoktur ki fizik yasalarına göre hareket eden atomlardan meydana geldikleri görüşüyle açıklanamasın.* Bu konu başlangıçta bilinmiyordu: Bu varsayımı ortaya atmak için birçok deneysel ve kuramsal çalışmanın yapılması gerekmişti, fakat artık kabul görmektedir ve biyoloji alanında yeni düşünceler üretilmesini sağlayan en yararlı kuramdır.

Yan yana atomlardan oluşan bir çelik parçası ya da bir parça tuz böylesine ilginç özelliklere sahip olabiliyorsa; dünya üzerinde binlerce kilometrelik alana yayılmış bu aynı küçük parçacıklardan başka bir şey olmayan su dalgalar ve köpükler yapabiliyor, kıyıya vurunca haşin sesler çıkarıyor, çimentoyla karışınca acayip örüntüler oluşturuyorsa; eğer bunların tümü, bir su akıntısının tüm yaşamı bir atomlar yığınından başka bir şey değilse, *acaba daha neler olabilir*? Atomları durmaksızın tekrarlayarak, belirli bir desende düzenlemek ya da onlardan menekşe kokusu gibi küçük karmaşık öbekler oluşturmak yerine, farklı atomlardan, hiç tekrarlanmayan, yerden yere *hep değişen* çeşitli şekillerde bir düzenleme yapsak, acaba bu nesne ne kadar daha harikulâde davranabilir? Önünüzde ileri geri yürüyen, sizinle konuşan ve akıl almaz karmaşıklığıyla yapabileceği şeyleri hayal etme gücünüzü sarsan bu "nesne"nin çok karmaşık düzenlenişte bir atomlar yığınından ibaret olması mümkün müdür? Bizim bir atom yığını olduğumuzu söylediğimizde, *sadece* bir atom yığınından ibaret olduğumuzu kastetmiyoruz; çünkü birinden diğerine tekrarlanmamış bir atomlar yığını, önünüzdeki aynada gördüğünüz olanaklara tam lâyıkıyla sahip olabilir.



2

TEMEL FİZİK

Giriş

Bu bölümde fiziğin en temel ilkelerini, nesnelerin doğasını şu anda nasıl gördüğümüzü inceleyeceğiz. Tüm bu düşüncelerin nasıl doğrulandıklarının öyküsüne girmeyeceğiz; bunu zaman geçtikçe öğreneceksiniz.

Bilimde ilgilendiğimiz şeyler çok sayıda niteliklerle sayısız yapılarda ortaya çıkarlar. Örneğin kıyıda durup denize baktığımızda, suyu, dalgaların parçalanışını, köpükleri, suyun çalkantı hareketini, suyun sesini, havayı, rüzgârları ve bulutları, güneşi ve mavi gökyüzünü ve ışığı görürüz; etrafta alabildiğine kum, çeşitli sertlikte, renk ve dokuda kayalar vardır. Hayvanlar ve yosunlar vardır; açlık ve hastalık, bir plaj gözetleyicisi... Hatta mutluluk ve düşünce bile oralarda olabilir. Doğanın hangi başka bir yerinde de benzer bir nesneler çeşitliliğiyle ve etkileriyle karşılaşırız. Neresi olursa olsun, doğanın her yeri hep böylesine karmaşıktır. Merakımızdan, sorular sorarız, nesneleri bir araya getirmeye çalışırız ve belki de sonsuz çeşitliliğe sahip birleşimlerde oldukça küçük sayıda temel nesnelerin ve kuvvetlerin eyleminden hareketle, bu görünüm çokluğunu anlamaya çalışırız.

Örneğin kum, kayadan başka bir şey midir? Acaba kum çok büyük sayıda küçücük taş parçacıklarından mı oluşmaktadır? Ay, muazzam büyüklükte bir kaya olamaz mı? Eğer

kayaları anlarsak, kumu ve ayı da anlamış olmaz mıyız? Rüzgâr, denizdeki suyun çalkantı hareketi gibi, havanın bir çalkantısı mıdır? Farklı hareketlerin ortak özellikleri nelerdir? Kaç çeşit renk vardır? vb. Böylece her şeyi yavaş yavaş çözümlemeye, ilk bakışta farklı gibi görünen bu şeyleri bir araya getirmeye çalışırız; ümidimiz, *farklı* şeylerin sayısını azaltabilmek ve dolayısıyla onları daha iyi anlamaktır.

Birkaç yüzyıl önce, bu tür sorulara sınırlı yanıtlar bulabilmek için bir yöntem oluşturulmuştu. Bilimsel yöntem dediğimiz bu yol, *gözlem, akıl yürütme ve deney*den meydana gelmektedir. Bilimsel yöntemin uygulanmasından ortaya çıkan bazen *temel fizik* ya da temel düşünceler dediğimiz temel görüşümüzün çıplak bir anlatımına sınırlayacağız kendimizi.

Bir şeyi "anlamak" sözüyle ne demek isteriz? "Evreni" oluşturan bu hareketli nesnelerin karmaşık dizilişinin, tanrılar tarafından oynanan büyük bir satranç oyunu olduğunu ve bizim de bu oyunun seyircileri olduğumuzu düşünebiliriz. Oyunun kurallarını bilmiyoruz; sadece oyunu *seyretmemize* izin verilmiştir. Yeterince seyredersek, eninde sonunda elbette kuralların birkaçını kavrayabiliriz. *Oyunun kuralları, temel fizik* dediğimiz şeydir. Yine de her kuralı öğrenmiş olsak bile oyun aşırı karmaşık ve bizim aklımız sınırlı olduğu için, oyundaki özel bir hamlenin neden yapıldığını anlayamayabiliriz. Satranç oynuyorsanız, tüm kuralları öğrenmenin kolay bir iş olduğunu bilirsiniz; yine de bazen en iyi hamleyi seçmek, ya da rakibin o hamleyi neden yaptığını anlamak çok zordur. Doğada da bu böyledir, hatta çok daha zordur; ama en azından bütün kuralları bulabiliriz. Aslında, şu anda kuralların tümüne sahip değiliz. (Zaman zaman hâlâ anlayamadığımız bazı şeyler ortaya çıkar.) Tüm kuralları bilmediğimiz gibi, bu kurallar cinsinden açıklayabildiğimiz şeyler de sınırlıdır; çünkü ilerde olacaklar bir yana, neredeyse tüm durumlar o kadar karmaşıktır ki kuralları kullanarak oyundaki hamleleri izleyemeyiz. Bu nedenle incelemelerimizi, daha temel bir soruya, oyunun kurallarına sınırlamalıyız. Kuralları biliyorsak, dünyayı "anlıyoruz" diyebiliriz.

Oyunu iyice çözümleyemiyorsak, "tahmin" ettiğimiz kuralların gerçekten doğru olup olmadıklarını nasıl söyleyebiliriz? Bunun için, kabaca üç yol vardır. Birincisi doğanın düzenlediği, ya da doğada bizim düzenlediğimiz öyle durumlar olabilir ki, problem, bizim kesin olarak öngöreceğimiz kadar basit ve az parçalı olur ve böylece kurallarımızın işleyiş tarzını kolayca sınayabiliriz. (Satranç tahtasının bir köşesinde sadece birkaç taş kalmıştır ve oradaki durumu tam olarak kavrayabiliriz.)

Kuralları sınamanın ikinci iyi yolu, onlardan çıkarılmış daha az özel kuralları sınamaktır. Örneğin kural olarak fil sadece çapraz yönde hareket eder. Buna göre, kaç hamle yapmış olursa olsun, belli bir filin her zaman bir kırmızı karede olacağı sonucuna varılır. Böylece ayrıntıyı izlemeden de, filin hep kırmızı karelerde olup olmadığını araştırmakla, filin hareketleri hakkındaki düşüncelerimizi sınayabiliriz. Kuşkusuz, fil uzun süre kırmızı karelerde hareket edecektir; fakat hiç beklenmedik bir anda onu siy*ah* bir karede de görebiliriz. (Bu arada olan şudur: Bu fil alınmıştır ve bir diğer piyon satranç tahtasının en ileri sırasına kadar giderek bir siyah karede bir file dönüşmüştür.) Fizikte de böyle olur. Uzun bir süre her şekilde, ayrıntıları izlemesek bile mükemmelen işleyen bir kurala sahibizdir ve sonra bazen *yeni bir kural* keşfederiz. Temel fizik açısından, en ilginç olaylar kuşkusuz *yeni* yerlerde, kuralların çalışmadığı yerlerdedir, çalışan yerlerde değil! Yeni kuralları işte böyle keşfederiz.

Kurallarımızın doğru olup olmadığını söylemenin üçüncü yolu oldukça kabadır, fakat belki de yolların en güçlüsüdür. Bu, kabaca *yaklaştırma* yöntemidir. Alekhine'in *şu taşı* neden oynadığını söyleyemesek de, şahı korumak niyetiyle taşlarını onun etrafında toplamakta olduğunu kabaca anlayabiliriz, çünkü böyle durumlarda yapılacak akıllıca iş aşağı yukarı budur. Aynı şekilde, oyunu anlayış tarzımıza paralel olarak, *her bir küçük taşın* ne yaptığını görmeden yaptığımız gibi, doğayı da aşağı yukarı böyle anlayabiliriz.

Doğa olayları başlangıçta, kabaca ısı, elektrik, mekanik, manyetizma, maddenin özellikleri, kimyasal olaylar, ışık ya da optik, X-ışınları, çekirdek fiziği, kütleçekim, mezon olayları vb gibi sınıflara ayrılmıştı. Bununla birlikte, esas amaç, *tüm doğayı* bir olaylar topluluğunun farklı görünümleri olarak anlamaktır. Temel kuramsal fiziğin bugünkü problemi budur: *deneyin ardındaki yasaları bulmak, bu sınıfları birleştirmek*... Tarihsel olarak, onları birleştirmeyi daima başarmışız, fakat zaman geçtikçe yeni şeyler bulundu. Sınıfları gayet güzel bir şekilde birleştirirken, birdenbire X-ışınları keşfedildi. Biraz daha birleştirme yapmıştık ki mezonlar bulundu. Dolayısıyla oyunun her aşamasında, işler hep daha da karışık görünüyor. Pek çok şey birleştirilmiş olsa da, oradan buradan sarkan teller ve iplikler var hâlâ. İşte açıklamaya çalışacağımız bugünkü durum budur.

Birleştirmeyle ilgili bazı tarihsel örnekler var. Önce ısı ve mekaniği ele alalım. Atomlar hareket halindeyken, sistemde ne kadar çok hareket varsa, sistem de o kadar çok ısı içerir; dolayısıyla *ısı ve tüm sıcaklık etkileri, mekanik yasalarıyla temsil edilebilir*. Diğer muazzam birleştirme, elektrik, manyetizma ve ışık arasındaki bağlantının keşfidir; bunların bugün *elektromanyetik alan* dediğimiz bir tek şeyin farklı görünümleri olduğu bulunmuştur. Bir başka örnekse kimyasal olaylar, değişik maddelerin çeşitli özellikleri ve atomik parçacıkların davranışlarının *kimyanın kuantum mekaniği* içerisinde birleştirilmesidir.

Temel soru kuşkusuz şudur: *Her şeyi* birleştirmek mümkün olacak mıdır? Ve bu evrenin, en saf haliyle, *bir tek şeyin* farklı görünümlerini temsil ettiği keşfedilecek midir? Bunu kimse bilmiyor. Bildiğimiz tek şey şu ki, yolumuzda ilerledikçe, parçaları birleştirebildiğimizi görüyoruz ve sonra bazı parçaların uymadıklarını anlıyoruz ve böylece yap-boz bilmecesini bir araya getirme çalışmamızı sürdürüyoruz. Yap-bozun parçaları sonlu sayıda mı, hatta bilmecenin bir sınırı var mı, kuşkusuz bunlar bilinmiyor. Resmi bitirinceye kadar da, eğer bitirilebilirse, bu asla bilinmeyecek. Burada

yapmak istediğimiz şey, en az sayıda ilke içerisinde temel olayları anlamada birleştirme sürecinin nereye kadar ilerlemiş olduğunu görmek ve şu andaki durumu öğrenmektir. Bunu en basit haliyle ifade edersek, *nesneler nelerden yapılmıştır ve ne kadar az yapı-taşı vardır?*

1920'den Önceki Fizik

Birdenbire bugünkü görünümle başlamak biraz zor geleceği için, önce 1920'lerdeki durumu görecek ve sonra da bu tablodan bir şeyler çıkaracağız. 1920'den önce, evren tablomuz aşağı yukarı şöyleydi: Evrenin üzerinde oyununu sürdürdüğü "sahne", Öklit'in betimlediği geometrinin üç-boyutlu *uzay*ıdır ve olaylar *zaman* denen bir ortamda cereyan eder. Sahnedeki oyuncular parçacıklardır, örneğin bazı özelliklere sahip olan atomlar. İlk özellik eylemsizliktir. Bir parçacık hareket halindeyse, üzerine *kuvvet* uygulanmadıkça aynı yöndeki hareketini sürdürür. Buna göre, ikinci öğe *kuvvetler*dir. O zamanlarda iki çeşit kuvvetin var olduğu düşünülürdü. Birincisi çeşitli atomları karmaşık bir şekilde değişik düzenlemeler halinde tutan, sıcaklığı değiştirdiğimizde tuzun daha hızlı ya da daha yavaş erimesini tayin eden aşırı derecede karmaşık ve ayrıntılı türden bir etkileşme kuvvetidir. Diğer kuvvetse uzun-erimli bir etkileşme olarak bilinen, uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişen ve *kütleçekim* denen –düzgün ve sakin bir çekme– idi. Bu yasa biliniyordu ve çok basitti. Fakat hareket eden cisimlerin *neden* harekette kaldıkları, ya da *neden* bir kütleçekim yasasının var olduğu kuşkusuz bilinmiyordu.

Burada biz doğanın anlatımıyla ilgileniyoruz. Bu açıdan, bir gaz ve aslında tüm madde, çok büyük sayıda hareketli parçacıklardan oluşmuştur. Buna göre, deniz kıyısında dururken gördüğümüz olayların pek çoğu derhal birleştirilebilir. Önce basınca bakalım. Basınç, atomların duvarlarla ve başka nesnelerle çarpışmasından ileri gelir. Atomların sürüklenmesiyse, ortalama olarak tümü bir yönde hareket

ediyorsa, rüzgârdır; *gelişi güzel* iç hareketlerse *'ısı'*dır. Çok sayıda parçacığın bir araya toplanmasıyla oluşan aşırı yoğunluk dalgaları vardır; bunlar hızla hareket ederek diğer parçacık yığınlarını ötelere iterler. Bu yüksek yoğunluk dalgası *'ses'*tir. Bu denli çok şeyi anlayabilmek, olağanüstü bir başarıdır. Bunların bir kısmı, önceki bölümde açıklanmıştı.

Kaç tür parçacık vardır? O zamanlar 92 tür parçacık olduğu düşünülüyordu; sonunda 92 farklı türden atom keşfedildi. Bunlara kimyasal özellikleriyle ilgili isimler takıldı.

Problemin bir sonraki parçası, *kısa-erimli kuvvetlerin neler olduğu*dur? Karbon neden bir oksijeni ya da belki iki oksijeni çeker, fakat üç oksijeni çekmez? Atomlar arasındaki etkileşme mekanizması nedir? Kütleçekim midir? Hayır. Kütleçekim tümden aşırı zayıftır. Fakat uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişen, bu nedenle kütleçekime benzeyen, ancak çok daha büyük olan ve bir başka farka daha sahip bulunan bir kuvvet düşünün. Kütleçekimde her şey her şeyi çeker; fakat şimdi *iki tür "cevher"* olduğunu ve bu yeni kuvvetin (bu, kuşkusuz, elektrik kuvvetidir), benzer "cevher"lerin birbirlerini *itme* ve benzer olmayanlarınsa birbirlerini *çekme* özelliğine sahip olduğunu varsayın. Bu yeğin etkileşmeyi taşıyan "cevher"e yük deriz.

O halde elimizde ne var? Birbirini çeken iki benzemeyen yüke –birine artı ve diğerine eksi diyelim– sahip olduğumuzu varsayın; bu iki yük birbirine sıkıca yapışır. Biraz ötede başka bir yük daha olsun. Bu yük bir çekim hisseder mi? *Pratik olarak hiçbir çekim* hissetmez, çünkü ilk iki yük büyüklükçe eşitse, birinin çekimi diğerinin itimini dengeler. Dolayısıyla hatırı sayılır bir uzaklıkta çok çok küçük bir kuvvet olur. Diğer yandan, üçüncü yükü ikiliye *iyice yaklaştırırsak*, bir *çekim* ortaya çıkar; çünkü benzerlerin birbiri itmesi ve benzer olmayanların çekmesi nedeniyle, üçüncü yük ikilinin kendine benzer olmayanını biraz yakınına çeker ve diğeriniyse biraz uzağa iter. Bu durumda, itme kuvveti çekme kuvvetinden daha az olacaktır. Artı ve eksi yüklerden oluşan atomların birbirlerinden hatırı sayılır uzaklıktayken çok kü-

çük bir kuvvet (kütleçekim bir yana) hissetmelerinin nedeni budur. Birbirlerine yaklaştıklarındaysa birbirlerinin "içlerini görebilirler" ve yüklerini yeniden düzenlerler; sonuçta çok büyük bir etkileşmeye sahip olurlar. Atomlar arasındaki etkileşmenin temeli *elektrikseldir*. Bu kuvvet çok büyük olduğundan, tüm artılar ve tüm eksiler normalde oluşabilecek en sıkı düzenlenme içinde birbirlerine yaklaşacaklardır. Her şey, biz bile çok iyi dengelenmiş, çok güçlü olarak etkileşen küçük küçük artı ve eksi kısımlardan oluşmuşuzdur. Arada bir, kaza eseri, birkaç eksi ya da artı yük kaybedebiliriz (genellikle eksileri kaybetmek daha kolaydır); bu durumda dengelenmemiş elektriksel kuvvetler belirir ve işte o zaman bu elektriksel çekimlerin etkilerini görürüz.

Elektrik kuvvetinin kütleçekimden ne denli büyük olduğu hakkında bir fikir vermek için, bir milimetre çapında ve birbirinden otuz metre uzaklıkta iki kum tanesi düşünelim. Onların arasındaki kuvvet dengelenmemiş olsaydı, benzer yüklerin birbirlerini itmeleri yerine her şey her şeyi çekseydi, kuvvetlerin birbirlerini yok etmeleri olmasaydı, iki kum tanesi arasındaki kuvvet ne olurdu? Bu iki kum tanesi arasında *üç milyon tonluk* bir kuvvet olurdu! Görüyorsunuz ya, hissedilebilir elektriksel kuvvetler oluşturmak için eksi ve artı yüklerin sayıları arasında gereken fazlalık ya da eksiklik *çok, ama çok küçük*tür. Elektrik yüklü bir cisim ile elektrikçe yüksüz bir cisim arasındaki farkı göremeyişimizin nedeni işte budur: bu farkı yaratan parçacık sayısı o kadar azdır ki, bir cismin ağırlığına ya da büyüklüğüne neredeyse hiç etki etmezler.

Bu tablo sayesinde atomları anlamak kolaylaşmıştı. Atomların, merkezde çok ağır ve elektrikçe artı yüklü bir "çekirdek"e sahip oldukları ve çekirdeğin etrafının belirli sayıda eksi yüklü çok hafif "elektronlar"la sarılı olduğu düşünülüyordu. Şimdi öykümüzü biraz daha ileriye götürerek, çekirdeğin içinde de hemen hemen aynı ağırlıkta çok ağır iki tür parçacığın –protonlar ve nötronlar– olduğunu söyleyebiliriz. Protonlar elektrikçe yüklü, nötronlarsa yüksüzdür.

Çekirdeğinin içinde altı protonu bulunan ve etrafı altı elektronla sarılmış olan bir atomumuz varsa, bu, kimyasal tabloda (periyodik cetvelde) altı numaralı elementtir ve karbon adını almıştır (sıradan madde dünyasındaki parçacıkların tümü elektronlardır ve bunlar çekirdeği oluşturan proton ve nötronlara göre çok hafiftirler). Benzer şekilde, atom numarası sekiz olana oksijen denir, çünkü kimyasal özellikler *dıştaki* elektronlara, aslında sadece kaç elektron olduğuna bağlıdır. Demek ki bir elementin kimyasal özellikleri sadece bir sayıya, elektron sayısına bağlıdır. (Kimyacıların tam elementler listesini, aslında 1, 2, 3, 4, 5, . . . gibi sayılarla adlandırabilirdik. "Karbon" yerine, altı elektron anlamında "element 6" derdik; fakat elementler ilk keşfedildiklerinde sayılarla ifade edilebilecekleri bilinmiyordu, ayrıca bu işleri oldukça karmaşık hale sokabilirdi. Bu nesneler için isim ve semboller kullanmak onları sayılarla göstermekten daha iyidir.)

Elektriksel kuvvet hakkında daha pek çok şey keşfedildi. Elektriksel etkileşmenin doğal yorumu, iki cismin basitçe birbirlerini çekmesidir: eksiye karşı artı yük. Bununla birlikte, daha sonra bunun onu temsil etmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Durumun çok daha doyurucu bir temsili şudur: Artı yükün varlığı bir bakıma uzayı değiştirir, ya da uzayda öyle bir "koşul" yaratır ki, oraya bir eksi yük getirdiğimizde bu yük kendi üzerinde bir kuvvet hisseder. İşte bu kuvvet yaratma kudretine elektrik alanı denir. Bir elektrik alanı içerisine bir elektron koyduğumuz zaman, elektron "çekilmiştir" deriz. Buna göre elimizde iki kural var demektir: (a) yükler bir alan yaratır ve (b) alanlar içinde bulunan yüklere kuvvetler uygulanır ve bu yükler hareket ederler. Bunun nedeni, aşağıdaki olayları inceledikçe açıklık kazanacaktır: Bir cismi, örneğin bir tarağı, elektrikle yükler ve sonra biraz uzağına küçük bir kâğıt parçası koyup tarağı ileri geri oynatırsak, kâğıt parçası tarağa doğru yönelip yanıt verir buna. Tarağı daha hızlı sallarsak, kâğıt parçasının biraz geri kaldığını görülür; *etkide bir gecikme vardır.* (Başlangıçta tara-

ğı oldukça yavaş hareket ettirdiğimizde, manyetizma denen bir karışıklıkla karşılaşırız. Manyetik etkiler, *yüklerin görece hareketleri*yle ilgilidir; dolayısıyla manyetik kuvvetler ve elektrik kuvvetleri tamamen aynı şeyin iki farklı görünümü olarak gerçekten de tek bir alana bağlanabilir. Değişen bir elektrik alanı manyetizmasız var olamaz.) Yüklü kâğıt parçasını daha da uzağa götürürsek, gecikme daha da artar. O zaman çok ilginç bir şey gözlenir. Yüklü iki cisim arasındaki kuvvetlerin uzaklığın karesiyle ters orantılı olması gerektiği halde, bir yükü salladığımızda, etkinin ilk bakışta tahmin edebileceğimizden çok daha uzaklara yayıldığı görülür. Diğer bir deyişle, etki, uzaklığın karesinin tersiyle orantılı olduğu durumdan daha da yavaş azalmaktadır.

İşte size bir benzetme: Bir su havuzunun içinde olduğumuzu ve yakınımızda yüzen bir mantar parçası bulunduğunu varsayalım; suyu başka bir mantar parçasıyla iterek ilk mantarı "doğrudan doğruya" hareket ettirebiliriz. Sadece iki mantara bakarsanız, görebileceğiniz tek şey, bir mantarın hareketine yanıt olarak diğerinin hareket etmiş olmasıdır; iki mantar *arasında bir tür "etkileşme"* vardır. Kuşkusuz, gerçekte yaptığımız şey, *suyu* karıştırmaktır; sonra *su da* diğer mantarı tedirgin eder. Buradan, 'suyu birazcık itersek, yakında yüzen bir cisim hareket eder' şeklinde bir "yasa" oluşturabiliriz. Kuşkusuz mantar çok uzakta olsaydı, hemen hemen hiç hareket etmezdi; çünkü suyu *yerel* olarak hareket ettirmiştik. Diğer yandan, mantarı hızla titretirsek, yeni bir olay ortaya çıkar; suyun hareketi biraz ötedeki suyu da hareket ettirir ve böylece uzaklaşan dalgalar oluşur. Demek ki suyu titreterek çok daha ötelerde bir etki, doğrudan etkileşmeyle anlaşılamayacak titreşimsel bir etki oluşturulabilir. Böylece doğrudan etkileşme düşüncesi yerine, havuz örneğinde suyun varlığı, elektriksel haldeyse *elektromanyetik alan* esas alınmalıdır.

Elektromanyetik alan, dalgaları taşıyabilir; bu dalgaların bazıları *ışık*tır, bir kısmı da *radyo yayınlarında* kullanılır; ama genel adlandırma *elektromanyetik dalgalar*dır. Bu

titreşimsel dalgalar çeşitli frekanslarda olabilir. Dalgalar arasında gerçek farkı yaratan tek şey, *titreşimin frekansı*dır. Bir yükü gitgide artan bir hızla ileri geri sallar ve etkilerine bakarsak, farklı türden etkilerin bir tam dizisini elde ederiz; bunların tümü bir tek sayıyı, saniyedeki titreşim sayısını belirtmek suretiyle birleştirilebilir. Evlerimizde kullandığımız

Titreşim sayısı/saniye cinsinden Frekans	İsim	kaba davranış
10^2	Elektriksel tedirgeme	Alan
$5 \times 10^5 - 10^6$	Radyo yayını	Dalga
10^8	FM – TV	Dalga
10^{10}	Radar	Dalga
$5 \times 10^{14} - 10^{15}$	Işık	Dalga
10^{18}	X – Işınları	Parçacık
10^{21}	γ – Işınları, çekirdeksel	Parçacık
10^{24}	γ – Işınları "yapay"	Parçacık
10^{27}	γ – Işınları, kozmik ışınlarda	Parçacık

Tablo 2–1 Elektromanyetik Spektrum.

elektrik akımının frekansı 50 devir/saniyedir. Frekansı saniyede 500 ya da 1000 kilodevire (1 kilodevir = 1000 devir) çıkarırsak, "yayındayız" demektir, çünkü bu radyo yayıncılığında kullanılan frekans bölgesidir. (Kuşkusuz, bu dalgaların havayla hiçbir ilgisi yoktur! Radyo yayını havasız yerlerde de yapılabilir.) Frekansı biraz daha yükseltirsek, FM ve TV'nin kullandığı bölgeye gireriz. Daha ileri gittiğimizde, belli kısa dalgalara varırız: örneğin radar dalgaları. Frekansı daha da yükseltirsek, artık eşyaları "görmek" için herhangi bir alete gerek duymayız; onları kendi gözlerimizle görebiliriz.

Eğer yüklü tarağımızı saniyede 5×10^{14} devirden 5×10^{15} devire kadar olan frekans bölgesinde sallayabilseydik, bu yüklü tarağın titreşimini gözlerimizle –frekansa bağlı olarak– kırmızı, mavi ya da mor ışık olarak görürdük. Bu bölge-

nin altındaki frekanslara *kızılaltı* ve üstündekilere *morötesi* denir. Belirli bir frekans bölgesini gözle görebilmemiz, fizikçi açısından bu bölgenin diğer bölgelerden daha etkileyici olduğu anlamına gelmez, fakat bu bölge insan olarak bizim için kuşkusuz çok önemlidir. Daha da yüksek frekanslara çıkarsak, X-ışınlarına varırız. X-ışınları çok yüksek frekanslı ışıktan başka bir şey değildir. Daha da yükseğe çıktığımızda, gamma ışınlarına ulaşırız. Bu iki terim, X-ışınları ve gamma ışınları, neredeyse aynı anlamda kullanılır. Genelde atomlardan gelen yüksek enerjili elektromanyetik ışınları X-ışınları olarak adlandırırken, çekirdeklerden gelenlereyse gamına ışınları deriz; fakat aynı frekansta olanlar, kaynakları ne olursa olsun, fiziksel bakımdan ayırt edilemezler. Eğer iyice yükseklere, diyelim ki saniyede 10^{24} devirlere çıkarsak, örneğin buradaki (CALTECH) sinkrotron hızlandırıcısında yapay olarak üretilen dalgalara erişiriz. *Kozmik ışınları*n içinde akıl almaz derecede yüksek frekanslı –binlerce kez daha hızlı titreşimli– elektromanyetik dalgalar bulabiliriz. Bu dalgaları biz kontrol edemeyiz.

Kuantum Fiziği

Elektromanyetik alan düşüncesini ve bu alanın dalgaları taşıyabildiğini anlattıktan sonra, bu dalgaların aslında hiç de dalgaya benzemeyen acayip bir tarzda davrandıklarını öğreniyoruz. Yüksek frekanslarda daha çok *parçacık* gibi davranırlar. 1920'den hemen sonra keşfedilen ve dalgaların bu acayip özelliklerini izah eden fizik dalı *kuantum mekaniği*'dir. 1920'den önceki yıllarda uzayın üç-boyutlu ve zamanın da ondan ayrı bir şey olduğunu düşünüyorduk; bu tablo Einstein tarafından önce dört-boyutlu uzayzaman haline getirildi ve daha sonra kütleçekimi de temsil edecek şekilde *eğri* uzayzamana dönüştürüldü. Böylece "sahne"miz artık uzayzamandır ve kütleçekim de uzayzamanın biraz değiştirilmiş halidir. Ayrıca parçacıkların hareketleriyle ilgili kuralların da doğru olmadığı anlaşılmıştı. Atomların dünyasında "ey-

lemsizlik" ve "kuvvet" gibi mekanik kuralları –Newton yasaları– *yanlıştır*. Buna karşılık, küçük ölçekli nesneler, *hiç de* büyük ölçekli nesneler gibi davranmazlar. Fiziğin güçlüğü, ama diğer taraftan da ilginçliği buradadır. Fizik zordur, çünkü küçük ölçekli nesnelerin davranış tarzı "doğallık"tan çok uzaktır; onlarla ilgili hiçbir doğrudan deneyimimiz yoktur. O ölçekte nesneler bildiğimiz gibi davranmazlar; öyle ki bu davranışı analitik yollardan başka hiçbir şekilde betimleme olanağına sahip değiliz. Bu iş gerçekten zordur, bolca hayal gücü gerektirir.

Kuantum mekaniğinin pek çok cephesi vardır. İlkin, bir parçacığın belirli bir konuma ve belirli bir hıza sahip olma düşüncesi artık geçerli değildir; bu yanlıştır. Klasik fiziğin ne denli yanlış olduğuna dair bir örnek verelim: Kuantum mekaniğindeki bir kurala göre, bir nesnenin hem nerede olduğu ve hem de hangi hızla gittiği bilinemez. Momentumun belirsizliği ile konumun belirsizliği birbirini tamamlar; bu ikisinin çarpımı, küçük bir sabitle sınırlıdır. Bu yasayı $\Delta x\ \Delta p \geq h/2\pi$ şeklinde yazabiliriz. Bunu daha sonra ayrıntılı olarak açıklayacağız. Bu kural, şu gizemli ikilemi çözümler: Atomlar artı ve eksi yüklerden oluşmaktaysa, neden eksi yükler artı yüklerin tam tepesine oturup (çünkü birbirlerini çekerler) onları tamamıyla yok etmezler? *Atomlar neden bu denli büyüktür?* Neden çekirdek merkezde ve elektronlar onun etrafındadır? İlkin, çekirdek çok büyük olduğu için bu böyledir diye düşünülmüştü; fakat hayır, *çekirdek çok küçüktür*. Bir atom 10^{-8} cm'lik bir çapa sahiptir; çekirdeğin çapıysa 10^{-13} cm'dir. Bir atomu, çekirdeğini görebileceğimiz kadar büyütmek isteseydik, bu atomun tümünü geniş bir oda kadar büyütmemiz gerekirdi; o zaman çekirdeği gözümüzle sade bir leke gibi görürdük. Fakat atomun neredeyse *tüm kütlesi* o sonsuz-küçük çekirdek içindedir. Elektronları çekirdeğe düşmekten koruyan nedir? Belirsizlik ilkesi: Elektronlar tam çekirdeğe girselerdi, onların konumlarını kesin olarak bilirdik ve belirsizlik ilkesi onların çok büyük (fakat kesin olmayan) bir momentuma, diğer bir deyişle çok büyük

bir *kinetik enerji*ye sahip olmalarını gerektirirdi. Bu enerjiyle elektronlar çekirdekten kopup giderlerdi. Bunun yerine bir uzlaşma sağlanır: Kendilerine bu belirsizlik için biraz yer ayırırlar ve bu ilkeye uygun belirli miktarda bir minimum hareketle titreşirler (Hatırlarsanız, bir kristal mutlak sıfıra kadar soğutulduğunda, atomların durmadıklarını, hâlâ titreştiklerini söylemiştik. Niçin? Çünkü dursalardı, nerede olduklarını ve hareketlerinin sıfıra indiğini bilirdik; bu da belirsizlik ilkesine aykırı olurdu. Nerede olduklarını ve ne kadar hızlı hareket ettiklerini bilmediğimize göre, oralarda sürekli kıpırdamakta olmaları gerekir.)

Kuantum mekaniğinin düşüncelerde ve bilim felsefesinde meydana getirdiği bir diğer ilginç değişim de şudur: Herhangi bir durumda ne olacağını önceden tam olarak kestirmek mümkün değildir. Örneğin bir atomu ışık salmaya hazır hale getirebilir ve ışığı saldığı anı bir foton parçacığını yakalayarak ölçebiliriz. Fakat ışığı *ne zaman* yayınlayacağını, ya da çok atom varsa, hangisinin yayınlayacağını önceden kestiremeyiz. Bunun nedeni, atomda bulunan fakat bizim henüz dikkatle bakmadığımız bir "iç düzen" olabilir diyebiliriz. Ama hayır, bir iç-düzen falan yoktur. Doğa, bugün anladığımız kadarıyla, öyle davranır ki verilen bir deneyde *tam olarak ne olacağını kesin biçimde söylemek temelden olanaksız*dır. Bu korkunç bir şey; aslında daha önceleri filozoflar, aynı koşullar sağlandığı takdirde, mutlaka aynı şeyin meydana gelmesi bilimin temel gereklerinden biridir diyorlardı. Oysa bu hiç de doğru değildir; bu, bilimin temel bir koşulu değildir. Aslında aynı şey meydana gelmez; biz ne olacağı konusunda, ancak istatistiksel bir ortalama olarak buluruz. Bununla birlikte, bilim tam anlamıyla çökmüş de değildir. Filozoflar, bilim için *mutlaka gerekli* olan şeyler konusunda yeri geldikçe konuşurlar; fakat bunların çoğu, hep görüldüğü gibi, pek bilmeden safça söylenmiş, genelde de yanlış şeylerdir. Bir profesör, 'Stockholm'de bir deney yapılsa ve sonra aynı deney diyelim ki Quito'da (Ekvator'un başkenti) tekrarlansa; orada da aynı sonucun bulunması gerekir; bu, bilimsel ça-

lışmanın temelidir' demişti. Oysa bu çok yanlıştır. Bilimin bunu sağlaması gerekmez; deney bunu gösterebilir, fakat gerekli değildir. Örneğin deneylerin biri Stockholm'de gökyüzüne bakıp kuzey ışıklarını (Aurora borealis) görmekse, onu Quito'da göremezsiniz; bu farklı bir olaydır. Fakat bu dışarısıyla ilgili bir olaydır; Stockholm'de kendinizi bir kutuya kapatıp perdeleri de çekerseniz, herhangi bir fark olur mu?" diyeceksiniz. Kesinlikle. Her yönde salınabilen bağlantılı bir sarkacı yana çekip bırakırsanız, bu sarkaç neredeyse bir düzlemde salınacaktır, fakat tam da öyle değil. Stockholm'de bu salınım düzlemi yavaş yavaş değişir, ama Quito'da değişmez. Perdeler kapansa da. Bir deneyin farklı yerlerde farklı sonuçlar vermesi, bize bilimin yıkıldığını göstermez. Bilimin temel varsayımı, temel felsefesi nedir? Birinci bölümde onu şöyle ifade etmiştik: *Bir düşüncenin tek geçerlilik testi deneydir.* Eğer pek çok deney hem Stockholm'de ve hem de Quito'da aynı şekilde işliyorsa, o zaman bu "pek çok deney" bir genel yasanın formüle edilmesinde kullanılabilir; ama aynı sonucu vermeyen deneyler için, onların Stockholm yakınındaki çevrenin bir sonucu olduğunu söyleriz. Deneyin sonuçlarını özetleyecek bir yol icat ederiz; bu yolun neye benzeyeceğinin daha önceden bize belirtilmesi gerekmez. Aynı deneyin daima aynı sonuçları vereceği bize söylenirse, pek iyi olur; fakat onu denediğimizde aynı sonucu vermezse, vermez, ne yapalım. Biz sadece ne gördüysek, onu kabul etmek durumundayız ve bundan sonra düşüncelerimizin geri kalanını gerçek deneyimlerimize göre formüllere dökeriz.

Yeniden kuantum mekaniğine ve temel fiziğe dönelim; kuşkusuz burada kuantum mekaniksel ilkelerimizin ayrıntılarına giremeyiz, çünkü onları anlamak oldukça zordur. Bu ilkelerin var olduklarını kabul edecek ve bazı sonuçlarını betimlemeye girişeceğiz. Sonuçlardan biri, dalga olarak ele almaya alıştığımız şeylerin parçacık gibi de davrandıkları ve parçacık olduklarına alıştıklarımızın da dalga niteliğine de sahip olduklarıdır; aslında her şey aynı davranışı göstermektedir. Parçacık ve dalga arasında bir ayrım yoktur. Kuan-

tum mekaniği, alan kavramını, onun dalgalarını ve parçacıklarını, hepsini *birleştirir*. Şimdi, frekans düşükse, olayın alan görünümü daha açıktır, ya da günlük deneyimlerimize dayanan yaklaşık bir anlatım için daha yararlıdır. Fakat frekans yükseldikçe, olayın parçacık görünümü, genellikle ölçme yapılan gereçlerle daha açık hale gelir. Aslında, birçok frekanstan söz ettiğimiz halde, henüz doğrudan 10^{12} devir/saniyenin üzerinde bir frekans içeren hiçbir olay saptanmamıştır. Biz daha yüksek frekansları sadece, kuantum mekaniğinin parçacık-dalga düşüncesini kabul eden bir kural aracılığıyla, parçacıkların enerjisinden çıkarırız.

Böylece elektromanyetik etkileşme konusunda yeni bir görüş kazanmış oluyoruz. Artık elektron, proton ve nötrona eklenecek yeni bir parçacık türümüz daha var. Bu yeni parçacığa *foton* denir. Elektronlarla fotonların etkileşmesini içeren, fakat kuantum mekaniği açısından da doğru olan elektromanyetik kuramın bu yeni görünümüne *kuantum elektrodinamiği* adı verilir. Işık ve maddenin, ya da elektrik alanı ile yüklerin etkileşmesinin bu temel kuramı, fizikte bugüne dek elde edilmiş olan en büyük başarıdır. Bu bir tek kuramın içinde, kütleçekim ve çekirdek süreçleri hariç, geri kalan tüm olağan olayların temel kuralları yer almaktadır. Örneğin tüm bilinen elektriksel, mekanik ve kimyasal yasalar kuantum elektrodinamiğinden çıkar: bilardo toplarının çarpışma yasaları, manyetik alanlar içinde iletken tellerin hareketi, karbonmonoksitin öz ısısı, neon sinyallerinin rengi, tuzun yoğunluğu ve su oluşturmak üzere hidrojen ve oksijenin tepkimeleri, bunların tümü bu tek yasanın sonuçlarıdır. Eğer durum bir yaklaştırma yapmak için yeterince basitse, tüm bu ayrıntılar incelenebilir; gerçi bu neredeyse hiçbir zaman olmaz, ama sık sık ne olduğunu az çok anlayabiliriz. Şu an için, çekirdekler konusu dışında, kuantum elektrodinamiği yasalarına uymayan bir durum ortaya çıkmamıştır; çekirdekte de böyle bir durum olup olmadığını bilmiyoruz, çünkü çekirdek içinde olup bitenler konusunda pek bilgimiz yok. Bu durumda, ilke olarak, kuantum elektrodinamiği tüm

kimyanın ve tüm yaşamın kuramıdır; eğer yaşam en sonunda kimyaya ve dolayısıyla fiziğe indirgenirse, ki kimya zaten fiziğe indirgenmiş durumdadır (fiziğin kimyaca içerilen kısmı zaten bilinmektedir). Üstelik, aynı kuantum elektrodinamiği, bu büyük kuram, pek çok yeni şey öngörmektedir. İlk sırada, çok yüksek enerjili fotonların, gamma ışınlarının ve benzerlerinin özelliklerini bize söylemektedir. Çok dikkate değer bir başka şey de önermektedir: Elektronun yanı sıra, aynı kütleli fakat zıt yüklü *pozitron* denen bir başka parçacık daha olmalıdır; bu ikisi, bir araya geldiklerinde, ışık ya da gamma ışınları yayınlayarak birbirlerini yok ederler. (Zaten ışık ve gamma ışınları aynı şeydir; sadece farklı frekans bölgelerinde yer alırlar.) Bunun, 'her parçacığın bir karşı parçacığı vardır' şeklindeki genellemesinin doğruluğu sonunda anlaşılmıştır. Elektronun karşı parçacığına ayrı bir isim verilmiştir: pozitron. Fakat diğerlerinin çoğu için karşı parçacığına karşı-falan-filân denir: karşı-proton, karşı-nötron vb gibi. Kuantum elektrodinamiğinde iki sayı baştan verilir ve diğerlerinin bunlardan hesaplanabileceği var sayılır. Doğrudan verilen bu iki sayı, elektronun kütlesi ve elektronun yüküdür. Aslında bu tam da doğru değildir; çünkü kimyada bize çekirdeklerin ağırlıklarını bildiren pek çok sayı daha vardır. Bu bizi aşağıdaki kesime getirir.

Çekirdekler ve Parçacıklar

Çekirdekler nelerden yapılmıştır ve onlar nasıl bir arada tutulurlar? Çekirdeklerin muazzam kuvvetlerle bir arada tutuldukları anlaşılmıştır. Bu kuvvetlerin salıverilmesi halinde, ortaya çıkan enerji kimyasal enerjiyle karşılaştırıldığında korkunç derecede büyüktür: atom bombasının TNT (dinamit) patlamasına oranı gibi. Çünkü dinamit patlaması, atomların çevresindeki elektronların değişimleriyle ilgilidir, oysa atom bombası, çekirdek içindeki değişimlerle ilgilidir. Soru şudur: Proton ve nötronları çekirdek içinde bir arada tutan kuvvetler ne türden kuvvetlerdir? Tıpkı elektriksel etkileşmelerin

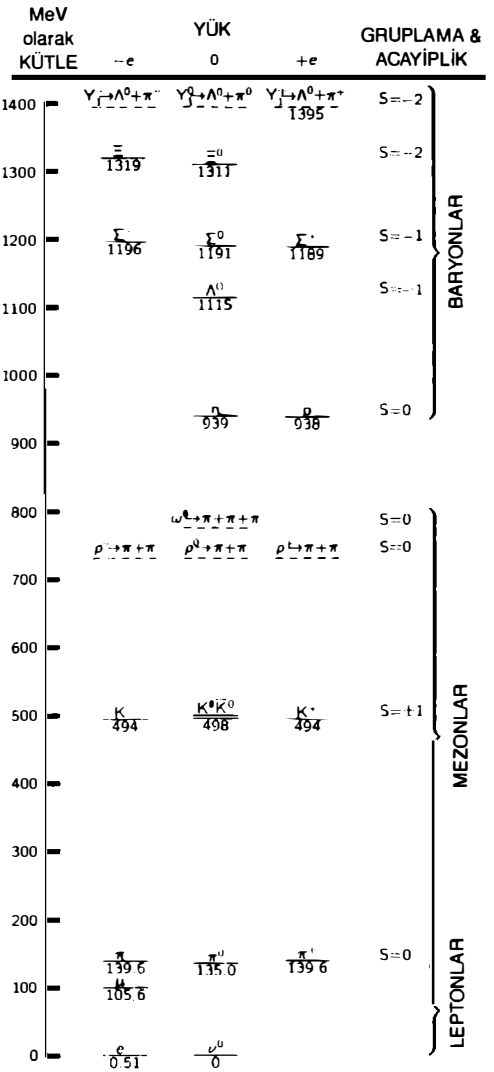
foton denen bir parçacıkla ilişkilendirilmiş olması gibi, Yukawa da nötronlar ve protonlar arasındaki kuvvetlerin bir tür alana sahip olduğunu ve bu alandaki kıpırtıların bir parçacık gibi davranacağı önerisinde bulunmuştu. Böylece dünyada proton ve nötronların yanı sıra, bazı başka parçacıklar da bulunabilirdi ve Yukawa bu parçacıkların özelliklerini çekirdek kuvvetlerinin zaten bilinen niteliklerinden çıkarabilmişti. Örneğin bunların kütlelerinin elektron kütlesinin iki ya da üç yüz katı kadar olması gerektiğini öngörmüştü. Hayret ki hayret! Kozmik ışınlarda tam o kütlede bir parçacık keşfedildi! Fakat daha sonra onun yanlış parçacık olduğu anlaşıldı. O parçacığa μ-mezon ya da müon adı verildi.

Bununla birlikte, kısa bir süre sonra, 1947 ya da 1948'de Yukawa'nın ölçütlerini sağlayan ve π-mezon ya da pion adı verilen bir başka parçacık daha bulundu. O halde çekirdek kuvvetlerini elde edebilmek için, proton ve nötronun yanına pionu da eklemeliyiz. Şimdi diyebilirsiniz ki "Şahane! Bu kuramla, tam Yukawa'nın istediği gibi, pionları kullanarak kuantum nükleodinamiğini kurabiliriz ve çalışıyor mu diye bakarız ve böylece her şeyi açıklayabiliriz." Ama kötü şans. Bu kuramı içeren hesaplamaların öylesine zor oldukları anlaşılmıştır ki hiç kimse bu kuramın sonuçlarının ne olacağını çıkaramamış ya da deneyle sınayamamıştır. Bu durum neredeyse yirmi yıldır böyle sürüp gitmektedir.

Böylece doğru mu yanlış mı olduğunu bilmediğimiz bir kurama takılıp kaldık; aslında onun biraz yanlış, ya da en azından noksan olduğunu biliyoruz. Biz kuramsal çalışmalarla oyalanırken, bu kuramın sonuçlarını hesaplamaya çalışırken, deneysel fizikçiler bazı şeyler keşfediyorlardı. Örneğin onlar şu μ-mezonunu, ya da müonu keşfettikleri halde, biz onun nereye uyabileceğini henüz bilmiyoruz. Ayrıca kozmik ışınlarda çok sayıda başka "yeni" parçacıklar da bulundu. Bugün neredeyse otuz kadar parçacığımız var; bu parçacıkların ilişkilerini, doğanın onları neden istediğini, ya da birbirleriyle olan bağlantılarını anlamak çok zordur. Bugün için bu parçacıkları, aynı şeyin farklı görünümleri

olarak algılamıyoruz. Birbiriyle bağlantısız görünen bu kadar çok parçacığın var olması, iyi bir kurama sahip olmadan bu kadar çok ilişkisiz bilgiye sahip olduğumuzu gösteriyor. Kuantum elektrodinamiğinin büyük başarılarından sonra, çekirdek fiziği konusunda birazı kuramsal ve birazı da deneysel olmak üzere epeyce kaba bilgi toplanmış bulunuyor; bu bilgiler, protonlar ve nötronlar arasında, aslında nereden kaynaklandığını pek anlamadığımız, bir tür kuvvetin varlığını kabul ederek ve neler olacağına bakarak elde edilmiştir. Bunun dışında, bu konuda çok az ilerledik. Kimyada bir zamanlar çok sayıda kimyasal element toplamıştık; orada bu elementler arasında birden bire hiç beklenmedik bir bağıntı ortaya çıkmış ve Mendeleyev'in periyodik tablosunu oluşturmuşlardı. Örneğin sodyum ve potasyum kimyasal özellikleri açısından hemen hemen aynıdır ve Mendeleyev tablosunda aynı sütunda yer alırlar. Fizikteki yeni parçacıklar için de Mendeleyev-tipi bir tablo aramaktayız. Yeni parçacıkların böyle bir tablosu, birbirinden bağımsız olarak, Amerika Birleşik Devletleri'nde Gell-Mann ve Japonya'da Nishijima tarafından yapılmıştır. Onların sınıflandırmasının temelinde, elektrik yükü gibi, "acayiplik" sayısı (S) denen ve her parçacığa verilen yeni bir sayı vardı. Elektromanyetik etkileşme süreçlerinde elektrik yükü nasıl korunuyorsa, bu sayı da çekirdek kuvvetleriyle meydana gelen tepkimelerde korunur.

Tüm parçacıklar Tablo 2–2'de listelenmiştir. Bu aşamada onları pek fazla tartışamayacağız, fakat bu tablo en azından size ne kadar çok şey bilmediğimizi gösterecektir. Her parçacığın altında, MeV denen belirli bir birim cinsinden onun kütlesi gösterilmektedir. Bir MeV, $1{,}782 \times 10^{-27}$ grama eşittir. Bu birimin seçilme nedeni tarihseldir; şimdi buna hiç girmeyeceğiz. Daha ağır parçacıklar tabloda daha yukarıya yerleştirilmiştir; tabloda nötron ve protonun neredeyse aynı kütleye sahip olduklarını görmekteyiz. Aynı elektrik yüklü parçacıkları aynı düşey sütunlara koyduk; tüm yüksüz nesneler bir sütunda, tüm artı yüklüler onun sağında ve tüm eksi yüklüler solundadır.



Tablo 2–2 Temel Parçacıklar

Parçacıklar dolu çizgiyle, "rezonanslar" ise kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Birçok parçacık tabloya konmamıştır. Bunlar baryon-mezon-lepton sınıflama şeması içine düşmeyen, fo-

ton ve graviton gibi, önemli sıfır-kütleli, sıfır-yüklü parçacıklardır. Ve daha yeni rezonanslardan bazılarını (K^*, ϕ, η) da tabloya eklemedik. Mezonların karşı parçacıklarını tabloda görüyorsunuz; fakat leptonların ve baryonların karşı parçacıklarını, sıfır-yüklü sütuna göre yansımış tamamen bu tablo gibi görünen bir başka tabloya yerleştirmek gerekir. Elektron, nötrino, foton, graviton ve proton dışındaki parçacıkların tümü kararsız olmakla birlikte, tabloda sadece rezonansların bozunum ürünleri gösterilmiştir. Leptonlar çekirdeklerle yeğin olarak etkileşmedikleri için, onlara acayiplik sayısı verilemez.

Nötron ve protonla birlikte olan tüm parçacıklara baryon denir ve bu sınıfın diğer üyeleri şunlardır: 1115 MeV kütleli bir "lambda" (Λ°), birbirine çok yakın kütlelere sahip "sigma" (Σ) denen eksi yüklü, yüksüz ve artı yüklü üç başka parçacık ve birbirine yakın kütlelere sahip "ksi" (Ξ) adında eksi yüklü ve yüksüz iki parçacık daha. Tekrar vurgularsak, baryonlar sınıfı içinde, hemen hemen aynı kütleli (kütle farkları yüzde 1 veya 2 kadar olan) "çoklu"[1] dediğimiz parçacık grupları vardır. İlk çoklu, proton-nötron ikili'sidir, sonraki bir tekli'dir (lambda), daha sonra sigma üçlüsü gelir ve en sonunda ksi üçlüsü yer alır. Çok yakınlarda, 1961'de, birkaç parçacık daha bulunmuştu. Acaba bunlar parçacık mıydı? Bunlar o kadar kısa yaşarlar ki, neredeyse oluşur oluşmaz bozunurlar. Bunları yeni parçacıklar olarak mı, yoksa bozunmalarından doğan Λ ve π ürünlerinin belirli bir enerjideki "rezonans" etkileşmesi olarak mı ele almak gerekir bilmiyoruz.

Baryonlara ek olarak, çekirdek etkileşmelerine katılan diğer parçacıklara *mezonlar* denir. Bunların başında, artı, eksi ve yüksüz üç çeşit halinde pionlar gelir; bunlar bir diğer üçlü oluşturur. K-mezon denen bazı yeni parçacıklar da bulunmuştu; bunlar bir (K^+, K^0) ikilisi meydana getirir. Ayrıca bir parçacık kendi kendisinin karşı parçacığı olmadıkça, her parçacığın bir karşı parçacığı vardır. Örneğin π^- ile π^+

[1] *İng.* multiplet –çn.

birbirlerinin karşı parçacıklarıdır, fakat π^0'ın karşı parçacığı kendisidir. K^- ile K^+ birbirlerinin karşı parçacıklarıdır; K^0'ın karşı parçacığı $\bar{K}^0$'dır. Bunlara ek olarak, 1961'de daha başka mezonlar, ya da oluşur oluşmaz bozunan sözde-mezonlar bulunmuştu. Onlardan biri, omega (ω) denen ve üç piona bozunan 780 MeV kütleli bir mezondur; daha az kesin olan bir başkası, iki piona bozunan bir nesnedir. Mezonlar ve baryonlar adı verilen bu parçacıklar ile mezonların karşı parçacıkları aynı tablodadırlar; fakat baryonların karşı parçacıklarının, bu tablonun sıfır-yük sütununa göre "yansımış"ı olan bir başka tabloda gösterilmeleri gerekir.

Nasıl ki Mendeleyev'in o güzel tablosunda tablonun dışına sarkan çok sayıda nadir toprak elementi varsa, bizim parçacık tablomuzda da dışarıya sarkan şeyler var: çekirdeklerin içinde yeğin olarak etkileşmeyen, çekirdek etkileşmesiyle ilgisi olmayan ve yeğin etkileşmeye sahip olmayan parçacıklar (yeğin etkileşmeyle, çekirdeksel enerjinin bir tür çok güçlü etkileşmesi kastedilmektedir). Bu parçacıklara leptonlar denir: En başta elektron vardır, bu ölçekte çok küçük bir kütleye sahiptir, sadece 0,510 MeV. Sonra şu diğeri, μ-mezon veya müon gelir; çok büyük kütlelidir, elektrondan 206 kez daha ağırdır. Bugüne kadar yapılmış olan deneylere bakarak diyebiliriz ki elektron ile müon arasındaki tek fark kütledir. Birinin diğerinden daha ağır olması dışında, müonla ilgili her şey, tıpkı elektronla olanlar gibidir. Niçin daha ağır bir diğeri vardır? Onun yararı nedir? Bunu bilmiyoruz. Ayrıca nötrino denen yüksüz bir lepton daha vardır ve kütlesi sıfırdır. Aslında, şimdi biri elektronla ve diğeri müonla ilgili iki farklı türden nötrinonun var olduğu biliniyor.

Son olarak, çekirdek parçacıklarıyla yeğin şekilde etkileşmeyen iki parçacığa daha sahibiz: Bunlardan biri fotondur ve eğer kütleçekim alanının kuantum mekaniksel bir benzeri varsa (kütleçekimin kuantum kuramı henüz kurulamamıştır), belki diğeri de sıfır kütleli graviton olacaktır.

Bu "sıfır kütle" de nedir? Burada verilen kütleler, parçacıkların *durgun haldeki kütleleri*dir. Bir parçacığın sıfır

kütleye sahip olması, bir bakıma o parçacığın durgun olamayacağı anlamına gelir. Bir foton asla durgun olamaz; daima saniyede 300.000 km hızla hareket halindedir. Görelilik kuramını anladığımızda, kütlenin ne anlama geldiğini de daha iyi anlayacağız. Zamanı gelince bu kuramı göreceğiz.[2]

Böylece hep birlikte maddenin temel yapı-taşları gibi görünen çok sayıda parçacıkla karşı karşıya bulunmaktayız. İşin iyi tarafı, bu parçacıkların birbirleriyle etkileşmeleri açısından tümüyle *farklı olmamaları*dır. Aslında, parçacıklar arasında sadece *dört tür* etkileşme var gibi görünüyor; bunlar, azalan şiddet sırasına göre, çekirdek kuvveti, elektriksel etkileşmeler, beta-bozunumu etkileşmesi ve kütleçekimdir. Foton tüm yüklü parçacıklarla bağlanmaktadır ve etkileşim şiddeti, değeri 1/137 olan bir sayıyla ölçülür. Bu bağlanmanın ayrıntılı yasası, kuantum elektrodinamiği olarak bilinmektedir. Kütleçekim her enerjiye bağlanmaktadır; fakat bu bağlanma aşırı derecede zayıf, elektriksel bağlanmadan çok çok zayıftır. Bu yasa da bilinmektedir. Sonra zayıf bozunumlar vardır: nötronun oldukça yavaş bir şekilde proton, elektron ve nötrinoya parçalanmasına neden olan beta bozunumu. Bu yasa da kısmen biliniyor. Yeğin etkileşme denen mezon-baryon etkileşmesiyse, bu ölçekte 1 şiddetine sahiptir ve bu tür süreçlerde baryon sayısının değişmemesi gibi bazı kurallar bilinmekle birlikte, yeğin etkileşmeyle ilgili yasa bizim için henüz meçhuldür.

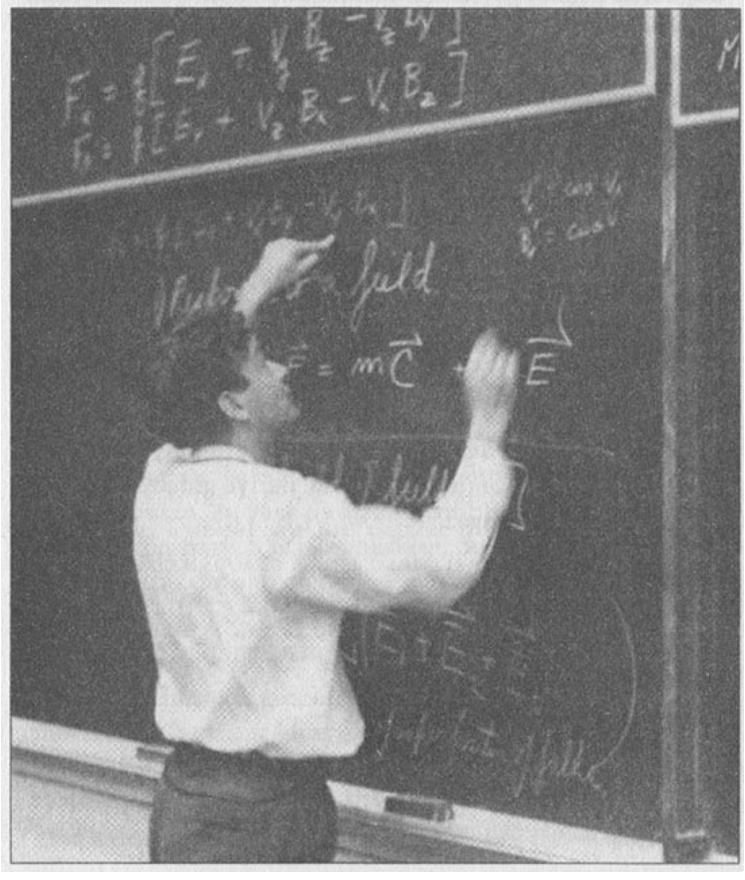
Bağlanma	Şiddet*	Yasa
Yüklü parçacıklara foton	~ 10^{-2}	yasa biliniyor
Tüm enerjiye kütleçekim	~ 10^{-40}	yasa biliniyor
Zayıf bozunumlar	~ 10^{-5}	yasa kısmen biliniyor
Baryonlara mezonlar	~ 1	yasa bilinmiyor (bazı kurallar biliniyor)

Tablo 2–3 Temel Etkileşmeler[3]

[2] *Bkz.* Feynmann'ın *"Altı Zorca Parça"* kitabı –yn.

[3] "Şiddet", her etkileşmedeki bağlanma sabitinin boyutsuz bir ölçüsüdür; ~ işaretiyse "mertebesinde" anlamındadır.

İşte bilgimizin bugünkü korkunç durumu. Özetlemek gerekirse, şunu söyleyebiliriz: Çekirdeğin dışında her şeyi biliyoruz gibi görünüyor; çekirdek içindeyse kuantum mekaniği geçerlidir; kuantum mekaniği ilkelerinin hiçbir başarısızlığı görülmemiştir. Diyebiliriz ki üzerine tüm bilgilerimizi koyduğumuz sahne, göreli uzayzamandır; belki de kütleçekim de uzayzamanca kapsanmaktadır. Evrenin nasıl başladığını bilmiyoruz; uzay ve zamanla ilgili düşüncelerimizi doğru şekilde sınamak için, çok küçük uzaklıkların daha altında, hiç deney yapmadık. Böylece biz sadece düşüncelerimizin bu uzaklığın üstünde işlediğini *biliyoruz*. Şunu da eklemeliyiz ki, oyunun kuralları kuantum mekaniksel ilkelerdir ve bu ilkeler hem eski hem de, bildiğimiz kadarıyla, yeni parçacıklara uygulanır. Çekirdek içindeki kuvvetlerin kaynağı bizi yeni parçacıklar götürüyor, fakat ne yazık ki bunların çok fazla sayıda oldukları görülüyor; aralarında bizi hayrete düşüren bazı bağıntılar olduğunu biliyorsak da, aralarındaki tüm ilişkileri tam olarak anlamaktan yoksunuz. Atom-altı parçacıklar dünyasını anlamaya doğru el yordamıyla ilerliyor gibiyiz, fakat bu işte daha ne kadar ileriye gidebileceğimizi gerçekten de bilmiyoruz.



3

FİZİĞİN DİĞER BİLİMLERLE İLİŞKİSİ

Giriş

Fizik, bilimlerin en temel olanıdır ve temel bilimlerin tümünü kapsar; bilimsel gelişmelerin tümünü derinden etkilemiştir. Aslında fizik, modern bilimlerin doğduğu *doğa felsefesi*nin bugünkü eşdeğeridir. Pek çok bilim dalındaki öğrenciler, tüm olaylarda oynadığı temel rol nedeniyle, kendilerini fizik derslerinde bulurlar. Bu bölümde, diğer bilimlerdeki temel problemleri anlatmaya çalışacağız; fakat kuşkusuz bu kadar kısa sürede diğer bilimlerin karmaşık, ince ve güzel yanlarını gerçek ayrıntılarıyla ele almak mümkün değildir. Yerimizin darlığı, ayrıca fiziğin mühendislik, endüstri, toplum ve savaşla olan ilgisini ve hatta matematikle fizik arasındaki dikkat çekici bağlantıyı tartışmaktan bizi alıkoymaktadır. (Matematik, bir *doğa* bilimi olmadığından, bize göre bir bilim değildir; çünkü doğruluğu deneyle sınanamaz.) Bununla birlikte şunu daha başlangıçta belirtelim ki, bir şeyin bilim olmaması, onun kötü olmasını gerektirmez. Örneğin aşk bir bilim değildir. O halde, bir şeyin bilim olmadığını söylemek, onda mutlaka bir anormallik var demek değildir; sadece bilim değil demektir.

Kimya

Fiziğin en derinden etkilediği bilim herhalde kimyadır. Tarihsel olarak, kimyanın ilk günlerinde en çok uğraşılan konu, şimdi inorganik kimya dediğimiz canlılarla ilgili olmayan maddelerin kimyası idi. Çok sayıda elementin varlığını ve aralarındaki ilişkileri –kayalarda, toprakta ve benzeri yerlerde bulunan oldukça basit birçok bileşiği nasıl meydana getirdiklerini– keşfetmek için pek çok analizin yapılması gerekiyordu. Bu erken dönem kimyası, fizik için çok önemliydi. İki bilim arasındaki etkileşme çok önemliydi, çünkü atom kuramı büyük oranda kimyadaki deneylerle kanıtlanmıştı. Kimya kuramı, diğer bir deyişle tepkimelerin kuramı, çeşitli elementler arasındaki birçok garip ilişkiyi açıklayan Mendeleyev'in periyodik tablosunda geniş ölçüde özetlenmişti; hangi maddenin hangi maddeyle ve nasıl birleşeceğini belirten kurallar topluluğu da inorganik kimyayı oluşturmaktaydı. Tüm bu kurallar en sonunda ilke olarak kuantum mekaniğiyle açıklanmıştı; buna göre, kuramsal kimya aslında fizikten başka bir şey değildir. Öte yandan, bunun sadece *ilkesel* bir açıklama olduğu da vurgulanmalıdır. Satranç kurallarını bilmekle bu oyunu oynayabilmek arasındaki ayırımı zaten tartışmıştık. Dolayısıyla kuralları çok iyi bildiğimiz halde, oyunu iyi oynayamayabiliriz. Verilen bir kimyasal tepkimede ne olacağını önceden kesin olarak söylemek çok zor olabilir; gene de kuramsal kimyanın iyice derin kısımları, kuantum mekaniğiyle incelenir.

Fizik ve kimyanın birlikte geliştirdiği aşırı derecede önemli bir bilim dalı daha vardır. *İstatistik mekanik* denen bu bilim dalı, içinde mekanik yasalarının geçerli olduğu durumlara istatistik yöntemlerin uygulanmasıdır. Her kimyasal tepkimede çok büyük sayıda atom yer alır ve bu atomların etrafta iyice gelişigüzel ve çok karmaşık bir şekilde dolaştıklarını biliyoruz. Her çarpışmayı çözümleyebilip her molekülün hareketini tüm ayrıntılarıyla izleyebilseydik, tepkimede ne olacağını kavramayı umabilirdik; fakat tüm

bu molekülleri izleyebilmek için gereken sayılar, her bilgisayarın ve kesinlikle her insan beyninin kapasitesini öylesine çok aşmaktadır ki bu denli karmaşık durumlarla uğraşmaya uygun bir yöntem geliştirmek önemli hale gelmişti. İstatistik mekanik zaten ısı olaylarının ya da termodinamiğin bilimidir. İnorganik kimya, bir bilim olarak, artık esas olarak fizikokimya ve kuantum kimyasına indirgenmiştir. Fizikokimya, tepkimelerin hızlarını ve neler olacağını (moleküller nasıl çarpışır? Önce hangi parçalar ayrılıp gider?) ayrıntılarıyla inceler; kuantum kimyasıysa meydana gelen olayları fizik yasalarıyla anlamamıza yardımcı olur.

Kimyanın bir diğer dalı, canlılarla ilgili maddelerin kimyasıyla uğraşan *organik kimya*dır. Bir zamanlar canlı nesnelerle ilgili maddelerin, inorganik malzemelerden yapay olarak meydana getirilemeyecek kadar olağanüstü olduklarına inanılıyordu. Bu hiç de doğru değildir – bunlar inorganik kimyada yapılmış olan maddelerin aynısıdır; fakat çok daha karmaşık atom dizilimleri içerirler. Organik kimyanın ona malzeme temin eden biyolojiyle ve endüstriyle yakından ilişkili olduğu açıktır ve ayrıca fizikokimya ve kuantum mekaniği hem organik hem de inorganik bileşiklere büyük ölçüde uygulanabilir. Bununla birlikte, organik kimyanın ana problemleri bu alanlarda olmayıp, daha çok biyolojik sistemlerde, canlı nesnelerde oluşan maddelerin çözümlenmesi ve birleştirilmesindedir. Bu bizi farkında olmadan adım adım biyokimyaya ve oradan da biyolojinin kendisine ya da moleküler biyolojiye götürür.

Biyoloji

Böylece canlı nesnelerin incelenme alanı olan *biyoloji* bilimine gelmiş oluyoruz. Biyolojinin ilk günlerinde, biyologlar sırf tanımlama sorunlarına el atıp ne gibi canlıların var olduğu üzerinde çalışmak durumundaydılar ve böylece pirelerin ayaklarındaki kılları saymak gibi şeylerle uğraştılar. Bu tür konular büyük bir merakla çalışılıp çözüldükten sonra,

biyologlar canlı varlıkların içlerindeki mekanizmaya yöneldiler; ince ayrıntıları elde etmek büyük gayret gerektireceği için, doğal olarak, önce kaba yönden işe giriştiler.

Fizik ve biyoloji arasındaki ilk ilginç ilişki, *enerji korunumu*nun keşfinde biyolojinin fiziğe yaptığı yardımdır; bu korunum, bir canlının içine aldığı ve dışarı verdiği ısı miktarıyla bağlantı içinde ilk kez Mayer tarafından gösterilmiştir.

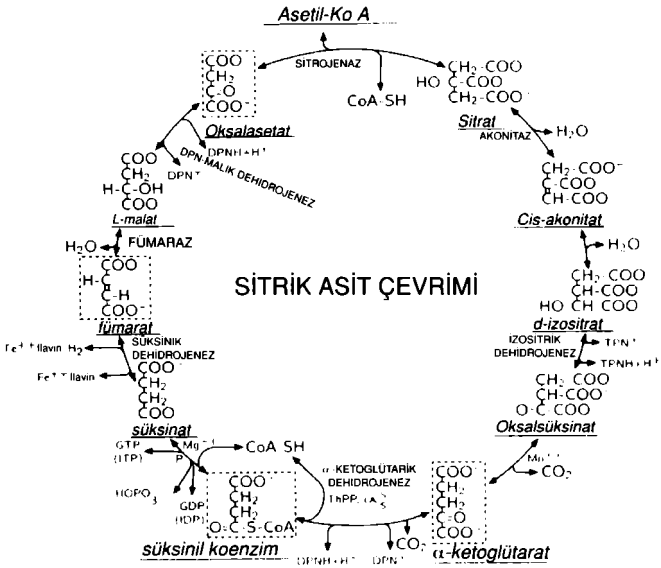
Canlı hayvanların biyolojik süreçlerine yakından bakarsak, *birçok* fiziksel olay görürüz: Kan dolaşımı, pompalar, basınç, vb. Ayrıca sinirler: Sivri bir taşa bastığımızda ne olduğunu, bir şekilde bilginin bacağımızdan beynimize gittiğini hepimiz biliriz. Bunun nasıl meydana geldiği çok ilginçtir. Sinirleri inceleyen biyologlar, onların çok ince ve karmaşık duvarlı ince borucuklardan meydana geldikleri sonucuna varmışlardı. Hücre bu duvarlar boyunca iyonları pompalar, öyle ki, tıpkı bir kondansatör gibi, artı iyonlar dışarıda ve eksi iyonlar içeride kalır. İşte bu zar ilginç bir özelliğe sahiptir; bir noktada "yük boşalması" olursa, diğer bir deyişle iyonlar bir noktada diğer tarafa geçerlerse, oradaki elektrik gerilimi azalır, yakındaki iyonlar bu elektriksel etkiyi hisseder ve bundan zar da etkilenerek yakındaki diğer noktalardan da iyonların geçmesine yol açar. Bu durum bu şekilde ilerler de ilerler; böylece keskin taşa bastığımız yerdeki ucu "uyarılan" sinir lifi boyunca giden bir "nüfuz etme" dalgası halini alır. Bu dalga, bir bakıma uzun bir dikey domino taşları dizisinin benzeridir; bir uçtan itildiğinde bir sonraki itilir ve bu böylece sürüp gider. Kuşkusuz dominolar tekrar dizilmedikçe, bu sadece bir mesaj iletecektir. Benzer olarak, sinir hücresinde, siniri bir sonraki itmeye hazırlamak üzere, iyonları yavaşça tekrar dışarıya pompalayan süreçler vardır. Böylece ne yaptığımızı (ya da en azından nerede olduğumuzu) bu şekilde biliriz. Kuşkusuz, bu sinir itmesiyle ilişkili elektriksel etkiler, elektrik düzenekleriyle algılanabilir; olaya elektriksel etkiler karıştığı için, elektriksel etkiler fiziğinin, olayın anlaşılmasında büyük rol oynadığı açıktır.

Bu olayın tersi de, beynimizin bir yerinden bir sinir lifi boyunca bir mesajın gönderilmesidir. Sinirin öbür ucunda ne olur? Orada sinir çok ince küçük kollara ayrılır, bu kollar bir kasın yakınında uç levhası denen bir yapıya bağlanırlar. Tam olarak anlaşılmayan nedenlerle, itme sinirin ucuna vardığında, asetilkolin denen kimyasaldan yapılma küçük paketçikler (bir defada beş ya da on molekül) atılır; bunlar kas lifini etkiler ve kas kasılır; ne kadar basit, değil mi? Bir kasın kasılmasına neden olan şey nedir? Kas, miyozin ve aktomiyozin adında iki farklı madde içeren çok sayıda lifin sıkıca bir araya gelmiş halidir; fakat asetilkolinin yol açtığı kimyasal tepkimenin bir molekülün boyutlarını değiştirme mekanizmasını henüz bilmemekteyiz. Diğer bir deyişle, kaslarda mekaniksel hareketleri oluşturan temel süreçler bilinmemektedir.

Biyoloji öylesine devasa genişlikte bir bilimdir ki burada hiç sözünü edemeyeceğimiz kadar çok başka problemi vardır: görme nedir (ışık gözde ne yapar?), işitme nedir, vb gibi. (Düşünmenin işleyiş tarzını biraz sonra psikoloji dalında göreceğiz.) Biraz önce biyolojiyle ilgili olarak gördüğümüz şeyler, biyolojik bakış açısından, aslında temel şeyler değildir, yaşamın temeli değildirler; çünkü onları anlasak bile gene de yaşamın kendisini anlayamayız. Bunu aydınlatalım: Sinirleri inceleyen insanlar çalışmalarının çok önemli olduğunu hissederler, çünkü ne de olsa, sinirsiz hayvan olamaz. Fakat sinirsiz yaşam da vardır. Bitkilerin ne sinirleri vardır, ne de kasları; fakat onlar çalışır durumdadırlar, aynı şekilde canlıdırlar. Öyleyse biyolojinin temel problemleri için daha derinlere bakmalıyız; bunu yaptığımızda, canlıların çok sayıda ortak niteliğe sahip olduklarını görürüz. Canlıların en ortak özelliği, tümünün *hücreler*den yapılmış olması ve her bir hücrenin içinde kimyasallar üreten karmaşık mekanizmaların bulunmasıdır. Örneğin bitki hücrelerinde ışığı toplayıp sakaroz üreten bir mekanizma vardır; bu sakaroz karanlıkta sarf edilerek bitkiyi canlı tutar. Bitki yendiği zaman, sakarozun kendisi hayvanda bir dizi kimyasal tepkime

meydana getirir; bu tepkimeler, bitkilerdeki fotosentezle (ve karanlıkta onun ters olayı) çok yakından ilgilidir.

Canlı sistemlerin hücrelerinde pek çok incelikli kimyasal tepkime olur; bu tepkimelerde bir bileşik başka başka bileşiklere dönüşür. Biyokimya çalışmalarını oluşturan bu olağanüstü çabalar hakkında bir fikir vermek üzere, hücrelerde meydana gelen birçok tepkime dizisinin sadece küçük bir kısmı, belki de onun ancak yüzde bir kadarı, hakkında bugünkü bilgimiz Şekil 3–1'de özetlenmiştir.



Şekil 3–1 Krebs çevrimi

Burada, oldukça küçük adımlardan oluşan bir çevrimde birinden diğerine değişen bütün bir moleküller dizisini görmekteyiz. Buna Krebs çevrimi, solunum çevrimi denir. Her kimyasal bileşik ve her adım, molekülde oluşturulan değişim bakımından, oldukça basittir; fakat –ve bu, biyokimyada çok önemli bir buluştur– *bu değişimlerin laboratuvarda yapıl-*

maları oldukça zordur. Elimizde birbirine çok benzeyen iki madde varsa, bunların biri diğerine hemen dönüşmez, çünkü bu iki yapı arasında genelde bir enerji engeli, ya da "tepe"si vardır. Şu benzetmeyi ele alalım: Bir cismi bir yerden tepenin öbür tarafındaki aynı düzeyde başka bir yere götürmek istersek, onu doruktan aşırmak zorundayız; bunun için de bir ek enerji gerekir. Kimyasal tepkimeler de aynı nedenle durduk yerde olmaz, bir *etkinleştirme enerjisi*ne ihtiyaç vardır. Elimizdeki kimyasal maddeye bir atom eklemek için, bu atomu yeni bir düzenlemeye meydan verecek kadar *yakına* getirmeliyiz; atom ancak o zaman maddeyle birleşir. Fakat onu maddeye yaklaştıracak enerjiyi vermezsek, atom ancak "tepe"nin bir kısmını tırmanacak ve sonra tekrar aşağı inecektir. Bununla birlikte, molekülleri elimize alıp oradaki atomları iterek ve çekerek yeni atomu içeri sokmak için bir delik açar ve yeni atom içeri girdikten sonra deliği tekrar kapatırsak, ekstra enerjiye gerek duymadan tepenin *etrafından* yeni bir yol bulmuş oluruz ve tepkime kolayca tamamlanmış olur. Hücrelerde aslında *çok büyük* moleküller vardır, değişimlerini betimlediklerimizden çok daha büyükleri; bunlar, tepkimelerin kolay meydana gelmesi için karmaşık bir tarzda küçük molekülleri hazırda tutarlar. Bu çok büyük ve karmaşık nesnelere *enzimler* denir. (Özgün olarak şekerin fermantasyonunda keşfedildikleri için, bunlara önce fermentler denilmişti. Aslında çevrimdeki ilk tepkimelerin bazıları orada bulunmuştu.) Bir enzimin varlığı halinde, tepkime meydana gelecektir.

Bir enzim *protein* denen bir maddeden oluşur. Enzimler çok büyük ve karmaşıktır; her biri farklıdır ve belirli bir özel tepkimeyi kontrol etmek üzere kurulmuştur. Enzimlerin adları Şekil 3–1'deki her tepkimede yazılmıştır. (Bazen bir enzim iki tepkimeyi kontrol edebilir.) Enzimlerin kendilerinin doğrudan tepkimeye katılmadıklarını vurgulamak isteriz. Enzimler değişmez; sadece bir atomun bir yerden başka bir yere gitmesini sağlar. Bunu yaptıktan sonra, tıpkı fabrikadaki makineler gibi, enzim aynı şeyi bir sonraki moleküle yap-

maya hazırdır. Kuşkusuz, belli atomların bir kaynağı olmalı ve diğer atomların atılmaları için de bir yol bulunmalıdır. Örneğin hidrojeni ele alınız: Tüm kimyasal tepkimelerde hidrojeni taşıyan özel ünitelere sahip enzimler vardır. Örneğin çevrimimizin farklı yerlerinde kullanılan hidrojen indirgeyici üç ya da dört enzim vardır. Bir yerde bir hidrojeni serbest bırakan bir mekanizmanın bu hidrojeni alıp başka yerde kullanması çok ilginçtir.

Şekil 3–1'deki çevrimin en önemli yanı, biri diğerinden çok daha fazla enerjiye sahip olduğu için, GDP'nin GTP'ye (guanosin-di-fosfat'ın guanosin-tri-fosfat'a) dönüşmesidir. Tıpkı belirli enzimlerde hidrojen atomlarını taşıyan bir "kutu" bulunduğu gibi, trifosfat grubunu içeren özel enerji-taşıyıcı "kutular" da vardır. Böylece GTP'nin enerjisi GDP'den daha fazladır ve çevrim bir yönde gidiyorsa, fazlalık enerjiye sahip molekülleri üretiyoruz ve bunlar da örneğin kasın kasılması gibi enerji gerektiren bir başka çevrimi başlatabilirler. GTP olmadıkça, kas kasılmaz. Bir kas lifini alıp su içine koyalım ve üzerine GTP ekleyelim; eğer doğru enzimler de varsa, GTP GDP'ye dönüşecek ve lif kasılacaktır. Demek ki gerçek sistem, GTP-GDP dönüşümündedir; gün boyunca biriktirilmiş olan GTP karanlıkta tüm çevrimin diğer yönde yürütülmesinde kullanılır. Görüyorsunuz ki bir enzim için tepkimenin hangi yönde gittiğinin önemi yoktur; bunun önemi olsaydı, fizik yasalarından birini bozmuş olurdu.

Fizik bir başka nedenle de biyoloji ve diğer bilimler için çok önemlidir; bu, *deney yöntemleri*yle ilgilidir. Gerçekten de, deneysel fizikteki büyük gelişmeler olmasaydı, bugünkü biyokimya çizelgeleri bilinemezdi. Bunun nedeni, müthiş karmaşık olan bu sistemin analizi için en yararlı aracın, tepkimelerde kullanılan atomların *etiketlenme*sidir. Böylece çevrimin içine üzerinde "yeşil işaret" bulunan biraz karbondioksit koyup bu yeşil işaretin üç saniye sonraki, on saniye sonraki vb yerlerini ölçersek, tepkimelerin ilerlemesini izleyebiliriz. Bu "yeşil işaretler" nedir? Onlar farklı *izotoplar*dır. Atomların kimyasal özelliklerinin çekirdeğin kütlesiyle değil

de, elektronların sayısıyla belirlendiğini hatırlarsınız. Fakat örneğin karbonda, tüm karbon çekirdeklerinde yer alan altı protonla birlikte beş ya da yedi nötron da bulunabilir. Kimyasal olarak C^{12} ve C^{13} atomları birbirlerinin aynıdır; fakat ağırlıkları açısından farklıdırlar ve farklı çekirdek özelliklerine sahiptirler; dolayısıyla ayırt edilebilirler. Ağırlıkları farklı olan bu izotopları, ya da hatta çok küçük miktarların izlenmesi için çok duyarlı bir araç olan C^{14} gibi radyoaktif izotopları kullanarak tepkimeleri izlemek olasıdır.

Şimdi tekrar enzimlere ve proteinlere dönelim. Tüm proteinler enzim değildir; fakat tüm enzimler proteindir. Kaslardaki proteinler, örneğin kıkırdak doku, saç ve tırnaklarda bulunan yapısal proteinler vb gibi kendileri enzim olmayan bir sürü protein vardır. Bununla birlikte, proteinler yaşamın çok karakteristik maddeleridir: Her şeyden önce tüm enzimleri onlar yapar, ikinci olarak kalan canlı malzemenin çoğu da onların eseridir. Proteinler çok ilginç ve basit bir yapıya sahiptirler; farklı *amino asitlerin* bir dizisi ya da zinciridirler. Yirmi farklı amino asit vardır ve bunların tümü, belkemiği CO-NH vb olan zincirler oluşturmak üzere birbirleriyle birleşebilirler. Proteinler, bu yirmi amino asitten bir kısmının oluşturduğu zincirlerden başka bir şey değildir. Her bir amino asit, büyük olasılıkla belli özel bir amaca hizmet eder. Örneğin bazılarında belirli bir yerde bir sülfür atomu vardır; iki sülfür atomu aynı proteinde olduğunda bir bağ oluştururlar, zinciri iki noktada bir araya getirip bir halka meydana getirirler. Bir diğer proteinde, onu asidik bir malzeme yapan fazlalık oksijen atomları vardır; bir başkasıysa bazik niteliktedir. Onların bazıları, bir tarafında asılı büyük gruplara sahip olup çok yer kaplamaktadırlar. Prolin denen bir amino asit, aslında amino asit olmayıp imino asittir. Bu ikisi arasında çok küçük bir fark vardır; prolin bir zincirde bulunduğu zaman, zincirde bir kıvrım olur. Özel bir protein imal etmek istersek, şu komutları verebiliriz: Buraya şu sülfür kancalarından birini koy; sonra yer doldurmak için bir şeyler ekle; sonra da zincire bir kıvrım vermek için bir

şey bağla. Bu şekilde, karman çorman görünümlü, bir araya kıvrılmış, karışık yapıda bir zincirimiz olur. Tüm değişik enzimlerin yapılış tarzlarının da böyle olduğu sanılmaktadır. Son yılların (1960'tan sonra) en büyük zaferlerinden biri, bir sıra üzerinde elli altı ya da altmış amino asit içeren bazı proteinlerde atomların gerçek uzaysal konumlarının nihayet keşfedilmesidir. İki proteinde, binden fazla atom (hidrojen atomlarını da sayarsak, neredeyse iki bin atom) karmaşık bir desen halindeki yerlerine yerleştirilmişti. Birincisi hemoglobin idi. Bu keşfin üzücü yanlarından biri, desenden hiçbir şey anlamadığımızdır; neden öyle işliyor, bunu anlayamıyoruz. Ele alınacak bir sonraki problem, kuşkusuz, bu olacaktır.

Diğer bir problem de şudur? Enzimler nasıl olmaları gerektiğini nereden biliyorlar? Kırmızı gözlü bir sinek kırmızı gözlü bir bebek doğuruyor; öyleyse enzimlerin tüm desenine kırmızı pigment yapma bilgisi bir sinekten yavrusuna geçirilmelidir. Bu, hücre çekirdeğinde bulunan, protein olmayan ve DNA (Dioksiribo Nükleik Asit) denen bir madde tarafından yapılır. Bu, bir hücreden diğerine geçen anahtar rolünde bir maddedir (örneğin sperm hücrelerinin büyük kısmı DNA'dan ibarettir). DNA, yapılacak işin "ozalit kopyası"dır. Ozalit kopya neye benzer ve nasıl işler? İlk önce, ozalit kopya kendi kendisini üretebilmelidir. İkinci olarak, proteine talimat verebilmelidir. Üremeyi, hücre üremesi gibi düşünebilirdik. Hücreler basitçe büyür ve sonra ikiye bölünür. DNA molekülleri için de bu böyle midir? Onlar da büyüyüp ikiye mi bölünürler? Her bir *atom* kesinlikle büyüyüp sonra ikiye bölünmez! Hayır, bir molekülün bu şekilde üremesi olanaksızdır; bunun çok daha zekice bir yolu olmalıdır.

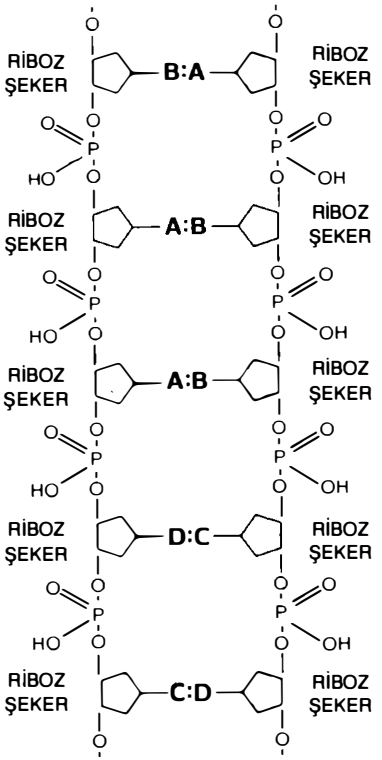
DNA malzemesinin yapısı, önce kimyasal yollarla bileşimini bulmak için ve sonra X-ışınlarıyla uzaysal desenini elde etmek için uzun süre incelenmişti. Sonuç, şu dikkat çekici keşif oldu: DNA molekülü, birbiri üzerine burulmuş bir çift zincirdir. Bu zincirlerin her biri protein zincirlerine benzemekle birlikte, kimyasal bakımdan çok farklıdır; buradaki zincirlerin her birinin belkemiği, Şekil 3–2'de görüldüğü gibi,

şeker ve fosfat gruplarının bir dizisidir. Zincirin talimatları nasıl içinde bulundurduğunu şimdi anlıyoruz; çünkü bu zinciri ortasından ikiye yarabilirsek, bir BAADC...dizisi elde ederiz ve her canlı varlık farklı bir diziye sahip olabilir. Böylece belki de, DNA'nın özel bir dizisinde, bir şekilde, proteinlerin yapımı için özel *talimatlar* içerilmektedir.

İkili zincir boyunca her şekere tutturulmuş olan ve iki zinciri birbirine bağlayan belirli çapraz parça çiftleri vardır. Ama bunların hepsi aynı türden değildir; adenin, timin, sitozin ve guanin denen dört farklı türü vardır; bunlara A, B, C ve D adlarını verelim. İlginç olan durum, bunlardan sadece belli çiftlerin, örneğin A'nın B ile ve C'nin D ile karşılıklı gelebilmeleridir. Bu çiftler iki zincire o şekilde yerleşirler ki "birbirine uyarlar" ve aralarında büyük bir etkileşme enerjisi olur. Bununla birlikte, A ile C ve C ile B uyuşmaz; ancak B'ye karşı A ve D'ye karşı C gelecek şekilde belirli çiftler uyuşur. Dolayısıyla biri C ise, diğeri D olmalıdır vb. Bir zincirde harfler ne olursa olsun, öbür zincirde her birinin özel tamamlayıcı harfi yer almalıdır.

Bu durumda üreme hakkında ne denebilir? Bu ikili zinciri boylu boyunca ikiye yardığımızı düşünelim. Bununla tamamen aynı olan bir diğerini nasıl yapabiliriz? Eğer hücrelerin içlerinde, bir zincire bağlanmamış fosfat, şeker ve A, B, C, D birimlerini yapan bir imalat bölümü varsa, bunların içinden bizim yarılmış zincirimize bağlanacak olanlar sadece doğru olanlardır, diğer bir deyişle BAADC....'lerin tamamlayıcıları olan ABBCD....'lerdir. Böylece olacak olan şudur: Hücre bölünmesi sırasında ikili zincir boylu boyunca ikiye yarıldığında, bir yarısı en sonunda bir hücreye ve diğer yarısı da diğer hücreye gidecektir; ayrıldıklarındaysa her yarım zincir yeni bir tamamlayıcı zincir oluşturur.

Bunun ardından gelen soru şudur: A, B, C, D birimlerinin sıralanışı, proteindeki aminoasitlerin düzenini kesin olarak nasıl saptar? Bugün için biyolojinin çözülmemiş en önemli problemi işte budur. Gene de, elimizde şu ipuçları ya da bilgi kırıntıları var:



Şekil 3–2 DNA'nın şematik diyagramı

Hücrede ribozom denen küçücük parçacıklar vardır ve bunların proteinlerin yapıldığı yerler oldukları artık biliniyor. Fakat ribozomlar, DNA'nın ve onun talimatlarının yer aldığı çekirdek içinde değildirler. Sanki ortada bir yanlışlık var! Bununla birlikte, DNA'dan küçük molekül parçalarının çıktığı da bilinmektedir; tüm bilgiyi taşıyan büyük DNA molekülü kadar uzun değil, fakat onun bir kısmı gibi. Buna RNA denir, fakat bu yaşamsal önemde değildir. RNA, DNA'nın bir tür kopyasıdır, kısa bir kopyası. Ne türden protein yapılacağı hakkında talimat taşıyan RNA'nın ribozoma gittiği biliniyor. Oraya vardığında, ribozomda protein sentezlenir. Bu

da biliniyor. Ama aminoasitlerin nasıl meydana geldikleri ve RNA'daki şifreye uygun olarak nasıl düzenlendikleri henüz ayrıntılarıyla bilinmemektedir. Bu şifreyi nasıl okuyacağımızı bilmiyoruz. Örneğin A, B, C, C, A "dizilişi"ni bilseydik, hangi proteinin yapılacağını söyleyemezdik.

Günümüzde hiçbir konu ya da bilim alanı, bu kadar çok cephede biyolojiden daha büyük gelişmeyi kesinlikle göstermemiştir. Yaşamı anlama çabasına bizleri yönelten varsayımlardan en güçlüsünü bizden ifade etmemiz istenseydi; bu, "*her şey atomlardan yapılmıştır* ve canlı varlıkların yaptıkları her şey atomların hareketleriyle anlaşılabilir" şeklinde olurdu.

Astronomi

Dünyanın bu çok hızlı açıklanışında, şimdi de astronomiye bakmalıyız. Astronomi fizikten de eskidir. Aslında astronomi, yıldızların ve gezegenlerin hareketinin müthiş güzellikteki basitliğini göstererek fiziği başlatmıştı; bunun anlaşılması fiziğin *başlangıcı* oldu. Fakat tüm astronomide en göze çarpan keşif, *yıldızların dünyada bulunan aynı tür atomlardan yapılmış olmasıdır*.[1] Bu gerçeğe nasıl ulaşıl-

[1] Ne kadar da hızlı gidiyorum! Bu kısa tarihçenin her cümlesi ne çok şey kapsamakta: "Yıldızlar, dünyada var olan aynı atomlardan oluşmuştur." Bir konferans vermek için ben genelde bunun gibi küçük bir konu seçerim. Şairler, bilim insanlarının yıldızlardaki güzellikleri alıp götürdüklerinden yakınırlar: sadece gaz atomlarından ibaret topaklar. Ama hiçbir şey "sadece" değildir. Ben de bir çöl gecesinde yıldızlara bakarım ve onları duyarım. Fakat ben daha mı az, daha mı çok şey görürüm? Göklerin boşluğu benim hayal gücümü zorlar; bu cümbüşe tutkun küçücük gözlerim, bir milyon yıllık ışığı görebilir. Devasa genişlikte bir desen ve ben de onun bir parçasıyım; belki benim maddem de artık unutulmuş bir yıldızdan püskürtülmüştü; şimdi birinin daha püskürtüldüğü gibi... Ya da onlara Palomar Gözlemevindeki büyük teleskop gözüyle bakarım ve bir zamanlar bir arada oldukları bir ortak başlama noktasından her tarafa doğru saçılmakta olduklarını görürüm. Bu desen nedir? Ya da anlamı? Ya da nedeni? Bu gizem hakkında çok az şey bilmek, onun değerini hiç

mıştı? Atomlar, bir müzik aletinin belirli ses perdeleri ya da frekanslarında tınlaması gibi, belirli frekanslara sahip ışık salarlar. Birçok farklı sesi dinlerken, onları birbirinden ayırt edebiliriz; fakat renklerden oluşmuş bir karışıma gözlerimizle baktığımızda, bu karışımın nelerden oluştuğunu söyleyemeyiz, çünkü göz bu bağlamda kulak kadar ayırt edici değildir. Bununla birlikte, ışık dalgalarının frekanslarını bir spektroskopla *çözümleyebiliriz* ve bu yolla farklı yıldızlardaki atomların gerçek "seslerini görebiliriz."

Aslında, kimyasal elementlerden ikisi, yeryüzünde bulunmadan önce, yıldızlarda bulunmuştu. Helyum güneşte keşfedilmiş ve adını güneşten almıştı ve teknetyumsa bazı soğuk yıldızlarda bulunmuştu. Yıldızlar yeryüzünde bulunan aynı tür atomlardan oluştukları için, bu yöntem, elbette yıldızları anlamamızda bize yol gösterecektir. Artık atomlar hakkında, özellikle yüksek sıcaklık fakat çok yüksek olmayan yoğunluk koşulları altındaki davranışlarıyla ilgili olarak pek çok şey biliyoruz; buna dayanarak, istatistik mekanik aracılığıyla, yıldız maddesinin davranışını çözümleyebiliriz. Yıldızlardaki koşulları yeryüzünde oluşturamasak da, temel fizik yasalarını kullanarak neler olacağını çoğu kez kesin olarak, ya da yakınlıkla, söyleyebiliriz. İşte fizik astronomiye böyle yardım eder. Güneşin iç kısımlarındaki madde dağılımını, dünyanın iç kısımlarından çok daha iyi anlamış olmamız, garip görünebilir. Yıldızların *içinde* atomların neler yapacaklarını birçok durumda *hesaplayabildiğimiz* için, bir yıldızın içinde neler olduğunu, küçük bir ışık noktasına teleskopla bakmanın güçlüğü nedeniyle yapılacak tahminlerden çok daha iyi anlamaktayız.

En etkileyici keşiflerden biri, yıldızların sürekli yanmalarını sağlayan enerjinin kaynağıdır. Bunu bulan kişilerden

---

de azaltmaz. Çünkü gerçek, geçmişteki her sanatçının hayal ettiklerinden çok daha olağanüstüdür! Günümüzün şairleri bundan neden söz etmezler? Jüpiter'den bir adammış gibi söz eden, fakat onun dönen devasa bir metan ve amonyum küresinden ibaret olması gerçeği karşısında susan şairler ne biçim insanlardır?

biri, yıldızların parlayabilmeleri için içlerinde *çekirdek tepkimelerinin* yer alması gerektiğini düşündükten bir gece sonra kız arkadaşıyla dolaşıyordu. Kız "bak, yıldızlar ne güzel parlıyor" dedi. Erkek yanıt verdi: "Evet! Ve şu anda dünyada, onların *neden* parladığını bilen tek kişi benim." Kız sadece ona gülmekle yetindi. Belli ki o anda yıldızların neden parladığını bilen tek adamla birlikte olmak onu etkilememişti. Evet, tek başına olmak üzüntü verir insana; ama ne yapalım ki bu dünya böyle.

Güneşin enerjisini sağlayan, hidrojenin çekirdeksel "yanması"dır; burada hidrojen helyuma dönüşür. Ayrıca yıldızların merkezlerinde hidrojenden çeşitli kimyasal elementlerin imal edilmesi sürer gider. *Bizim* yapıldığımız madde bir zamanlar bir yıldızda "pişirilmiş" ve etrafa atılmıştı. Bunu nasıl mı biliyoruz? Çünkü elimizde bir ipucu var. Farklı izotopların oranı, C^{12} miktarı, C^{13} miktarı, vb gibi *kimyasal* tepkimelerde asla değişmeyen şeylerdir; çünkü kimyasal tepkimeler bu ikisi için aynıdır. Oranlar, saf olarak *çekirdek* tepkimelerinin sonucudur. Bizi oluşturmuş olan soğuk, ölü közdeki izotop oranlarına bakarak, bizi oluşturan maddenin şekillendiği *fırının* neye benzediğini keşfedebiliriz. Bu fırın yıldızlar gibiydi ve bu nedenle, büyük olasılıkla, bizim elementlerimiz yıldızlarda "yapılmış" ve sonra da nova ve süpernova dediğimiz patlamalarla etrafa püskürtülmüştü. Astronomi fiziğe o denli yakındır ki, ileride birçok astronomi konusunu incelemek durumunda kalacağız.

Jeoloji

Şimdi de *yer bilimleri* ya da *jeoloji* dediğimiz bilim dalına dönüyoruz. Önce meteoroloji ve hava durumu. Meteoroloji aygıtları kuşkusuz fiziksel aygıtlardır ve bu aygıtların yapımını, daha önce açıklandığı gibi, deneysel fiziğin gelişimi sağlamıştır. Bununla birlikte, meteoroloji kuramı hiçbir zaman fizikçiler tarafından doyurucu bir şekilde işlenmemiştir. "Ama meteorolojide havadan başka bir şey yok ve biz de havanın hareket

denklemlerini biliyoruz" diyebilirsiniz. Evet, biliyoruz. "Peki, bugünün hava koşullarını biliyorsak, yarınki hava koşullarını neden çıkaramıyoruz?" Her şeyden önce, bugünkü koşulları *gerçekte* bilemeyiz; çünkü hava her yerde girdaplar yapmakta, kıvrılıp bükülmektedir. Durumun çok hassas ve hatta dengesiz olduğu anlaşılıyor. Suyun bir baraj üzerinde düzgün olarak akışını ve sonra düşerken çok sayıda parçalar ve damlalar haline gelişini gördünüzse, kararsız sözüyle ne demek istediğimi anlamışsınızdır. Suyun baraj oluğunu aşmadan önceki durumunu bilirsiniz; mükemmel bir şekilde düzgündür, fakat düşmeye başladığı anda, damlalar nerede oluşmaya başlar? Parçaların hangi büyüklükte olacağını ve yerlerini ne saptayacaktır? Su dengesiz olduğundan, bu bilinemez. Düzgün hareket eden bir hava kütlesi bile bir dağı aşarken, karmaşık çevrimler ve girdaplara dönüşür. Bugün çözümleyemediğimiz bu türden *çalkantılı akış*larla pek çok alanda karşılaşırız. Artık hava durumunu bırakıp jeolojiye dönelim.

Jeoloji temelli soru, yer küreyi bugünkü hale neyin getirdiğidir. En açık süreçler gözlerimizin önünde cereyan etmektedir: nehirlerin erozyon süreçleri, rüzgârlar, vb. Bunları anlamak yeterince kolaydır, fakat erozyonun her küçük parçası için ona eşit miktarda bir şey daha olur: Dağlar, ortalama anlamda, geçmişte olduğundan daha alçak değildir. Öyleyse dağ-yapıcı süreçler de var olmalıdır. Jeoloji okuyorsanız, kimsenin anlamadığı ama jeolojinin yarısını oluşturan dağ-yapıcı süreçlerin ve yanardağ olaylarının var olduklarını göreceksiniz. Yanardağlar olayı gerçekten de anlaşılmamıştır. Depremi neyin meydana getirdiği de anlaşılmamıştır. Bir şey başka bir şeyi iterse, onun kırılarak kayacağı anlaşılır, bu tamam. Fakat iten şey nedir ve neyi iter? Kuram şudur: Yer küresi içinde akıntılar vardır –yer küresinin içi ile dışı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle dolanan akıntılar– bunların hareketi yüzeyi hafifçe iter. Böylece yan yana iki zıt dolanım varsa, onların karşılaştıkları bölgede madde birikir ve şiddetli gerilimlere sahip dağ kuşakları meydana gelir; bunlardan da yanardağlar ve depremler oluşur.

Peki, ya yer küresinin içi için ne diyebiliriz? Deprem dalgalarının hızları ve yerin yoğunluk dağılımı hakkında çok şey bilinmektedir. Bununla birlikte, fizikçiler, yerin merkezinde beklenen basınçlarda maddenin ne kadar yoğun olacağına ilişkin iyi bir kuram oluşturamamışlardır. Başka bir deyişle, bu koşullarda maddenin özelliklerini çok iyi hesaplayamıyoruz. Yer hakkındaki bilgimiz, yıldızlardaki madde koşulları hakkındaki bilgimizden daha azdır. Bu konu için gereken matematik, bugüne dek biraz daha zor gibi görünüyordu; fakat birilerinin bunun önemli bir problem olduğunu anlaması ve onu ciddi şekilde çalışması yakındır. Diğer taraftan, yoğunluğu bilsek bile dolanım akımlarını hesaplayamayız. Kayaların ne hızla "yumuşayıp dağılacağını" söyleyemeyiz. Tüm bunların deneyle halledilmesi gerekmektedir.

Psikoloji

Şimdi de *psikoloji* bilimini ele alacağız. Aklıma gelmişken, psikanalizin bilim olmadığını söyleyeyim; en iyimser görüşle bir tıp yöntemi, belki daha çok büyüyle tedavi gibi bir şeydir. Bunun, hastalıkların nedenleriyle ilgili bir kuramı vardır; bir sürü farklı "ruh, cin, peri" vb. Büyücü doktorun kuramına göre, sıtma gibi bir hastalığa havaya sızan bir kötü ruh neden olur. Sıtma, hasta üzerinde bir yılanı sallayarak tedavi edilmez, ona kinin iyi gelir. Eğer hasta olursanız, büyücü doktora gitmenizi öneririm; çünkü kabilenin hastalıklar hakkında en bilgili adamı odur; diğer taraftan, büyücünün bilgisi bilim değildir. Psikanaliz deneyle dikkatlice sınanmamıştır; bu nedenle, doğru olduğu olaylar listesi, doğru olmadığı olaylar listesi vb gibi şeyler bulmak söz konusu değildir.

Psikolojinin duygu fizyolojisi –gözde neler olur? beyinde neler meydana gelir?– gibi konuları içeren diğer dalları daha az ilgi çekicidir. Ama biraz az da olsa, gerçek ilerleme bu konuların çalışılmasıyla olmuştur. En ilginç teknik problemlerden birine, psikoloji denilebilir de, denilemeyebilir de. Aklın, ya da dilerseniz, sinir sisteminin en önemi

problemi şudur: Bir hayvan bir şey öğrendiğinde, onu daha önce yapabildiğinden daha farkı şekilde yapabilir ve –beyin atomlardan oluştuğuna göre– onun beyin hücresi de değişmiş olmalıdır. *Ne tarzda bir değişiklik olmuştur?* Bir şey ezberlendiğinde, nereye bakacağımızı, ya da ne arayacağımızı bilemiyoruz? Bir gerçek öğrenildiği zaman, bunun ne anlama geldiğini, ya da sinir sisteminde meydana gelen değişikliğin ne olduğunu bilemiyoruz. Bu, hiç çözülmemiş çok önemli bir problemdir. Bununla birlikte, bellek denen bir şeyin varlığını kabul ederek diyebiliriz ki, beyin birbirine bağlı öylesine devasa büyüklükte bir teller ve sinirler topluluğudur ki herhalde kolayca anlaşılır bir tarzda çözümlenemez. Bunun bir benzeri olan hesap makineleri ve hesaplama elemanları da pek çok tele ve belki de sinir kavşağı ya da bir sinirin diğerine bağlanmasına benzeyen türden elemanlara sahiptir. Bu –düşünme ile hesap makineleri arasındaki ilişki– çok ilginç bir konudur; ama bunu daha fazla tartışmaya zamanımız yok. Kuşkusuz, takdir edersiniz ki bu konu, olağan insan davranışının gerçek karmaşıklığı hakkında bize çok az şey söyleyecektir. İnsanlar birbirlerinden o kadar farklıdırlar ki! Tüm bunları anlayabilmemiz daha çok zaman ister. İşe iyice gerilerden başlamalıyız. Bir köpeğin bile iç mekanizmasının nasıl işlediğini anlayabilirsek, epeyce ilerlemiş oluruz. Köpeklerin anlaşılması daha kolaydır; ne yazık ki bir köpeğin bile mekanizmasının nasıl işlediğini henüz bilen kimse yok.

Bu Duruma Nasıl Geldi?

Fiziğin diğer bilimlere, aygıtların icat edilmesinden başka, *kuramsal* açıdan yararlı olması için, söz konusu bilimin fizikçiye fizikçi dilinde konunun betimlemesini sağlamalıdır. Onlar, kurbağa neden sıçrar?" diye sorabilirler, fizikçi bunu yanıtlayamaz. Ama ona kurbağanın ne olduğu, çok sayıda moleküle sahip olduğu, şurada bir sinirin yer aldığı vb söylenirse, o zaman iş değişir. Eğer bize yerin ya da yıldızların aşağı yukarı nasıl oldukları anlatılırsa, onları kavrayabili-

riz. Fiziksel kuramın yararı olması için, atomların nerelerde yerleştiklerini bilmeliyiz. Kimyayı anlamak için, tam olarak hangi atomların var olduklarını bilmeliyiz; aksi halde onu çözümleyemeyiz. Kuşkusuz bu sadece bir sınırlamadır.

Kardeş bilimlerde fizikte bulunmayan bir başka problem vardır; onu, daha iyi bir terimimiz olmadığı için, tarihsel problem diye adlandıralım. O bu duruma nasıl geldi? Biyolojide her şeyi anlıyorsak, yeryüzündeki tüm varlıkların bu duruma nasıl geldiklerini bilmek isteyeceğiz. Bu hususta biyolojinin önemli bir kısmı olan evrim kuramı var. Jeolojide, sadece dağların nasıl oluştuğunu bilmekle yetinmeyiz, ayrıca tüm yer küresinin nasıl oluştuğunu, güneş sisteminin kaynağını vb bilmek isteriz. Bu, kuşkusuz, evrende ne tür maddelerin var olduğunu bilmek istememize götürür bizi. Yıldızlar nasıl evrilmiştir? İlk koşullar ne idi? Bu astronomi tarihine ilişkin bir problemdir. Yıldızların oluşumu hakkında, bizi oluşturan elementler hakkında ve hattâ, az da olsa, evrenin kaynağı hakkında epeyce bilgi toplanmış bulunmaktadır.

Günümüzde fizikte tarihsel problemle ilgili yapılmış çalışma yoktur. Şöyle bir sorumuz yok: "İşte bunlar fizik yasaları; onlar bu duruma nasıl geldiler?" Fizik yasalarının bir bakıma zamanla değişmesini, geçmişte şimdikinden farklı olduklarını şu anda düşünemiyoruz. Kuşkusuz bu da *olabilir*; yasaların zamanla değiştikleri bulunursa, fiziğin tarihsel problemi evren tarihinin geri kalanıyla sarmalanacak ve ondan sonra fizikçi de astronomlar, jeologlar ve biyologlar gibi aynı problemleri konuşacaktır.

Son olarak, birçok alanda ortak olan bir fiziksel problem vardır; çok eski bir problemdir ve hâlâ çözülmemiştir. Yeni temel parçacıkların bulunması problemi değildir bu; çok uzun zaman –yüzlerce yıl– önceden kalma bir şey. Kardeş bilimler için çok önemli olduğu halde, fizikte bunu hiç kimse matematiksel olarak doyurucu biçimde çözümleyememiştir. Bu, *dolanan ya da girdaplı sıvıların* çözümlenmesi problemidir. Bir yıldızın evrilmesini gözlersek, öyle bir nokta gelir ki ora-

da artık taşınım olaylarının başlayacağı sonucuna varırız ve ondan sonra ne olacağını kestiremeyiz. Yıldız birkaç milyon yıl sonra patlar, fakat bunun nedenini bulamayız. Hava durumunu çözümleyemeyiz. Yer küresinin içinde meydana gelecek hareketlerin desenini bilemeyiz. Problemin en basit şekli, çok uzun bir boru alıp onun içine yüksek hızda su itmektir. Soru şudur: Verilen miktardaki suyu bu boru boyunca itmek için, ne kadar basınç gerekir? Hiç kimse bunu, ilk ilkelerden ve suyun özelliklerinden çözümleyemez. Su çok yavaş akarsa ya da bal gibi kıvamlı bir sıvı kullanırsak, bunu kolayca yaparız. Bunu ders kitabınızda bulacaksınız. Gerçekte çözemediğimiz şey, borudan akan gerçek, *ıslak* suyla ilgili problemdir. Bir gün çözmemiz gereken, ama henüz çözemediğimiz ana problem işte budur. Bir zamanlar bir şair "Tüm evren bir bardak şaraptadır" demişti. Şairler şiirlerini anlaşılsın diye yazmadıkları için, şairin bununla ne demek istediğini belki de asla bilemeyeceğiz. Fakat bir bardak şaraba yakından bakarsak, orada tüm evreni göreceğimiz doğrudur. Orada fizikle ilgili her şey var: rüzgâr ve havaya bağlı olarak buharlaşan hareket halinde sıvı, camdaki yansımalar ve hayal gücümüz dahilinde atomlar. Cam, yeryüzündeki kayaların damıtılmış halidir; onun bileşiminde evrenin yaşının gizlerini ve yıldızların evrimini görürüz. Şarapta ne türden acayip kimyasal dizilişler vardır? Nasıl oluştular? Ayrıca mayalar, enzimler, mayanın etkilediği maddeler ve diğer ürünler oradadır. Şu büyük genelleme de o şarapta bulunmuştur: tüm yaşam mayalanmadır. Hiç kimse, Louis Pasteur'ün yaptığı gibi, birçok hastalığın nedenini bulmadan şarabın kimyasını keşfedemez. Onu gözleyen bilince varlığını hissettiren kırmızı Bordo şarabı "Claret" nasıl da canlıdır! Bizim küçük beynimiz, biraz kolaylık uğruna, bu bir bardak şarabı, bu evreni, kısımlara –fizik, biyoloji, jeoloji, astronomi, psikoloji vb– ayırırsa da, unutmayın ki doğanın bundan haberi olmaz! Dolayısıyla bunu ne amaçla yaptığımızı hatırlayıp, sonunda tüm kısımları tekrar bir araya getirelim. Bırakalım bize son bir zevk daha versin: Bu bir bardak şarabı içelim ve her şeyi unutalım!

4

ENERJİNİN KORUNUMU

Enerji Nedir?

Genel betimlemeleri bitirmiş olarak, bu bölümde fiziğin farklı yanlarını daha ayrıntılı biçimde incelenmeye başlayacağız. Kuramsal fizikte kullanılabilen düşünceleri ve sonuç çıkarmaları açıklamak için, şimdi en temel fizik yasalarından birini, enerjinin korunumunu gözden geçireceğiz.

Bugüne kadar bilinen tüm doğa olaylarını yöneten bir olgu, ya da isterseniz, bir *yasa* vardır. Bu yasaya uymayan bir olay çıkmamıştır; bu yasa, bildiğimiz kadarıyla, tam doğrudur. Buna *enerjinin korunumu* yasası denir. Bu yasa, doğanın uğradığı çeşitli değişikliklerde değişmeyen, enerji dediğimiz belirli bir niceliğin var olduğunu ifade eder.

Matematiksel bir ilke olduğundan, iyice soyut bir düşüncedir bu; bize, bir takım olaylar cereyan ettiği halde bir sayısal niceliğin hiç değişmediğini söyler. Bu, bir mekanizma ya da somut bir şeyin betimlemesi değildir; sadece garip bir olgudur: Belirli bir sayıyı hesaplarız ve bir süre doğanın numaralarını gözledikten sonra bu sayıyı tekrar hesaplarız ve ortaya aynı sayı çıkar. (Şunun gibi bir şey: Fil kırmızı karededir ve birçok hamleden sonra –ayrıntılar bilinmiyor– fil hâlâ aynı kırmızı karededir. Bu doğanın bir yasasıdır.) Soyut bir

düşünce olduğundan, onun anlamını bir benzetmeyle açıklayacağız.

Hiçbir şekilde yok edilemez ve parçalara bölünemez oyuncak bloklarla oynayan bir çocuğu, belki de "Afacan Deniz"i düşünün. Her biri diğeriyle aynı olan, diyelim ki 28 blok var. Annesi Deniz'i günün başında 28 blokla bir odaya koymuş olsun. Günün sonunda, meraklı anne dikkatlice blokları sayıyor ve bir olgusal yasa keşfediyor: oğlan bloklarla neler yapmış olursa olsun, daima geriye 28 blok kalıyor! Bu günlerce böyle sürüyor, ta ki bir gün 27 blok kalmış görününceye kadar; fakat küçük bir araştırma, bir blokun halı altında olduğunu gösteriyor; blok sayısının değişmediğinden emin olmak için, anne her yere dikkatlice bakmalıdır. Bununla birlikte, bir gün sayının değiştiği görülüyor; sadece 26 blok vardır ortada. Dikkatli bir araştırma, pencerenin açık olduğunu gösteriyor ve dışarıya bakıldığında diğer iki blok da bulunuyor. Bir başka gün, dikkatli bir sayımda 30 blok çıkıyor! Bu büyük bir şaşkınlığa neden oluyorsa da, sonra Birtan'ın kendi bloklarıyla birlikte Deniz'i ziyarete geldiği ve birkaç blokunu Deniz'in odasında unuttuğu anlaşılıyor. Fazlalık bloklar Birtan'a geri verildikten sonra pencere kapatılıyor ve Birtan içeri sokulmuyor; böylece her şey yolunda gidiyorken bir gün bloklar sayıldığında sadece 25 blokun olduğu görülüyor. Bununla birlikte, odada bir kutu vardır, bir oyuncak kutusu. Anne oyuncak kutusunu açmaya yeltendiğinde, çocuk "Hayır, oyuncak kutumu açma" deyip çığlığı basıyor. Oyuncak kutusunun açılmasına izin alamayan anne, iyice meraklanarak ve biraz da maharetle bir plân yapıyor! Bir blokun 75 gr ağırlığında olduğunu biliyor. Ayrıca ortalıkta 28 blok varken kutuyu tartmış ve 400 gr bulmuştur. Şimdi kontrol etmek için kutuyu tekrar tartıyor, bundan 400 gr'ı çıkarıp 75 gr'a bölüyor ve şunu keşfediyor:

$$\left(\begin{array}{l}\text{görülen}\\ \text{blokların}\\ \text{sayısı}\end{array}\right) + \frac{(\text{kutunun ağırlığı}) - 400\ \text{gr}}{75\ \text{gr}} = \text{sabit} \qquad (4.1)$$

Daha sonra bazı yeni sapmaların olduğu ortaya çıkıyor, fakat dikkatli bir inceleme, banyo küvetindeki kirli su düzeyinde değişme olduğunu gösteriyor. Çocuk blokları suya atmıştır ve su çok kirli olduğu için anne onları görememektedir; ama formülüne bir terim daha ekleyerek su içinde kaç blok olduğunu hesaplayabilir. Suyun normal yüksekliği 15 cm'dir ve her blok suyu yarım cm yükselttiğine göre, yeni formülü şöyle olmalıdır:

$$\text{(görülen blokların sayısı)} + \frac{\text{(kutunun ağırlığı)} - 400\ \text{gr}}{75\ \text{gr}} + \frac{\text{(suyun yüksekliği)} - 15\ \text{cm}}{0{,}5\ \text{cm}} = \text{sabit} \qquad (4.2)$$

Anne, dünyasının karmaşıklığı derece derece arttıkça, bakamadığı yerlerde kaç blok olduğunu hesaplamayı betimleyen terimler dizisini keşfeder. Sonuçta, karmaşık bir formül şeklinde, her durumda hep aynı kalan hesaplanacak bir nicelik bulur.

Bunun nesi enerjinin korunumuna benzemektedir? Bu tablodan çıkarılacak en önemli ders, *ortada olmayan bloklar*dır. (4.1) ve (4.2)'deki ilk terimleri bir yana çıkarırsanız, kendimizi, az ya da çok, soyut şeyler hesaplarken buluruz. Benzerlik şu noktalardadır: Her şeyden önce, enerjiyi hesaplarken, onun bir kısmı bazen sistemden ayrılır, bazen de sisteme katılır. Enerjinin korunumunu doğrulamak için, içeriye hiç enerji alınmadığına, ya da dışarıya hiç enerji çıkarılmadığına dikkat etmeliyiz. İkinci olarak, çok sayıda *değişik* enerji biçimleri ve her birinin bir formülü vardır. Bunlar, kütleçekim enerjisi, kinetik enerji, ısı enerjisi, esneklik enerjisi, elektrik enerjisi, kimyasal enerji, ışıma enerjisi, çekirdek enerjisi, kütle enerjisidir. Bu katkıların her birinin formüllerini toplarsak, bu toplam, giren ve çıkan enerjiler dışında, değişmeyecektir.

Bugün fizikte enerjinin ne olduğunu *bilmediğimizi* kavramak önemlidir. Enerjinin belirli küçük miktarlarda topaklar halinde geldiğini gösteren bir resme sahip değiliz. Enerji bu tarzda değildir. Bununla birlikte, belirli bir sayısal niceliği hesaplamak için formüller vardır ve bunların tümünü topladığımızda, daima aynı sayıyı, "28"i verir. Bu, bize oradaki mekanizmayı, ya da çeşitli formüllerin nedenlerini söylemeyen soyut bir şeydir.

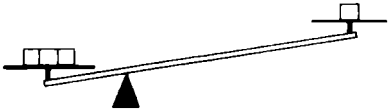
Kütleçekimsel Potansiyel Enerji

Her enerji biçimi için formüllere sahipsek, ancak o zaman enerjinin korunumu anlaşılabilir. Kütleçekimsel enerji formülünü yer yüzeyine yakın bölgelerde tartışmak istiyorum. Bu formülü, tarihsel yolun dışında, basitçe bu özel ders için icat ettiğim bir dizi akıl yürütmeyle türeteceğim. Bu size dikkate değer bir olguyu, doğa hakkında pek çok şeyin birkaç gerçek ve sıkı akıl yürütmeden çıkarılabileceğini gösterecektir. Kuramsal fizikçilerin çalışma tarzı budur. Bu, buhar makinelerinin verimi üzerine Carnot'nun sunduğu o mükemmel kanıta uygun olarak biçimlendirilmiştir.[1]

Ağırlık-kaldırıcı makineleri –bir ağırlığı aşağı indirerek başka bir ağırlığı yukarı kaldırma özelliğine sahip makineler– ele alalım. Gelin, önce şu varsayımı yapalım: Bu ağırlık-kaldırıcı makinelerle sürekli hareket (devri-daim) diye bir şey olamaz. (Aslında, sürekli hareketin olmaması, enerjinin korunumu yasasının genel ifadesidir.) Sürekli hareketi tanımlamada dikkatli olmalıyız. Bunu önce ağırlık-kaldırıcı makineler için yapalım. Birçok ağırlığı kaldırıp indirdiğimiz ve sonunda makineyi başlangıç koşuluna getirdiğimiz zaman, net sonucun bir ağırlığı kaldırmak olduğunu bulursak, bu durumda bir sürekli hareket makinesine sahibiz demektir; çünkü kaldırılmış olan ağırlık bir şeyleri çalıştırır. Diğer

[1] Buradaki amacımız pek de (4.3) sonucu değildir, onu aslında belki zaten biliyorsunuz; asıl amaç, ona kuramsal akıl yürütmeyle ulaşma olanağıdır.

bir deyişle, ağırlık-kaldırıcı makine tam olarak başlangıç durumuna gelir ve ayrıca da her şeyi kendi içinde bulundurur: Birtan'ın blokları gibi, bu ağırlığı kaldırmak için bir dış kaynaktan enerji almaz.



Şekil 4–1 Basit kaldıraç

Şekil 4–1'de çok basit bir ağırlık-kaldırıcı makine görülüyor. Bu makine üç-birim "şiddet"indeki ağırlıkları kaldırmaktadır. Bir kefeye üç-birim ve diğerine bir-birim koyarız. Bununla birlikte, onu gerçekten çalıştırmak için, sol kefedeki ağırlığı biraz kaldırmalıyız. Öte yandan, küçük ağırlığı kaldırma esprisiyle, üç-birimlik ağırlığı aşağıya indirerek bir-birimlik ağırlığı yukarıya kaldırabiliriz. Kuşkusuz, her *gerçek* kaldırıcı makinede, makineyi çalıştırmak için küçük bir fazlalık ağırlığın eklenmesi gerektiğini anlarız. *Bir an için*, bunu bir kenara bırakalım. İdeal makineler, var olmasalar da, fazladan hiçbir ağırlık istemezler. Gerçekte kullandığımız bir makine, *neredeyse* tersinirdir: bir-birimlik ağırlığı indirerek üç-birimlik ağırlığı kaldıracaksa, üç-birimlik ağırlığı indirerek de bir-birimlik ağırlığı aynı miktarda kaldıracaktır.

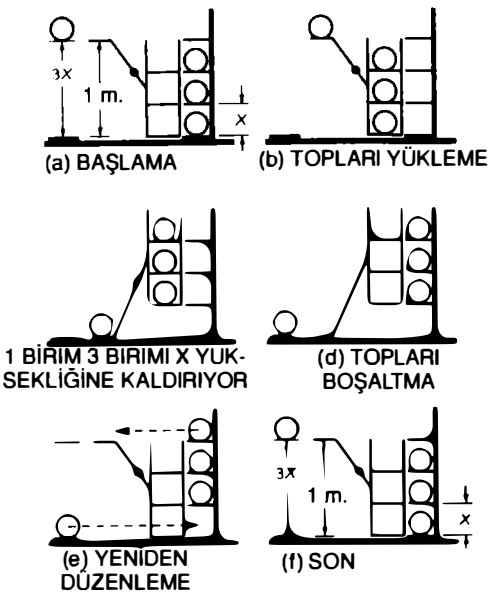
Makineleri iki sınıfa ayıralım: tüm gerçek makineleri içeren tersinir *olmayan* makineler ve tersinir makineler. İkinci sınıftakiler, kuşkusuz destekler, kaldıraçlar vb gibi şeylerin tasarımlarında ne denli dikkatli olunursa olunsun, gerçekte asla ulaşamayacağımız makinelerdir. Bununla birlikte, böyle bir tersinir makinenin bulunduğunu varsayalım. Bu makine, bir-birimlik (bir kilogram ya da bir başka birim) ağırlığı bir uzunluk birimi alçaltarak aynı zamanda üç-birimlik ağırlığı yukarı kaldırsın. Bu tersinir makineye A makinesi diyelim. Bu özel tersinir makinenin üç-birimlik ağırlığı X yük-

sekliğine kaldırdığını düşünelim. Mutlaka tersinir olması gerekmeyen bir başka makinemiz da B makinesi olsun; bu da bir-birimlik ağırlığı bir birim aşağıya indirdiğinde, üç-birimlik ağırlığı Y kadar yükseğe çıkarsın. Şimdi Y'nin X'ten daha yüksek olamayacağını kanıtlayacağız. Dolayısıyla bir ağırlığı tersinir bir makineden daha yükseğe kaldırabilecek bir makine yapmak olanaksızdır. Bunun nedenini görelim. Y'nin X'ten daha yüksek olduğunu varsayalım. Bir-birimlik bir ağırlık alıp, onu B makinesiyle bir-birim kadar aşağıya indirelim; üç-birimlik ağırlık Y kadar yükseğe çıkarılacaktır. Sonra bu ağırlığı Y'den X'e indirerek serbest güç elde ederiz ve A makinesini geriye doğru işleterek üç-birimlik ağırlığı X kadar aşağı indirmek için bir-birimlik ağırlığı bir-birim mesafe kadar yukarı yükseltiriz. Bu işlem, bir-birimlik ağırlığı yerine geri getirecek ve her iki makineyi de tekrar kullanılacak hale sokacaktır! Dolayısıyla eğer Y, X'ten daha yüksek olsaydı, sürekli harekete (*devri daim*'e) sahip olurduk; bununsa olanaksız olduğunu varsaymıştık. Böylece bu varsayımlarla, Y'nin X'ten daha yüksek olamayacağını çıkarırız; öyle ki tasarlanabilecek tüm makinelerin en iyisi tersinir makinedir.

Ayrıca tüm tersinir makinelerin bir ağırlığı tam olarak aynı yüksekliğe kaldıracaklarını da anlarız. B makinesinin de aslında tersinir olduğunu varsayalım. Y'nin X'ten yüksek olamayacağı savı, kuşkusuz, tam da önceki kadar doğrudur; fakat makineleri ters sırada kullanarak bu savımızı tersine de çevirebilir ve X'in Y'den daha yüksek olamayacağını da kanıtlarız. Bu, çok dikkate değer bir gözlemdir; çünkü farklı makinelerin bir ağırlığı kaldıracakları yükseklikleri iç mekanizmalarına bakmaksızın çözümlememizi sağlar. Hemen anlarız ki bir kimse aşırı özenle, bir-birim ağırlığı bir-birim mesafe indirerek üç-birim ağırlığı kaldıracak bir dizi kaldıraç yaparsa ve biz onu aynı işi yapan ve temelde tersinir olan basit bir kaldıraçla karşılaştırırsak; onun makinesi söz konusu ağırlığı daha yükseğe kaldıramayacak, belki biraz daha az bile yükseltecektir. Onun makinesi tersinirse, ağır-

lığı ne kadar yükseğe kaldıracağını da tam olarak biliriz. Özetlersek, bir kilogramlık ağırlığı bir metre aşağı indiren ve üç kilogramlık ağırlığı kaldıran her tersinir makine, nasıl çalışırsa çalışsın, söz konusu ağırlığı daima aynı X yüksekliğine çıkarır. Bunun çok yararlı evrensel bir yasa olduğu açıktır. Bir sonra gelen, kuşkusuz, X nedir? sorusudur.

Bir-birim ağırlık ile üç-birim ağırlığı bu X yüksekliğine kaldıracak bir tersinir makinemiz olduğunu varsayalım. Şekil 4–2'de görüldüğü gibi, hareket etmeyen eşit raflı bir platforma üst üste üç top yerleştiriyoruz. Bir topsa yerden 1 metre yukarıdaki bir düzeyde tutuluyor. Makine bu topu 1 metre aşağıya indirerek üç topu yukarı kaldırabilir. Şimdi, üç topun konacağı kefeyi eşit X aralıklı bir taban ve üstünde iki raf olarak düzenliyoruz ve ayrıca topların durduğu platformun rafları tam olarak X aralıklıdır.



Şekil 4–2 Tersinir bir Makine

(a) Önce topları platform raflarından yatay olarak kefe raflarına yuvarlıyoruz; (b) ve yükseklikler değişmediği için bu işlemin enerji harcamaksızın meydana geldiğini varsayıyoruz. Bu durumda tersinir makine çalışır: Tek topu tabana indirir ve üç toplu kefeyi X yüksekliğine çıkarır, (c). Raflar öylesine zekice düzenlenmişti ki bu toplar şimdi platformlarla aynı düzeydedir. Böylece topları platform raflarına boşaltabiliriz, (d). Topları boşalttıktan sonra, makineyi başlangıç koşuluna getirebiliriz. Artık üst üç rafta üç top ve tabanda bir top vardır. Fakat tuhaf olan, topların ikisinin hiç kaldırılmamış olmasıdır, çünkü her şeye karşın 2. ve 3. raflardaki toplar önce de oradaydılar. Sonuç etki, bir topun 3X kadar yukarı çıkarılmasıdır. 3X yüksekliği 1 metreyi aşarsa, o zaman makinenin başlangıç koşuluna geri getirilmesi için topu daha aşağı indirebiliriz, (f) ve bu serbest enerjiyle düzeneği gene çalıştırırız. Dolayısıyla 3X yüksekliği 1 metreyi aşamaz; çünkü aşarsa, sürekli hareket elde etmiş oluruz. Benzer şekilde, tersinir olan makinenin tersine çalıştırılabilmesi için 1 metrenin de 3X'i aşamayacağını kanıtlayabiliriz. Demek ki 3X, 1 metreden ne daha büyüktür ne de daha küçük; bu durumda sadece akıl yürütmeyle X = 1/3 metre yasasını buluruz. Genelleme bellidir: Bir tersinir makine çalıştığında, 1 kilogramlık ağırlık belli bir yüksekliği iner; bu durumda p kilogramlık ağırlığı bu yükseklik bölü p kadar yukarı kaldırır. Başka bir ifadeyle, 3 kilogram çarpı kaldırılan yükseklik (burada X), 1 kilogram çarpı indirilen yüksekliğe (burada 1 metre) eşittir. Tüm ağırlıkları alalım ve şu anda tabanın üzerindeki yükseklikleriyle çarpalım; sonra makineyi çalıştıralım ve daha sonra gene tüm ağırlıkları yükseklikleriyle çarpalım; hiç değişme olmayacaktır. (Sadece bir ağırlığı hareket ettirdiğimiz örneği, birini indirip birçok değişik ağırlığı kaldırdığımız hale genellemeliyiz; fakat bu kolaydır.)

Ağırlıkların yüksekliklerle çarpılıp toplanmasına kütleçekim potansiyel enerjisi deriz; bu, bir cismin uzayda yeryüzüne göre konumu nedeniyle sahip olduğu enerjidir.

Kütleçekim enerjisinin formülü, yeryüzünden çok yüksekte olmadıkça (çünkü biz yükseldikçe, kuvvet zayıflar) şöyledir:

$$\begin{pmatrix}\text{Bir cisim için}\\ \text{kütleçekim po-}\\ \text{tansiyel enerjisi}\end{pmatrix} = (\text{ağırlık}) \times (\text{yükseklik}). \tag{4.3}$$

Bu çok güzel bir akıl yürütme tarzıdır. Tek sorun belki de doğru olmamasıdır. (Sonunda, doğa bizim akıl yürütmemize uymak zorunda değil.) Örneğin belki de sürekli hareket aslında olanaklıdır. Varsayımlardan bazıları yanlış olabilir, ya da belki biz akıl yürütmede bir hata yaptık; dolayısıyla daima kontrol etmek gerekir. Neyse ki *deneysel olarak her şeyin doğru olduğu* anlaşılmıştır.

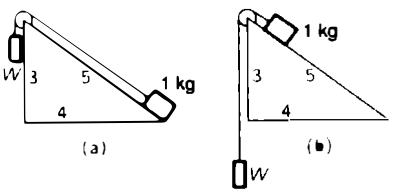
Bir başka şeye göre konuma bağlı olan enerjinin genel adı *potansiyel* enerjidir. Bu özel halde ona, kuşkusuz, *kütleçekimsel potansiyel enerji* deriz. Kütleçekim kuvvetleri yerine elektrik kuvvetlerine karşı iş yapıyorsak, diğer bir deyişle bazı elektrik yüklerine karşı bir dizi kaldıraçla elektrik yükleri "kaldırıyor"sak, o zaman enerji içeriğine *elektriksel potansiyel enerji* denir. Genel ilke şudur: Enerjideki değişim, kuvvet çarpı kuvvetin uygulandığı uzaklıktır; bu, genelde enerjideki değişmedir:

$$\begin{pmatrix}\text{enerjideki}\\ \text{değişim}\end{pmatrix} = (\text{kuvvet}) \times \begin{pmatrix}\text{kuvvetin uygu-}\\ \text{landığı mesafe}\end{pmatrix}. \tag{4.4}$$

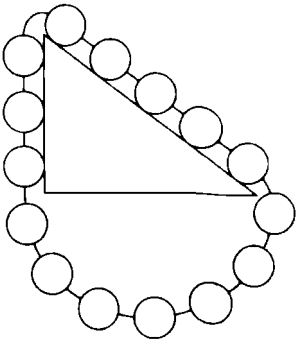
Derslerimiz boyunca, yeri geldikçe, diğer enerji türlerinin birçoğuna geri döneceğiz.

Enerjinin korunumu ilkesi, birçok durumda neler olacağı konusunda çıkarımlarda bulunmak açısından çok yararlıdır. Lisede makaralar ve kaldıraçlar hakkında farklı biçimlerde kullanılan bir yığın yasa öğrendik. Şimdi bu "yasalar"ın *tü-*

münün aynı şey olduğunu ve onu çözmek için 75 tane kuralı ezberlememiz gerekmediğini anlıyoruz. Basit bir örnek, üç-dört-beş üçgeni şeklindeki düzgün eğik düzlemdir (Şekil 4–3). Eğik düzlem üzerine bir makarayla 1 kilogramlık bir ağırlık ve makaranın diğer yanına bir W ağırlığı asıyoruz. Düzlem üzerindeki 1 kiloluk ağırlığı dengelemek için W ağırlığının ne olması gerektiğini bilmek istiyoruz. Bunu nasıl hesaplayabiliriz? Tam dengede olmasını istiyorsak, tersinir olacaktır ve bu durumda aşağı yukarı hareket edebilir. Şu durumu ele alabiliriz: Başlangıç halinde, (a), 1 kiloluk ağırlık dipte ve W ağırlığı tepededir. W tersinir bir şekilde aşağı kaydığında, 1 kiloluk ağırlık tepeye çıkar, W ağırlığıysa tepeden eğik düzlemin uzunluğu kadar, 5 m aşağıdadır, (b). 1 kiloluk ağırlığı sadece 3 m *kaldırdık*, W ağırlığınıysa 5 m indirdik. Dolayısıyla W = 3/5 kilogramdır. Dikkat ederseniz, bunu kuvvet bileşenlerinden değil de, enerjinin korunumundan çıkardık. Bununla birlikte, maharet de görecelidir. Bu sonuç, Hollandalı matematikçi Simon Stevinus'un bulduğu ve mezar taşında da betimlendiği gibi, daha da parlak bir tarzda çıkarılabilir. Şekil 4–4 bunun 3/5 kilo olması gerektiğini açıklıyor; çünkü alttaki yedi ağırıklı zincir parçası kendisini dengeler, öyle ki bir yanda beş ağırlığın çekişi diğer yandaki üç ağırlığın çekişini –ya da yan kenarların oranı neyse onu– dengelemelidir. Diyagrama bakarak, W'nun 3/5 kilogram olması gerektiğini görürsünüz. (Mezar taşınıza böyle bir yazıt konsa, fena mı olur!)

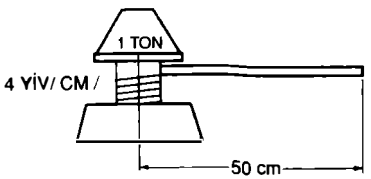


Şekil 4–3 Eğik Düzlem



Şekil 4–4 Stevinus'un mezar yazıtı

Şimdi de enerji ilkesini çok daha karmaşık bir problemle, Şekil 4–5'de görülen vidalı krikoyla açıklayalım. Santimetre başına 4 yivi bulunan vidayı döndürmek için 50 cm uzunluğunda bir kol kullanılmaktadır. Bir tonu kaldırmak için kola ne kadar kuvvet uygulamak gerekir? Bir tonu diyelim ki 2,5 cm yukarı kaldırmak istiyoruz, o zaman kolu on kez döndürmeliyiz. Kol bir kez döndüğünde, kuvvetin uygulanma noktası (kolun ucu) yaklaşık 315 cm yol alır. Buna göre, kol 3150 cm yol almalıdır. Eğer çeşitli makaralar vb gibi şeyler kullanırsak, kolun ucuna bilinmeyen küçük bir W ağırlığı uygulayarak bu bir tonu kaldırabiliriz. Böylece W'nun 0,8 kilogram kadar olduğunu buluruz. Bu, enerjinin korunumunun bir sonucudur.

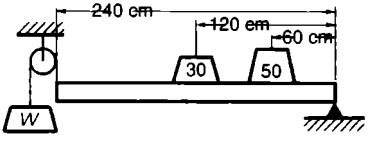


Şekil 4–5 Vidalı kriko

Şimdi Şekil 4–6'da görülen biraz daha karmaşık bir örneği ele alalım. 240 cm uzunluğunda bir demir çubuk bir ucundan desteklenmiştir. Çubuğun ortasında 30 kg'lık bir yük vardır, destekten 60 cm öteye de 50 kg'lık ikinci bir yük konmuştur. Çubuğun ağırlığını göz ardı edersek, sistemi diğer uçtan dengede tutabilmek için ne kadar zorlanırız? Bu uca bir makara koyduğumuzu ve makaraya bir ağırlık astığımızı düşününüz; denge için bu W ağırlığı ne büyüklükte olmalıdır? W ağırlığı herhangi keyfi bir uzaklık kadar –işimizi kolaylaştırmak için, diyelim ki 10 cm– düşürülsün. Çubuğun üzerindeki yükler ne kadar yükselirler? Merkez 5 cm yükselir; destekten bir çeyrek ötedeki yükse 2,5 cm yukarı kalkar. Dolayısıyla yükseklikler ile ağırlıkların çarpımlarının toplamının değişmediğini söyleyen ilkeye göre, W ağırlığı kere 10 cm aşağı, artı 30 kg kere 5 cm yukarı, artı 50 kg kere 2,5 cm yukarı, sıfıra eşit olmalıdır:

$$-(10)(W) + (5)(30) + (2,5)(50) = 0, \qquad W = 27,5 \text{ kg} \tag{4.5}$$

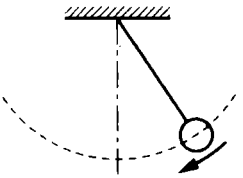
Böylece çubuğu dengelemek için 27,5 kg'lık bir kuvvet uygulamalıyız. "Denge" yasalarını –karmaşık köprü düzenlemeleri ve benzeri şeylerin statiğini– bu şekilde hesaplayabiliriz. Bu yaklaşıma *sanal iş ilkesi* denir; çünkü bu tartışmayı uygulayabilmek için yapının birazcık hareket ettiğini düşünmeliyiz; gerçekte *hareket etmese* ya da *edemese bile*. Evet, enerjinin korunumu ilkesini uygulamak için, çok küçük bir hayalî hareket kullanırız.



Şekil 4–6 Bir ucundan destekli ağırlık yüklü çubuk

Kinetik Enerji

Bir başka enerji türünü açıklamak için bir sarkacı ele alalım (Şekil 4–7). Kütleyi yana çekip bırakırsak sarkaç ileri geri sallanır. Hareketi esnasında her bir uçtan merkeze gelirken yükseklik kaybeder. Acaba potansiyel enerji nereye gider? En dibe geldiğinde kütleçekim enerjisi yok olur; bununla birlikte tekrar yukarı tırmanacaktır. Öyleyse kütleçekim enerjisi bir başka biçime dönüşmüş olmalıdır. Hareketi nedeniyle tekrar yukarıya tırmanabildiği açıktır; böylece en dibe ulaştığında, kütleçekim enerjisinin bir başka biçime dönüştüğünü anlarız.



Şekil 4–7 Basit sarkaç

Hareket enerjisi için bir formül elde etmeliyiz. Şimdi, tersinir makinelerle ilgili savlarımızı anımsayarak, en dipteki harekette sarkaç kütlesinin belli bir yüksekliğe çıkmasını sağlayacak, yukarı çıkma mekanizması ya da yukarı çıkma yoluyla ilgisi olmayan, bir enerji niceliğinin var olması gerektiğini kolayca anlayabiliriz. Böylece Deniz'in blokları için yazdığımız formüle benzeyen bir eşdeğerlik formülü yazabiliriz. Enerjiyi betimlemek için bir başka biçime sahibiz. Onun ne olduğunu söylemek kolaydır. En dipteki kinetik enerji, ağırlık çarpı hızına bağlı olarak çıkabileceği yüksekliktir: K.E. = W H. Gerek duyduğumuz şeyse, cisimlerin hareketiyle ilgili yüksekliği bir kurala göre bize söyleyecek olan bir formüldür. Önce belli bir hızla, diyelim ki dimdik yukarı doğru hareket edilirse, belli bir yüksekliğe varılır; henüz onun ne olduğunu bilmiyoruz, fakat hıza bağlıdır; bunun için bir formül var.

V hızıyla hareket eden bir cismin kinetik enerji formülünü bulmak için, ulaşabileceği yüksekliği hesaplamalı ve bunu ağırlıkla çarpmalıyız. Bunu aşağıdaki gibi yazabileceğimizi çok yakında bulacağız:

$$K.E. = W V^2 / 2 g \qquad (4.6)$$

Kuşkusuz, hareketin enerjiye sahip oluşunun, kütleçekim alanı içinde bulunuşumuzla bir ilgisi yoktur. Hareketin *nereden* kaynaklandığı hiç fark etmez. Bu, çeşitli hızlar için genel bir formüldür. (4.3) ve (4.6)'nın ikisi de yaklaşık formüllerdir; yükseklikler çok büyük olduğunda, diğer bir deyişle kütleçekimin zayıfladığı yüksekliklerde birinci formül yanlıştır; ikincisiyse yüksek hızlarda göreli düzeltmeler nedeniyle doğru değildir. Bununla birlikte, en sonunda enerjilerin doğru formüllerini bulduğumuz zaman, enerjinin korunumu yasası gene doğru çıkar.

Diğer Enerji Biçimleri

Diğer enerji biçimlerinin varlığını örneklerle açıklamayı bu şekilde sürdürebiliriz. Önce esneklik enerjisini ele alalım. Bir yayı aşağı çekersek, bir iş yapmış oluruz; çünkü o aşağıdayken, onunla ağırlık kaldırabiliriz. Dolayısıyla gergin durumunda iş yapma olanağına sahiptir. Yüksekliklerle ağırlıkların çarpımlarının toplamını hesaplasaydık, sonuç doğru çıkmazdı; yayın gergin olduğunu hesaba katacak bir şey daha eklemeliyiz. Esneklik enerjisi, yayın gerginliği için bir formüldür. Bu enerji ne kadardır? Yayı bırakırsak, yay denge konumundan geçerken esneklik enerjisi kinetik enerjiye dönüşür ve böylece enerji yayın sıkışması ya da gerilmesi ile hareketin kinetik enerjisi arasında gidip gelir. (Ayrıca girip çıkan bir kütleçekim enerjisi de vardır; fakat bu katkıyı istemezsek, deneyi "yanlamasına" yapabiliriz.) Bu gidiş-geliş tamamen duruncaya kadar sürer. Aha! Sistemi hareket ettirmek için küçücük ağırlıklar koyun ya da makineler tersinirdir ya

da sonsuza kadar çalışırlar denerek tamamen kandırıldık; görüyoruz ki sonunda sistemler duruyorlar. Peki, yayın aşağı yukarı salınma hareketi sona erdiğinde, enerjiye ne oluyor? Bu, bir başka enerji biçimini sahneye sokar: *ısı enerjisi.*

Bir yay ya da kaldıracın içinde çok sayıda atomdan oluşmuş kristaller vardır; ve bir düzeneği kurarken parçaların düzenlenmesini büyük bir özen ve titizlik içinde öyle ayarlamaya çalışırız ki, bir şeyi başka bir şey üzerinden yuvarlarken atomların hiçbiri hiç kıpırdamasın. Fakat çok dikkatli olunmalıdır. Genellikle nesneler yuvarlandıklarında, malzemedeki düzensizlikler nedeniyle çarpmalar ve sallanmalar olur ve içerde atomlar kıpırdamaya başlar. Böylece bu enerjinin izini yitiririz; hareket yavaşladıktan sonra atomları içeride rastgele ve karışık biçimde salınır halde buluruz. Bu gene kinetik enerjidir; tamam da, görünür hareketle ilgili değildir. Ne hayal ama! Bunun hâlâ kinetik enerji olduğunu nasıl biliyoruz? Sonunda, termometreyle yayın ya da kaldıracın aslında *daha sıcak* olduğunu, kinetik enerjide belirli bir miktar artma meydana geldiğini anlayabilirsiniz. Bu enerji biçimine *ısı enerjisi* diyoruz; fakat onun aslında yeni bir enerji biçimi olmadığını, sadece kinetik enerji –iç hareket– olduğunu biliyoruz. (Büyük ölçekteki maddeyle yaptığımız tüm bu deneylerin güçlüklerinden biri, onlarda enerjinin korunumunu sahiden gösterememiz ve tersinir makineler yapamamamızdır; çünkü her seferinde koca koca madde yığınlarını harekete geçiriyoruz, atomlar kesinlikle rahatsız ediliyorlar ve böylece atomik sisteme belirli bir miktarda rastgele hareket verilmiş oluyor. Bunu göremiyoruz, fakat termometrelerle ve benzeri şeylerle onu ölçebiliyoruz.)

Enerjinin birçok başka biçimi vardır; ama onları elbette şu anda ayrıntılı olarak betimleyemeyiz. Elektrik yüklerinin itme ve çekmesiyle ilgili elektriksel enerji vardır. Işıma enerjisi, ışık enerjisi vardır; bunun bir elektriksel enerji biçimi olduğunu biliyoruz, çünkü ışık, elektromanyetik alandaki titreşimler olarak temsil edilebilir. Kimyasal enerji, kimyasal tepkimelerde salınan enerjidir. Aslında esneklik enerjisi,

bir dereceye kadar, kimyasal enerji gibidir; çünkü kimyasal enerji atomların birbirlerini çekme enerjisidir ve bu nedenle esneklik enerjisidir. Çağdaş kavrayışımız şöyledir: Kimyasal enerji iki kısma sahiptir; atomların içindeki elektronların kinetik enerjisi ve elektronlarla protonların etkileşmesinin elektriksel enerjisi; böylece bir kısmı kinetik ve kalanı elektrikseldir. Şimdi de çekirdeğin içindeki parçacıkların düzenlenmesiyle ilgili nükleer enerjiye geliyoruz; bunun için formüllerimiz var, fakat temel yasalara sahip değiliz. Elektriksel olmadığını, kütleçekimsel olmadığını, saf kimyasal olmadığını biliyoruz; fakat ne olduğunu bilmiyoruz. Sanki ek bir enerji biçimiymiş gibi görünüyor. Nihayet, görelilik kuramıyla ilişkili olan kinetik enerji –ya da ne isterseniz, deyin– yasalarının değiştirilişi vardır; öyle ki kinetik enerji, kütle enerjisi denen bir başka terimle birleştirilir. Bir cisim sırf varlığından ötürü enerjiye sahiptir. Eğer hiçbir şey yapmayıp duran –kütleçekimini boş verin, her şeyi boş verin– bir pozitrona ve bir elektrona sahipsem, onlar bir araya gelip yok olurlar ve belirli bir miktar ışıma enerjisi açığa çıkar; bu miktar hesaplanabilir. Tek bilmemiz gereken cismin kütlesidir. Ne olduğuna bağlı değildir; iki şey yok olur ve belirli bir miktar enerji çıkar. İlk kez Einstein tarafından bulunmuş olan $E = m\,c^2$ eşitliğidir.

Biraz önce birkaç örneği tartışırken tüm formülleri bilmeksizin çözümlemeler yapmada enerjinin korunumu yasasının müthiş yararlı olduğunu açıkça gördük. Tüm enerji biçimlerinin formüllerini bilseydik, ayrıntılara girmeksizin, kaç sürecin çalıştığını çözümlerdik. Dolayısıyla korunum yasaları çok ilginçtir. Fizikteki diğer korunum yasalarının neler oldukları sorusu buradan doğal olarak önümüze gelir. Enerjinin korunumuna benzeyen iki korunum yasası daha vardır. Bunların biri çizgisel momentumun korunumudur; diğeriyse açısal momentumun korunumu. Bunlar hakkında daha sonra çok şey öğreneceğiz. Son çözümlemede, korunum yasalarını derinlemesine anlamış değiliz. Enerjinin korunumunu tam anlamadık. Enerjiyi, belli sayıda küçük topaklar

şeklinde anlayamadık. Belki duymuşsunuzdur, fotonlar topaklar halinde yayınlanır ve bir fotonun enerjisi Planck sabiti çarpı frekanstır. Bu doğru, fakat ışığın frekansı her değerde olabileceğinden, enerjinin tam belli bir miktarda olması gerektiğini söyleyen bir yasa yoktur. Deniz'in bloklarından farklı olarak, enerji herhangi bir miktarda var olabilir; en azından şimdilik anladığımız kadarıyla. Böylece bu enerjiyi şu an için bir şeyleri sayarak değil de, soyut ve oldukça tuhaf bir durum, sırf matematiksel bir nicelik olarak anlıyoruz. Kuantum mekaniğinde, enerjinin korunumu dünyanın önemli başka bir özelliğiyle yakından ilişkilidir: *Hiçbir şey mutlak zamana bağlı değildir.* Verilen bir anda bir deney kurup deneyi yaparız ve sonra aynı deneyi başka bir anda tekrarlarız; tam olarak aynı sonuçları buluruz. Bu kesin olarak doğru mudur değil midir, onu bilmiyoruz. *Doğru* olduğunu varsayar ve kuantum mekaniğinin ilkelerini eklersek, enerjinin korunumu ilkesini elde ederiz. Bu oldukça incelikli ve ilginç bir şeydir; açıklanması da hiç kolay değildir. Diğer korunum yasaları da birbirine bağlanır. Momentumun korunumu kuantum mekaniğinde, "deneyi nerede yaptığınızın önemi yoktur, sonuçlar daima aynı çıkacaktır" önermesiyle ilişkilidir. Uzaydan bağımsızlık momentumun korunumuyla ve zamandan bağımsızlık enerjinin korunumuyla ilişkili olduğu gibi, son olarak, düzeneğimizi döndürdüğümüzde, bu da hiç fark yaratmaz; böylece açısal yönelmeye göre dünyanın değişmezliği de açısal momentumun korunumuyla ilişkilidir. Bunların yanı sıra, üç korunum yasası daha vardır ki, bugün söyleyebildiğimiz kadarıyla, bunlar tam olarak korunmakta olup blokların sayımı niteliğinde olduklarından, anlaşılmaları da çok daha kolaydır.

Bu üç yasanın ilki, yükün korunumudur; tek yapacağınız şey, sahip olduğunuz artı elektrik yüklerini saymak ve bu sayıdan eksi yükleri çıkarmaktır; bu sayı asla değişmez. Bir eksi yükle bir artıdan kurtulabilirsiniz, fakat eksilerden daha fazla net artı yük üretemezsiniz. Diğer iki yasa buna benzemektedir; biri baryonların korunumudur. Çok sayıda

acayip parçacık vardır; baryonlar dediğimiz nötron ve proton bunlara birer örnektir. Doğası ne olursa olsun her tepkimede, tepkimeye giren kaç baryon sayarsanız, çıkan baryonların sayısı da gene aynı olacaktır.[2] Leptonların korunumu denen bir başka yasa daha vardır. Lepton olarak adlandırılan parçacıklar grubunun elektron, mü-mezon ve nötrino olduğunu söyleyebiliriz. Karşı-elektrona pozitron denir; karşı-leptonlar –1 lepton olarak sayılırlar. Bir tepkimeye giren ve çıkan leptonların toplam sayısı, şimdi bildiğimiz kadarıyla, asla değişmemektedir.

Demek ki altı korunum yasası vardır; bunların üçü derin anlamlı olup uzay ve zamanı içerirler; diğer üçüyse basit olup bir şeyi sayma anlamındadır.

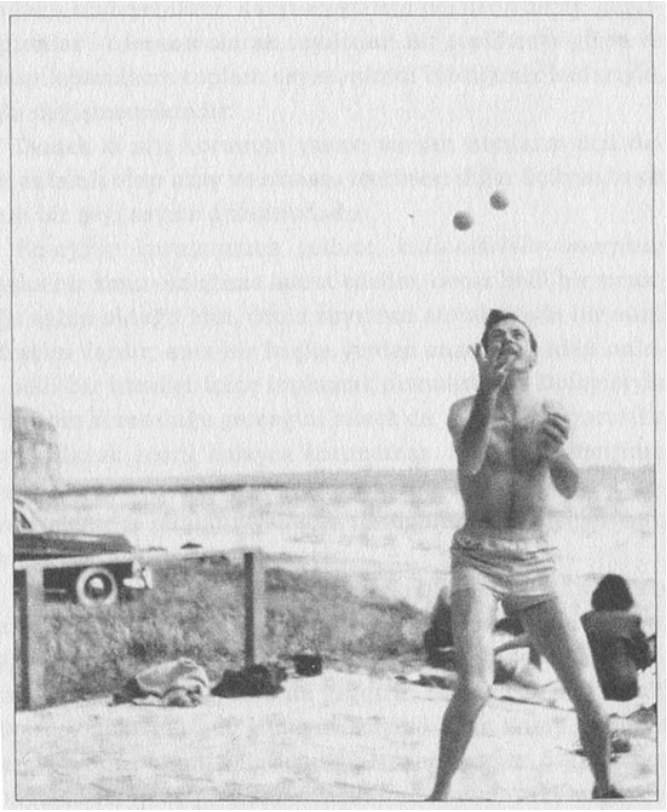
Enerjinin korunumuna gelince, *kullanılabilir enerji*nin başka bir konu olduğuna işaret edelim: deniz belli bir sıcaklığa sahip olduğu için, deniz suyunun atomlarında bir sürü titreşim vardır; ama bir başka yerden enerji almadan onları belli bir hareket içine toplamak olanaksızdır. Dolayısıyla enerjinin korunduğu gerçeğini bilsek de, insanların yararına kullanılacak enerji kolayca korunamaz. Ne kadar enerjinin işe yarayışlı olduğunu yöneten yasalara *termodinamik yasaları* denir ve bunlar tersinmez termodinamik süreçleri için entropi denen bir kavram içerir.

Son olarak, bugün enerji gereksinimlerimizi nereden karşılayabiliriz sorusuna değinelim. Biz enerjiyi güneşten, yağmurdan, kömürden, uranyumdan ve hidrojenden sağlamaktayız. Güneş yağmuru da yağdırır, kömürü de oluşturur; böylece bunların tümü güneşten kaynaklanır. Enerji korunsa da, doğanın bununla ilgilendiğini sanmıyoruz; o güneşten çok fazla enerji açığa çıkarır, fakat bunun ancak iki milyarda biri yerküremize düşer. Uranyumdan zaten enerji elde ettik; hidrojenden de elde edebiliriz; fakat şimdilik bunu sadece infilâk edici, tehlikeli bir durumda yapabiliyoruz. Eğer bunu termonükleer tepkimelerde kontrol edebilirsek, 10 litre su-

---

[2] Karşı-baryonlar, -1 baryon olarak hesaba katılırlar.

dan saniyede elde edilebilecek enerji, Amerika Birleşik Devletlerinde üretilen elektrik gücünün tümüne eşit olur. Dakikada 600 litre içme suyuyla, bugün ABD'de kullanılan tüm enerjiyi sağlayacak yakıta sahip olursunuz! Bu nedenle, bizi enerji sıkıntısından kurtarma yolunu arayıp bulmak fizikçiye kalmıştır. Bu yapılabilir.



5

KÜTLEÇEKİM KURAMI

Gezegen Hareketleri

Bu bölümde insan aklının en kapsamlı genellemelerinden birini tartışacağız. İnsan aklına hayran kaldığımız halde, kütleçekim yasası gibi bu denli mükemmel bir basit ilkeyi böylesine tamlık ve genellik içinde verebilen doğaya karşı epey bir süre huşu duymalıyız. Bu kütleçekim yasası nedir? Bu yasaya göre, evrende her cisim bir başka cismi, her birinin kütlesiyle orantılı ve aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılı olan bir kuvvetle çeker. Bunu matematiksel olarak şu denklemle ifade ederiz:

$$F = G\frac{mm'}{r^2}.$$

Buna "bir cisim, bir kuvvete, kuvvetin yönünde ve cismin kütlesiyle ters orantılı bir ivmeyle cevap verir" olgusunu eklersek, gerekli her şeyi söylemiş oluruz; çünkü bu durumda yeterince kabiliyetli bir matematikçi bu iki ilkeden tüm sonuçları çıkarabilir. Gene de, henüz yeterince becerikli olduğunuz varsayılmadığı için, sonuçları daha ayrıntılı olarak tartışacağız ve sizi sadece bu iki çıplak ilkeyle baş başa bırakmayacağız. Kütleçekim yasasının keşfedilme öyküsünü

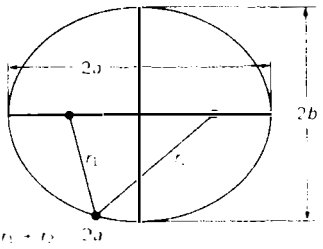
kısaca anlatacağız ve onun bazı sonuçlarını, tarihteki etkilerini, böyle bir yasanın neden olduğu gizemleri ve yasada Einstein tarafından yapılmış olan arıtmaları tartışacağız; yasanın diğer fizik yasalarıyla ilişkilerini de tartışacağız. Bunların tümü bir bölümde yapılamaz, fakat bu konular zamanı geldikçe ileriki bölümlerde ele alınacaktır.

Öykü, yıldızların arasında gezegenlerin hareketlerini gözetleyen eski çağ insanlarıyla başlar ve en sonunda onların güneş etrafında gezindikleri sonucunu çıkarırlar; bu, daha sonra Kopernik tarafından yeniden keşfedilmiş bir olgudur. Gezegenlerin güneşin çevresinde tam olarak nasıl gezindiklerinin, tam olarak nasıl bir yörünge çizdiklerinin keşfi biraz daha fazla çalışma gerektirmişti. On beşinci yüzyılın başlarında, gezegenlerin gerçekten de güneşin çevresinde dönüp dönmedikleri konusunda büyük tartışmalar olmuştu. Tycho Brahe, eski çağ insanlarının önerdiklerinden farklı bir fikre sahipti: Onun düşüncesine göre, gezegenlerin hareketlerinin doğası hakkındaki bu tartışmalar, gezegenlerin gökyüzündeki gerçek konumları yeterince doğru olarak ölçülürse, en iyi şekilde karara bağlanabilirdi. Ölçümler gezegenlerin tam olarak nasıl hareket ettiklerini gösterse, belki o zaman bu görüşü ya da diğerini onaylamak mümkün olabilirdi. Bu müthiş bir düşünceydi: bir şeyi öğrenmek için, derin felsefî tartışmaları sürdürmek yerine, bazı dikkatli deneyler yapmak çok daha iyidir. Bu düşünce doğrultusunda, Tycho Brahe, Kopenhag yakınlarındaki Hven adasında bulunan kendi gözlemevinde yıllarca gezegenlerin konumlarını incelemiş ve ciltler dolusu tablolar hazırlamıştı. Ancak Tycho'nun ölümünden sonra, matematikçi Kepler bu tabloları inceleyip, bu verilerden gezegen hareketleriyle ilgili bazı çok güzel ve önemli, basit yasalar keşfetmişti.

Kepler Yasaları

Her şeyden önce, Kepler, her gezegenin güneş etrafında, odaklarından birinde güneşin bulunduğu, elips denen bir eğri

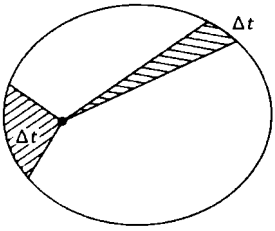
üzerinde gezindiğini bulmuştu. Elips sadece oval bir şekil değildir, çok özel ve kesin bir eğridir: Her biri bir odakta olmak üzere iki çivi, bir halka ip ve bir kalemle çizilebilir; daha matematiksel bir deyişle, elips, tespit edilmiş iki noktadan (odaklar) uzaklıklarının toplamı bir sabite eşit olan noktaların geometrik yeridir. Ya da, isterseniz, basık bir çemberdir de diyebilirsiniz (Şekil 5–1).



Şekil 5–1 Elips

Kepler'in ikinci gözlemi şuydu: Gezegenler güneş etrafında düzgün bir hızla gezinmezler; fakat güneşe yakınken daha hızlı, uzakken daha yavaş hareket ederler. Kesin olarak şöyle: Bir gezegenin herhangi iki ardışık zamanda, diyelim ki bir hafta arayla, gözlendiğini ve her gözlendiği konumda gezegene bir yarıçap vektörünün[1] çizildiğini varsayalım. Bir haftalık sürede gezegen tarafından gidilen yörüngesel yay ve iki yarıçap vektörü belirli bir düzlemsel alanı sınırlandırır (Şekil 5–2'de görülen taralı alan). Yörüngenin güneşten çok uzak bir parçasında (orada gezegen daha yavaş hareket eder) gene bir hafta aralıkla benzer iki gözlem yapılırsa, benzer sınırlanmış alan birincisiyle tam olarak aynıdır. Böylece ikinci yasayla uyum içinde, her gezegenin yörünge hızı öyledir ki yarıçap eşit zamanlarda eşit alanlar "süpürür."

[1] Yarıçap vektörü, güneşten gezegenin yörüngesi üzerindeki herhangi bir noktaya çizilen yönlü bir düz çizgidir.



Şekil 5-2 Kepler'in alanlar yasası.

Son olarak, üçüncü yasa Kepler tarafından çok sonra keşfedilmişti; bu yasa, diğer iki yasadan farklı bir kategoridendir; çünkü sadece bir tek gezegenle ilgilenmeyip bir gezegeni diğerine bağlar. Bu yasa, herhangi iki gezegenin yörüngesel periyotları ve yörünge boyutları karşılaştırıldığında, periyotların yörünge boyutunun 3/2'nci kuvvetiyle orantılı olduğunu söyler. Bu ifadede periyot, gezegenin yörüngesinde bir tam tur attığında geçen zaman aralığıdır ve yörünge boyutuysa eliptik yörüngenin en büyük çapının (teknik olarak büyük eksen diye bilinir) uzunluğuyla ölçülür. Daha basit haliyle, eğer gezegenler çemberler üzerinde dolansaydı, ki hemen hemen öyle yaparlar, çemberi dolanmak için gereken zaman, çapın (ya da yarıçapın) 3/2'nci kuvvetiyle orantılı olurdu. Dolayısıyla Kepler'in üç yasası şunlardır:

I. Her gezegen, bir odağında güneş olmak üzere, güneş etrafında bir elips üzerinde döner.
II. Güneşten gezegene uzanan yarıçap vektörü, eşit zaman aralıklarında eşit alanlar süpürür.
III. Herhangi iki gezegenin periyotlarının kareleri, onların yörüngelerinin yarı-büyük-eksenlerinin küpleriyle orantılıdır:

$$T \sim a^{3/2}$$

Dinamiğin Geliştirilmesi

Kepler bu yasaları keşfederken, Galileo hareket yasalarını inceliyordu. Problem, gezegenleri neyin döndürdüğü idi. (O günlerde, önerilmiş olan kuramlardan biri şuydu: Gezegenlerin dönmelerinin nedeni, gezegenlerin arkalarında kanatlarını çırptıkça onları ileri doğru süren görünmeyen meleklerin bulunmasıydı. Bu kuramın şimdi düzeltildiğini göreceksiniz! Gezegenleri döner durumda tutmak için, görünmeyen meleklerin farklı bir yönde uçmaları gerektiği ve onların kanatlarının olmadığı anlaşılmıştır. Yoksa, o bir bakıma benzer bir kuramdır!) Galileo bu yasaları anlamak için can alıcı bir şeyi, hareket hakkında çok dikkat çekici bir gerçeği keşfetmişti. Bu, eylemsizlik ilkesidir: Bir nesne hareket ediyorsa, ona hiçbir şey dokunmadıkça, o hiç rahatsız edilmedikçe, bir düz çizgi boyunca düzgün bir hızda seyrederek sonsuza dek gidecektir. (Niçin öyle seyretmeyi sürdürür? Bilmiyoruz, fakat o böyledir.)

Newton, 'bir cismin hareketini değiştirmenin tek yolu, kuvvet kullanmaktır' diyerek bu düşünceyi düzeltmişti. Cisim hızlanırsa, hareketin yönünde bir kuvvet uygulanmıştır. Diğer yandan, cismin hareketi yeni bir yöne doğru değişmişse, yanlamasına bir kuvvet uygulanmıştır. Newton böylece bir cismin hızını ya da hareket doğrultusunu değiştirmek için kuvvet gerekir düşüncesini eklemişti. Örneğin bir ipe bir taş bağlar ve onu bir çember üzerinde çevirirsek, taşı çember üzerinde tutmak için bir kuvvet harcanır. İpi çekmemiz gerekir. Aslında, yasa şudur: Kuvvet tarafından üretilen ivme, kütleyle ters orantılıdır, ya da, kuvvet, kütle çarpı ivmeyle orantılıdır. Daha ağır bir cisme belli bir ivme vermek için daha şiddetli bir kuvvet gerekir. (Aynı ipin ucuna başka taşlar koyup onları aynı çemberde aynı hızla döndürerek kütleyi ölçebilirsiniz. Bu şekilde çok ya da az kuvvet gerektiğini hisseder, daha ağır cisim için daha büyük bir kuvvet gerektiğini bulursunuz.) Bu incelemelerden çıkan parlak düşünce, bir gezegeni yörüngede tutmak için teğet kuvvete gerek

olmadığıdır (melekler teğet olarak uçmamalıdırlar), çünkü gezegen yine de o doğrultuda gidecektir. Onu tedirgin edecek hiçbir şey olmasaydı, gezegen bir düz çizgi boyunca giderdi. Fakat gerçek hareket, hiçbir kuvvetin olmaması halinde cismin gideceği düz çizgiden sapar ve bu sapma esas olarak harekete dik açılarda olur, hareket doğrultusunda değil. Bir başka deyişle, eylemsizlik ilkesi nedeniyle gezegenin güneş etrafındaki hareketini kontrol etmek için gereken kuvvet, güneş etrafında değil de güneşe doğrudur. (Güneşe doğru bir kuvvet varsa, kuşkusuz, güneş bir melek olurdu!)

Newton'un Kütleçekim Yasası

Hareket kuramını daha iyi anlamış olarak, Newton, gezegenlerin hareketini yöneten kuvvetlerin yerinin ya da örgütünün güneş olabileceğini fark etmişti. Newton, 'eşit zamanlarda eşit alanlar süpürülür' gerçeğinin 'tüm sapmalar kesinlikle yarıçap doğrultusundadır' önermesinin kesin bir kanıtı olduğunu kendi kendisine ispatlamıştı (belki biz de yakında bunu kanıtlayabileceğiz); alanlar yasası, tüm kuvvetlerin tam olarak güneşe doğru yöneldiği düşüncesinin doğrudan sonucudur.

Bir sonra, Kepler'in üçüncü yasasını çözümleyerek, gezegen ne kadar çok uzaktaysa kuvvetin de o denli zayıfladığını göstermek mümkündür. Güneşten farklı uzaklıklarda bulunan iki gezegen karşılaştırılarak yapılan çözümleme, kuvvetlerin, uzaklıkların kareleriyle ters orantılı olduklarını gösterecektir. İki yasanın birleştirilmesiyle, Newton, iki cisim arasında, aradaki uzaklığın karesiyle ters orantılı ve cisimleri birleştiren doğru boyunca yönelmiş bir kuvvet olmalıdır sonucuna varmıştı.

Genellemeleri iyi hisseden biri olarak, Newton, kuşkusuz bu bağıntının sadece gezegenleri tutan güneşe değil de daha genel olarak uygulanabileceğini varsaymıştı. O zamanlar, dünyanın etrafında dolanan ayı gibi, örneğin Jüpiter gezegeninin de etrafında dolanan ayları olduğu zaten biliniyordu

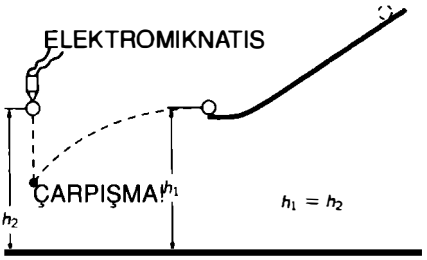
ve Newton her gezegenin kendi aylarını bir kuvvetle tuttuğundan emindi. Bizi yer üzerinde tutan kuvvetten zaten haberdardı; bu nedenle, bunun evrensel bir kuvvet olduğunu –her şeyin her şeyi çektiğini – önerdi.

Bir sonraki problem, dünya üzerindeki insanları çekmesiyle aydaki çekmenin "aynı" olup olmaması, dolayısıyla uzaklığın karesiyle ters orantılı olup olmamasıydı. Yeryüzünde bir cisim durgun halden bırakıldıktan sonra ilk saniyede 4,9 metre düşerse, aynı sürede ay dünyaya doğru ne kadar düşer? Ay hiç düşmez diyebiliriz. Fakat aya etkiyen bir kuvvet olmasaydı, bir düz çizgi boyunca giderdi; oysa ay bir çember üzerinde seyretmektedir. Demek ki aslında hiç kuvvet olmasaydı bulunacağı yerden düşer. Ayın yörüngesinin yarıçapından (yaklaşık 384.000 km kadar) ve dünyanın etrafında bir tam turunda geçen zamandan (yaklaşık 29 gün), ayın yörüngesi üzerinde bir saniyede ne kadar hareket ettiğini ve sonra bir saniyede dünyaya doğru ne kadar düştüğünü hesaplayabiliriz.[2] Bu mesafe, kabaca 1 santimetrenin 1/7 'sidir. Bu değer, ters kare yasasıyla çok iyi uyuşur; çünkü dünyanın yarıçapı yaklaşık 6400 km'dir ve dünyanın merkezinden 6400 km uzaktaki bir nesne bir saniyede 4,9 metre düştüğüne göre, 384.000 km ya da 60 kat daha uzaktaki bir nesne 4,9 metrenin sadece $1/(60)^2 = 1/3600$ kesrini düşer, ki bu da 1 santimetrenin 1/7'si eder. Bu kütleçekim kuramını benzer hesaplamalarla sınamak isteyen Newton, hesaplarını çok dikkatli yapmış ve öyle büyük bir çelişki bulmuştu ki kuramın gerçeklerle bağdaşmadığını düşünmüş ve sonuçları yayınlamamıştı. Altı yıl sonra dünyanın boyutunun yeni bir ölçümü, astronomların aya olan uzaklık için yanlış bir değer kullandıklarını göstermişti. Newton bunu duyduğunda, hesabını düzeltilmiş sayılarla yeniden yapmış ve güzel bir uyuşma elde etmişti.

---

[2] Dolayısıyla ayın yörünge çemberinin, ayın bir saniye önce bulunduğu noktada ona teğet olan düz çizginin ne kadar altına düştüğünü hesaplarız.

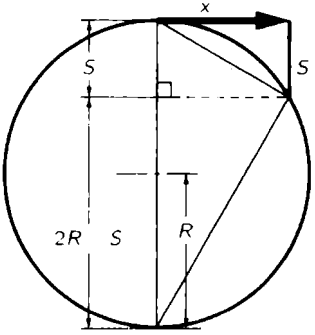
Ayın "düşmesi" fikri biraz yanıltıcıdır; çünkü göreceğiniz gibi, o daha yakına gelmez. Bu fikir daha fazla yorumu hak edecek kadar ilginçtir: kuvvetler olmasaydı, izleyeceği düz çizgiden ayrılma anlamında düşer ay. Dünyanın yüzeyinde bir örnek alalım. Yeryüzünün yakınında bırakılan bir cisim ilk saniyede 4,9 metre düşecektir. Yatay olarak atılan bir cisim de 4,9 metre düşecektir; yatay olarak hareket ettiği halde, aynı sürede yine aynı 4,9 metre düşer. Şekil 5–3'te bu deneyin yapıldığı bir düzenek görülüyor. Yatay ray üzerindeki top, kısa bir mesafe ileriye doğru sürülecektir. Aynı yükseklikte duran bir topsa düşey olarak düşecektir. Bir elektrik anahtarı öyle düzenlenmiştir ki ilk top rayı terk ettiği anda ikinci top bırakılır. Topların havada çarpışmaları olayı, onların aynı zamanda aynı derinliğe geldiklerine tanıklık eder. Yatay olarak ateşlenmiş mermi gibi bir cisim bir saniyede uzun bir yol –belki 600 metre– almış olabilir, fakat yatay atılmışsa gene 4,9 metre düşmüş olacaktır. Mermiyi gittikçe artan hızlarda ateşlersek ne olur? Unutmayın ki dünyanın



Şekil 5–3 Düşey ve yatay hareketlerin bağımsız olduklarını gösteren düzenek.

yüzeyi eğridir. Mermiyi yeterince hızlı atarsak, artık 4,9 metre düştüğünde, yüzeyden tam öncekiyle aynı yükseklikte olabilir. Bu nasıl mı olur? Düşmesine düşer, ama dünya da biraz eğrilmiştir; böylece dünyanın "etrafına" düşer. Şimdi soru şudur: Mermi bir saniyede ne kadar ileriye gitmelidir ki dünya ufkun 4,9 metre altında olsun? Şekil 5–4'te 6400

km yarıçaplı dünyayı ve kuvvet olmasaydı merminin izleyeceği teğet geçen düz-çizgisel yolu görüyoruz. Şimdi, geometrinin şu harikulâde teoremlerinden birini, diğer bir deyişle 'teğetimiz, bir eşit kiriş tarafından kesilen çapın iki parçası arasındaki ortalama orandır' diyenini kullanırsak, görürüz ki gidilen yatay mesafe, düşülen 4,9 metre ve dünyanın 12800 km'lik çapı arasındaki ortalama orantıdır. (4,9/1000) x12800'ün karekökü yaklaşık 8 km eder. Böylece mermi saniyede 8 km kadar giderse, o zaman her saniye yere doğru aynı 4,9 metrelik düşmesini sürdürecek, fakat asla daha yakına gelemeyecektir; çünkü dünya da ondan aşağı doğru olan eğrilmesini koruyacaktır. Dolayısıyla Bay Gagarin dünyanın çevresinde 40233 km giderken saniyede yaklaşık 8 km hızla giderek (o, biraz daha yüksekten uçtuğu için, biraz daha uzun zaman alıyordu) kendini uzayda tutuyordu.



Şekil 5–4 İvme, çembersel yolun merkezine doğrudur. Düzlem geometriden x/S = (2R – S)/x ≈ 2R/x 'dir; burada R dünyanın yarıçapı (6437 km), x bir saniyede "yatay olarak gidilen" mesafe ve S bir saniyede"düşülen" mesafe (4,9 metre)dir.

Büyük bir yeni yasa keşfi, ancak ondan koyduğumuzdan daha fazlasını alırsak yararlıdır. Şimdi, Newton kendi kütleçekim yasasını çıkarmak için Kepler yasalarının ikinci ve üçüncüsünü kullanmıştı. Peki, neler öngörmüştü? Birincisi

ayın hareketini çözümlemesi bir öngörüydü, çünkü cisimlerin dünyanın yüzeyindeki düşüşünü aydakiyle ilişkilendirmişti. İkincisi, yörünge elips midir, sorusudur. Daha sonraki bir bölümde, hareketi tam olarak hesaplamanın nasıl mümkün olduğunu göreceğiz ve yörüngenin bir elips olması gerektiği[3] gerçekten kanıtlanabilir; dolayısıyla birinci Kepler yasasının açıklanması için fazlalık bir olgu gerekmez. Böylece Newton kendisinin ilk güçlü öngörüsünü yapmıştı.

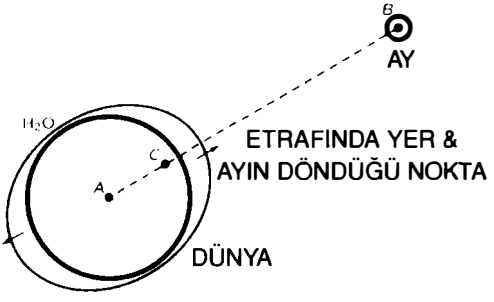
Kütleçekim yasası, daha önce anlaşılmamış olan pek çok olayı açıklamaktadır. Örneğin ayın çekimi dünya üzerinde, o zamana kadar gizemli olan, gel-gitlere neden olur. Ay altındaki suyu yukarı çeker ve gel-gitler oluşur; daha önce insanlar bunu düşünmüştü, fakat onlar Newton kadar zeki değildi ve onlar gün boyunca sadece bir gel-git olmalı diye düşünüyordu. Akıl yürütmeleri şöyleydi: Ay altındaki suyu yukarı çekerek bir yüksek ve bir alçak gel-git oluşturur; alttaki dünya döndüğünden, bir istasyonda her 24 saatte bir yukarı ve bir aşağı gel-git olur. Aslında gel-git 12 saatte bir yukarı ve bir aşağı gider. Bir diğer düşünce okuluysa yüksek gel-gitin dünyanın diğer tarafında olması gerektiğini, çünkü ay dünyayı sudan öteye çeker diye iddia ediyordu! Bu kuramların ikisi de yanlıştır. Aslında olan şudur: Ayın dünyayı ve suyu çekmesi merkezde "dengelenir." Fakat dünyaya yakın olan su ortalamadan daha çok ve uzak olansa ortalamadan daha az çekilir. Ayrıca su akabilir, oysa katı olan dünya akamaz. Gerçek tablo, bu ikisinin birleşimidir.

"Dengelenme"yle ne demek isteriz? Dengelenen nedir? Ay tüm dünyayı kendine çekiyorsa, dünya neden ayın tam "üzerine" düşmez? Çünkü dünya da ay gibi aynı hileyi kullanır: dünyanın içinde olan, fakat merkezinde olmayan bir noktanın çevresinde seyreder. Ay sadece dünyanın çevresinde dolaşmaz, Şekil 5–5'te görüldüğü gibi, dünya ve ayın her ikisi bir merkezcil konum çevresinde, her biri bu ortak konuma doğru düşerek de döner. Her birinin düşüşünü dengeleyen,

---

[3] Bunun ispatı bu derste verilmez.

ortak merkez çevresindeki bu harekettir. Böylece dünya da bir düz çizgi üzerinde gitmiyor; bir çember üzerinde seyrediyor. Uzak taraftaki su "dengelenmemiş"tir, çünkü orada ayın çekimi dünyanın merkezinde olana göre daha zayıftır, orada o tam "merkezkaç" kuvveti dengeler. Bu dengesizliğin sonucu, suyun dünyanın merkezinden öteye doğru yükselmesidir. Yakın taraftaysa, ayın çekimi daha kuvvetlidir ve dengesizlik uzayda zıt yöndedir, fakat gene dünyanın merkezinden öteyedir. Net sonuç olarak, iki gel-git kabarması elde ederiz.



Şekil 5–5 Gel-gitli dünya-ay sistemi.

Evrensel Kütleçekimi

Kütleçekimini anladığımızda, başka neleri anlayabiliriz? Dünyanın yuvarlak olduğunu herkes bilir. Peki, dünya neden yuvarlaktır? Bunu yanıtı kolay: bunun nedeni kütleçekimdir. Her şey başka her şeyi çektiği ve buna göre kendisini, olabildiği kadarıyla, bir araya çekip topladığı için, dünyanın yuvarlak olduğu anlaşılabilir! Daha da ileri gidersek, dünya tam olarak bir küre değildir, çünkü dönmektedir ve bu, ekvatorun yakınlarında kütleçekime direnen merkezkaç etkiler yaratır. Buradan dünyanın eliptik olması gerektiği anlaşılır ve doğru elips biçimini de buluruz. Dolayısıyla sadece kütleçekim yasasından, güneş, ay ve dünyanın her birinin (hemen hemen) küre biçiminde olmaları gerekir sonucunu çıkarabiliriz.

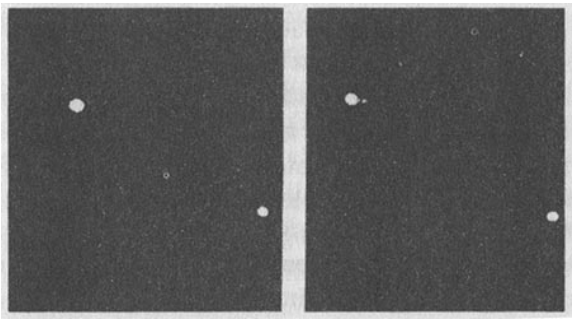
Kütleçekim yasasıyla başka neler yapabilirsiniz? Jüpiter'in aylarına bakarsak, onların bu gezegenin çevresindeki hareket tarzı hakkında her şeyi anlayabiliriz. Bu arada, bir zamanlar Jüpiter'in aylarıyla ilgili işaret etmeye değer güçlükler vardı. Bu uydular Roemer tarafından dikkatlice incelenmişti. Roemer ayların bazen tarifedeki zamandan önce ve bazen de sonra göründüğüne dikkat etmişti. (Onların tarifeleri, çok uzun zaman bekleyerek ve ayların dönüşlerini ortalama ne kadar sürede tamamladıklarını bularak hazırlanabilir) Jüpiter dünyaya özellikle yakın olduğunda onlar ilerde ve Jüpiter dünyadan uzak olduğunda geride kalıyorlardı. Bu, kütleçekim yasasına göre açıklanması çok zor bir şey olabilirdi; aslında, başka bir açıklama olmasaydı, bu harikulâde kuramın ölümü olabilirdi. Eğer bir yasa geçerli olması gereken bir tek yerde bile işlemezse, o tamamen yanlıştır. Fakat bu uyuşmazlığın nedeni çok basit ve güzeldi: Işığın Jüpiter'den dünyaya gelmesi için geçen zaman nedeniyle Jüpiter'in aylarını görmek biraz zaman alıyordu. Jüpiter dünyaya yakınken, zaman birazcık az ve uzakken zaman birazcık daha fazladır. Ayların ortalamaya göre biraz ilerde ya da biraz geride olarak görünmesinin nedeni budur: onların dünyaya yakın ya da uzak olması. Bu olay, ışığın bir anda gitmediğini göstermiş ve ışık hızının ilk tahminini sağlamıştı. Bu 1656'da yapılmıştı.

Gezegenlerin tümü birbirlerini itip çekiyorsa, diyelim ki, Jüpiter'in güneşin çevresinde dolanmasını kontrol eden kuvvet, sadece güneşten kaynaklanan kuvvet değildir; örneğin Satürn'den de bir çekme vardır. Bu kuvvet gerçekte şiddetli değildir, çünkü güneş Satürn'den çok daha kütlelidir; ama biraz çekme vardır ve bu nedenle Jüpiter'in yörüngesi mükemmel bir elips olmamalıdır ve değildir de; birazcık dışarıyadır ve doğru eliptik yörünge etrafında "yalpalar." Böyle bir hareket biraz daha karmaşıktır. Jüpiter, Satürn ve Uranüs'ün hareketlerini kütleçekim yasasının temelinde analiz etmek için girişimler yapılmıştı. Bu gezegenlerin hareketlerindeki ufacık sapmaların ve düzensizliklerin bu tek yasadan tam

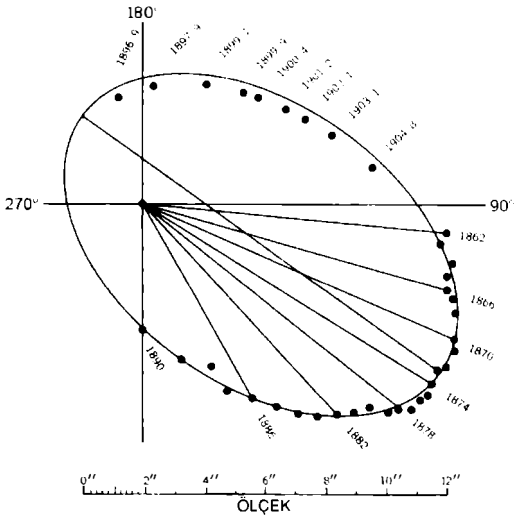
olarak anlaşılıp anlaşılamayacağını görmek için, bu gezegenlerin her birinin bir diğerine olan etkileri hesaplanmıştı. İşe bakın ki, Jüpiter ve Satürn için her şey yolundaydı, ama Uranüs "tuhaf"tı. O çok özel bir tarzda davranmaktaydı. Bir tam elips üzerinde seyretmiyordu, ama Jüpiter ve Satürn'ün çekimleri nedeniyle bu anlaşılabilirdi. Fakat bu çekimler hesaba katılsa bile Uranüs hâlâ doğru gitmiyordu; böylece kütleçekim yasaları altüst olma tehlikesi içindeydi; yabana atılamayacak bir olasılık. İngiltere ve Fransa'dan iki adam, Adams ve Le Verrier, bağımsız olarak bir başka olasılığa ulaştılar: Belki bir diğer gezegen vardır, karanlık ve görünmez olduğu için insanlar onu görememişlerdi. Bu gezegen, N, Uranüs'ü çekebilirdi. Bu iki centilmen, gözlenen tedirgemelere neden olacak böyle bir gezegenin nerede konumlanabileceğini hesapladılar. Kendi gözlemevlerine gönderdikleri mesajlarda diyorlardı ki "Baylar, teleskobunuzu falanca yere yöneltiniz, orada yeni bir gezegen göreceksiniz." Size aldırıp aldırmamaları, genelde kimlerle çalıştığınıza bağlıdır. Le Verrier'yi dikkate aldılar, oraya baktılar; gezegen N oradaydı! Diğer gözlemevi de ivedi olarak birkaç gün içinde söylenen yere baktı ve yeni gezegeni o da gördü.

Bu keşif, Newton yasalarının güneş sistemi için mutlak şekilde doğru olduğunu gösterir. Onlar acaba en yakın gezegenlerin oldukça küçük mesafelerinden çok ötelere de uzanır mı? İlk sınama şu soruya dayanır: gezegenler gibi yıldızlar da birbirlerini çekerler mi? Çift yıldızlarda onların birbirlerini çektiklerine dair kesin kanıta sahibiz. Şekil 5–6 bir çift yıldızı gösteriyor: birbirlerine çok yakın iki yıldız (resimde üçüncü bir yıldız daha var, öyle ki fotoğrafın döndürülmemiş olduğunu anlayacağız). Yıldızlar, yıllar sonra görünmüş halleriyle de gösterilmiştir. Çiftin ekseninin "sabit" yıldıza göre dönmüş olduğu görüyoruz; iki yıldız birbirleri etrafında gidiyor. Onlar Newton yasaları uyarınca mı dönüyor? Böyle bir çift yıldız sisteminin göreli konumlarının dikkatli ölçümleri, Şekil 5–7'de görülmektedir. Orada çok güzel bir elips görüyoruz; ölçümler 1862'de başlayarak 1904'lere kadar sürüyor

(şimdilerde çevreyi bir kez daha dönmüş olmalı). Sirius A yıldızının odakta olmaması dışında, her şey Newton yasalarına uygundur. Sirius A niçin odakta olmamalı? Çünkü elips düzlemi "gökyüzü düzlemi"nde değildir. Elips düzlemine dik açıda bakmıyoruz; Bir elipse eğik bakılırsa, o elips olarak kalır, ama odak artık aynı yerde değildir. Böylece birbirleri etrafında hareket eden çift yıldızları, kütleçekim yasasının gereklerine uygun olarak çözümleyebiliriz.



Şekil 5-6 Bir çift yıldız sistemi.



Şekil 5-7 Sirius B yıldızının Sirius A 'ya göre yörüngesi.

Kütleçekim yasasının daha büyük uzaklıklarda bile doğru olduğu Şekil 5–8'de gösterilmektedir. Kütleçekimin buralarda etkidiğini anlayamayan biri, ruhsuz demektir. Bu şekil, gökyüzündeki en güzel şeylerden birini gösteriyor: bir küresel yıldız kümesi, Noktaların tümü yıldızdır. Sanki merkeze doğru sıkıca paketlenmiş gibi görünüyorlarsa da, bunun nedeni aletlerimizin yanılabilir olmasıdır. Aslında, en merkezdeki yıldızların aralarındaki uzaklık bile çok büyüktür ve çok nadiren çarpışırlar. İç kısımlarda dışarılara göre daha fazla yıldız vardır ve dışarıya doğru gidildikçe iyice azalırlar. Bu yıldızlar arasında bir çekimin olduğu açıktır. Kütleçekimin bu devasa boyutlarda –belki de güneş sisteminin boyutunun 100.000 katı– var olduğu kesindir. Şimdi daha da ileri gidelim ve bir gökadanın tamamına bakalım (Şekil 5–9). Bu gökadanın biçimi, onun maddesinin bir araya toplanmaya eğilimli olduğunu göstermektedir. Kuşkusuz, yasanın orada kesinlikle ters kare olduğunu kanıtlayamayız; ancak hâlâ, bu devasa boyutlarda, tüm nesneyi bir arada tutan bir çekim vardır. "Peki, bunların tümü zekice, ama neden tam bir top gibi değil?" denebilir. Çünkü o dönmektedir ve büzülürken vazgeçemeyeceği bir açısal momentuma sahiptir; daha çok bir düzleme büzülmelidir (Sırası gelmişken, iyi bir problem arıyorsanız, kolların nasıl oluştuğunun tam ayrıntıları ve bu gökadaların biçimlerini neyin belirlediği henüz incelenmemiştir.) Bununla birlikte, gökada yapısının karmaşıklığı onu tam olarak çözümlemeye henüz izin vermese de, onun biçiminin kütleçekim nedeniyle olduğu açıktır. Bir gökadada herhalde 50.000 ile 100.000 ışık-yılı arasında bir ölçeğe sahibiz. Dünyanın güneşten uzaklığı 8,33 ışık-dakikasıdır; buradan bu boyutların ne kadar büyük olduğunu anlayabilirsiniz.



Şekil 5–8 Bir küresel yıldız kümesi.

Kütleçekim, pek çok "küçük" nesnenin bir araya kümelendiği Şekil 5–10'da resimlenen, daha da büyük boyutlarda bile vardır. Bu, tıpkı bir yıldız kümesi gibi, gökadalardan oluşmuş bir kümedir. Böylece gökadalar da böylesine uzaklıklarda birbirlerini çekerler ve onlar da kümeler halinde toplanırlar. Belki kütleçekim onlarca milyon ışık-yılı mesafelerin üzerinde bile etkindir; şu anda bildiğimiz kadarıyla, kütleçekim uzaklığın karesinin tersiyle sonsuza dek uzanıyor gibi görünmektedir.

Sadece bulutsuları anlamakla kalmıyoruz, kütleçekim yasasından yıldızların kökenleri hakkında bazı fikirler de elde edebiliriz. Şekil 5–11'de görüldüğü gibi, eğer büyük bir toz ve gaz bulutumuz varsa, toz parçalarının birbirlerine uygulayacakları kütleçekim kuvvetleri onların küçük topaklar oluşturmasını sağlayabilir. Şekilde zar zor görülen "küçük" siyah lekeler toz ve gazların toplanmalarının başlangıcı olabilir, böylece kütleçekimleri nedeniyle yıldızların oluşması başlar. Acaba hiç yıldız oluşumu gördük mü görmedik mi konusu hâlâ tartışmalıdır. Şekil 5–12, böyle bir şey gördüğümüzü akla getiren bir kanıt parçasını gösteriyor. Soldaki, içinde bazı yıldızlarla birlikte bir gaz bölgesinin 1947'de çekilmiş bir resmidir ve sağdakiyse sadece yedi yıl sonra çekilmiş



Şekil 5-9 Bir gökada.



Şekil 5-10 Gökadaların bir kümesi.

bir diğer resimdir; orada iki yeni parlak leke görülüyor. Acaba gaz bir araya toplandı, kütleçekim yeterince şiddetli etkiyerek onu iç kısımlarda yıldızın çekirdek tepkimelerinin başlamasına yetecek büyüklükte bir top haline mi sıkıştırdı?

Böylece toz ve gaz bulutu bir yıldıza mı dönüştü? Belki öyle, belki de değil. Bir yıldızın sadece yedi yılda kendisini görünür hale getirip onu görmemiz kadar çok şanslı olmamız mantık dışıdır; iki tane görmemizin olasılığıysa aşırı derecede azdır!

Cavendish Deneyi

Dolayısıyla kütleçekim devasa mesafeler boyunca uzanır. Fakat herhangi bir cisim çifti arasında bir kuvvet varsa, bizim kendi cisimlerimiz arasındaki kuvveti ölçebilmeliyiz. Birbirleri etrafında dolanan yıldızları gözlemek yerine, neden bir kurşun ve bir mermer top alıp, mermer topun kurşun topa doğru gittiğini gözlemeyelim? Böylesine basit tarzda yapıldığında bu deneyin zorluğu, kuvvetin çok zayıf ve nazik oluşundan kaynaklanır. Bu deney aşırı özenle yapılmalı; havayı dışarı çıkarmak için düzenek kapatılmalı, elektrikçe yüklü olmadığından emin olunmalı ve benzeri önlemler alınmalı; ancak bundan sonra kuvvet ölçülebilir. Bu kuvvet ilk kez Cavendish tarafından Şekil 5–13'te şematik olarak gösterilen bir düzenekle ölçülmüştü. Bu, iki büyük sabit kurşun küre ve burulma fiberi denen çok ince bir fiberle asılmış bir kolun uçlarındaki iki küçük kurşun bilye arasındaki direkt kuvvetin ilk gösterilişiydi. Fiberin ne kadar burulduğu ölçülerek kuvvetin şiddeti bulunabilir, uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğu doğrulanabilir ve ne kadar şiddetli olduğu saptanır. Böylece

$$F = G\frac{mm'}{r^2}.$$

formülündeki G katsayısı doğru şekilde saptanabilir. Tüm kütleler ve uzaklıklar bilinmektedir. "Bunu dünya için zaten biliyorduk" diyebilirsiniz; evet, fakat dünyanın kütlesini bilmiyoruz. Bu deneyden G'yi öğrenerek ve dünyanın ne şiddetle çektiğini bilerek, dünyanın kütlesinin ne büyüklükle olduğunu dolaylı olarak öğreniriz! Bu deneye bazıları "dünyayı tartmak" der ve kütleçekim yasasının G katsayısını belirle-

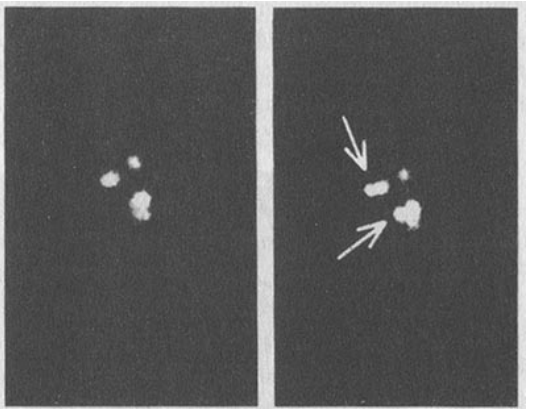
mekte kullanılabilir. Dünyanın kütlesinin tek saptanabilme yolu budur. G için şu değer bulunmuştur:

$$G = 6{,}670 \times 10^{-11} \text{ Newton} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$



Şekil 5-11 Yıldızlararası bir toz bulutu.

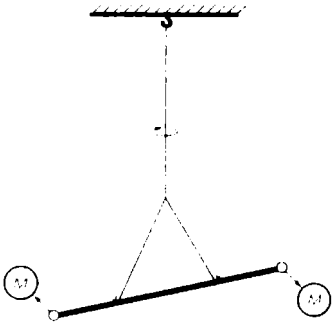
Kütleçekim kuramının bu büyük başarısıyla bilim tarihi üzerine yaptığı etkinin önemini vurgulamak abartma sayılmaz. Bitmeyen tartışmaların ve ikilemlerin olduğu eski çağlarda hüküm süren karışıklık, güven eksikliği, noksan bilgi ile bu yasanın açıklığını ve basitliğini karşılaştırın: tüm ayların ve gezegenlerin ve yıldızların onları yöneten böyle basit bir kurala sahip olmaları gerçeği ve üstelik insanoğlunun onu anlayabilmesi ve gezegenlerin nasıl hareket edeceklerini çıkarabilmesi! İleriki yıllarda bilimlerin başarısının nedeni budur, çünkü kütleçekim yasası, diğer doğa olaylarının da böylesine güzellikteki basit yasalara sahip olabileceği ümidini yaratmıştır.



Şekil 5–12 Yeni yıldızların oluşumu?

Kütleçekim Nedir?

Acaba o böyle basit bir yasa mıdır? Onun mekanizması nedir? Tüm yaptığımız, dünyanın güneş çevresinde nasıl hareket ettiğini betimlemektir; fakat onu yürütenin ne olduğunu hiç söylemedik. Newton bunun hakkında varsayımlar yapmamıştı; Mekanizmasına girmeksizin, onun ne yaptığını bulmak Newton'u tatmin etmişti. Hiç kimse daha sonra herhangi bir mekanizma vermedi. Fiziksel yasaların bu soyut niteliğe sahip olmaları, onların karakteridir. Enerjinin korunumu yasası, hiçbir mekanizmaya değinmeyen, hesaplanacak ve toplanacak niceliklerle ilgili bir teoremdir. Aynı şekilde mekaniğin büyük yasaları da nicel matematiksel yasalar olup, onlar için elimizde hiç mekanizma yoktur. Doğayı, arkasında mekanizmalar olmadan, betimlemek için niçin matematiği kullanabiliriz? Bunu kimse bilmiyor. Bunu sürdürmeliyiz, çünkü bu yolla daha çok şey buluruz.



Şekil 5-13 Küçük cisimler için evrensel kütleçekim yasasını doğrulamak ve G kütleçekim sabitini ölçmek için Cavendish tarafından kullanılmış olan düzeneğin basitleştirilmiş bir diyagramı.

Kütleçekim için birçok mekanizma önerilmişti. Bunlardan, zaman zaman pek çok kişinin düşündüğü birini ele almak ilginç olur. Başta, onu "keşfettiği" zaman çok heyecanlı ve mutludur; fakat kısa sürede doğru olmadığı anlaşılır. İlk keşif 1750'lerde yapılmıştır. Varsayalım ki uzayda her yönde çok yüksek hızlarla hareket eden ve madde içinden geçerken çok az miktarda soğurulan birçok parçacık var. Onlar soğurulduklarında, dünyaya bir itme veriyorlar. Bununla birlikte, bir yönde diğer yönde giden kadar parçacık olduğu için, itmelerin tümü birbirlerini dengeler. Fakat güneş yakında olduğunda, güneşten geçip dünyaya doğru gelen parçacıklar özellikle soğurulurlar, böylece güneşten gelenler diğer taraftan gelenlerden daha azdır. Dolayısıyla dünya güneşe doğru net bir itme hisseder ve uzaklığı değiştirince güneşi gören katı açının değişimi nedeniyle, onun uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğunu görmek çok zaman almaz. Bu mekanizmada yanlış olan nedir? Aslında doğru olmayan bazı yeni sonuçlar içerir. Bu özel fikir aşağıdaki sıkıntıya yol açar: Dünyaya, güneş çevresinde dönerken, geri tarafa göre ileri taraftan daha fazla parçacık çarpar (yağmurda koşarken, hani yüzünüze kafanızın arkasından daha şiddetli yağar ya

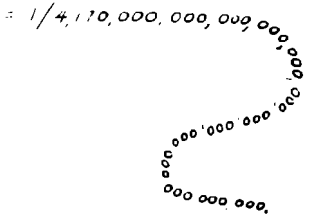
yağmur!) Dolayısıyla dünyaya önden verilen itme daha fazla olur; dünya hareketine karşı bir direnç hisseder ve yörüngesinde yavaşlama olabilir. Bu direncin bir sonucu olarak dünyanın durması için ne kadar zaman geçeceği hesaplanabilir. Dünyanın, yörüngesinde hareketsiz hale gelmesi için yeterince uzun zaman almaz; dolayısıyla bu mekanizma çalışmaz. Şimdiye dek kütleçekimi "açıklayacak" –ama bunun yanında var olmayan bazı başka olaylar da öngörmeyecek– hiçbir mekanizma icat edilemedi.

Bundan sonra kütleçekimin diğer kuvvetlerle olabilecek ilişkisini tartışacağız. Şimdilik kütleçekimin diğer kuvvetler cinsinden bir açıklaması yok. O, elektriğin ya da buna benzer bir şeyin bir görünümü değildir; demek ki bir açıklamamız yok. Bununla birlikte, kütleçekim ve diğer kuvvetler birbirlerine çok benzemektedir ve bu benzerliklere dikkat çekmek ilginçtir. Örneğin iki yüklü parçacık arasındaki elektrik kuvveti tam kütleçekim yasası gibi görünmektedir: Elektrik kuvveti, bir eksi işaretiyle bir sabit kere yüklerin çarpımı ve uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişir. Zıt yöndedir; benzer yükler iter. Fakat iki yasanın da uzaklığın aynı fonksiyonunu içermesi yine de dikkate değer değil midir? Belki de kütleçekim ve elektrik düşündüğümüzden çok daha sıkı şekilde birbirlerine bağlıdır. Onları birleştirmek için pek çok girişim yapılmıştır; birleşik alan kuramı, elektrik ve kütleçekimi bir araya getirmek için sadece çok hoş bir girişimdir; ama kütleçekim ile elektriğin karşılaştırılması halinde en ilginç şey, kuvvetlerin göreli şiddetleridir. Onların ikisini de içeren bir kuram, kütleçekimin ne kadar şiddetli olduğu sonucunu da vermelidir.

İki elektronun (doğanın evrensel yükü) elektrik kuvveti nedeniyle itmesini ve kütleleri nedeniyle çekmesini, bir doğal birim sisteminde, ele alırsak, elektriksel itmenin kütlesel çekmeye oranını ölçebiliriz. Bu oran, uzaklıktan bağımsız olup doğanın bir temel sabitidir. Oran Şekil 5–14'te görülüyor. İki elektron arasındaki elektriksel itmeye göre kütlesel çekme, 1 bölü $4{,}17 \times 10^{42}$ kadardır! Soru şudur: Böyle büyük

bir sayı nereden gelmektedir? Dünyanın hacminin bir pirenin hacmine oranı gibi, rastgele olamaz. Aynı şeyin, bir elektronun iki doğal yüzünü dikkate aldık. Bu inanılmaz sayı, bir doğal sabittir; dolayısıyla doğanın derinliklerinde bir şeyler içerir. Böylesine devasa bir sayı nereden gelebilir? Bazılarına göre, günün birinde "evrensel denklem"i bulacağız ve onun içinde, köklerden biri bu sayı olacak. Böyle inanılmaz büyük bir sayıyı doğal bir kök olarak verecek bir denklem bulmak çok zordur. Başka olanaklar da düşünülmüştü; bunlardan biri bu sayıyı evrenin yaşına bağlamaktır. Açıkçası, bir yerlerde başka bir büyük sayı bulmalıyız. Fakat evrenin yaşını yıllar cinsinden mi alacağız? Hayır, çünkü yıllar "doğal" değildir; insanlar tarafından uydurulmuştur. Doğal bir şeye örnek olarak, ışığın bir protonu çaprazlamasına geçme süresi olan 10^{-24} saniyeyi ele alalım. Bu süreyi evrenin yaşı olan 2×10^{10} yıl ile karşılaştırırsak, yanıt 10^{-42} çıkar. Bu, aynı sayıda uzayıp giden sıfıra sahiptir; böylece kütleçekim sabitinin evrenin yaşıyla ilişkili olduğu öne sürülmüştü. Eğer böyle olsaydı, kütleçekim sabiti zamanla değişirdi, çünkü evren yaşlandıkça evrenin yaşının ışığın bir protonu çaprazlamasına geçme süresine oranı giderek artardı. Kütleçekim sabitinin zamanla değişmesi olası mıdır? Kuşkusuz değişmeler öyle küçük olurdu ki bundan emin olmak iyice zorlaşır.

$$\frac{\text{Kütlesel çekme}}{\text{Elektriksel itme}} = 1 / 4{,}17 \times 10^{42} \ldots\ldots$$



Şekil 5-14 İki elektron arasındaki elektriksel ve kütleçekimsel etkileşmelerin göreli şiddetleri.

Düşünülebilecek bir sınama, geçmiş olan 10^9 yıl esnasında değişmenin etkisinin ne olduğunu saptamaktır, ki bu dünyadaki en erken yaşamdan bugüne olan çağ ve evrenin yaşının onda biridir. Bu sürede, kütleçekim sabiti yüzde on kadar artmış olabilir. Güneşin yapısını –onun maddesinin ağırlığı ile içinde ışıma enerjisinin üretilme hızı arasındaki dengeyi– düşünürsek, şunu çıkarabiliriz: Kütleçekim yüzde 10 daha şiddetli olsaydı, güneş yüzde 10'dan çok daha fazla parlak olurdu; kütleçekim sabitinin altıncı kuvvetiyle! Kütleçekimi değiştiğinde dünyanın yörüngesine olacakları hesaplarsak, dünyanın içe daha yakınlaşacağını bulurduk. Sonuçta, dünya 100 derece santigrat daha sıcak olur; denizlerde hiç su kalmaz; tüm su havada su buharı olarak bulunurdu; böylece yaşam denizlerde başlayamazdı. Dolayısıyla biraz önce bir örneğini verdiğimiz böyle tartışmalar hiç inandırıcı değildir ve konu henüz tam olarak kapanmamıştır.

Şu bir gerçektir ki, kütleçekim kuvveti, temelde eylemsizliğin bir ölçüsü olan nicelikle, diğer bir deyişle kütleyle orantılıdır; bir çember üzerinde dönen bir nesneyi orada tutmak ne kadar zordur. Dolayısıyla büyük bir cismin çevresinde, kütleçekim nedeniyle, aynı çember üzerinde aynı hızla dönen biri ağır biri hafif iki cisim, birlikte kalacaklardır, çünkü bir çember üzerinde dönmek, daha büyük kütle için daha şiddetli bir kuvveti gerektirir. Dolayısıyla verilen bir kütle için kütleçekim, iki cismi birlikte döndürecek şekilde tam doğru orana sahip şiddettedir. Bir cisim diğerinin içindeyse, hep içinde kalır; bu mükemmel bir dengedir. Bu nedenle, Gagarin, ya da Titov bir uzay gemisinin içinde nesneleri "ağırlıksız" bulacaklardır; örneğin onlar bir tebeşir parçasını bıraksalar, tebeşir dünya çevresinde tüm uzay gemisiyle tamamıyla aynı şekilde dönerdi; böylece uzay gemisinde onların önünde asılı kalmış gibi görünürdü. Bu kuvvetin büyük bir doğruluk içinde kütleyle tam orantılı olması çok ilginçtir; çünkü tam orantılı olmasaydı, eylemsizliğin ve ağırlığın fark göstereceği bir etki ortaya çıkardı. Böyle bir etkinin yokluğu, ilk kez 1909'da Eötvös ve daha yakınlarda

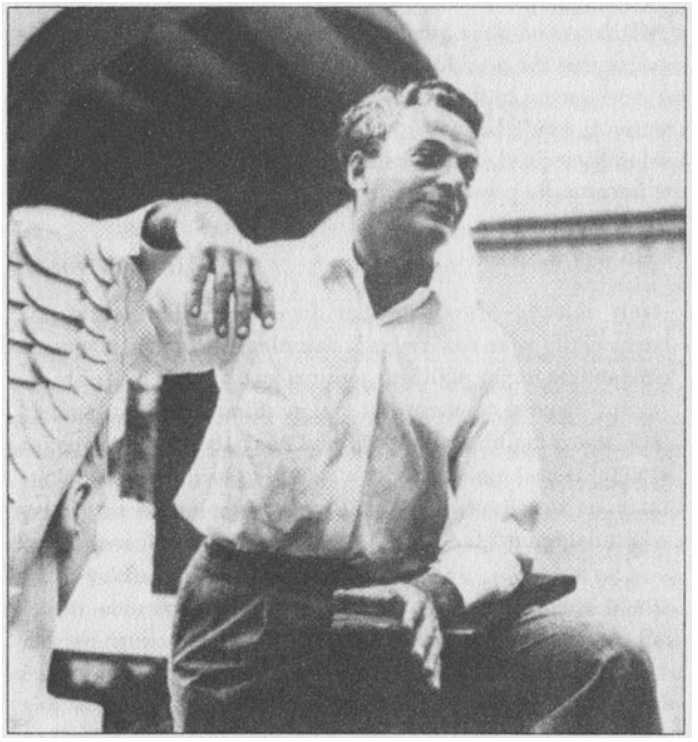
Dicke tarafından yapılan deneylerde büyük bir doğrulukla gösterilmişti. Denenen tüm maddeler için, kütleler ve ağırlıklar, 1.000.000.000'da 1 ya da daha az hatayla tam olarak orantılı çıkmıştır. Bu olağanüstü bir deneydir.

Kütleçekim ve Görelilik

Tartışılmaya değer bir diğer konu, Einstein tarafından Newton'un kütleçekim yasasında yapılan düzeltmedir. Doğurduğu tüm heyecana karşın, Newton'un kütleçekim yasası doğru değildir! Bu yasa, görelilik kuramını hesaba katarak Einstein tarafından düzeltilmişti. Newton'a göre, kütleçekim etkisi anlıktır; diğer bir deyişle bir kütleyi hareket ettirseydik, bu kütlenin yeni konumu nedeniyle hemen yeni bir kuvvet hissederdik; bu yolla sonsuz hızda sinyaller yollayabilirdik. Einstein ışık hızından daha hızlı sinyaller yollayamayacağımızı öngören kanıtlar geliştirmişti; buna göre kütleçekim yasası yanlış olmalıydı. Gecikmeleri hesaba katan düzeltmeyle, Einstein'ın kütleçekim yasası denen yeni bir yasaya sahibiz. Bu yeni yasanın anlaşılması oldukça kolay bir özelliği şudur: Einstein'ın görelilik kuramında, enerjisi olan her şey kütleye sahiptir: kütleçekimsel olarak çekilen anlamında, kütle. Enerjiye sahip ışığın bile bir "kütle"si vardır. İçinde enerjiye sahip olan bir ışık demeti güneşin yakınından geçerek geldiğinde, güneş tarafından onun üzerine bir çekme uygulanır. Böylece ışık düz gitmeyip biraz sapar. Güneş tutulması sırasında, örneğin güneş civarındaki yıldızlar, güneş orada olmasaydı bulunacakları yerden yer değiştirmiş gibi görüneceklerdir; bu durum gözlenmişti.

Haydi son olarak da, kütleçekimi diğer kuramlarla karşılaştıralım. Son yıllarda, tüm kütlenin minicik parçacıklardan oluştuğunu ve çekirdek kuvvetleri vb gibi birkaç tür etkileşmenin var olduğunu keşfettik. Bu çekirdeksel ya da elektriksel kuvvetlerin hiçbiri henüz kütleçekim için bir açıklama getiremedi. Doğanın kuantum-mekaniksel özellik-

leri de henüz kütleçekime taşınamadı. Ölçek, kuantum etkilerini gerektirecek kadar küçük olunca, kütleçekim etkileri öylesine zayıf oluyor ki, kütleçekimin kuantum kuramına olan acil gereksinimi bir türlü geliştirilemedi. Diğer taraftan, fizik kuramlarımınız tutarlılığı için, acaba Einstein yasasına düzeltilmiş olan Newton yasası belirsizlik ilkesiyle uyuşacak şekilde daha da düzeltilmeli mi diye düşünmek önemli olabilir. Bu son düzeltme henüz tamamlanmış değil.



6

KUANTUM DAVRANIŞI

Atom Mekaniği

Son birkaç bölümde önemli ışık olaylarını –genelde elektromanyetik ışınımı– anlamak için gereken esas düşünceleri ele almıştık. (Birkaç özel konuyu, özellikle yoğun maddelerin kırılma indisi kuramını ve tam iç yansımayı gelecek yıla bırakmıştık.) İncelediğimiz konuya elektrik dalgalarının "klasik kuramı" denir ve pek çok olay için doğanın tam anlamıyla yeterli bir betimlemesi olur. Henüz ışık enerjisinin topaklar ya da "fotonlar" şeklinde geldiği olgusu hakkında hiçbir kaygımız yoktu.

Bir sonraki konumuz olarak, maddenin oldukça büyük parçalarının davranışı –özellikle, onların mekanik ve ısıl özellikleri– problemini ele almak istiyoruz. Bunları tartışırken, klasik (ya da daha eski) kuramın neredeyse tam olarak başarısız kaldığını göreceğiz, çünkü madde gerçekte atomboyutlu parçacıklardan oluşmaktadır. Yine de biz sadece klasik kısımla uğraşacağız, çünkü öğrenmekte olduğumuz klasik mekaniği kullanarak anlayabileceğimiz tek kısım budur. Fakat çok başarılı olamayacağız. Işıktan farklı olarak, madde halinde kısa sürede zorluklarla karşılaşacağız. Kuşkusuz, atomik olaylardan sürekli kaçınabiliriz; fakat bunu

yapmak yerine, burada araya kısa bir gezinti sıkıştırarak maddenin kuantum özellikleri hakkındaki temel düşünceleri, diğer bir deyişle atom fiziğinin kuantum düşüncelerini betimleyeceğiz; böylece neleri atladığımız hakkında bazı hislere sahip olacağız. Atlayacağımız bazı önemli konuları, onlara yakınlaşınca görmezden gelemeyiz.

Bu nedenle, kuantum mekaniği konusuna şimdi bir giriş yapacağız, fakat çok sonrasına kadar konuyu tam gerçeğiyle anlayamayacağız.

"Kuantum mekaniği" maddenin tüm ayrıntılarıyla, özellikle atomik ölçekteki davranışının betimlenişidir. Çok küçük ölçekteki nesneler, herhangi bir direkt deneyime sahip olduğumuz şeylerin hiçbiri gibi davranmazlar. Dalgalar gibi davranmazlar, parçacıklar gibi de davranmazlar; bulutlar gibi ya da bilardo topları gibi veya yayların uçlarındaki ağırlıklar gibi de davranmazlar; şu ana kadar gördüğünüz hiçbir şey gibi davranmazlar.

Newton ışığın parçacıklardan oluştuğunu düşünmüştü; fakat sonra, burada gördüğümüz gibi, onun bir dalga gibi davrandığı keşfedildi. Bununla birlikte, daha sonra (yirminci yüzyılın başında) ışığın zaman zaman gerçekten bir parçacık gibi de davrandığı bulundu. Tarihsel olarak, örneğin elektronun bir parçacık gibi davrandığı düşünülmüştü; ama daha sonra birçok bakımdan onun bir dalga gibi davrandığı bulundu. O halde, elektron aslında ne parçacık ne de dalga gibi davranır. Artık vazgeçiyoruz ve diyoruz ki "elektron bunların hiçbiri gibi değildir."

Bununla birlikte, elektronların tıpkı ışık gibi davrandığı bir şanslı duruma sahibiz. Atomik nesnelerin (elektronlar, protonlar, nötronlar, fotonlar vb gibi) kuantum davranışı tümü için aynıdır; onların hepsi "parçacık dalgaları"dır ya da onları nasıl adlandırırsanız odur. Böylece elektronların özellikleri hakkında bildiklerimizi (ki bunları örneklerimizde kullanacağız), ışığın fotonları dahil, tüm "parçacıklar"a da uygulanacaktır.

Bu yüzyılın ilk çeyreği boyunca atomik ve küçük-ölçekli davranış hakkında yavaş yavaş toplanan bilgi, küçük nesnelerin nasıl davrandıklarıyla ilgili bazı belirtiler verdiyse de, gittikçe artan bir karışıklık da yaratmıştı. Bu karışıklık, en sonunda, 1926 ve 1927'de Schrödinger, Heisenberg ve Born tarafından çözüldü. Bu fizikçiler nihayet maddenin küçük ölçekteki davranışı için tutarlı bir anlatım elde ettiler. Bu betimlemenin belirgin yanlarını bu bölümde ele alacağız.

Kuantum Davranışı

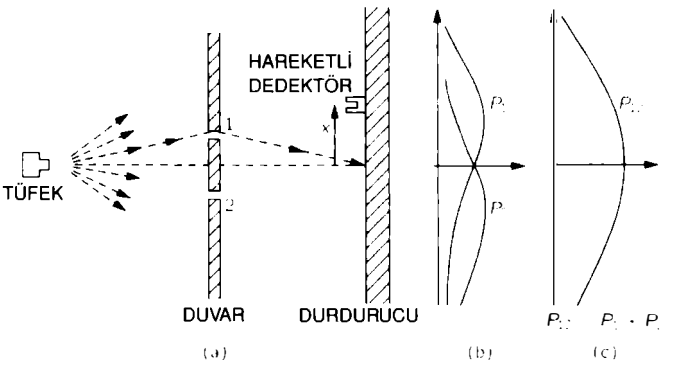
Atomik davranış günlük deneyimden o kadar farklıdır ki, ona alışmak aşırı derecede zordur ve herkese, acemi çaylaklara da deneyimli fizikçilere de, tuhaf ve gizemli görünür. Uzmanlar bile onu istedikleri biçimde anlayamazlar ve bunu anlayamamaları mutlak surette akla yakındır, çünkü tüm doğrudan insan deneyimleri ve insan sezgileri büyük cisimlere yöneliktir. Büyük cisimlerin nasıl davranacaklarını biliyoruz, fakat küçük ölçekteki nesneler hiç de böyle davranmazlar. Öyleyse onlar hakkında, doğrudan deneyimlerimizle ilişkilendirmeye çalışmadan, soyut ya da imgesel tarzda bilgi edinmeliyiz.

Bu bölümde gizemli davranışın temel öğesini, en acayip yapısı içinde, hemen ortaya sereceğiz. İncelemek için seçtiğimiz olayın, herhangi bir klasik yolla anlatılması olanaksızdır, *kesinlikle* olanaksız; bu olay, içinde kuantum mekaniğinin özünü barındırmaktadır. Bu, gerçekte, sadece gizem içermektedir. Bu gizemi, nasıl işlediğini "açıklama" anlamında açıklayamayız. Size onun nasıl işlediğini söyleyeceğiz. Nasıl işlediğini söylerken de, size tüm kuantum mekaniğinin temel özelliklerini söylemiş olacağız.

Mermilerle Bir Deney

Elektronların kuantum davranışını anlamaya çalışmak için, onların davranışlarını, özel bir deneysel düzenekte, mer-

miler gibi parçacıkların ve su dalgaları gibi dalgaların çok iyi bilinen davranışlarıyla karşılaştıracağız ve farkları belirteceğiz. Önce Şekil 6–1'deki diyagramda görülen deneysel düzenekte mermilerin davranışını inceleyeceğiz. Seri halde mermiler atan bir makineli tüfeğimiz var. Çok iyi bir tüfek değil; mermileri, şekilde görüldüğü gibi, oldukça büyük bir açısal alan içine rastgele püskürüyor. Tüfeğin önünde, üzerinde bir merminin geçmesine yetecek büyüklükte iki delik bulunan bir duvar (çelik levhadan) var. Duvarın ilerisinde, ona çarptıklarında mermileri "soğuracak" bir durdurucu (diyelim ki kalın bir ahşap perde) yer alıyor. Bu perdenin ön yüzünde de mermi "dedektör"ü dediğimiz bir cisim var; diyelim ki içinde kum bulunan bir kutu.



Şekil 6–1 Mermilerle girişim deneyi

Dedektöre giren her mermi durdurulup toplanacaktır. İstediğimiz zaman kutuyu boşaltabilir ve yakalanan mermileri sayabiliriz. Dedektör ileri geri (x diyeceğimiz doğrultuda) hareket edebilir. Bu düzenekle, şu sorumuza yanıt bulabiliriz: "Bir merminin duvardaki deliklerden geçip merkezin x kadar uzağında durdurucu perdeye varmasının olasılığı nedir?" Önce, olasılıktan söz edeceğimizi iyice algılamalısınız, çünkü her özel merminin nereye gideceğini kesin olarak söyleye-

meyiz. Deliklerden birine çarpan bir mermi o deliğin kenarlarından sekip herhangi bir yere gidebilir. "Olasılık" sözüyle, merminin dedektöre varma şansını kastediyoruz; bunu da, belirli bir sürede dedektöre ulaşan mermileri sayıp sonra bu sayıyı bu sürede durdurucu perdeye çarpan mermilerin *toplam* sayısına bölerek ölçebiliriz. Ya da, ölçüm süresinde tüfeğin daima aynı oranda mermi atacağını varsayarsak, istediğimiz olasılık, belirli bir standart zaman aralığında dedektöre ulaşan sayıyla orantılıdır.

Şimdiki amacımız için, mermilerin gerçek mermiler olmayıp *parçalanamaz* –yarıya bölünemez– mermiler olduğu, bir bakıma idealize bir deney tasarlamak istiyoruz. Deneyimizde mermilerin daima topaklar halinde bulunduğu, dedektörde bir şey yakalarsak bunun daima bir tam mermi olduğunu anlayacağız. Eğer makineli tüfeğin ateşleme oranı iyice düşükse, verilen herhangi bir anda durdurucu perdeye ya hiçbir şeyin ulaşmadığını, ya da bir ve sadece bir –tam olarak bir– merminin ulaştığını görürüz. Ayrıca topağın büyüklüğü kesinlikle tüfeğin ateşleme oranına bağlı değildir. Şunu diyeceğiz: "Mermiler perdeye *her zaman* özdeş topaklar halinde ulaşırlar." Dedektörümüzle ölçtüğümüz şey, bir topağın perdeye ulaşma olasılığıdır. Ve olasılığı x'in fonksiyonu olarak ölçeriz. Bu düzenekle alınan böyle ölçümlerin sonucu (henüz deneyi yapmadık, dolayısıyla aslında sonucu sadece hayal ediyoruz), Şekil 6–1 'in (c) kısmında çizilen grafikte görülmektedir. Bu grafikte olasılığı sağa çizdik; x düşeydir, böylece x ölçeği düzenek diyagramına uygundur. Mermiler ya 1. delikten ya da 2. delikten geçebilecekleri için, olasılığa P_{12} deriz. P_{12}'nin grafiğin ortasının yakınlarında büyük olduğu, fakat x büyüdükçe küçüldüğü kimseyi şaşırtmayacaktır. Yine de x = 0 'da P_{12}'nin neden maksimum değere sahip olduğunu merak edebilirsiniz. Deneyimizi bir kez 2. deliği kapatarak ve bir kez de 1. deliği kapatarak yaparsak, bu gerçeği anlayabiliriz. 2. delik kapalıyken, mermiler sadece 1. delikten geçebilirler ve şeklin (b) kısmında P_1 ile işaretlenen eğriyi elde ederiz. P_1'in maksimumu, beklendiği gibi, tüfekle 1. deliği birleşti-

ren doğru üzerine raslayan x değerinde olur. 1. delik kapalıyken, şekildeki P_2 simetrik eğrisini elde ederiz. P_2, mermilerin 2. delikten geçmesiyle ilgili olasılık dağılımıdır. Şekil 6–1'in (b) ve (c) kısımlarını karşılaştırarak, şu önemli sonucu buluruz:

$$P_{12} = P_1 + P_2 \tag{6.1}$$

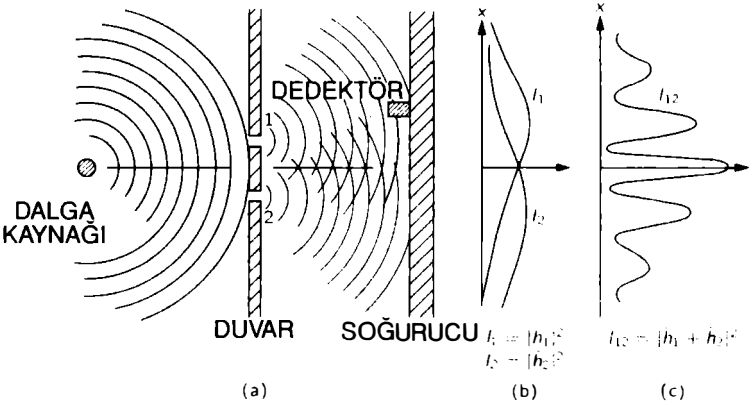
Olasılıklar dosdoğru birbirine eklenir. İki delik de açık olduğu zamanki etki, her bir deliğin tek başına açık olduğu zamanki etkilerin toplamıdır. Bu sonucu, daha sonra göreceğimiz bir nedenle, "girişim olmayan" bir gözlem olarak adlandıracağız. Mermi deneyi için bu kadarı yeter. Mermiler topaklar halinde gelir ve perdeye ulaşma olasılıkları girişim göstermez.

Dalgalarla Bir Deney

Şimdi de su dalgalarıyla bir deney yapmak istiyoruz. Düzenek Şekil 6–2 'de diyagram olarak görülmektedir. Sığ bir su teknemiz var. "Dalga kaynağı" denen küçük bir cisim bir motorla aşağı yukarı titreştirilir ve böylece dairesel dalgalar oluşturur. Kaynağın sağında gene iki delikli bir duvar vardır ve onun ötesinde de ikinci bir duvar; bu ikinci duvar bir "soğurucu" olup ona ulaşan dalgaları hiç yansıtmaz. Bu, hafifçe yükselen bir kum "plaj"ı oluşturarak yapılabilir. Plajın önüne, daha önceki gibi, x-doğrultusunda ileri geri hareket edebilen bir dedektör yerleştiririz. Bu kez dedektör, dalga hareketinin "şiddeti"ni ölçen bir aygıttır. Dalganın yüksekliğini ölçen bir elektronik düzenek düşünebilirsiniz; öyle ki ölçeklemesi gerçek yüksekliğin *karesi*yle orantılı olsun; böylece okumalar dalganın şiddetiyle orantılı olur. Bu durumda dedektörümüz dalga tarafından taşınan *enerji*yle orantılı sayılar, ya da daha çok, dedektöre taşınan enerji oranını okur.

Dalga düzeneğimizde ilk dikkat edeceğimiz şey, şiddetin büyüklüğünün *her* değeri alabileceğidir. Kaynak çok küçük

miktarlarda hareket ederse, dedektörde çok küçük bir dalga hareketi olur. Kaynağın hareketi büyütülürse, dedektörde de daha yüksek şiddetler gözlenir. Dalga şiddeti her değere sahip olabilir. Dalga şiddetinde herhangi bir "topaklık" vardır diyemeyiz.



Şekil 6 - 2 Su dalgalarıyla girişim deneyi

Şimdi çeşitli x değerleri için dalga şiddetini ölçelim (dalga kaynağını daima aynı biçimde işler tutarak). Şeklin (c) kısmındaki ilginç görünümlü I_{12} eğrisini elde ederiz.

Elektrik dalgalarının girişimini incelediğimizde, böyle örüntülerin nasıl ortaya çıktıklarını zaten görmüştük. Bu durumda, özgün dalganın deliklerde kırındığını ve her bir delikten yeni dairesel dalgaların yayıldığını gözlemleriz. Bir ara bir deliği kapatır ve soğurucudaki şiddet dağılımını ölçersek, şeklin (b) kısmında görülen oldukça basit şiddet eğrilerini buluruz. I_1, 1. delikten geçen dalga şiddetidir (ki onu, 2. deliği kapatarak ölçeriz) ve I_2 ise 2. delikten geçen dalga şiddetidir (1.delik kapatıldığında görülen).

İki delik de açıkken gözlenen I_{12} şiddeti, kesinlikle I_1 ve I_2'nin toplamı değildir. Bu durumda iki dalganın "girişimi" vardır deriz. Bazı noktalarda (I_{12}'nin maksimum olduğu nok-

talar) dalgalar "aynı fazda"dır ve dalga tepeleri, büyük bir genlik ve dolayısıyla büyük bir şiddet vermek üzere birbirlerine eklenirler. İki dalganın böyle yerlerde "yapıcı olarak girişti̇ği"ni söyleriz. Dedektörün bir deliğe olan uzaklığının, diğer deliğe olan uzaklığından dalga boyunun bir tam sayı katı kadar daha uzun (ya da daha kısa) olduğu yerlerde böyle yapıcı girişimler olacaktır.

İki dalganın dedektöre π kadarlık bir faz farkıyla ulaştığı yerlerde (buralarda iki dalga zıt fazdadır), dedektördeki bileşke dalga iki genliğin farkı olacaktır. Dalgalar "yıkıcı olarak girişirler" ve dalga şiddeti için düşük bir değer elde ederiz. Dedektör ile 1. delik arasındaki uzaklığın, dedektör ile 2.delik arasındaki uzaklıktan yarı-dalga boyunun tek katları kadar farklı olduğu yerlerdeyse böyle düşük değerler bekleriz. Şekil 6–2'de

I_{12}'nin düşük değerleri, iki dalganın yıkıcı olarak giriştiği yerlere karşılık gelir.

I_1, I_2ve I_{12}'nin arasındaki nicel bağıntının aşağıdaki gibi ifade edilebildiğini anımsayacaksınız: 1. delikten gelen su dalgasının dedektördeki anlık yüksekliği $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$ (aslında bunun gerçel kısmı) olarak yazılabilir; buradaki $\hat{h}_1$ "genliği" genelde karmaşık bir sayıdır. Şiddet, yüksekliğin mutlak değer karesiyle, ya da karmaşık sayıları kullanırsak $|\hat{h}_1|^2$ terimiyle orantılıdır. Aynı şekilde, 2. delik için yükseklik $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$ olur ve şiddet $|\hat{h}_2|^2$ terimiyle orantılıdır. İki delik de açık olduğunda, dalga genlikleri eklenerek $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2)\, e^{i\omega t}$ bileşke yüksekliğini verir ve şiddet $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ olur. Şu anki amacımız için orantı katsayısını göz ardı edersek, girişen dalgalar için doğru bağıntılar şunlardır:

$$I_1 = |\hat{h}_1|^2, \quad I_2 = |\hat{h}_2|^2, \quad I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2. \qquad (6.2)$$

Bu sonuç, dikkat ederseniz, mermilerle elde edilen (6.1) bağıntısından iyiden iyiye farklıdır. $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ ifadesini açarsak, şunu buluruz:

$$|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2\,|\hat{h}_1||\hat{h}_2| \cos \delta. \qquad (6.3)$$

Burada δ, $\hat{h}_1$ ve $\hat{h}_2$ arasındaki faz farkıdır. Bunu şiddetler cinsinden

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \qquad (6.4)$$

şeklinde yazabiliriz. (6.4)'teki son terim "girişim terimi"dir. Su dalgaları için de bu kadar yeter. Şiddet her değeri alabilir ve su dalgaları girişim gösterir.

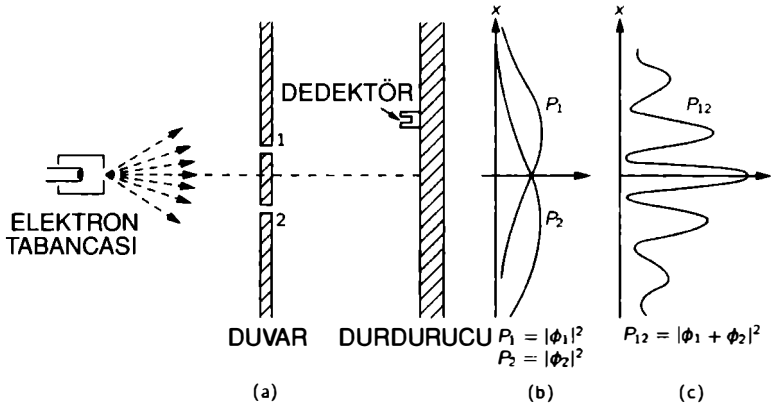
Elektronlarla Bir Deney

Şimdi de elektronlarla benzer bir deney düşünelim. Bunun diyagramı Şekil 6–3'te gösterilmektedir. Elektrik akımıyla ısıtılan tungsten bir tel ve onu kapatan tek delikli bir metal kutudan oluşan bir elektron tabancası yaparız. Tel kutuya göre bir negatif voltajda tutulursa, telin saldığı elektronlar duvarlara doğru hızlanacaklar ve bazıları delikten geçecektir. Tabancadan çıkan elektronların tümü (yaklaşık olarak) aynı enerjiye sahip olacaktır. Tabancanın önünde gene iki deliğe sahip bir duvar (iyice ince bir metal levha) vardır. Bu duvarın ötesinde "durdurucu" olarak hizmet gören bir başka levha bulunur. Durdurucunun ön yüzüne hareketli bir dedektör yerleştiririz. Dedektör bir Geiger sayacı olabilir, ya da belki daha da iyisi, bir hoparlöre bağlı bir elektron çoğaltıcı.

Hemen bu deneyi kurmaya çalışmak da neyin nesi diyebilirsiniz; çünkü biraz önce anlattığımız düzeneklerle zaten bu deneyleri yapmıştık. Bu deney tam bu şekilde asla yapılmadı. Güçlük, ilgilendiğimiz etkilerin gösterilebilmesi için düzeneğin olanaksız ölçüde küçük yapılmasının gerektiğidir. Bir "düşünce deneyi" yapıyoruz; düşünmek kolay olduğu için onu seçtik. Elde edilecek sonuçları biliyoruz, çünkü anlatacağımız etkileri gösterecek ölçek ve oranlar seçilerek yapılmış pek çok deney *var*.

Elektron deneyimizde dikkat edeceğimiz ilk husus, dedektörde (hoparlörde) duyacağımız keskin "tık, tık"lardır. Tüm "tık, tık"lar aynıdır. "Yarım-tık" yoktur.

"Tık, tık"ların çok düzensiz geldiklerine de dikkat ederiz. Şöyle: tık ..... tık, tık ..... tık .... tık..... tık. tık ..... tık, vb... Bir Geiger sayacını çalışırken duymuş olabileceğinizden hiç kuşkum yok. Yeterince uzun bir süre boyunca, diyelim ki birkaç dakikada dedektöre gelen "tık"ları sayarsak, sonra yine aynı eşit sürede gelen "tık"ları sayarsak, bu iki sayının neredeyse aynı olduğunu görürüz. Öyleyse duyduğumuz ortalama "tık"lama hızından söz edebiliriz (ortalama olarak dakikada şu kadar "tık").



Şekil 6–3 Elektronlarla girişim deneyi

Dedektörü oraya buraya dolaştırdığımızda, "tık"lamalar daha hızlı ya da daha yavaş oranda görünür, ama her "tık"ın ses yüksekliği hep aynıdır. Tabancadaki telin sıcaklığını düşürdüğümüzde tıklama oranı yavaşlar, fakat hâlâ her "tık"ın sesi aynıdır. Durdurucuya iki ayrı dedektör yerleştirirsek, birinin ya da diğerinin "tık"ladığını, fakat hiçbir zaman ikisinin birlikte "tık"lamadığına da dikkat ederiz. (Çok seyrek olarak, iki "tık" zamanca birbirlerine çok yakın çıkmışsa, ku-

lağımız ayrılmayı hissetmeyebilir.) Dolayısıyla durdurucuya ne ulaşıyorsa "topaklar" halinde ulaşır sonucunu çıkarırız. Tüm "topaklar" aynı büyüklüktedir: sadece bütün olan "topaklar" durdurucuya ulaşır ve bir anda bir tane ulaşır. Sonuç olarak şöyle diyeceğiz: "Elektronlar, durdurucuya daima özdeş topaklar halinde ulaşırlar."

Tıpkı mermilerle yapılan deneyimizde olduğu gibi, şimdi deneysel olarak şu soruya yanıt bulmaya çalışırız: "Bir elektron topağı, durdurucunun merkezden çeşitli x uzaklıklarına hangi göreceli olasılıkla ulaşır?" Önceki gibi, tabancanın çalışmasını sabit tutarak, "tık"lamaların oranını gözlemek süretiyle göreceli olasığı elde ederiz. Topakların belirli bir x noktasına ulaşma olasılığı, bu x'teki "tık"lamaların ortalama oranıyla orantılıdır.

Deneyimizin sonucu, Şekil 6–3'ün (c) kısmında P_{12}'yle işaretlenen ilginç eğridir. Evet! Elektronların hareket tarzı işte budur.

Elektron Dalgalarının Girişimi

Elektronların davranışını anlayıp anlayamayacağımızı görmek için, şimdi Şekil 6–3 eğrisini çözümlemeye çalışacağız. Söyleyeceğimiz ilk şey şudur: Elektronlar topaklar halinde geldiklerine göre, her topak (pekalâ ona bir elektron da diyebiliriz) ya 1. delikten ya da 2. delikten geçerek gelmiştir. Haydi bunu bir "Önerme" biçiminde yazalım:

> Önerme A: Her elektron ya 1. delikten ya da 2. delikten geçer.
> A Önermesini kabul ederek, durdurucuya ulaşan tüm elektronları iki sınıfa ayırabiliriz:

(1) 1. delikten geçerek gelen elektronlar ve (2) 2. delikten geçerek gelen elektronlar. Buna göre gözlenen eğri, 1. delikten geçen elektronların etkileri ile 2.delikten geçen elektronların etkilerinin toplamı olmalıdır. Bu düşünceyi deneyle kontrol edelim. Önce, 1. delikten geçerek gelen elektronlar için bir

ölçme yapacağız. 2. deliği kapatıp dedektördeki "tık"lamaları sayarız. "Tık"lama oranından P_1'i elde ederiz. Ölçümün sonucu, Şekil 6–3'ün (b) kısmında P_1 işaretli eğriyle verilmektedir. Sonuç akla çok yakın görünüyor. 2. delikten geçerek gelen elektronlar için P_2 olasılık dağılımını da benzer biçimde ölçeriz. Bu ölçümün sonucu da şekilde çizilmiştir.

Deliklerin *ikisi de* açıkken elde edilmiş olan P_{12} sonucunun, her bir delik tek başına açıkken bulunan P_1 ve P_2 olasılıklarının toplamı olmadığı apaçıktır. Öyleyse, su-dalgası deneyimizle benzerlik içinde, "Girişim vardır" deriz.

$$\textit{Elektronlar için: } P_{12} \neq P_1 + P_2 \qquad (6.5)$$

Böyle bir girişim nasıl meydana gelebilir? Belki şunu demeliyiz: "Şey, belki büyük olasılıkla, topakların ya 1. delikten ya da 2. delikten geçmesi *doğru değil*dir; çünkü öyle geçselerdi, olasılıkların toplanması gerekirdi. Belki de onlar daha karmaşık bir şekilde hareket ediyorlar. Yarıya bölünüyorlar ve . . . ." Fakat hayır! Onlar bölünmezler, durdurucuya daima topaklar halinde ulaşırlar. . . " İyi, ama belki bazıları 1. delikten geçtikten sonra dolanıp 2.'den geçiyor ve sonra birkaç kez daha dolanırken, ya da daha karmaşık bir yolla dolanırken . . . 2. deliği kapatınca, 1. delikten geçmeye başlayıp sonunda durdurucuya varma şansını değiştiriyoruz . . ." Fakat dikkat edin! Deliklerin ikisi de açıkken çok az sayıda elektronun ulaştığı bazı yerler var; fakat oralar bir deliği kapatınca daha çok elektron alıyor; böylece bir deliği *kapatmak* diğerinden geçen sayıyı arttırıyor. Bununla birlikte, dikkat ederseniz, merkezde P_{12}, $P_1 + P_2$'nin büyüklüğünün iki katından daha da büyüktür. Bir deliğin kapatılması diğer delikten geçen elektronların sayısını *azalttığı* halde, bu böyledir. Elektronların karmaşık yollar boyunca hareket ettiklerini varsayarak bu *iki etkiyi* de açıklamak zor görünüyor.

Bu tümden çok gizemlidir. Ve ne kadar çok bakarsanız, gizem de o kadar çok artmaktadır sanki. Elektronların deliklerden çok karmaşık şekillerde geçtiklerini öngörerek P_{12}

eğrisini açıklamaya çalışan pek çok düşünce üretildi; ama hiçbiri başarılı olamadı. Hiçbiri P_1 ve P_2 cinsinden doğru P_{12} eğrisini elde edemedi.

Oysa, P_1 ve P_2'yi P_{12}'ye bağlayan matematiğin aşırı derecede basit olması yeterince şaşırtıcıdır. Çünkü P_{12}, tıpkı Şekil 6–2'deki I_{12} eğrisi gibidir ve o çok basitti. Durdurucuda olan biten her şey, z_1 ve z_2 diyeceğimiz iki karmaşık sayıyla (kuşkusuz, onlar x'in fonksiyonlarıdır) betimlenebilir. z_1'in mutlak karesi sadece 1. deliğin açık olması durumundaki etkiyi verir. Dolayısıyla $P_1 = |z_1|^2$'dir. Ayni şekilde sadece 2. deliğin açık olması durumundaki etki $|z_2|^2$ olup $P_2 = |z_2|^2$'dir. Ve iki deliğin birleşik etkisi

$P_{12} = |z_1 + z_2|^2$'dir. Buradaki *matematik*, su dalgaları için sahip olduğumuz matematiğin aynısıdır! (Böylesine basit bir sonucu, elektronların acayip bir yörünge boyunca levhanın içinden ileri geri gidip gelmesinin karmaşık bir oyunundan nasıl elde edebileceğini anlamak zordur.)

Şu sonuca varırız: Elektronlar durdurucu levhaya, parçacıklar gibi, topaklar halinde varırlar ve bu topakların varma olasılığı, bir dalganın şiddet dağılımına uyar. Bu demektir ki, bir elektron "bazen bir parçacık gibi ve bazen de bir dalga gibi davranır."

Bu arada, klasik dalgalarla uğraşırken, şiddeti, dalga genliğinin karesinin zaman üzerinden ortalaması olarak tanımlamıştık ve çözümlemeyi basitleştirmek için matematiksel bir kurnazlık olarak karmaşık sayıları kullanmıştık. Fakat kuantum mekaniğinde, genliklerin karmaşık sayılarla betimlenmesi *gerektiği* anlaşılıyor. Yalnızca gerçel kısımlar bunu yapamayacaktır. Bu, şu an için teknik bir noktadır, çünkü formüller tamamen aynı görünüyor.

Her iki delikten geçerek levhaya varma olasılığı, $P_1 + P_2$'ye eşit olmasa da, böylesine basit olduğuna göre, gerçekten başka ne denebilir ki? Fakat doğanın böyle işlediği gerçeğinde içerilen pek çok incelik vardır. Şimdi size bu inceliklerin bazılarını anlatmak istiyoruz. Önce, belirli bir noktaya ulaşan elektron sayısı, 1. delikten ulaşan sayı ile 2. delikten ulaşan

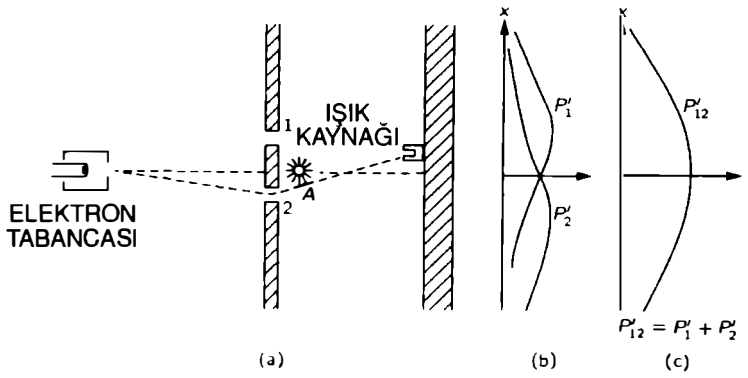
sayının toplamına *eşit olmadığından*, oysa Önerme A'dan eşit olma sonucunu çıkarmalıydık, hiç kuşku yok ki *Önerme A'nın yanlış olduğu* sonucuna varmamız gerekir. Elektronların ya 1. delikten ya da 2. delikten geçecekleri doğru *değildir*. Fakat bu çıkarım bir başka deneyle sınanabilir.

Elektronları İzleme

Şimdi şu deneyi yapmaya çalışacağız. Elektron düzeneğimize, Şekil 6–4'te görüldüğü gib, metal levhanın arkasına ve iki deliğin arasına yerleştirilmiş çok güçlü bir ışık kaynağı ekleyeceğiz. Elektrik yüklerinin ışığı saçtığını biliyoruz. Dolayısıyla bir elektron delikleri geçip dedektöre doğru giderken, gözümüze biraz ışık saçacaktır, böylece elektronun nereye gittiğini görebileceğiz. Örneğin bir elektron Şekil 6–4'te çizildiği gibi 2. delikten yoluna devam ediyorsa, şekilde A işaretli yerin yakınından gelen bir ışık çakması görürüz. Eğer bir elektron 1. delikten geçiyorsa, üstteki deliğin yakınlarından gelen bir ışık çakması görmeyi bekleriz. Eğer aynı anda her iki yerden gelen ışık görürsek, o zaman elektron ikiye bölündü demektir . . . Haydi gelin şu deneyi yapalım!

Gördüğümüz şudur: Durdurucudaki elektron dedektöründe duyduğumuz her "tık" sesiyle birlikte, ya 1. delik ya da 2. delik yakınlarında bir ışık çakması görürüz; ama hiçbir zaman bir seferde iki çakma görmeyiz. Dedektörü nereye koyarsak koyalım, hep aynı sonucu gözleriz. Bu gözlemden şu sonucu çıkarırız: Elektronlara baktığımızda, elektronların ya bu delikten ya da diğerinden geçtiğini buluruz. Deneysel olarak, A önermesi mutlak surette doğrudur.

Öyleyse A önermesi'ne *karşı* tartışmamızda yanlış olan nedir? P_{12}, neden $P_1 + P_2$'ye eşit değildir? Tekrar deneye geri gidelim! Elektronları izleyelim ve ne yaptıklarını anlayalım. Dedektörün her x konumunda oraya ulaşan elektronları sayacağız ve ayrıca ışık çakmalarını gözleyerek hangi delikten geçtiklerini izleyeceğiz. Bunu şöyle yapabiliriz: Her "tık" sesi duyduğumuzda, ışık çakmasını 1. delik yakınında görürsek



Şekil 6–4 Farklı bir elektron deneyi

1. sütun'a, 2. delik yakınında görürsek 2. sütun'a bir çizgi çekeceğiz. Ulaşan her elektron iki sınıftan birine kaydedilecektir: 1. delikten gelenler ve 2. delikten gelenler sınıfına. 1. sütun'da kaydedilen sayıdan $P`_1$ olasılığını elde ederiz; bu, bir elektronun 1. delikten geçip dedektöre ulaşma olasılığıdır. Ve 2. sütun'da kaydedilen sayıdan P'_2'yi, diğer bir deyişle bir elektronun 2. delikten geçip dedektöre ulaşma olasılığını elde ederiz. Bu deneyi birçok x değeri için tekrarlarsak, Şekil 6–4'ün (b) kısmında görülen $P`_1$ ve P'_2 eğrilerini elde ederiz.

Evet, bu pek şaşırtıcı değil! $P`_1$ için, daha önce 2. deliği kapatarak bulduğumuz P_1'e çok benzeyen bir eğri bulduk; P'_2 de, 1. deliği kapattığımız zaman elde ettiğimiz eğrinin benzeridir. Böylece her iki delikten geçme gibi hiçbir karmaşık durum yok ortada. Onları gözlediğimizde, elektronlar tam olarak beklediğimiz gibi geçiyorlar. Delikler ister kapalı isterse açık olsunlar, 1. delikten geçerek geldiklerini gördüğümüz elektronlar, 2. delik açık da olsa kapalı da olsa aynı şekilde dağılıyorlar.

Fakat hele durun! Bu durumda *toplam* olasılık nedir? Bir elektronun herhangi bir yoldan dedektöre ulaşma olasılığı nedir? Bu bilgiye zaten sahibiz. Işık çakmalarına hiç bakmamış gibi yapalım ve iki sütuna ayırdığımız dedektör

"tık"lamalarını bir araya toplayalım. Bu durumda sadece sayıları *birbirlerine eklemeli*yiz. Bir elektronun her iki delikten geçerek durdurucuya ulaşma olasılığı olarak $P`_{12} = P`_1 + P'_2$ buluruz. Dolayısıyla elektronların hangi delikten geçtiklerini gözleyerek yürüttüğümüz deneyde eski P_{12} girişim eğrisini elde etmeyip, girişim göstermeyen yeni bir $P`_{12}$ elde ediyoruz! Işığı kapatırsak, tekrar P_{12}'yi buluyoruz.

Şu sonucu çıkarmak zorundayız: Elektronları izlediğimiz takdirde onların perdedeki dağılımı, izlemediğimiz zamanki dağılımdan farklıdır. Belki ışık kaynağını açmak her şeyi tedirgin ediyor. Elektronlar çok nazik olmalı, ışık elektronlardan saçıldığında onlara hareketlerini değiştirecek bir sarsma veriyor. Işığın elektrik alanı bir yük üzerine etkidiğinde, ona bir kuvvet uygulayacağını biliyoruz. Böylece belki hareketin değişmesini bekleyebiliriz. Her neyse, ışık elektronlara büyük bir etki uygular. Elektronları "izlemeye" çalışarak onların hareketlerini değiştirdik. Demek ki elektron tarafından saçılan fotonun elektrona verdiği sarsma, elektronun hareketini yeteri kadar değiştirerek, P_{12}'nin maksimum olduğu bir yere gidecekken minimum olduğu bir yere gitmesine yol açıyor; biz bu nedenle artık dalgalı girişim etkilerini görmüyoruz.

Belki şöyle düşünürsünüz: "böyle parlak bir kaynak kullanmayın! Kaynağın parlaklığını azaltın. O zaman ışık dalgası zayıflayacak ve elektronu pek fazla tedirgin etmeyecektir. Kuşkusuz, ışığı zayıflatarak sonunda dalgayı göz ardı edecek derecede bir etki yaratacak hale gelene kadar küçültürsünüz." Peki, haydi bunu deneyelim. İlk gözleyeceğimiz şey, geçen elektronlardan saçılacak olan ışık çakmasının zayıflamayacağıdır. *Çakma daima aynı büyüklüktedir.* Işık zayıfladığında olan sadece şudur: Bazen dedektörde bir "tık" sesi duyarız, *fakat hiç çakma görmeyiz.* Elektron "görünmeden" gitmiştir. Buradan ışığın da elektronlar gibi davrandığını çıkarırız; ışığın "dalgalı" olduğunu *biliyorduk*, fakat şimdi "topaklı" olduğunu da bulmuş oluyoruz. Işık, daima "fotonlar" denen topaklar halinde gelir ya da saçılır. Işık kaynağının

şiddetini düşürdüğümüzde, fotonların büyüklüklerini değiştirmeyiz, sadece onların miktarını azaltırız. Bu, kaynağımız zayıfladığında, bazı elektronların neden görünmeden gittiklerini açıklar. Çünkü elektronun geçtiği anda oralarda bir foton yoktur.

Tüm bunlar biraz umut kırıcıdır. Her elektron gördüğümüzde aynı-şiddette bir ışık çakması da "gördüğümüz" doğruysa, bu durumda gördüğümüz bu elektronlar daima tedirgin edilmiş elektronlardır. Deneyi bir şekilde zayıflatılmış ışıkla yapmayı deneyelim. Şimdi her ne zaman dedektörde bir "tık" sesi duyarsak, üç sütundan birine bir çizgi çekeceğiz: 1. delikte görülen elektronlar 1. sütun'da, 2. delikte görülenler 2. sütun'da ve hiç görülmeyenler 3. sütun'da işaretlenecek. Verileri işlediğimizde (olasılıkları hesaplayarak), şu sonuçları buluruz: "1. delikte görülen" elektronlar P'_1 gibi bir dağılıma, "2. delikte görülenler" P'_2 gibi bir dağılıma (öyle ki ya "1. delikte ya da 2. delikte görülen" elektronlar P'_{12} gibi bir dağılıma) sahiptirler; ve "hiç görülmeyenlerin" ise tam Şekil 6–3 'teki P_{12} gibi "dalgalı" bir dağılımı vardır! Elektronlar görülmüyorsa, girişime sahibiz!

Bu anlaşılabilir bir durumdur. Elektronu görmediğimiz zaman, onu tedirgin eden foton yoktur; oysa onu gördüğümüzde, onu bir foton tedirgin etmiştir. Her zaman aynı miktarda tedirginlik vardır, çünkü ışık fotonlarının tümü aynı-şiddette etkiler üretirler ve saçılmış olan fotonların etkisi her girişim etkisini yeterince bozar.

Elektronları tedirgin etmeden görmenin bir yolu yok mudur? Daha önceki bir bölümde bir "fotonun" taşıdığı momentumun onun dalga boyuyla ters orantılı olduğunu görmüştük ($p = h/\lambda$). Foton bizim gözümüze doğru saçıldığında elektrona verilen sarsma, bu fotonun taşıdığı momentuma bağlıdır. Hah işte! Elektronları azıcık tedirgin etmek istersek, ışığın şiddetini düşürmeyip onun frekansını azaltmalıyız (dalga boyunu arttırmakla aynı şey). Öyleyse kırmızıca renkli bir ışık kullanalım. Hattâ kızılaltı ya da radyo dalgası

(radar gibi) kullanabiliriz ve bu daha uzun dalga boylu ışığı "gören" bir düzeneğin yardımıyla elektronun nereye gittiğini "görebiliriz." "Daha yumuşak" ışık kullanırsak, belki de elektronları bu kadar çok tedirgin etmekten kaçınabiliriz.

Deneyimizi daha uzun dalgalarla yapmaya çalışalım. Deneyimizi her seferinde daha uzun dalga boyuyla tekrarlamayı sürdüreceğiz. Önce, hiçbir şey değişmiyor gibi görünür. Sonuçlar aynıdır. Sonra, korkunç bir şey olur. Hatırlarsanız, mikroskobu tartıştığımızda, ışığın *dalga doğası*na göre, iki lekenin hâlâ iki leke olarak ayırt edilebilmesi için ne kadar yakın olabilecekleri üzerine bir sınırlamanın var olduğuna işaret etmiştik. Bu uzaklık ışığın dalga boyu mertebesindedir. Öyleyse, ışığın dalga boyu iki deliğin arasındaki uzaklıktan daha büyük alındığında, ışık elektronlardan saçıldığı zaman büyük bir bulanık çakma görürüz. Artık elektronun hangi delikten geçtiğini söyleyemeyiz! Elektronun herhangi bir yerden gittiğini biliriz! Ve anlarız ki tam bu renkteki ışıkla elektrona verilen sarsıntı, P'_{12}'nin P_{12} gibi görünmeye –girişim etkisi elde etmeye– başlamasına yetecek kadar küçüktür. Ancak iki deliğin arasındaki uzaklıktan çok daha uzun dalga boyları için (elektronun nereden gittiğini söyleme şansını tamamen kaybettiğimiz zaman) ışığın neden olduğu tedirgeme yeterince küçüktür ve tekrar Şekil 6–3'te görülen P_{12} eğrisini elde ederiz.

Deneyimizde, hem elektronun hangi delikten geçtiğini söyleyebilecek ve hem de olasılık dağılımını bozmayacak şekilde ışığı düzenlemenin olanak dışı olduğunu buluruz. Heisenberg tarafından önerildiği gibi, yeni doğa yasalarının tutarlı olması için, deneysel yeteneklerimiz üzerine daha önce onaylamadığımız bazı temel sınırlamalar konmalıdır. Heisenberg'in genel bir ilke olarak önerdiği *belirsizlik ilkesi*, deneyimiz cinsinden ifade edebileceğimiz haliyle şöyledir: "Elektronun hangi delikten geçtiğini belirleyecek ve aynı zamanda elektronları girişim desenini bozmaya yetecek ölçüde tedirgin etmeyecek bir düzenek tasarlamak olanaksızdır." Eğer bir düzenek elektronun hangi delikten geçtiğini belirte-

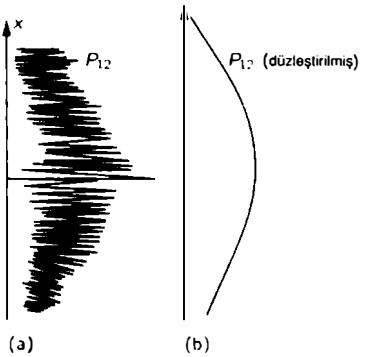
biliyorsa, deseni esaslı bir şekilde bozmayacak kadar hassas *olamaz*. Bu güne kadar hiç kimse belirsizlik ilkesinin etrafından dolanacak bir yol bulamadı (düşünemedi bile). Dolayısıyla bu ilkenin doğanın bir temel karakteristiğini betimlediğini kabul etmeliyiz.

Artık atomları ve aslında tüm maddeyi betimlemede kullanacağımız tam kuantum mekaniği kuramı, belirsizlik ilkesinin doğruluğuna dayanır. Kuantum mekaniği böylesine başarılı bir kuram olduğundan, belirsizlik ilkesine olan inancımız pekişmiştir. Fakat şimdiye kadar belirsizlik ilkesini "yenecek" bir yol keşfedilebilseydi, kuantum mekaniği tutarsız sonuçlar verirdi ve doğanın geçerli bir kuramı olmaktan çıkardı.

"Peki, Önerme A hakkında ne düşünüyorsunuz? Doğru mu, doğru değil mi? Elektron 1. delikten mi geçiyor, yoksa 2. delikten mi?" diye sorabilirsiniz. Verilebilecek tek yanıt şudur: Tutarsızlığa düşmemek için deneyden çıkardığımız belirli özel bir yoldan düşünmek durumundayız. Yanlış öngörülerden kaçınmak için şöyle demeliyiz: Deliklere bakılırsa, ya da daha doğru bir deyişle, elektronların 1. delikten mi yoksa 2. delikten mi geçtiğini belirtebilen bir düzenek parçası varsa, bu durumda elektronların 1. delikten ya da 2. delikten geçtiği söylene*bilir*. *Fakat* elektronun hangi yoldan gittiğini söylemeye girişmiyorsanız, o zaman deneyde elektronları tedirgin edecek hiçbir şey yoktur ve bu durumda elektronun 1. delikten mi yoksa 2. delikten mi geçtiğini söyleyemezsiniz. Eğer bunu söyler ve o söylemden çıkarımlar yapmaya başlarsanız, işte o zaman çözümlemede hatalar yapacaksınız demektir. Doğayı başarılı bir şekilde betimlemek istiyorsak, üzerinde cambaz gibi yürümemiz gereken gergin mantıksal ip budur.

Tüm maddenin –bu arada elektronların da– hareketi dalgalar cinsinden betimlenmek zorundaysa, ilk deneyimizdeki mermiler hakkında ne diyebiliriz? Orada neden bir girişim deseni görmedik? Mermiler için dalga boyları öylesine küçüktür ki girişim desenleri çok ince hale gelir. Aslında öy-

lesine ince ki sonlu boyutlu hiçbir dedektörle ayrı maksimum ve minimumlar ayırt edilemezler. Gördüğümüz sadece bir tür ortalamadır ve bu da klasik eğridir. Şekil 6–5'te, büyük-ölçekli cisimlerle olan biteni şema halinde göstermeye çalıştık. Şeklin (a) kısmı, mermiler için kuantum mekaniği kullanılarak beklenebilecek olasılık dağılımını gösteriyor. Hızlı kıpırtıların, çok kısa dalga boylu dalgalar için ele geçecek girişim desenini betimlediği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, hiçbir fiziksel dedektör, olasılık eğrisinin birçok kıpırtısını birbirinden ayıramaz; böylece ölçümler şeklin (b) kısmındaki düzgün eğriyi gösterir.



Şekil 6–5 Mermilerle girişim deseni (a) gerçek (şematik), (b) gözlenen

Kuantum Mekaniğinin Temel İlkeleri

Şimdi deneylerimizin esas sonuçlarını özetleyeceğiz. Yine de bu sonuçları, bu türden genel bir deneyler sınıfı için geçerli olacak bir yapıya sokacağız. Önce bir "ideal deney"i, içinde belirsiz dış etkilerin, diğer bir deyişle hesaba katamayacağımız sürüp giden sallantıların ya da diğer şeylerin yer almadığı bir deney olarak tanımlarsak, özetimizi çok daha basit olarak yazabiliriz. "Bir ideal deney, başlangıç ve bitiş koşulları tümüyle belirtilmiş bir deneydir" dersek, çok doğru ve kesin davranmış oluruz. Bir "olay" diye adlandıracağımız,

genelde, belirli başlangıç ve bitiş koşulları cümlesidir. (Örneğin "bir elektron tabancadan çıkar, dedektöre gelir ve hiçbir şey olmaz.") İşte özetimiz.

Özet

(1) Bir ideal deneyde, bir olayın olasılığı, olasılık genliği denen bir ϕ karmaşık sayısının mutlak değerinin karesiyle verilir.

$$\begin{aligned} P &= \text{olasılık} \\ \phi &= \text{olasılık genliği} \\ P &= |\phi|^2 \end{aligned} \qquad (6.6)$$

(2) Bir olay birkaç değişik yoldan meydana gelebiliyorsa, bu olayın olasılık genliği, her yol ayrı ayrı ele alınarak yazılan olasılık genliklerinin toplamıdır. Bu durumda girişim vardır.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 + \phi_2 \\ P &= |\phi_1 + \phi_2|^2 \end{aligned} \qquad (6.7)$$

(3) Değişik yollardan hangisinin gerçekten izlendiğinin belirtilebildiği bir deney yapılırsa, olayın olasılığı, her yol için yazılan olasılıkların toplamıdır. Bu durumda girişim kaybedilir.

$$P = P_1 + P_2 \qquad (6.8)$$

Yine de "Bu nasıl işler? Bu yasanın arkasındaki mekanizma nedir?" diye sormak isteyebilirsiniz. Hiç kimse bu yasanın dayandığı bir mekanizma bulamamıştır. Hiç kimse bizim "açıkladığımız"dan daha fazlasını "açıklayamaz." Hiç kimse size bu durumun daha derin hiçbir temsilini veremeyecektir. Bu sonuçların çıkarılabileceği daha temel bir mekanizma hakkında hiçbir düşünceye sahip değiliz.

Klasik mekanik ve kuantum mekaniği arasındaki çok önemli bir ayrımı vurgulamak istiyoruz. Bir elektronun ve-

rilen bir duruma ulaşma olasılığı hakkında konuşuyorduk. Deneysel düzenlememizde (ya da mümkün olan en iyi düzenlemede) tam olarak ne olacağını öngörmenin olanaksız olduğunu söylemiştik. Sadece acayiplikler/olasılıklar öngörebiliriz! Bu doğru olsaydı, bu, fiziğin, verilen bir durumda tam olarak ne olacağını öngörme probleminden vazgeçtiği anlamına gelirdi. Evet! Fizik bundan vazgeçmiştir. Verilen bir durumda ne olabileceğini nasıl öngöreceğimizi bilmiyoruz ve artık inanıyoruz ki bu olanaksızdır; öngörebileceğimiz tek şey, farklı olayların olasılığıdır. Bunun, daha önceki doğayı anlama idealimizde bir kısıtlama olduğunu anlamalıyız. Bu bir geri adım olabilir, fakat hiç kimse bundan kaçınmanın bir yolunu bulamamıştır.

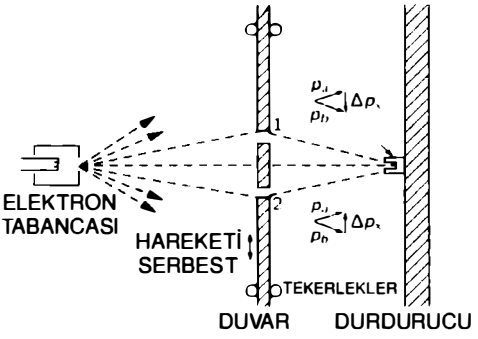
Şimdi verdiğimiz betimlemeyi göz ardı etmeye çalışan bir öneri üzerine birkaç uyarı yapacağız: "Belki de elektron bir tür iç-işlemeye –bazı iç değişkenlere– sahiptir, ama bizim henüz bunlar hakkında hiç bilgimiz yoktur. Belki de bundan ötürü ne olacağını öngöremiyoruz. Elektrona daha yakından bakabilseydik, nerede sonlanacağını söyleyebilirdik." Bildiğimiz kadarıyla, bu olanaksızdır. Yine de güç durumda oluruz. Varsayalım ki elektronun içinde sonunda nereye gideceğini belirten bir tür mekanizma var. Bu mekanizma yolu boyunca elektronun hangi delikten geçeceğini de belirliyor. Fakat şunu unutmamalıyız ki elektronun içinde olan şey, bizin ne yapacağımıza bağımlı değildir ve özellikle deliklerden birini kapatıp kapatmayacağımıza. Böylece bir elektron, daha harekete geçmeden önce (a) hangi deliği kullanacağına ve (b) nereye ulaşacağına karar vermişse, 1. deliği seçmiş olan elektronlar için P_1, 2. deliği seçmiş olanlar için P_2 ve zorunlu olarak iki delikten geçerek gelenler içinse $P_1 + P_2$ olasılıklarını bulmalıyız. Bundan başka yol yok gibi görünüyor. Fakat durumun böyle olmadığını deneysel olarak doğrulamıştık. Ve hiç kimse bu bilmeceden bir kurtulma yolu düşünemedi. Öyleyse şimdilik kendimizi olasılıkları hesaplamaya sınırlamak zorundayız. "Şimdilik" diyoruz, ama bunun sonsuza kadar bizimle olacağını, bu bilmeceyi çözmenin olanak-

sızlığını, doğanın gerçekten bu yolda olduğunu çok kuvvetli bir şekilde sezinliyoruz.

Belirsizlik İlkesi

Heisenberg'in özgün olarak ifade ettiği belirsizlik ilkesi şu şekildedir: Herhangi bir cisim üzerinde ölçme yaparsanız ve onun momentumunun x-bileşenini Δp belirsizliğiyle saptayabilirseniz, onun x-konumunu, aynı anda, $\Delta x = \hbar / 2\Delta p$'den daha doğru olarak bilemezsiniz. Herhangi bir anda, konum ve momentumun belirsizliklerinin çarpımı, indirgenmiş Planck sabitinin yarısından daha büyüktür. Bu, yukarıda daha genel olarak ifade edilmiş olan belirsizlik ilkesinin bir özel halidir. Çok daha genel ifade şudur: İki seçenekten ele alınan birini saptamak üzere, girişim desenini aynı anda bozmaksızın hiçbir şekilde bir düzenek tasarlanamaz.

Bizi sıkıntıya düşmekten koruması için, Heisenberg'in verdiği türden bir bağıntının gerekli olduğunu özel bir durum için gösterelim. Şekil 6–3'teki deneyde bir değişiklik yapalım, şöyle ki delikli duvar bu kez altına tekerlekler eklenmiş bir levha olsun ve Şekil 6–6'da görüldüğü gibi serbestçe aşağı yukarı (x-doğrultusunda) hareket edebilsin. Levhanın hareketini dikkatlice izleyerek, elektronun hangi delikten geçtiğini söylemeye çalışalım. Dedektörü $x = 0$'a yerleştirdiğimizde ne olacağını düşünelim. 1. delikten geçen elektronun dedektöre ulaşmak için levha tarafından aşağıya doğru saptırılmasını bekleriz. Elektronun düşey momentum bileşeni değişeceği için, levha eşit momentumla zıt yönde geri tepmelidir. Levha yukarı doğru bir itme kazanacaktır. Elektron alttaki delikten geçerse, levha aşağı doğru bir itki hissetmelidir. Dedektörün her konumu için, levhanın 1. delik aracılığıyla alacağı yanlamasına momentumun 2. delik aracılığıyla alacağı yanlamasına momentumdan farklı bir değere sahip olacağı açıktır. Böylece elektronları hiç tedirgin etmeden, sadece levhayı izleyerek, elektronun hangi yolu kullandığını söyleyebiliriz.



Şekil 6–6 Levhanın geri tepmesinin ölçüldüğü bir deney.

Bunu yapmak için, elektron delikten geçmeden önce levhanın momentumunun ne olduğunu bilmemiz gerekir. Böylece elektron geçtikten sonra momentumu ölçersek, levhanın momentumunun ne kadar değiştiğini hesaplayabiliriz. Ama hatırlarsanız, belirsizlik ilkesine göre, aynı zamanda levhanın konumunu keyfi bir doğrulukla bilemeyiz. Ama levhanın nerede olduğunu tam olarak bilemiyorsak, iki deliğin de kesin olarak nerede olduğunu söyleyemeyiz. Her elektron geçişinde onlar farklı yerde olacaklardır. Bu demektir ki girişim deseninin merkezi, her elektron için farklı bir konuma sahip olacaktır. Girişim deseninin kıpırdamaları, deseni bozacaktır. Gelecek bölümde nicel olarak göstereceğiz ki, geri tekme ölçümünden hangi deliğin kullanıldığını saptamak için levhanın momentumunu yeterince doğrulukla belirtirsek, bu durumda levhanın x-konumundaki –belirsizlik ilkesi uyarınca hesaplanan– belirsizliği, dedektörde gözlenen deseni, x-doğrultusunda bir maksimumdan ona bitişik minimuma olan uzaklık kadar kaydırmaya yetecektir. Böyle bir rasgele kayma, deseni bozmaya tam yetecek ve hiç girişim gözlenmeyecektir.

Belirsizlik ilkesi kuantum mekaniğini "korumakta"dır. Konum ve momentumu eş zamanlı olarak büyük bir doğrulukla ölçmek mümkün olsaydı, kuantum mekaniğinin çökebi-

leceğini fark etmişti Heisenberg. O nedenle, bunun olanaksız olduğunu öne sürmüştü. Sonra fizikçiler oturdular ve bunu yapmanın yollarını aradılar; hiç kimse hiçbir nesnenin –bir levhanın, bir elektronun, bir bilardo topunun, hiçbir şeyin– konum ve momentumunu istendiği kadar büyük bir doğrulukla ölçmenin bir yolunu bulamadılar.

Kuantum mekaniği, kendi riskli ama kesin varlığını sürdürmektedir.

DİZİN

"Acayiplik" sayısı, parçacıklar, 70, 72-3
"Oyunun kuralları," 54-5
α-irone (süsen özü), 49-50
Açısal momentum, 115, 116, 132-3
Adenin, 87
Ağırlık-kaldırıcı makineler, 102-7
Aktomiyozin, 81
Amino asitler, 57, 87, 89
Angström (Å), 35-6
Asetilkolin, 81
Astronomi, fizik ve, 89-91, 95
Atmosfer basıncı, 36-7
Atom bombası, 68-9
Atom mekaniği, kuantumlu davranış, 147-50
Atom olgusu, 34
Atom varsayımı, 34-41
Atomlar. *Ayrıca bkz.* Kuantum mekaniksel
  kimyasal tepkimeler, 45-51
  tüm maddenin bileşenleri olarak, 34-41
  için kanıtlar, 49-51
  giriş, 31-4
  etiketleme, 84-5
  fiziksel süreçler ve, 40-6
  özellikler, 57
  boyut, 35-6, 64-5
Ay, kütleçekim yasası ve, 124-9
Azot molekülleri, 41-3, 47-8
Bağlanma, fotonlar, 73-5
Basınç
  atmosferik, 36-7
gazlarda, 36-9
Baryonlar, 70, 72-5, 115-6
Bellek, 93-4
Beta-bozunumu parçacık etkileşmeleri, 73-5
Bilimsel yöntem, 54
Birleştirme, doğal olayların sınıfları, 56-7
Bitkiler
  biyolojisi, 81-3
  terleme, 47-8
Biyoloji, fizik ve, 79-89
Bohr, Niels, 15-6
Brahe, Tycho, 20, 120
Brown hareketi, tanımlı, 50-1
Buhar, atom varsayımı, 36-9
Buharlaşma, 41-4
Bulutsular, kütleçekim yasası ve, 133-6
Burulma fiberi, 136
Buz, atom varsayımı, 39-41

Cavendish deneyi, 134-9
Challenger (uzay mekiği), 19
Çalkantılı akış, 92
Çalkantılı sıvılar, 96
Çekim, elektrik kuvveti ve, 58

Çekirdekler
parçacıklar ve, 32, 68-75
boyutu, 64-5
Çekirdek Fiziği
doğa olayı olarak, 56
çekirdekler, parçacıklar ve, 68-75
Çekirdek kuvveti parçacık etkileşmesi, 73-5
Çekirdek tepkimeleri, yıldızlar, 91
Çembersel yolun merkezine doğru ivme, 127-8
Çift yıldız, 131-2
Çizgisel momentum, 115
Çökelti, 44-5
Çözelti, çökelti ve, 44-5

Dağlar, 92-3
Dalgalar
davranışı, 62-4, 66-7
elektromanyetik, 61-4
aşırı yoğunluk, ses ve, 58
ile kuantumlu davranış deneyi, 152-5
Dengelenmemiş elektrik kuvveti, 59
Deney yapma, Ayrıca bkz. Kuantumlu davranış
bilimsel yöntem ve, 54, 65-7
yöntemleri, fizik ve, 84-5
Depremler, 92-3
Dinamik süreçler, tanımlı, 44-5
Dioksiribo Nükleik Asit (DNA), 85-9
DNA (DioksiriboNükleik Asit), 85-9
Doğa felsefesi, 47
Doğa, olayları, 26
Dolanan sıvılar, 96
Duygu, fizyolojisi, 93-4
Düşey hareketler, 125-7

$E = mc^2$, 113-4
Eğik düzlem, düz, 107-8
Eğri uzay-zaman, 63-4
Einstein, Albert, 9, 19, 63-4, 113-4
Elektrik enerjisi, 101, 113-4
Elektriksel parçacık etkileşmeleri, 73-5
Elektriksel potansiyel enerji, 106-8
Elektromanyetik alan, tanımlı, 56, 61-2
Elektromanyetik dalgalar, 61-4
Elektron mikroskopları, 49-50
Elektrik
kütleçekimle karşılaştırmalı, 59, 140-1
kuvvetleri, 58-60
doğal olay olarak, 56
Elektrik alanı
tanımlı, 60
manyetizma ve, 61-2
kuantum elektrodinamiği, 67-8
Elektronlar. Ayrıca *bkz.* Kuantumlu davranış
karşılaştırmalı, müonlar, 73-4
kimyasal özellikleri saptar, 60
kütle/yük, 68-9
karşıt yüklü pozitronlar, 67-9
özellikleri, 59-60
Elementlerin periyodik tablosu, 69-70, 72, 78
Elips, 120-2, 127-8
Enerji. Ayrıca bkz. Enerji korunumu
değişik enerji biçimlerinin formülleri, 100-2
kütleçekim ve, 73-4
hareketin, 111
yıldızların/güneşin, 90-1
kaynakları, 115-7
Enerjinin korunumu
kütleçekim potansiyel enerji, 102-11

kinetik enerji, 111-2
yasası, 80, 99-102
diğer enerji türleri, 112-7
Entropi, 115-6
Enzimler, 83-7
Erime, tanımlı, 40-1
Erozyon, 92
Esneklik enerjisi, 47-8, 112-3
Etkileşme kuvveti, 57
Etkinleştirme enerjisi, 82-3
Euclid, 57
Evren, yaşı, 141-2
Evrensel kütleçekim, 128-36
Evrim, 95
Eylemsizlik, 57, 123-4, 142-3

Felsefe, fizik ve, 65-7, 77
Fermentler, 83
Fermi-Dirac istatistiği, 22-3
Feynman, Richard, 9-24
Feynman'ın Fizik Dersleri, 7, 13-4, 22-3
Fizik
1920 öncesi, 57-64
astronomi ve, 89-91
biyoloji ve, 79-89
kimya ve, 78-9
jeoloji ve, 91-3
giriş, 53-7
çekirdeksel, 56, 68-75
çekirdekler ve parçacıklar, 68-75
psikoloji ve, 93-4
diğer bilimlerle ilişkisi, 77, 93-6
Fizikokimya, 79
Frekanslar, elektromanyetik dalgalar, 61-4, 66-8
Fotonlar
bağlanma, 73-5
elektronlar, kuantumlu davranış ışıkla deney, 162-4
enerjisi, 115
elektronlara zıt yük olarak, 67-9
özellikleri, 70, 72
Fotosentez, 82-3

Galileo, 122-3
Gamma ışınları, 62-4, 67-9
Gazlar, atom varsayımı, 36-11
GDP ve GTP, 84
Gelgitler, ayın çekimi ve, 127-30
Gell-Mann, 70, 72
Genişleme, bir gazın, 38-41
Gezegen hareketleri, kütleçekim ve, 119-20
Girişim deneyleri, kuantumlu davranış, 149-67
Tersinmez termodinamik süreçler, entropi için, 115-6
Gökada, şekli, 132-4
Gökadalar kümesi, 133-4
Görelilik
kütleçekim ve, 142-4
kuramı, 73-4
Gözlem, bilimsel yöntem ve, 54
Gravitonlar, 70,72-4
Guanin, 87
Guanosin-di-fosfat (GDP), 84
Guanosin-tri-fosfat (GTP), 84
Güçlü parçacık etkileşmeleri, 73-5
Güneş, gezegen hareketleri ve, 120-3

Hareket
enerjisi, 111-2
yasaları, 122-4
Hava
çalkantılı akış, 92
suyun buharlaşması, 41-4
Hava durumu, 91-2, 96
Hava ve katıların suda çözünmesi, 42-3

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, 16-7, 64-5, 164-5, 169-71
Helyum, 40-1, 90-1
Hemoglobin, 85-6
Hız, kinetik enerji ve, 112
Hidrojen, 91
Hücreler, biyolojik fonksiyonlar, 80-3

Isı
  yanmadan, 46-7
  molekül hareketi ve, 35-7
  hareketli parçacıklar, 58
  doğal olay olarak, 56
  istatistik mekanik ve, 78-9
Isı enerjisi, 101, 112-3
Işık
  astronomi, fizik ve, 89-91
  elektronlar, kuantumlu davranış ile deneyler, 160-6
  yayınlama, 67-9
  enerjisi, 113-4, 147
  üreterek, yanarak ve, 46-7
  doğal olay olarak, 56
  kuantum elektrodinamiği, 67-8
Işık dalgaları, 61-2, 148-9
Işık mikroskopları, 49-50
Işıma enerjisi, 101, 113-4
İmino asit, 84-5
İnorganik Kimya, 78-9
İstatistik mekanik, 78-9, 90
İş, sanal, 110
İtme, elektrik kuvveti ve, 58
İvme, kuvvet, kütle ve, 119, 123-4
İyonlar, tanımlı, 43-4
İzotoplar, 84-5, 91

jeoloji ve, 92-3
Jeoloji, fizik ve, 91-6
Jüpiter, ayları, 102-3

K-mezonlar, 72-3
Karbondioksit (CO_2), 46-8
Karbonmonoksit, 46-7
Karbon, 45-7
Karşı-nötronlar, 68-9
Karşı-parçacıklar, 68-9, 72-3
Karşı-protonlar, 68-9
Katılar
  atom varsayımı, 39
  suda çözülme, 43-6
Kepler yasaları, 20, 120-3
Kısa-erimli etkileşme kuvveti, 58
Kızılaltı frekanslar, 62-3
Kimya, fizik ve, 78-9
Kimyasal enerji, 101, 113-4
Kimyasal formüller, tanımlı, 48-9
Kimyasal tepkimeler
  atom varsayımı, 45-51
  doğal olay olarak, 56
Kinetik enerji, 64-5, 101, 111-3
Koku, moleküller ve, 47-9
Konum, belirsizliği, 64-5
Kopernik (Copernicus), 120
Kozmik ışınlar, 62-4, 68-9
Krebs çevrimi, 54-6
Kristal dizilimi, 39
Kuantum elektrodinamiği (QED), 10, 67-9, 73-5
Kuantumlu davranış
  atom mekaniği, 147-50
  mermiler, ile deney, 149-52
  elektron dalgaları, girişimi, 156-60
  elektronlar, ile deney, 154-7, 160-6
  dalgalar, ile deney, 152-5
Kuantum mekaniği
  kimyanın, 56, 78
  tanımlı, 148-9
  ilk ilkeleri, 166-9
  kütleçekim ve, 144
  özellikleri, 63-9
  belirsizlik ilkesi, 169-71
Kuantum kimyası, 79

Kullanılabilir enerji, 115-6
Kuvvet
  eylemsizlik ve, 57-8, 123-4
  alanla orantılı, 37
  şiddeti, uzaklık ve, 133-8
Küresel yıldız kümesi, 132-3
Kütle
  dünya, 137
  elektronlar, 68-9
  kütleçekimin orantılı kuvveti, 142-3
Kütle enerjisi, 101, 113-4
Kütleçekim
  Cavendish deneyi, 134-8
  elektrikle karşılaştırma, 59, 140-1
  eğri uzay-zaman, 63-4
  tanımlı, 57
  dinamiğin geliştirilmesi, 122-4
  Kepler yasaları, 120-3
  mekanizmaları, 138-43
  doğal olay olarak, 56
  Newton yasaları, 124-9
  parçacık etkileşmeleri, 73-5
  gezegen hareketleri, 93-4
  görelilik ve, 142-4
  evrensel, 128-36
Kütleçekim enerjisi, 101, 111
Kütleçekimsel potansiyel enerji, 102-11

Lambda baryonları, 71-3
Leptonlar, 70, 72-4, 115-6

Madde. Ayrıca bkz. Kuantumlu davranış
  atom varsayımı, 34-41
  parçacıkları, 57-8
  kuantum elektrodinamiği, 67-8
Maddeler, özellikleri, 56
Makineler, ağırlık-kaldırıcı, 102-7
Manyetizma
  göreli harekette yükler, 60-2
  doğal olay olarak, 56
Matematik, fizik ve, 77
Mekanik, doğal olay olarak, 56
Mendeleyev'in periyodik tablosu, 69-70, 72
Mermiler, kuantumlu davranış deney, 149-52
Meteoroloji, 91-2
Mev birimi, 70,72
Mezonlar, 70, 72-4
Mikroskoplar, 49-50
Miyozin, 81
Moleküller
  kimyasal tepkimeler, 15– 21
  kavramı, 14, 15
  oksijen/azot, 11, 12
Momentum
  korunumu, 115-6
  belirsizliği, 64-5
Morötesi frekanslar, 62-3
Müonlar, 68-70, 72-4

Neden, bilimsel yöntem ve, 54
Newton yasaları, 63-4, 124-9, 131-2, 142-4
Newton, Isaac, 9-10, 14-5
Nishijima, 70, 72
Nobel Ödülü, Fizik, 19, 22-3
Nötrino, 73-4
Nötronlar, 59-60, 68-70, 72
Nükleer enerji, Çekirdek enerjisi, 101, 113-4

Oksijen molekülleri, 41-3, 45-8
Olasılık, 150-2, 167
Optik, doğa olayı olarak, 56
Organik kimya, 48-9, 79

Parçacıklar
  davranışı, 63-4, 66-7, 148-9
  tanımlı, 57
  temel, 71
  etkileşme türleri, 73-5
  durgun kütleler, 73-4
  çekirdekler ve, 68-75
  "acayiplik" sayısı, 70, 72
  türleri, 58-60
Pasteur, Louis, 96
Piyonlar, 69-70, 72-3
Planck sabiti, 115, 169
Planck, Max, 10
Potansiyel enerji, 106-7
Pozitronlar, 67-9
Prolin, 84-6
Proteinler, 83-9
Protonlar, 59-60, 68-70, 72
Psikoloji, fizik ve, 93-4

Radar dalgaları, 62-3
Radyo dalgaları, 61-2
Rezonanslar, 70, 72-3
Ribozomlar, 88-9
RNA, 88-9

S sayısı, parçacıklar, 70, 72
Sanal iş ilkesi, 110
Sanal iş, ilkesi, 110
Sands, Prof. Matthew, 28
Sarkaç, 82
Schwinger, Julian, 22-3
Ses, aşırı yoğunluk dalgaları ve, 58
Sıcaklık, 38-41
Sıfır kütle, 73-4
Sıfır-kütleli parçacıklar, 70, 72
Sıfır-yüklü parçacıklar, 70, 72
Sıkışma, bir gazın, 38-9
Sıvılar, atom varsayımı, 39
Sigma baryonları, 71-3
Simetri, buzdaki atomlar, 39
Sinir hücreleri, 80-1
Sinir sistemi, 93-4
Sitozin, 87
Sodyum klorür, 43-4
Solunum çevrimi, 82-3
Stevinus, 108-9
Su
  atom varsayımı, 34-41
  katıların suda çözülmesi, 43-6
  buharlaşma, 41-4
Su buharı, 41-4, 47-8
Sürekli hareket (devri-daim), 102

Tam iç yansıma, 147
Teknetyum, 90
Temel fizik, 54-5, 66-7
Temel fizik. Ayrıca bkz. Fizik
Terleme, 47-8
Termodinamik, 79, 115-6
Termonükleer tepkimeler, 116-7
Ters kare yasası, 124-6, 132-3
Tersinir makineler, 103-7
Timin, 87
Titreşimsel dalgalar, 61-4
TNT patlaması, 68-9
Tomanaga, Sin-Itero, 22-3
Tuz, suda çözünen, 43-6

Uzay, momentumun korunumu, 115-6
Uzay, zaman ve, 57, 63-4, 74-5
Uzun-erimli etkileşme kuvveti, 57
Üreme, 87-9

Vidalı kriko, 108-9

X-ışınları, 56, 62-4

Yanardağ olayları, 92-3
Yanma, tanımlı, 46-7
Yarıçap vektörü, 121-2

Yasalar, doğal olayların, 56, 99, 119-24
Yatay hareket, 125-7
Yer bilimleri, 91
Yer-ay sistemi, gel-gitli, 127-30
Yer, kütlesi, 137
Yıldızlar, 89-91, 95-6, 131-6
Yoğun maddelerin indisi, kuramı, 147
Yoğunluk
  gaz basıncı orantılıdır, 38-9
  aşırı yoğunluk dalgaları, 58
Yukawa, 68-70
Yük
  korunumu, 115-6
  elektrik alanları ve, 58-62
  kuantum elektrodinamiği, 67-8

Zaman, enerjinin korunumu ve, 115-6
Zaman, uzay ve, 57, 63-4
Zar, hücre, 80
Zayıf bozunum parçacık etkileşmeleri, 73-5
μ-mezon, 68-70, 72-4
π-mezon, 69-70

ALTI KOLAY PARÇA

RICHARD P. FEYNMAN

"Kendi kuşağının en özgün beyni"
– FREEMAN DYSON

20. yüzyılın önemli fizikçilerinden olan Nobel ödüllü Richard Feynman'ın ünü bilimsel topluluğun sınırlarını aşmıştır. Feynman'ın mizah içerikli destansı maceraları hakkındaki çok-satan kitabı *Eminim Şaka Yapıyorsunuz Bay Feynman*, onu neredeyse Albert Einstein ölçeğinde bir halk kahramanı yapmıştı. Hiç kuşkusuz olağanüstü öğretme gücü, Richard Feynman efsanesinin yayılmasına ve zenginleşmesine yardımcı olmuştur. Bu kitap, Feynman'ın 1961-1963 arası Caltech'te üniversite birinci ve ikinci sınıf öğrencilerine verdiği fizik derslerinin popülerleştirilmiş özetleridir. Temel fizik, atom kuramı, enerji, kütleçekim, kuantum ve fizikle diğer bilimlerin ortak noktalarını kapsayan bu konular, Feynman'ın usta anlatımıyla fizik bilmeyen okurların anlayabileceği düzeyde sunulmaktadır.

"Bu kitap fiziğin ve Feynman'ın özü. Bilimsel laf kalabalığı yok, sadece heyecanlı ve doğrudan fikirler var. Ayrıca, 'bunu bilmiyoruz' şeklinde gerçek cevaplar var."

–Stephen Wolfram, MATHEMATICA'nın yaratıcısı

ALFA
Ticarethane Sokak, No: 53, 34110
Cağaloğlu, Fatih - İstanbul
T. 0212 513 3420 (pbx)
F 0212 519 3300
www.alfakitap.com

ALFA BİLİM
ISBN: 978-605-106