

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



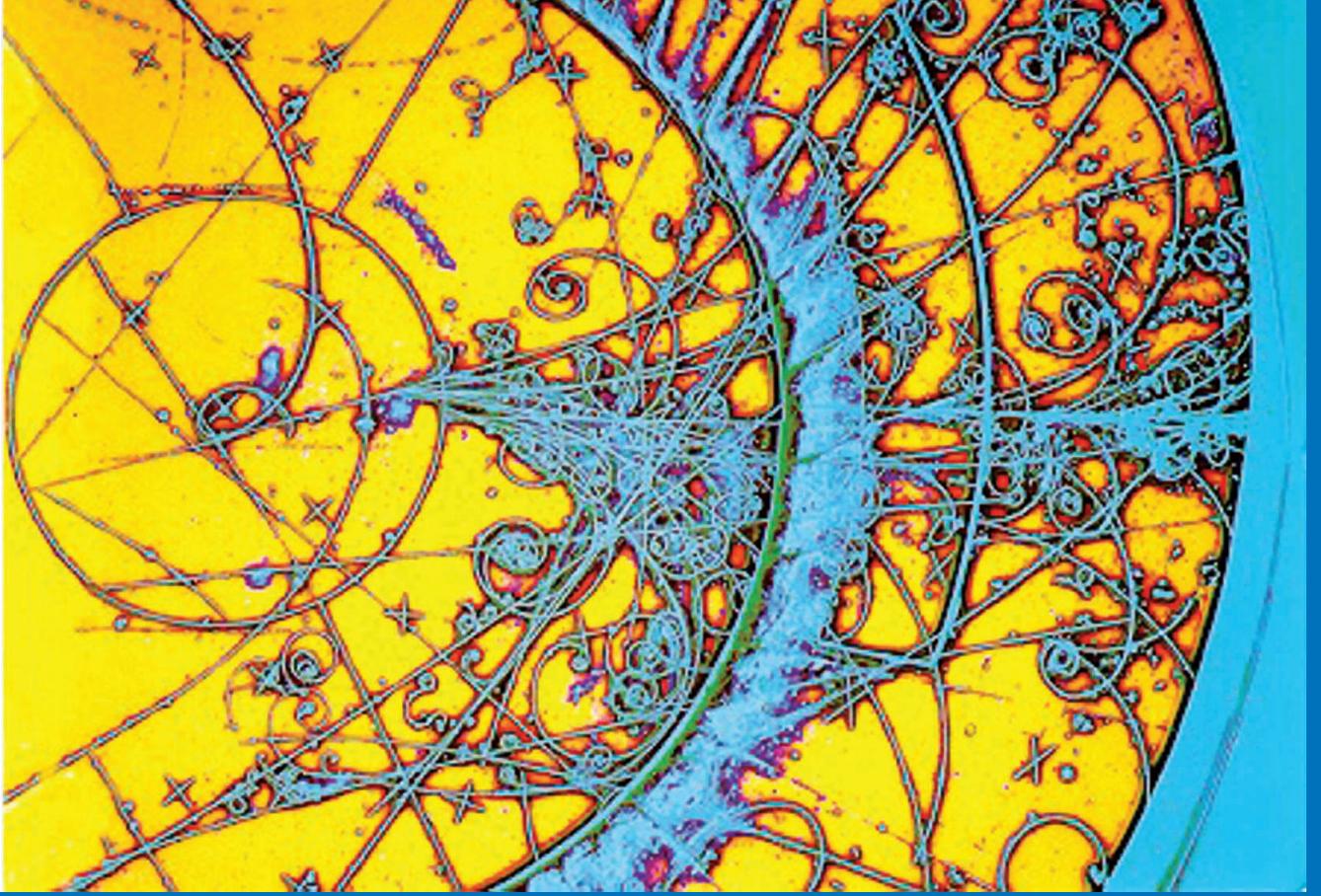
YENİ UFUKLAR

KUANTUM ÖLÇÜMÜ

EYLÜL 2006 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYAN : Prof. Dr. Vural Altın
BTD Yayın Kurulu Üyesi

KUANTUM



Kuantum mekaniği akla bir sürü soru getiriyor. En basit olarak, hidrojen atomunu düşünelim; bir proton, etrafında bir elektron. Elektron, farklı enerji düzeylerine karşılık gelen, 'yörünge' dediğimiz 'özdurum'lardan birinde bulunabilmekte. En alt enerji düzeyi, temel durum. Üst düzeylerden birinde olması, 'uyarılmış' durum. Üst yörüngelerden birindeki elektron, bazen alt yörüngelerden birine iniyor ve bu geçişin eşliğinde, iki yörüngeyi enerji düzeyleri arasındaki fark kadar enerjiye sahip bir foton ışıtır. İlk soru şu: Elektron acaba bu geçişi, ışıttıktan sonra mı yapıyor?... Ki, bu durumda, doğru miktarda enerjiyi ışıtabilmesi için, hangi yörüngeye gideceğinin önceden belirlenmiş olması gerekir. Yoksa elektron, geçişini tamamladıktan sonra mı ışıtır?... Bu durumda da, hangi yörüngeden geldiğinin, bir

şekilde kaydedilmiş olması lazım. "Işıkta dıkça düşüyor ve ışığa sona erdiği yerde duruyor" dersek, bu mümkün değil. Çünkü enerji bir foton şeklinde; adı üzerinde, tek bir 'paket' halinde ışınıyor. Elektronun ara konumlarından veya durumlardan geçmesi yasak. Böyle konum veya durumlar olsaydı zaten, oralarda başka yörüngeler de olurdu. Bir diğer soru, bu geçişin ne zaman başlayıp ne zaman sona erdiği, başlangıcını ve bitişini neyin belirlediği...

Kaldı ki elektron, hep yörüngelerden birinde bulunmak zorunda değil. Bunların bazı katsayılarla çarpılıp toplanmasıyla elde edilen bir 'doğrusal bileşke'de de olabiliyor. Genelde elektronun bulunabileceği bütün durumların, bu şekilde yazılabilmesi lazım. Bu bileşkedeki katsayıların kareleri, ilgili yörüngelerde bulunma ola-

sılıklarını vermekte. Burada da şu soru doğuyor: Elektronun enerjisi nedir?... Değişik yörüngelerde bulunma olasılıklarının o yörüngelerin enerji 'özdeğer'leriyle çarpımının toplamı olmalı. Buna 'beklenen değer' deniyor. Ama ölçüm yaptığımızda bu değeri bulmuyoruz. Yörüngelerden birine ait bir özdeğerle karşılaşmıyoruz. (Bknz. Frank-Hertz Deneyi.) Nasıl oluyor bu? Sistem bir özdurumlar almaışığındayken, ölçüm anında birden, özdurumlardan birine nasıl ve niye geçiyor? Niels Bohr ve Werner Heisenberg'in bu sorulara yanıtı, yaklaşık şöyle...

Sistem olarak biz geçmişte, kendi ölçüğümüzdeki sistemlerle etkileşimde bulduk. Kavramlarımız ve hatta dilimizdeki terimler, böyle 'klasik' sistemlerden edindiğimiz deneyimlerin üzerine inşa edilmiş. Atom ölçüğüne yeni inebildik ve bu, farklı bir dünya.

A ÖLÇÜMÜ

Klasik algılama biçimlerimizi, düşünce ve terimlerimizi, bu dünyaya aynen uygulayabilmeyi beklememeliyiz. Önemli olan gözlem; deney sonuçları neyi gösteriyorsa o. Kuram da bu deney sonuçlarını açıklayabiliyorsa, bundan öte bize klasik kavramlar çerçevesinde anlaşılabilir olmak zorunda değil. Tam tersine; bizim o kavramları, bu yeni dünya için değiştirmemiz gerekir. Elektronun yörüngedeki tam konumu, yörüngeler arasında geçiş yaparkenki durumu, bunlar yersiz sorular. Bu fiziksel değişkenleri tanımlayan, var kılan, deneyler. Biz ölçsek var, aksi halde yoklar. Momentumu da öyle. (Bknz. Kuantum Belirsizliği Deneyleri)

Fakat başta Einstein olmak üzere, önde gelen bazı bilimciler için, vazgeçilebileceklerin bir alt sınırı olmalıydı. Kuantum mekaniğinde 'eksik' olan bir şeyler vardı; kuramın gözden kaçırdığı 'gizli' bazı unsurlar. Çünkü, "Ay kimse bakmazken de orada"ydı. Konumu vardı, kütlesi, momentumu... Fiziksel özellikler biz ölçmezken yoksa eğer, bakmadığımız sırada geriye ne kalırdı ki?...

'Kuantum mekaniğinin matematiksel temelleri', John von Neumann'ın 1932 yılında bu başlıkla (Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik) yayınladığı çalışmasıyla atıldı. Buna göre, örneğin hidrojen atomu gibi kuantum mekaniğin bir sistemin içinde bulunabileceği durumlar kümesi, bir uzay oluşturur. Sistemin enerji gibi fiziksel değişkenleri, bu uzayın elemanları üzerinde etkiyen 'operatör'lere karşılık gelir. Operatörlerin özdeğerleri, ilgili fiziksel değişkenin ölçüm değerlerini verir. Durum uzayının herhangi bir elemanı, bu özdeğerlere ait özfonksiyonların bir bileşkesi şeklinde yazılabilir, vb. Önemli olan şu: Sistem 'yörünge'lerin bir bileşkesi durumundayken, örneğin enerjisi ölçüldüğünde, ansızın bu yörüngelerden birine 'çökmekte' ve ölçümün sonucu o yörüngeye ait enerji değerini vermektedir. 'Dalga fonksi-

yonunun çöküşü' kavramının matematiksel betimlemesi de yapılmış oldu.

Neumann'ın formalizmindeki 'fonksiyon çöküşü' kavramı, tek parçacıklı bir sistem için, hakim önsezilere yeterince tersti zaten. Fakat, çok sayıda parçacıklı sistemler için öngördüğü 'dolanıklık' durumu, daha da garipti. (Bknz. Dolanıklık) Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen bu kavramda, kuantum mekaniğinin eksikliğini yakaladıklarını düşünmüşlerdi. 1935 yılında birlikte yayınladıkları bir makalede dolanıklık öngörüsünü ele alarak, kurama yönelik, EPR ikilemi olarak bilinen tartışmayı başlattılar. 'Kuantum ölçümü sorunu' doğmuştu. Eleştirileri yaklaşık şöyleydi...

Örneğin dolanık bir elektron ikilisi, birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar, spinlerinin, seçilen herhangi bir yöndeki bileşeninin ölçüm değeri açısından, ters bir bağlantıyı sağlamak zorundadırlar. Birinin, diyelim z yönündeki spin bileşeni ölçüldüğünde +z bulunmuşsa eğer, diğerininin -z olması gerekir. Bu, x veya y bileşenlerinin tercih edilmesi halinde de böyledir. EPR konuya girmeden önce, bazı öz tanımlamalarda bulundu. Örneğin, A ve B gibi iki sistem, birbirlerini etkileyemeyecek kadar uzakta olabilmeliydiler. Aksi halde, 'etkilerin yerelliği' ortadan kalkar ve bağımsız sistemlerden söz etmek mümkün olmazdı. Dolayısıyla, dolanık elektron ikilisinin bu kapsamda, birinin diğerini etkileyemeyeceği kadar uzakta olduklarını varsaydılar. İkincisi; bir sistemin, 'fiziksel gerçeklik' kapsamında bazı özelliklerinin var olması gerektiğini belirttiler. Sistemin, ölçüme kalkışmadan önce veya onu herhangi bir şekilde rahatsız etmeksizin kesin bir şekilde öngörülüp hesaplanabilecek olan her fiziksel özelliği, bu 'fiziksel gerçekliğin bir unsuru'dur. 'Tamam olan bir kuram'ın, gerçeklik unsurlarının hepsini yakalamış ve önceden hesaplayabiliyor olması gerekir. Aksi halde, 'eksik

bir kuram' olur. Dolanıklık durumuna bu açıdan yaklaşıldığında, bir ikileme karşılaşıyor. Çünkü, yakınımızdaki, diyelim A elektronunun z spin bileşenini ölçtük. B'ninki anında -z olmak zorunda. Oysa, 'yerellik varsayımı' gereği, aralarında bir etkileşme olmamış olmalı. O halde, B'nin z spin bileşeni, biz ölçümümüzü yapmadan önce de zaten -z idi. Fakat kuantum mekaniği bunu öngöremiyor. Dolayısıyla 'eksik'... Bir adım ötesi; Biz A'nın, z yerine x spin bileşenini ölçmeyi de tercih etmiş olabilirdik. Eğer +x bulsaydık, B'ninki -x olacaktı. Yerellik varsayımı gereği, A tarafından etkilenemeyecekse, önceden zaten öyle olmalı. Demek ki, hem -z, hem de -x; aynı anda B'nin gerçeklik unsurları. Oysa bu, Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle çelişiyor. Çünkü spin bileşenleri, değişme özelliğine sahip olmayan, 'eşlenik' fiziksel değişkenler. O halde kuantum mekaniği iki kere eksik. Einstein net bir sonuca varmıştı: Ya kuantum mekaniği eksikti, ya da yerellik kavramından vazgeçilmesi gerekiyordu... (Bknz. Kuantum Haberleşmesi)

1950'li yılların sonlarına kadar gizli değişken kuramlarına yenileri eklendi. 1964 yılında John S. Bell, kendi adıyla anılan teoremini ispat edince, yerellik kaybetti. Bazılarınca 'bilim tarihinin en güzel ispatı'ydı bu. Deneysel olarak kanıtlanması çabalarına girişildi. (Bknz. Gizli Değişken Kuramları ve Bell Teoremi) Gereken aygıtlar çoktan hazır. (Bknz. Spin Filtreleri)

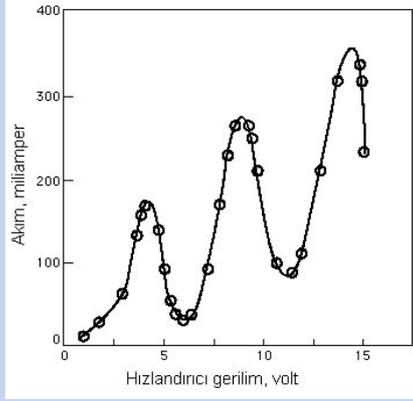
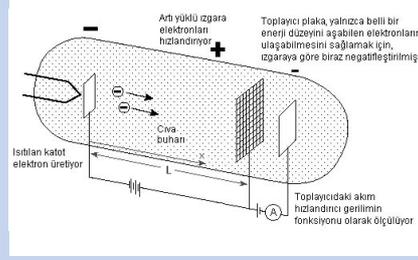
Farklı yorumları oluşturulmuş olmasına rağmen, kuantum mekaniğinin, büyük oranda Niels Bohr tarafından oluşturulan 'ortodoks Kopenhag yorumu' halen hakim görüşü oluşturuyor. Fakat bir deneyde, 'tamamlayıcılık ilkesi'ni zedeleyen sonuçların elde edildiği iddiası var. Bulguları henüz tartışmalı; yaygın kabul görmüş değil. Ama kuantum mekaniği kavramlarını inceliklerini yansıtmaması açısından, yararlı bir akıl jimnastiği gibi duruyor. (Bknz. Afşar Deneyi)

Frank-Hertz Deneyi

Gerçi atomların ışına spektrumunu oluşturan çizgiler, aralıklı enerji düzeylerinin kanıtını oluşturuyordu. Bohr da zaten, kendi adıyla anılan atom modelini, hidrojenin spektrumunu açıklamak amacıyla geliştirmişti. Fakat, atomların enerji düzeylerinin kesikliliğine dair ilk doğrudan kanıtı, J. Frank ve G.L. Hertz'in 1914 yılında yaptıkları deney sağladı.

Deney düzeneği bir katot ışını tüpünden oluşuyor. Tüpün bir ucunda, ısıtıldığı anda elektron saçan bir katot, diğer ucunda da, yüzeyine ulaşan elektronları toplayarak akım oluşturan bir anot bulunmaktadır. Bu ikisinin arasına ayrıca, elektronları hızlandırmak için, katoda L uzaklığında bir ızgara yerleştirilmiştir. Katotla ızgara arasına bir 'hızlandırma gerilimi', diyelim V uygulanmakta. Dolayısıyla, aralarında yaklaşık sabit bir elektrik alanı var: $E=V/L$. O halde, katottan ayrılan bir elektronun üzerindeki kuvvet de sabit ve $F=qE=eV/L$ kadar. Bu kuvvetin etkisiyle katottan uzaklaşıp x mesafesine ulaşan bir elektron, bu arada elektrik alanı tarafından üzerinde 'kuvvet çarpı yol' kadar iş yapılmış olduğundan, $F \cdot x = eV(x/L)$ kadar kinetik enerji kazanmış oluyor: Izgara vardığında eV kadar. Fakat anoda, ızgaraya göre biraz negatif potansiyel uygulanmış. Dolayısıyla, L mesafesi boyunca hızlandırılıp eV kadar kinetik enerji kazandırılmış olan elektronlar, ızgarayı geçtikten sonra anoda ulaşmak için, ufak bir potansiyel enerji tümseğini aşmak zorundalar. Tüpün içi düşük basınçlı, örneğin cıva buharıyla dolu. Hızlandırma gerilimi 0'dan başlatılıp, kademeli olarak artırılıyor. Katottan ayrılan elektronların, yol boyunca hızlanırken, arada bir cıva atomlarıyla çarpıştıkları oluyor. Fakat, kütleleri görece çok küçük olduğundan, yarım tonluk beton bloğa çarpan bilyalar gibi, hemen hiç kinetik enerji kaybetmeksizin yansıyıp, tekrar yollarına ve hızlanmaya devam ediyorlar. Izgara önündeki potansiyel engelini aşabilenler anoda ulaşıp, hızlandırma geriliminin fonksiyonu olarak ölçülmekte olan akıma katkıda bulunuyor.

Bu durumda, katodun sürekli olarak yeterince ve bol sayıda serbest elektron sağladığını ve tüpün içindeki hacmi elektronlar açısından, diyelim birim hacim başına n tane olmak üzere doygun hale getirebildiğini varsayarsak; hızlandırma gerilimi arttıkça, elektrotlar arasında ölçülen akımın da artması beklenir. Çünkü, ano-



dun birim yüzeyine saniyede ulaşan elektron sayısı; tüp içindeki elektronların sayısal yoğunluğuyla (n), anoda ulaşınca kadar kazanmış oldukları hızın (v) çarpımına eşittir ($J=v \cdot n$). Bu 'yüzeysel akım yoğunluğu', anodun yüzey alanıyla çarpıldığında, toplam akım elde edilir ($i=J \cdot A=v \cdot n \cdot A$). Akımı veren bu çarpanlardan A sabitken, n de yaklaşık sabit kalırken; v, hızlandırma gerilimiyle birlikte artar. Sonuç olarak, toplam akımın da artması gerekir.

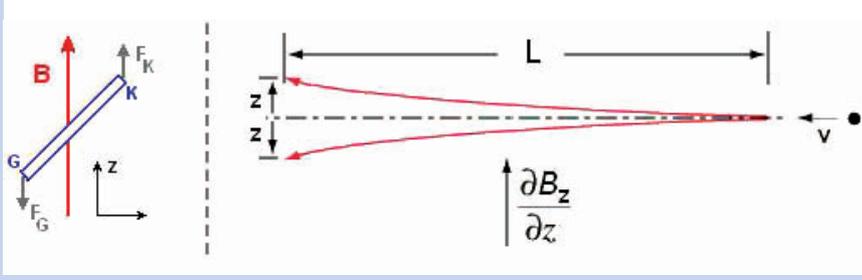
Nitekim, deney sonuçlarını gösteren yandaki grafikte, $V=4,9$ volt civarına kadar ki durum böyle. Fakat ondan sonra akım ansızın düşüyor. Bunun nedeni, kinetik enerjisi 4,9 eV'a ulaşan elektronların, cıva atomlarıyla esnek olmayan çarpışmalara girmeye başlaması. Böyle bir çarpışmada, atom temel enerji düzeyinden bir üst enerji düzeyine uyarılırken, elektron 4,9 eV kinetik enerji kaybediyor. Bu olay şimdilik, elektronların en büyük enerji düzeyine ulaştıkları ızgara öncesi konumda yer almakta ve esnek olmayan çarpışmaya girip de takatsız kalan elektronlar, ızgara sonrasındaki ve anodun önündeki potansiyel enerji tümseğini aşamadıklarından, akım azalmaktadır. Fakat, gerilimin artırılmasına devam edildiğinde, elektronların ızgaraya ulaşana kadar kazanacakları enerji 4,9 eV değerinin üstüne çıkarken, atomları uyarıma yeten bu miktardaki enerjiyi edindikleri x konumu da, ızgaradan uzaklaşıp katoda doğru geriler ($4,9eV=Vx/L$). Dolayısıyla, $x=4,9L/V$ konumunda esnek olmayan çarpışmaya uğrayan elektronlar, bu konumda sonra tekrar hızlanarak anoda ulaşmaya, dolayısıyla

akım yeniden artmaya başlar. Akım, hızlandırma gerilimi $2 \times 4,9$ V'a ulaşınca kadar artar. V'nin tam bu değerinde, elektronların çoğu önce L/2 konumuna ulaşana kadar 4,9 eV'lık kinetik enerji kazanır ve burada esnek olmayan bir çarpışmaya girip bunun tümünü kaybettikten sonra yeniden hızlanmaya başlayıp, L konumuna varana kadar 4,9 eV daha kazandıktan ve burada esnek olmayan ikinci bir çarpışmaya girdikten sonra takatsız kalırlar. Akım birden azalır; gerilim arttıkça, tekrar artmaya başlar. 4,9 V'lık aralıklarla böyle devam. Hızlandırma gerilimi V değerine sahipken, herhangi bir elektronun uyardığı atom sayısı, $V/4,9$ 'un altındaki en büyük tamsayıdır. Şekilde bu da görülüyor. Aynı deney neon atomlarıyla yapıldığında gerilim-akım grafiğinin, yaklaşık 19 V'lık aralıklarla benzer salınımlar sergilediği görülür. Peki, uyarılan atomlara ne olur?...

Uyarılmış olan cıva atomları daha sonra, $E=4,9$ eV enerjili birer foton ışınlayarak temel enerji durumuna geri dönerler. Bu enerjideki fotonun frekansı, $\nu=E/h=1,18 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, dalgaboyu ise $\lambda=c/\nu=2,54 \times 10^{-7} \text{ m}$ (254 nm) olup, morötesi bölgeye düşer. Dolayısıyla, 400-700 nm arasındaki görünür ışık aralığının dışına düşer ve görünmezler. Ancak, neon atomlarının, 18,3 ile 19,5 eV arasında, yani ortalama 18,9 eV civarında, yaklaşık 10 kadar uyarılmış düzeyi var. Bu düzeylere uyarılmış olan atomlar, 16,57 ile 16,79 eV aralığındaki, yani 16,68 eV civarındaki alt enerji düzeylerine geri dönerken, 2,22 eV civarında enerjiye sahip fotonlar ışınlar. Bu ışınların frekansı $\nu=5,3 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, dalgaboyu ise $\lambda=5,66 \times 10^{-7} \text{ m}$ (566 nm) civarındadır. Görünür bölgede olup, kırmızı-portakal renklidirler. Frank ve Hertz'in orijinal deney düzeneğinde hızlandırma gerilimi 80 V'a kadar çıkabildiğinden, hızlandırılan elektronların her biri en fazla 4 neon atomu uyarabiliyordu. Tüpün içinde eşit aralıklarla parılayan, en fazla bu sayıda bölge gördüler. Bohr'un kuantum modelini doğrulamışlardı. Bu çalışmalarıyla, "bir elektronun atomla çarpışmasını yöneten yasaları keşfetmiş olduklarından" dolayı. 1925 Nobel Fizik Ödülü'nü aldılar.

Stern-Gerlach Deneyi

Stern-Gerlach deneylerinin ilki, Otto Stern ve Walter Gerlach tarafından 1920 yılında Frankfurt Üniversitesi'nde, açıl



momentumun kesikli değerler alıp almadığını anlamak için yapıldı. Deney bu amacını başarmanın ötesinde, önemli diğer bazı bilimsel sonuçlar doğurdu, çarpıcı teknolojik gelişmelere yol açtı.

Kuantum varsayımını ilk kez, Planck 1900 yılında, siyah cisim ışınmasını açıklarken ortaya atmıştı. Buna göre, spektrumu oluşturan elektromanyetik dalgaların frekansı ν olanların taşıdığı enerji $h\nu$ 'ya eşitti. Bu varsayımı daha sonra, 1905 yılında Einstein, fotoelektrik olayı açıklamakta kullandı. Bohr, açısal momentumun da enerji gibi kesikli değerler alabileceğini düşünerek, hidrojen atomu için bir model geliştirdi. 1913 yılında açıkladığı bu 'yarı-klasik model'ini, yörüngedeki elektronun açısal momentumunun, Dirac sabiti h 'ın tamsayı katları değerler alabildiği varsayımına dayanarak türetmişti. Model, hidrojenin gözlemlenen ışın spektrumunun ana çizgilerini ifadelendiren 'Rydberg formülü'nü yakalıyordu. Sommerfeld bu modeli, yörüngelere biraz elipslik katıp, doğrusal momentumun konuma göre integralinden oluşan 'eylem' ('aksiyon') değişkenine de bir kesiklilik kısıtı uygulayarak geliştirdi. 1920 yılında açıklanan bu Bohr-Sommerfeld modeline göre, hidrojenin elektronu $n=1,2,3,..$ enerji kuantum sayılarına sahipti. Ayrıca, her enerji kuantum sayısı n için, kesikli değerler aldığı

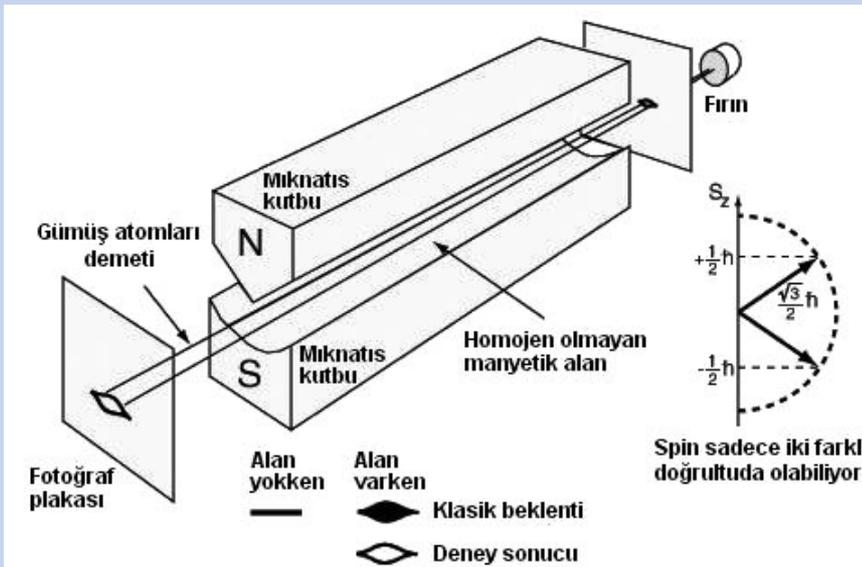
düşünülen bir açısal kuantum sayısı l vardı. Model, açısal momentumu 0 olan elektronun çekirdeğe düşeceği düşüncesiyle, $l=0$ durumuna izin vermiyor ve l 'nin 1'den n 'ye kadar değerler almasını öngörüyordu. Stern, açısal momentumun kesikliliğini ortaya koymak için, gümüş atomlarıyla bir deney tasarladı.

Gümüşün seçilmesinin nedeni, görece ağır olan bu atomların, bir fotoğraf filmine çaptırıldıklarında görece belirgin bir iz oluşturmalarıydı. Öte yandan, atom numarası 47 olan gümüşün en dış elektronu iç kabuklardaki 46 elektron çekirdeğin 47 protonundan 46'sını perdelediğinden tek bir proton görüyor ve dolayısıyla, hidrojenin tek elektronuna benziyor gibiydi. Stern bu en dış elektron için açısal momentum kuantum sayısı l 'nin 1 olduğunu düşünmüştü.

Klasik olarak bakıldığında, açısal momentuma sahip bir elektron, diyelim dairesel bir yörünge üzerinde dolaşmakta olup, dairesel bir akıma eşdeğerdir. Dolayısıyla, nasıl ki bir halka üzerinde dolaşan bir akım, halka düzlemine dik doğrultuda eksenel bir manyetik alan oluşturursa, elektron da benzeri şekilde bir manyetik alana yol açar. Kısacası atom, kuzey ve güney kutuplarından oluşan minik bir mıknatıs gibidir ve buna 'manyetik dipol' de denir. Bu mıknatıs bir dış manyetik alanın içine

konulduğunda, tıpkı bir pusula ibresinin yerin manyetik alanında yaptığı gibi, manyetik alanla eşyönlüleşmeye çalışır. Çünkü manyetik alan, mıknatısın kuzey ve güney kutuplarına, mıknatıs ta ki kendisiyle eşyönlüleşinceye kadar döndürmeye çalışan birer kuvvet uygular. Örneğin yandaki şeklin sol tarafında, z eksenindeki manyetik alan B , mıknatısın kuzey kutbunu yukarı doğru iterken güney kutbunu da aşağıya doğru çekmektedir. Homojen bir manyetik alandaki durum bundan ibaret. Ama eğer manyetik alanın şiddeti homojen olmayıp da, diyelim z yönünde, yani yukarı gidildikçe artıyorsa o zaman mıknatısın kuzey kutbu üzerindeki kuvvet (F_K), buradaki alan şiddeti biraz daha yüksek olduğundan, güney kutbu üzerindeki kuvvetten (F_G) daha büyük olur. Kuvvetler artık birbirini tam olarak götüremediğinden, üzerinde bir net kuvvet oluşan mıknatıs, yukarıya doğru bir miktar ivme ve hız kazanır. Kutupların doğrultusu ters yönde ise, hareket aşağıya doğrudur. Mıknatısın doğrultusu manyetik alana paralel duruşa ne kadar yakınsa, kutuplarının gördüğü manyetik alan şiddetleri o kadar farklı ve dolayısıyla da, üzerindeki net kuvvet o kadar büyük olur. Oysa, mıknatıs manyetik alana dik konumdaysa, kutupları üzerindeki kuvvetler birbirine eşit ve zıt yönlüdürler; mıknatıs hız kazanamaz. Dolayısıyla, böyle, yönü doğrultusunda homojen olmayan bir manyetik alanın içerisine, alana dik yönde hızlandırılmış bir avuç mıknatıs fırlatacak olursak, yol boyunca ilerlerken her biri, manyetik alana göre yönlerine bağlı olarak aşağıya ya da yukarıya doğru, manyetik alan şiddetine ve alana ne denli paralel olduklarına bağlı olarak da, az ya da çok miktarda sapmaya uğrarlar. Şeklin sağ tarafında, iki örnek minik mıknatısın patikaları gösteriliyor.

Stern'in bu düşünceden hareketle tasarladığı deney düzeneği, yandaki şekilde görüldüğü gibi. Arkadaki fırında ısıtılan gümüş atomlarından bazıları, fırının penceresinden kaçıyor ve z yönündeki değişken manyetik alan bölgesinden geçip, ön taraftaki fotoğraf plakasına ulaşıyor. Manyetik alan yokken, z yönünde sapma yok. Dolayısıyla atomların, fırının penceresinden fotoğraf filmine indirilen dikmenin ayağına ulaşmış, burada, pencerenin bulanık bir resmini oluşturması gerekir. Manyetik alan uygulandığında, atomlar filme ulaşana kadar, $+$ ya da $-$ yönünde sapsalarla uğrayacak. Sapmanın yönü ve



miktari, açısai momentuların z yönündeki izdüşümlerinin yön ve büyüklüklerine bağıli. Klasik olarak bu izdüşümlerin, $l=1$ hali için, -1 ile +1 arasında herhangi bir değeri alabilmesi gerekir; ki bu, film üzerinde görüntü olarak, z yönünde uzanmış kesintisiz bir dikine çizginin oluşmasını gerektirir. Oysa Bohr-Sommerfeld modeline göre, $l=1$ değerine sahip olan açısai momentumun, z bileşeninin -1 ya da +1'e eşit olacak şekilde kuantumlaşması gerekmekte, $l=0$ değerine ise izin verilmemektedir. Modelin bu öngörüsü doğruysa, atomların patikalari ikiye ayrışacak ve film üzerinde, pencereden indirilen dikmenin ayağının biraz altında ve biraz üstünde birer nokta oluşacaktır. Stern yaptığı hesaptan hareketle, ayrışmanın görülebilmesi için, manyetik alan şiddetinin z yönündeki türevinin 10^4 Gauss/cm olması gerektiği sonucuna varmıştır. Çalışma arkadaşına böyle bir alan oluşturup oluşturamayacağını sorar. Gerlach daha bile iyisini yapabileceğini söyleyince, deney düzeneği hazırlanır. İlk deneyde, fırına pencere olarak ince bir delik açılmış, fakat beklenen ayrışma gözlenememiştir. Delikten sızan atom demetinin zayıf kaldığı sonucuna varılır ve delik enlemesine genişletilerek, bir yarık haline getirilir. Şekilde, ayrılmış iki dudağın öpücüğü gibi duran görüntü bu yüzden öyle...

Stern ve Gerlach böylelikle, Bohr-Sommerfeld modelinin bir öngörüsünü kanıtlamış olduklarını sandılar. Oysa atom numarası 47 olan gümüşün elektron dizilimi $[Kr].4d^{10}.5s^1$ şeklinde olduğundan, en dış elektronun açısai momentumu, $l=1$ değil, $l=0$ 'dır. Bu durumda, atom demetinin açısai momentuma göre ayrışmaması, film üzerinde, fırının penceresinin resmine karşılık gelen enlemesine tek bir çizginin oluşması gerekir. Kaldı ki, Schrödinger'in 1926 yılında keşfettiği dalga denkleminin çözümleri, l nin, 0 ile $n-1$ arasında kesiklilikmesi ve her l değeri için, açısai momentumun z bileşenini temsil eden kuantum sayısı m 'nin, 0 da dahil olmak üzere, $-l$ ile $+l$ arasındaki tamsayı değerleri alabilmesi gerektiğini gösterdi. Bu durumda, $l=1$ olsa dahi, açısai momentumun z bileşeninin $m=-1,0,+1$ değerleriyle kuantumlaşması ve atom demetinin iki yerine üçe ayrışarak, ortada bir çizgi daha vermiş olması gerekiyordu. Oysa deney sonucu böyle değildi. Bu durumu açıklamak için S.A. Goudsmith ve G.E. Uhlenbeck 1926 yılında, elektronun, yörünge açısai momentumunun yanında, $h/2$ büyüklüğünde içsel bir

'eksenel açısai momentum'a sahip olduğu önerisinde bulundu. 1927 yılında hidrojen atomlarıyla yapılan yeni bir Stern-Gerlach deneyi, bu öneriyi doğruladı. Elektronun o zamana kadar bilinmeyen bir fiziksel özelliğinin daha var olduğu ve kesikli değerler aldığı ortaya konmuştu. Spin keşfedildi.

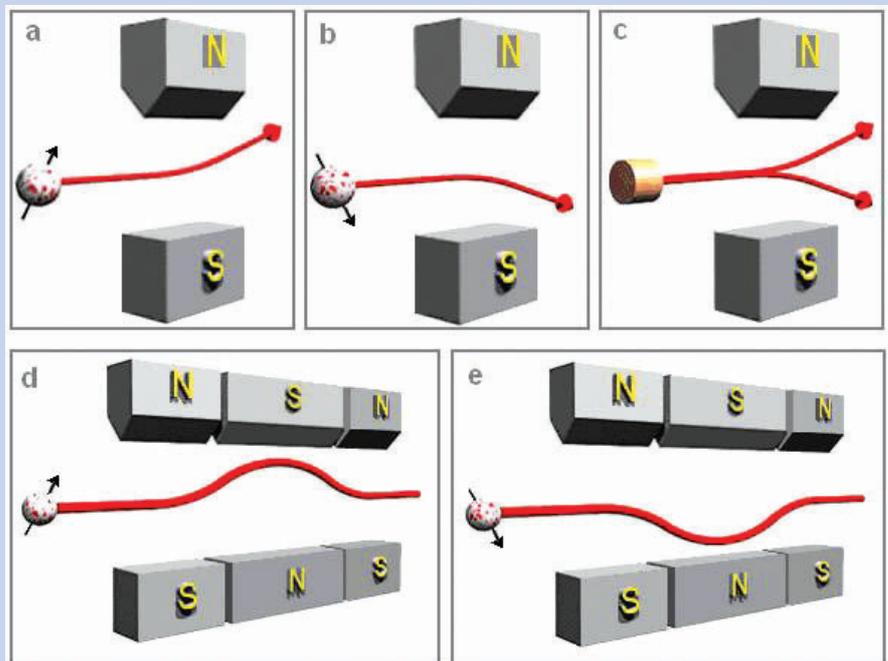
Stern-Gerlach deneyi, Bohr ve Sommerfeld'in, aslında yanlış olan kuramını sınamak amacıyla tasarılmıştı. Yanlış bir varsayımda bulunulunca, o yanlış kuramı doğruladı. Ancak, varsayımın yanlış olduğu anlaşılınca, kuram değışti. Bu sağlam bir deneyin, illa da doğru bir kuramdan esinlenmesi gerekmediğine bir örnek oluşturuyor. Bilim tarihinin en etkili ve güzel deneylerinden biri sayılmakta. Çok önemli sonuçları oldu. Deneyi izleyen on yıl içinde, aynı S-G deney tekniği kullanılarak, bazı atomların çekirdeklerinin de kuantumlaşmış açısai momentuma sahip olduğu gösterildi. Spektrum çizgilerindeki 'hiper ince yapı'nın; çekirdeğin bu açısai momentumuyla, elektronun açısai momentum ve spininin etkileşmesinden kaynaklandığı anlaşıldı. 1930'larda Isidor Rabi ve arkadaşları, S-G düzeneğinde zamanla değışen manyetik alan kullanıldığı takdirde, atomların açısai momentularının, adeta kulaklarından tutulup döndürölmek suretiyle, z izdüşümlerinin bir kuantum durumundan diğere değıştirilebileceğini gösterdiler. Bu deney dizisi 1937 yılında, ilgili kuantum durumları arasındaki geçişlerin, zamanla değışen 'radyofrekans' (RF) alanlarıyla uyarılabileceğini gösterdi. Rabi salınımları, bugün tıpta kullanılan Manyetik

Rezonans Görüntülemesi (MRI) aygıtlarının çalışma mekanizmasının temelini oluşturuyor. Daha sonra N.F. Ramsey, Rabi düzeneğini, elektromanyetik alanla etkileşme süresini uzatacak şekilde değıştirdi. Elektromanyetik dalgaların frekans duyarlılığının yüksek olması, duyarlı zaman ölçümünde çok yararlı ve bugün atom saatlerinde kullanılıyor. 1960'ların başlarında, Ramsey ve D. Kleppner, S-G düzeneğinden yararlanarak, 'hidrojen maseri'ne enerji kaynağı olarak kullanmak üzere, kutuplanmış bir hidrojen atomları demeti ürettiler. Bu sistem halen, en yaygın atom saatlerinde kullanılmakta.

Teknoloji alanında böyle. Bilimsel olarak, spinin doğrudan gözlenmesi, 'kuantum varsayımı'nın ve dolayısıyla da kuantum mekaniği kuramının geçerliliğinin en doğrudan kanıtlarından birini oluşturmaktadır. S-G düzeneği ve optik benzerleri, 'kuantum ölçümü problemi'nin araştırılmasında en temel ve vazgeçilmez araç. (Bknz. Kıyaslama Deneyleri.)

Spin Filtreleri

Elektronun manyetik momenti, spininden kaynaklanıyor ve eksi yükü nedeniyle, onunla ters yönde. Dolayısıyla elektron, spininin tersi yönde minik bir mıknatıs gibi davranır. Elektronun bu yüzden, Stern-Gerlach deneyinde, belli bir yönde olan ve yönü doğrultusunda değışen bir manyetik alana girdiğinde, alan yönünde saptığını görmüştük. Şekil 1a'da böyle bir durum görülüyor. Manyetik alan, mıknatısın ku-

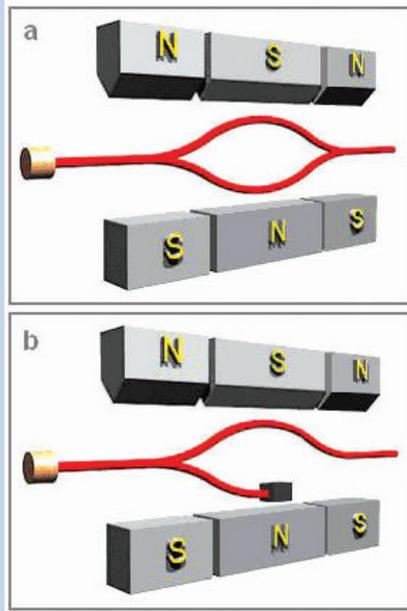


Şekil 1

zey kutbundan güney kutbuna, yani aşağıya doğru. Şiddetinin de aşağıya doğru azaldığını varsayalım. Elektronun spini ise, sağ el kuralına göre ok yönünde. Yani, sağ elin diğer parmakları elektronun hayali dönme yönünde kıvrılırsa, başparmak spin yönünü veriyor. Dolayısıyla, bu elektronun spini 'yukarı'ya doğru bir izdüşümüne sahip. Yani manyetik momenti aşağıya doğru; güney ucu yukarıda, kuzey ucu aşağıda. Yukarıdaki güney ucun bulunduğu konumdaki alan şiddeti, aşağıdaki kuzey ucun konumundaki alan şiddetinden daha büyük olduğundan; güney uç mıknatısın kuzey kutbu tarafından, kuzey ucun mıknatısın güney kutbu tarafından çekildiğinden daha büyük bir kuvvetle çekilir. Bu elektron yukarı doğru sapar. Şekil 1b'deki ise, aşağıya doğru...

Elektronlar aslında manyetik alanda, yükleri nedeniyle, alana dik yönde de saparlar. Fakat bu sapma, yatay düzlemde uygun şiddette bir elektrik alanı oluşturularak önlenir. Bunun için elektrik alanı şiddetini, elektron üzerindeki elektrik ve manyetik kuvvetlerin, 'Lorentz kuvveti' denen toplamının ($F=eE-evxB$) yatay bileşeni sıfır olacak şekilde seçmek yeterlidir. Dolayısıyla, yatay hareketleri hesaba katmaksızın, şekildeki gibi 'aşağı' yönde olan ve bu yönde azalan bir manyetik alan içerisinde: Spin yukarı ise, manyetik moment aşağıya doğru olduğundan, sapma yukarıya; aksi halde, spin aşağıya ise, manyetik moment yukarıya doğru olduğundan, sapma aşağıya doğru... O halde, böyle bir manyetik alanın üzerine, örneğin bir elektron tabancası tarafından spinleri gelişigüzel yönlü olarak üretilmiş bir elektron demeti gönderilirse, elektronların bir kısmı yukarı, bir kısmı da aşağıya doğru sapar. Şekil 1c'de görülen bu durum, elektron spininin kuantumlaştığını ve yalnızca olası iki değerden birini alabildiğini, tek başına kanıtlar.

Art arda mıknatıslar kullanılarak, elektronun patikası kavilendirilebilir de. Örneğin Şekil 1d'de, yukarı spinli bir elektronun birinci mıknatıs tarafından yukarıya, ikincisi tarafından aşağıya, üçüncüsü tarafından tekrar yukarıya saptırıldığı görülüyor. Ortadaki mıknatıs, eşyönlü olan dıştakilere ters yönde ve onlardan iki misli uzun olduğundan, onların yol açtığı yukarı yöndeki toplam sapmayı telafi edebiliyor. Öyle ki, elektron üçlü mıknatıs dizisinden, girdiği yönde çıkmış. Şekil 1e'deyse, aynı durum, aşağı spinli bir elektron için gösteriliyor. Bu önemli. Çünkü, spin



Şekil 2

yönleri gelişigüzel bir elektron demeti böyle bir üçlü mıknatıs dizisinden geçirildiğinde, patikaları önce ayrışıp sonra tekrar birleşmekte. Şimdi varsayalım ki, alt patikayı izleyen, yani spini dış mıknatısların manyetik alanıyla aynı yönde ve aşağıya doğru olan elektronların önüne bir engel koyup, (örneğin bir kurşun blok) onları durdurduk. O zaman, bu üçlü mıknatıs sisteminden yalnızca, spini dış mıknatısların manyetik alanına ters yönde, yani yukarı doğru olan elektronlar geçebilir. Kısacası, bir 'yukarı spin filtresi' elde etmiş oluruz. Filtrenin tercih ettiği yön, burada 'yukarı' dediğimiz yön; dıştaki mıknatısların güney kutbundan kuzey kutbuna yönelik; onların ürettiği aynı yönlü manyetik alanların yönüne ters olan yön...

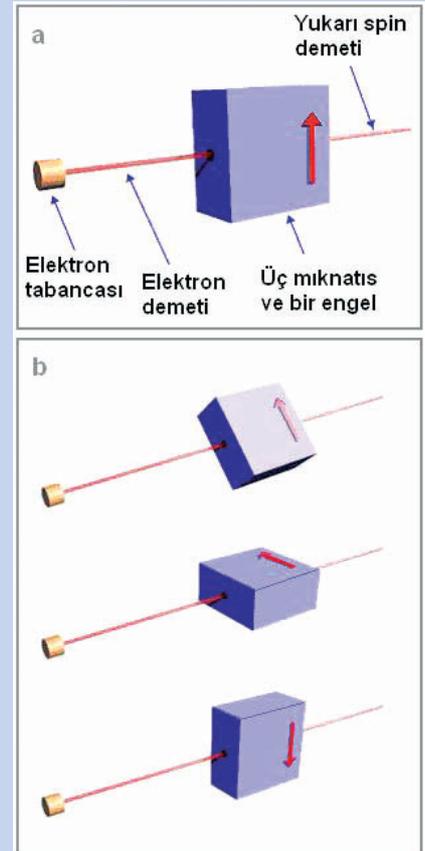
Diyelim ki bu üçlü mıknatıs sistemlerinden bir dizisini üretilip, kutulara yerleştirdik. Her birinin bir girişi, bir çıkışı var. Dikkat edilecek olursa, sistem simetrik olduğundan, elektronların hangi taraftan girip hangi taraftan çıkacağı önemli değil. Önemli olan şu: Üçlü mıknatıs karşımıza geldiğimizde, kutuların ön ve arka yüzlerine, dış mıknatısların güney-kuzey kutbu yönünde birer ok işaretlemek... Kutuları artık kapatabiliriz. Her biri, bir elektron tabancasından gelip de içinden geçen elektronları, ön ya da arka yüzündeki ok yönünde filtreleyecektir. Şekil 3a'da görüldüğü gibi..

Dikkat edilecek olursa, kutu uzayda nasıl durursa dursun tabancadan gelişigüzel spin yönleriyle gelip de filtreye giren elektronların yalnızca, ortalama yarısı diğer taraftan çıkar; diğer yarısı çıkamaz. Çi-

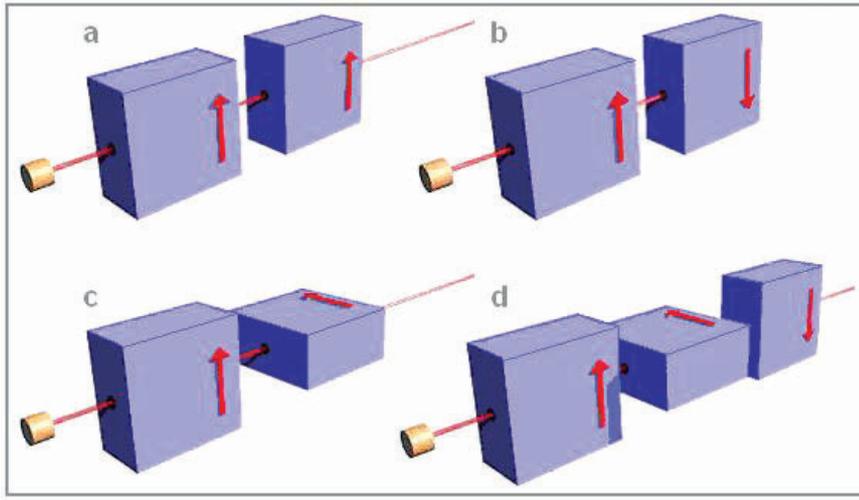
kanların spin yönü, kutunun üzerindeki ok yönündedir; ki, biz buna 'yukarı' demiştik. Demek ki 'yukarı'yı belirleyen aslında, kutunun üzerindeki ok. Şekil 3b'de kutu, uzayda farklı yönelişlerle gösterilmiş. Filtreleme yönü, ok yönünde; o ne yöndeysse, 'yukarı' orası. Bu yönü, ölçümü yapan kutu belirliyor, spini uzayda kuantumlaştırıyor. Buna 'uzay kuantumlaşması' da deniyor.

Yine dikkat edilecek olursa, böyle bir filtreye ulaşan elektronların hepsi, filtreden geçebilsin ya da geçemesinler, spin yönleriyle birlikte kayda geçirilebilirler: Spini yukarı olup da geçenler, filtrenin çıkışına bir algılayıcı konularak, spini aşağı olup geçemeyenler de, bu elektronları durduran kurşun blokta neler olup bittiğine bakılarak...

Şimdi işi bir adım daha öteye götürüp, bu filtrenin yanına, aynı yönde ikinci bir filtre daha koyalım. Elektron tabancasından gelen elektronların ortalama yarısı birinci filtreden geçer ve bunların hepsi, 'yukarı' yönlü olduklarından, ikinci filtreden de geçerler. Birinci filtrenin tanımladığı 'yukarı' yönü, ikinci filtrenin tanımladığı 'yukarı' yönüyle çakışmakta, dolayısıyla ikinci filtrenin, çıkıştaki elektron demetinin şiddeti üzerinde bir etkisi olmamakta-



Şekil 3



Şekil 4

dır. Oysa, ikinci filtreyi birincinin tersi yönde koyarsak, tabancadan isabet eden elektronların yine ortalama yarısı birinci filtreden geçer ve bunların hepsi 'yukarı' yönlü olduklarından, ikinci filtreden geçmezler. Açıkça, birinci filtrenin 'yukarı' olarak tanımladığı yön, ikincisi için 'aşağı' olmakta, çıkıştaki elektron demetinin şiddeti sıfırlanmaktadır. Şekil 4.a ve b'de bu durumlar görülmüyor. Şimdi soru şu: Eğer ikinci filtreyi, Şekil 4.c'de görüldüğü gibi, oku birinci filtreninkine 90° açı yapacak şekilde koyarsak ne olur?

Birinci filtrenin yönüne z, ikincisinininkine x diyelim. Tabancadan isabet eden elektronların, her zamanki gibi ortalama yarısı birinci filtreden geçer. Bunların spinlerinin z bileşenleri, birinci filtre tarafından 'yukarı' olarak tanımlanmış olan +z yönündedir. Oysa x bileşenleri, +x ya da -x yönünde olmak açısından eşit şansa sahiptirler. Dolayısıyla, bunların yarısı ikinci filtreden geçer. Özetle, tabancadan isabet eden elektronların yarısı birinci filtreden, bunların da yarısı ikinciden geçerler. Daha genel olarak, ikinci filtreyi birincisiyle aynı yönlü durumdan başlatıp, ters yönlü hale gelinceye, yani okları arasındaki açı 0°'den başlayıp 180° oluncaya kadar döndürüyor olalım: Birinci filtreden geçen elektronların ikinciden de geçmeyi başarma oranı %100'den %0'a kadar azalır. Hatta şöyle: Oklar arasındaki açı θ ise, ikinciden çıkanla birinciye giren demetlerin şiddetlerinin oranı olarak, bu yüzde; $I/I_0=100.\cos^2(\theta/2)$ ifadesiyle verilir.

Dikkat edilecek olursa, elektronların bu spin filtreleri, ışığın 'kutuplayıcı filtre'lerine ('polaroid') benzemektedir. Örneğin akkor telli bir lambadan gelişigüzel kutuplanma yönleriyle çıkan ışık, kutupla-

yıcı bir filtreye düşürüldüğünde, yarısı filtreden geçer. Eğer bu filtrenin arkasına, kutuplama doğrultusu birincinininkine paralel ikinci bir tanesi yerleştirilirse, ilkinden geçen ışığın hepsi ikinciden de geçer. En azından kusursuz kutuplayıcı filtreler için bu böyle. Oysa iki filtrenin kutuplama doğrultuları arasındaki açı 90° ise; birinci filtreden geçen ışınlar, ikincisinden geçmez. Böyle bir filtre ikilisi siyah görünür. Bu durum, spin filtrelerindeki 180°'lik duruma benziyor. Son olarak, iki kutuplayıcı filtre, kutuplama doğrultuları 45°'lik açı yapacak şekilde yerleştirildiğinde, birinci filtreden geçen ışığın yarısı ikinci filtreden de geçer. Bu da, spin filtrelerindeki 90°'lik duruma benzemektedir. Anlaşılan, elektronların spin filtreleri ikilileriyle ışığın kutuplayıcı filtre çiftleri arasında, göreceli açısal konumlarının etkinliği açısından, 2 çarpanı kadar bir fark var. ($I/I_0=100.\cos^2(\theta/4)$). Bu benzerlik nedeniyledir ki, elektron filtrelerine 'kutuplayıcı' ('polariser') da deniyor.

Asıl konumuza dönecek olursak, Şekil 4d'de üçlü bir filtre dizilimi görülmekte. Birinci filtreden geçen elektronların yarısı ikinciden, bunların da yarısı, üçüncüden de geçer. Dikkat edilecek olursa, aradaki filtre olmasaydı kalan ikiliden çıkan elektron olmazdı. Burası da önemli: Çünkü, birinci filtreden çıkan elektronların spinini, bu filtrenin tanımladığı 'yukarı' yönde, yani +z yönünde. İkinci filtre, kendisine gelen elektronları spinlerinin x yönündeki bileşenlerine göre seçiyor ve onlar için +x yönünü 'yukarı' yön olarak tanımlıyor. Ancak bunu yaparken, spinlerinin z yönündeki bileşenlerini de geliştigüzelleştiriyor. Eğer öyle olmasaydı eğer, bu ikinci filtreden çıkan elektronların spinlerinin z bile-

şenleri hâlâ +z yönünde olur ve hepsi, üçüncü filtre tarafından durdurulmuş olurdu. İkinci filtre bu sonucu değiştirmiş oluyor ve ikinci filtrenin bu işlevi şu anlama geliyor: Elektron spininin x bileşenini yönlendirmek, yani ölçmek, spinin z bileşenini geliştigüzelleştirir, yani etkiler. Çünkü, elektronların spinlerinin ikinci filtreye girmeden önceki z bileşenleri hep aynı yöndeydi; birinci filtrenin tanımladığı 'yukarı', yani +z yönündeydi. Oysa, ikinci filtreden geçtikten sonra geliştigüzelleştirdi, yani belirsizleştirdi. Bu, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, o ilkenin açık bir kanıtı. Spinin z ve x bileşenlerinden biri belirlendiğinde diğeri belirsizleşiyor. Kuantum mekaniği terimleriyle, bu iki fiziksel değişken, 'eşlenik' bir değişken çifti oluşturuyor ve değişme özelliğini sağlamayan 'operatör'lere karşılık geliyorlar. Benzer şekilde x ve y, y ve z bileşen çiftleri de öyle. Gelelim bağıntı deneylerine...

Bağıntı Deneyleri

Elimizde, hemen hemen aynı anda iki elektron ışınarak bozunan bir çekirdekte oluşan bir malzeme örneğinin bulunduğu düşünelim. Çekirdeğin bozunma sonucunda sekmediğini ve iç açısal momentumunun değişmediğini varsayalım. Bu durumda, doğrusal momentumun korunması için, ışınan iki elektronun zıt yönlerde ve eşit hızla hareket etmeleri lazım. Öte yandan, bu iki elektronun spinlerinin de, aynı doğrultuda ve zıt yönlü olmaları gerekir; ki, toplam iç açısal momentum da korunabilsin. Gerçek çekirdekler elektron çiftlerini, spinlerinin doğrultuları gelişigüzel olacak şekilde ışınlamakta; fakat bu çiftlerden herhangi ve her birindeki elektron ikilisinin spinlerinin, birbirine zıt yönlü olması gerekmektedir. Dikkatimizi bu elektron çiftlerinden birine odaklayalım ve kendimize bir z ekseni seçip, eşlerden birinin, diyelim birincisinin, spin yönünü belirlemeye hazırlanalım. Biz bu belirlemeyi yapana kadar, bu elektronun spininin yukarı ya da aşağı olma olasılıkları, eşit ve %50-50'dir. Diğer elektron için de durum keza böyledir. Ancak, biz birinci elektronun spin yönünü belirlediğimiz anda, diyelim 'yukarı', diğerinki bu belirlediğimiz yönün tersine; yani 'aşağı' olmak zorundadır. Garip bir durum: Dolanıklılık...

Böyle bir malzemeyi Şekil 5a'da gösterildiği gibi, zıt yönlü yerleştirilmiş iki filtrenin arasına koymuş olalım. Filtrelerden birinin tanımladığı yön 'yukarı', diğerinin-

konulup toplanıyor ve metalde oluşan akımın büyüklüğünden hareketle, bu koldaki elektron demetinin şiddeti hesaplanıyor. Tabancanın ışımaya şiddeti bilindiğine göre, üst kolunkini de hesaplamak mümkün. Sonuç: İki bir birine eşit. Bu kaynaktan gelen elektronların, spinlerinin z bileşenleri eşit olasılıkla + ya da - yönde olacak şekilde ışınmakta olduğuna işaret ediyor. Yani tabancanın ışırken, elektronlar için daha ziyade tercih ettiği bir spin doğrultusu yok. Doğrultular rastgele. Genelde, tabancadan çıkan herhangi bir elektronun 'spin dalga fonksiyonu', z bileşeni yukarı ve z bileşeni aşağı anlamına gelen Φ_z^+ ve Φ_z^- 'özdurum'larının doğrusal bir bileşkesi olarak $\Psi_s = \alpha \cdot \Phi_z^+ + \beta \cdot \Phi_z^-$ şeklinde yazılabilir. Burada α^2 , elektronun Φ_z^+ özdurumunda, β^2 de Φ_z^- özdurumunda olma olasılığı. Olasılıkların toplamı 1'e eşit olmak zorunda: $\alpha^2 + \beta^2 = 1$. Bu durumda, eşit de olmaları gerektiğinden: $\alpha = \beta = 1/\sqrt{2}$. Yani: $\Psi_s = \Phi_z^+/\sqrt{2} + \Phi_z^-/\sqrt{2}$. Neyse...

Oysa, birinci S-G'nin çıkışında, üstteki elektronların hepsinin z yönündeki spin bileşenleri artı. Demek ki, her birinin spin dalga fonksiyonu: $\Psi_s = 1 \cdot \Phi_z^+$, aynı özdurum. Şimdi soru şu: Bu elektronlar kendi hallerine bırakıldıklarında; dalga fonksiyonları acaba zamanla değişir mi, z yönündeki spin bileşenleri rastgeleleşir mi? A deneyi bunu sınıyor. Üstteki z^+ elektronları, bir süre seyahat ettikten sonra, yine z yönelişli ikinci bir S-G aygıtına sokuluyor ve yalnızca üst kol olarak çıktıkları görülüyor. Alt kolda elektron yok. Demek ki dalga fonksiyonu üzerinde bir dış etken yoksa, zamanla değişmesi için neden de yok. Peki, elektron tabancasından gelen elektronların $\Psi_s = \Phi_z^+/\sqrt{2} + \Phi_z^-/\sqrt{2}$ şeklindeki dalga fonksiyonlarına ne oldu, onlar niye değişti? Birinci S-G aygıtından geçerken, manyetik alanla etkileşmeleri sonucunda, yarısının Φ_z^+ 'lara, yarısının Φ_z^- 'lere dönüştü. Olası iki farklı özdurumdan birine 'çöktü'... Değiştiren ne? Elektronların spinlerinin z bileşenini belirlemek amacıyla birinci S-G aygıtında yaptığımız 'deney,' ya da 'ölçüm'. O halde, deney ya da gözlem, klasik mekanikte düşünüldüğü gibi pasif bir eylem olmaktan çıkıyor, gözlemlenen sistemin durumunu değiştiriyor; dalga fonksiyonunu, özdurumlarından birine 'çökertiyor'. Kuantum mekaniğinin matematiksel formülasyonunu geliştiren John von Neumann'ın 'dalga fonksiyonu çöküşü'yle kastettiği buydu. Bohr'un

savunduğu temel kuantum mekaniği kavramlarından ve vücut verdiği 'ortodoks Kopenhag yorumu'nun ana unsurlarından birisi. Peki ikinci S-G'den geçen elektronların dalga fonksiyonları, geçerken niye çökmüyor? Çökecek halleri yok da ondan: Bunların hepsi $\Psi_s = \Phi_z^+$, özdurumdalar zaten...

Şekildeki B deneyinde, kaynaktan gelen elektron demeti, önce z yönelişli birinci S-G aygıtından geçirilip ayrıştırılmış ve alttaki z^- demeti engellenip, bir z^+ demeti elde edilmiş. Tıpkı A deneyinde olduğu gibi. Bundan sonraki soru şu: Bu elektronların spinlerinin z bileşenleri + yönde. De, acaba x bileşenleri hangi yönlerde? Onlar da belirlenmiş oldu mu, onlar da mı hepsinde aynı?... Demet, bu sefer x yönelişli ikinci bir S-G aygıtından geçirilerek x^+ ve x^- kollarına ayrıştırıldığında; x yönündeki spin bileşenlerinin, + ile - yönleri arasında eşit sayılarla dağıldığı görülüyor. Bileşenler rastgele: $\Psi_s = \Phi_x^+/\sqrt{2} + \Phi_x^-/\sqrt{2}$... Şimdi de bir başka soru doğuyor: Acaba bu rastgelelik, elektronların kaynaktan ışınlırlarkenki spin doğrultularının rastgeleliğinin x yönünde hala korunuyor olmasından mı kaynaklanıyor; yoksa bu durum, birinci S-G aygıtında z bileşenlerini belirlerken mi oluştu? O ölçümün bir sonucu mu? Son deney bu soruya yanıt veriyor...

C deneyinde, bir önceki deneydeki gibi edilmiş olan x^- demeti, z yönelişli üçüncü bir S-G aygıtından geçiriliyor. Sonuç: Çıkıştaki z^- demetinde de elektronların bulunduğu ve bu demetin şiddetinin, üst kolu oluşturan z^+ 'ninkine eşit olduğu. Tabii her ikisi de, girişteki x^+ 'ninkinin yarısı şiddetinde... Oysa, girişteki bu x^+ demetine kaynaklık eden, ikinci S-G aygıtının girişindeki elektronların hepsi z^+ idi. Demek ki elektronların z spin bileşenleri, bu ikinci S-G aygıtından geçerken rastgeleleşmiş; spinlerin x bileşenlerinin belirlenme süreci, z bileşenlerini geliştirmiş. Bu, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi; o ilkenin açık bir kanıtı. Spinin z ve x bileşenlerinden, biri belirlendiğinde diğeri belirsizleşiyor. Kuantum mekaniği terimleriyle, bu iki fiziksel değişken, 'eşlenik' bir değişken çifti oluşturmakta ve 'değişme özelliği'ni sağlamayan 'operatör'lere karşılık geliyorlar. Benzer şekilde; x ve y, y ve z bileşen çiftleri de öyle.

Dolanıklık

Bazı çekirdekler var ki, hemen hemen aynı anda iki elektron ışınarak bozunurlar

ve bunun yaparken sekmezler, spinleri de değişmez. Dolayısıyla, toplam momentumun korunması için, elektronların doğrusal momentumlarının aynı doğrultuda ve zıt yönlü olması gerekir. Yani, zıt yönlerde ve aynı hızla hareket ederek birbirlerinden uzaklaşmaktadırlar. Öte yandan, toplam spinin korunabilmesi için, bu elektronların spinlerinin de aynı doğrultuda ve zıt yönlü olması gerekmektedir. Yani, birinin spininin, örneğin bir manyetik alanla belirlediğimiz z doğrultusundaki spin bileşeni ölçüldüğünde +z çıkarsa, diğersininkini ölçmeye dahi gerek kalmamıştır, çünkü -z olması gerekir. Ya da tersi... İki birlikte ele alındığında ya birincisi +z, diğeri -z, ya da ikincisi +z, birincisi -z olmak zorundadır ve bu iki durumun olasılıkları birbirine eşittir. Ancak, ölçüm yapmadan önce, hangisinin +z, hangisinin -z olduğunu bilmek mümkün değildir. Bu, bilgimizin sınırlılığından ya da bilgi edinme süreçlerimizin kusurluluğundan değil, sözkonusu iki elektronun 'ayırdelemezliği'nden kaynaklanır. Dolayısıyla, bu iki parçacık, fiziksel açıdan bağımsız iki ayrı sistem oluşturmamakta, en azından spin değişkenleri aracılığıyla birbirlerine bağımlı bulunmaktadır. Böyle bir ikili sistemin spin dalga fonksiyonu, ikiliyi birlikte tasvir etmek zorundadır. Birinci elektronun +z, ikincisinin -z olduğu 'özgün durumu' $\Phi^{1+,2-}$, birinci elektronun -z, ikincisinin +z olduğu özgün durumu da $\Phi^{1-,2+}$ gösterecek olursak, ikili sistemin spin dalga fonksiyonu genel olarak, örneğin $\Psi_s = \alpha \cdot \Phi^{1+,2-} + \beta \cdot \Phi^{1-,2+}$ şeklinde yazılabilir. Burada α^2 , ikilinin $\Phi^{1+,2-}$ özdurumunda, β^2 de $\Phi^{1-,2+}$ özdurumunda olma olasılığı. Olasılıkların toplamı 1'e eşit olmak zorunda: $\alpha^2 + \beta^2 = 1$. Bu durumda, eşit de olmaları gerektiğinden; $\alpha = \beta = 1/\sqrt{2}$. Yani: $\Psi_s = \Phi^{1+,2-}/\sqrt{2} + \Phi^{1-,2+}/\sqrt{2}$. Elimizdeki iki parçacıklı sistemin durumuyla ilgili bu değerlendirmeler, herhangi bir yöndeki spin bileşeni için de geçerlidir. Buna 'tekil spin' ('spin singlet') durumu deniyor. Dolanıklık halî, garip bir durum...

Önümüzde öyle bir çekirdek bulunsun ve $t=0$ sıfır anında, böyle dolanık bir elektron çifti ışınlanmış olsun. Elektronlar aynı doğru üzerinde zıt yönlerde, diyelim bir sağa, diğeri sola doğru yola çıktılar. Yeterince uzun bir süre seyahat ettikten sonra, birer ışık yılı mesafe katedip, birbirlerinden iki ışık yılı uzaklaştılar. Sağdakinin ulaştığı yerde birisi de elektronu yakalayıp da, bir Stern-Gerlach aygıtından geçi-

rerek spininin z bileşenini ölçerse, iki ışık yılı ötedeki diğerininki de anında belirlenmiş olur. Burada çarpıcı görünen bir şey yok. Çarpıcı olan şu: Sağdaki elektronun spini, %50-50 olasılıkla +z ya da -z olabilir. Dolayısıyla, elektron deney öncesinde illa da, deney sonrasında belirlenmiş olan spin değerine sahip değildir. Hangi sonucun ortaya çıkacağını, deney süreci belirler: O halde diğerininkini de. İşte bu çarpıcı. Çünkü burada sanki, sağdaki elektronun spinini ölçme süreci, soldaki elektronun spini üzerinde, ışık hızından daha hızlı seyahat edebilen, anında gerçekleştiği için de 'yerel olmayan' bir etkiye sahip. O halde, Büyük Patlama'dan bu yana hâlâ seyahat etmekte olan sürüsüyle dolanık çift bulunabileceğine ve pek çok diğeri de, daha sonraki yıldız patlamalarında oluşmuş olabileceğine göre evren dolmadolanık, sarmakarışık bir halde olmalı: Tek bir dalga fonksiyonu, bütün evren için. E, o zaman evrenin bir köşesinde oturup da herhangi bir sistemi ele alıp, sanki evrenin kalan kısmından bağımsızmış ya da yalıtılmış gibi üzerinde deneyler yapmanın ne anlamı var? Nerede kaldı 'yerellik?...'. Bunun çaresi şuydu: Ya bu iki elektron arasında, ışınmaları sırasında oluşan ve bundan sonra spinlerini her an için zıtlık ilişkisine zorluyor olup, onlarla birlikte seyahat etmekte olan 'gizli' bir mekanizma ya da değişken vardı... ve kuantum mekaniği bu 'gizli değişken'i göremediği için 'eksik'ti ('incomplete')... Ya da kuantum mekaniği, bu 'anında uzaktan etki'yi kabul edip, 'yerellik' iddiasından vazgeçecekti. Bohr bu ikincisini yaptı. Bohr'a göre burada, ışık hızından daha hızlı seyahat eden bir etki vardı gerçekten. Ama bu etki aracılığıyla, uzayın uzak bir köşesine anında bilgi aktarmak ve böylelikle, o uzak köşede cereyan etmekte olan fiziksel olayları, anında etkilemek mümkün değildi. Şöyle...

Elimizde bir kutu var diyelim; iki yanında açılıp kapanabilir pencereler ve içinde dolanık elektron çiftleri yayan ışın netkin bir malzeme. Üç yıl sonra pencereler açılacak ve dolanık elektron çiftlerinden pencerelere isabet edenler, dışarı sızıp yola koyulacak. Biz dikkatlerimizi, bunu başaran ilk çifte doğrultalım. Ben size diyorum ki, "bu elektronlar, en erken beşinci yılın sonunda, buradan birer ışık yılı mesafede olacak: En erken, tam şu gün, şu saatte, şuralarda. Hemen yola çıkalım ve onların beş yıl sonra ulaşacağı noktalara, onlardan önce varalım. O gün o saat-

ten sonra, ben bana ulaşan ilk elektronun spinini ölçeceğim. Bir saniye sonra da siz, sizin ilkinizi ölçersiniz. Dikkat edin ama, bakın, z eksenimiz şu; bu yönde ölçeceğiz. Ben benimkini ölçtüğümde +z bulursam, sizinki -z olacak: Bu 'hayır' anlamına gelsin. Yok eğer, ben -z bulursam, sizinki +z olacak: Bu da 'evet' anlamına gelsin. 'Evet' dersem, elinizdeki tetiği çeker ve yakınınızdaki gezegeni yok, etrafınızı berbat edersiniz. 'Hayır' dersem, bir şey yok. Yani, size ışık hızından hızlı iletteceğim 'bilgi'ye bağlı olarak, çevrenizi ya etkiler, ya da etkilemezsiniz...

Ancak, bu yöntemle haberleşmemiz imkansızdır. Çünkü ben, bana ulaşan elektronun spininin ölçüm sonucunu, arzu ettiğim gibi belirleyemiyorum ki. Sonucu, size 'evet' iletmek kastıyla -z, 'hayır' iletmek kastıyla da +z yapamıyorum ki. Sonuç, %50 'evet', %50 'hayır' olacak. Bu, iradeye dayalı bir bilgi iletimi değil. Ben irademe bağlı bir tercihle, bir kararla; sizin o anda bulunacağınız uzak evren köşesini sizin aracılığınızla, ışık hızından büyük bir hızla etkileyemiyorum. Deney üzerindeki yegane kontrolüm, deneyi yapmak ya da yapmamak. Hah!... İşte bu, size bilgi aktarmama kapı açar gibi görünüyor! Ben ölçümümü yaptıysam, sizinkinin sonucu, %100 olasılıkla, benimkine bağlı olarak +z ya da -z çıkacak. Oysa yapmamışsam, %50, +z, %50, -z... O zaman, ayrılmadan önce şöyle anlaşabiliriz; ben size şöyle derim: "Zamanı geldiğinde ölçümünüzü yapın. Eğer sonuç kesinlikle +z ya da kesinlikle -z çıkarsa, bu ben deneyimi yapmışım demektir. Bu 'evet' anlamına gelsin. Yok eğer, %50 olasılıkla +z, %50 olasılıkla -z şeklinde ise; bu da yapmamışım demektir. 'Hayır' anlamına gelsin..."

Fakat, burada da şöyle bir sorun doğuyor: Elinizde, üzerinde ölçüm yapacağınız tek bir elektron var. Nasıl bileceksiniz ki elde ettiğiniz değer %100'lük bir olasılığın zorunlu sonucu mu, yoksa %50-50'lik olasılıklardan birinin rastgele karşınıza çıkmışlığı mı olduğunu? Bir tek çareniz var, o da şu: Elektron size ulaştığında, ölçüm yapmadan önce, diyelim 1000 tane aynısından yapıp, yani onu 'klonlayıp', daha sonra bunların üzerinde, ayrı ayrı ölçümler yapıp, sonuçlarına bakmak. Eğer sonuçlar %50-50'lik bir dağılım sergiliyorsa, bu benim ölçümümü yapmadığım anlamına; hepsinin spinleri aynı yönde çıkarsa da, yaptığım anlamına gelir: Birincisi 'hayır', ikincisi 'evet...' Görellilik

kuramı zedelenmiş görünüyor. Bu gediği kapamak lazım. İşte bu yüzden; kuantum mekaniğinde 'klonlamak' yasak, bunun mümkün olmaması gerekiyor. Görellilik böylece 'kurtarılmış' oluyor. Zaman üzerindeki neden-sonuç ilişkileri dizilimi anlamındaki 'nedensellik' ilkesi de...

Dikkatle okuyanlarımızın gözünden kaçmamıştır. Işın netkin bir malzemenin, ne zaman ve hangi yönde ışığı olasılıklara dayalıdır. Dolayısıyla, yukarıdaki anlatımda rol alan taraflar, bir bakıma malzemenin 'insaf'ına kalmış olacaklarından, ilk elektronları yakalamak için uzunca süre tetikte beklemek zorunda kalabilirler. Oysa dolanık sistemleri, talep üzerine oluşturmanın yöntemleri var. 'Bell ölçümleri' bunu yapıyor, daha ziyade foton çiftleriyle. (Bknz. Gizli Değişkenler Kuramı ve Bell Teoremi)

Kuantum Haberleşmesi

Olası bir 'dolanıklık aracılığıyla haberleşme' yönteminde, ışıktan hızlı seyahat eden bir etki var, fakat 'yararlı bilgi' aktarımı yok. Oysa, taraflardan biri elindeki parçacığın ölçüm sonucunu dilediği gibi seçebilseydi, ne iyi olurdu. Sonucu +z ya da -z seçip, karşı tarafa bunların terslerini, 'evet' ya da 'hayır' anlamında, sanki 0 ya da 1'ler yollardı; 'bit'ler... Bir dizi dolanık ikili sistemin birer parçacığı üzerinde art arda çalışarak, bit dizileri oluştururdu; kelimeler. Hem de bu yöntemde, bitlerin yolda değişikliğe uğramaları olasılığı yok. Çünkü parçacıklar, toprak altındaki bir solucanın, dışarı çıkmış iki ucu gibiler; birinin durumu belirlendi miydi, diğeri bunun tersi durumda olmak zorunda. Oysa diğer tür 'kuantum kanalları'nda, örneğin bir optik liften aşağıya gönderilen bitlerin, diyelim 'sağ' ya da 'sol' kutuplanmış fotonların, yolda karşılaştıkları beklenmedik koşulların etkisiyle kutuplanma yönlerini değiştirmeleri olasılığı her zaman var. Bilindiği gibi buna 'gürültü' ya da günlük dilde 'parazit' deniyor. Gürültü, örneğin bir tel üzerinden iletilen akımlarla yürütülen 'klasik haberleşme kanalları'nda da var. Ancak, düzeyi sıcaklıkla orantılı olduğundan ve bu hatlarda çok sayıda parçacığın ortalama davranışıyla taşınan 'dev' sinyallerle çalışıldığından, görelilik etkisi düşük. Oysa, bir optik lif üzerinden yapılan haberleşmede kullanılan fotonların enerjisi, lifin sıcaklığına oranla çok daha yüksek. Gürültü üzerinde, daha çok sinyal ta-

şıyan fotonların genlik, frekans ve faz ölçümlerindeki kuantum belirsizlikleri rol oynuyor ve fotonların fiziksel özelliklerinin algılanmasında hata oranları yüksek olabiliyor. Dolayısıyla, tek başına 'kuantum sınırı gürültüsü' dahi fazlaca büyük. Bu yüzden, 'kuantum haberleşmesi' alanında, örneğin foton atımlarının, doğrusal olmayan optik malzemelerin kullanımıyla uzayda enlemesine, kuantum belirsizliğinin ötesinde sıkıştırılıp, genliklerinin artırılmasına çalışılıyor; ki, gürültü oranı görece azalsın. Oysa 'dolanıklık kanalı'nda, hat boyunca gürültü olmazdı.

Yani, bu olası 'dolanıklık kanalı' şöyle bir kanal: İletimi ışıktan hızlı. Hat boyunca gürültü yok. Tek bir kusuru var; gerçi bu kadarı kayınlımda da var ama, yararlı bilgi aktarımı yok. Buna karşılık, klasik haberleşme kanalları, ışık hızından yavaş, ama yararlı bilgi aktarabiliyor, gürültü düzeyi de az. Uzun sözün kısası şu: Tek başına dolanıklık aracılığıyla yararlı bilgi aktarılamaz. Ama bir dizi dolanık ikili, klasik bir haberleşme kanalıyla birlikte kullanılarak, ışık hızından yavaş, yararlı bilgi aktarımı başarılabilir. Örneğin, optik lif üzerinden seyahat eden sinyal taşıyıcı fotonların arasına dolanık foton çiftleri serpiştirmek suretiyle, haberleşme güvenliğini artırmak için. Çünkü, bir üçüncü kişi araya girip de bu haberleşmeyi dinlemeye kalkıştığında, dolanıklık durumlarının zorunlu kıldığı 'istatistikler' bozulur ve haberleşen taraflar bunun farkına varıp, önlemlerini alırlar. Kuantum 'şifrelemesi' ('kriptografi') bunun yöntemleri üzerinde çalışıyor. Ticarileşti bile. Öte yandan, dolanık parçacıklardan birini, üçüncü bir parçacıkla dolanık hale getirmek suretiyle, üçüncü parçacığın 'durum'unu karşı tarafa aktarmak da mümkün. Bu bize, elimizdeki bir nesnenin durum bilgilerinin karşı tarafa iletilmesiyle, aynısının diğer tarafta inşasına imkan tanıyor. Asıl nesnenin kuantum durumu bu arada kaybolduğundan, tam olarak bir 'klonlama' değil bu. Gerçi doğru anlamıyla bir taşınım süreci de değil. Ama kuantum 'taşınım'ın ('teleport') konusu. Fakat, dolanık kuantum durumlarını, gerçek yaşam koşullarında uzun süreyle ayakta tutmak zor. Dış etkiler nedeniyle, şimdilik 10^{-3} saniye düzeyinde kısa sürede bozuluyorlar. Bu yüzden, 'kuantum şifrelemesi'nin ilk ticari uygulamaları 100 km ile sınırlı. Kuantum haberleşmesinin uydulara taşınmasına çalışılıyor. Atmosfer dışındaki bozucu etkenler daha zayıf olduğundan.

Gizli Değişken Kuramları ve Bell Teoremi

Einstein, kuantum mekaniğinin olasılıklara dayalı yapısını kabullenememiş, "Tanrı zar atmaz" demişti. Oysa maddenin, kuantum mekaniğinin olasılık öngörülerine uygun davrandığına dair kanıtlar da açık ortadaydı. Einstein bu durumu, bazı 'gizli değişkenler'in varlığına bağlıyordu. Örneğin, 1905 yılında yayınladığı üç makalesinden birinde, su yüzeyindeki bir çiçek polenin 'Brown hareketi'ni, polenin su molekülleriyle rastgele çarpışmalarının ortalama sonucu şeklinde açıklamıştı. Gerçi polenin hareketi olasılıklara dayalı olarak hesaplanabiliyor, görünen hareketi de bu hesaplara uyuyor, fakat aslında, geri plandaki görünmeyen su moleküllerinin momentum, kinetik enerji, konum gibi fiziksel değişkenler tarafından yönetilen hareketleri sırasında polenle karşılaşmalarında girdikleri çarpışmaların istatistiksel ortalama etkisinden kaynaklanıyordu. Kuantum mekaniğinin de buna benzer bir durumu olmalıydı; asıl etkeni oluşturan gizli bazı değişkenleri gözden kaçırdığı için, zorunluluk gereği olasılıklarla çalışıyor, fakat ortalama davranışları isabetli bir şekilde betimliyor olduğundan dolayı da, öngörülerini doğru çıkıyordu. Hatta bu duruma daha iyi bir örnek, klasik ve istatistik termodinamiğin birbirlerine göre konumuydu. İlk önce, bir 'devr-i daim' makinasının yapılamazlığı gibi sayısız deneysel kanıtla desteklenmiş bir ilkeden hareketle, enerjinin korunumu ve entropi artışı gibi kuramsal türetilmeye gidilmişti. Bu türetimlerden hareketle, maddenin hallerinin davranışını, sıcaklık, basınç ve hacim gibi büyük ölçekli ('makro') değişkenler cinsinden betimleyen klasik termodinamik kuramı oluşturuldu. Fakat daha sonra, (klasik) istatistik termodinamik gelişti. Örneğin sıcaklık ve basınç değişkenlerinin aslında, maddenin yapısını oluşturan çok sayıda atom ya da molekülün, kinetik enerjilerinin ya da momentumlarının uğradığı değişimlerin ortalama değerleriyle ilgili olduğu anlaşıldı. Daha önce gözden kaçırılmış olan küçük ölçekli değişkenler yakalanmış ve klasik termodinamiğin başarıyla betimlediği ortalama davranışlar bu gizli değişkenler cinsinden, daha temelde duran Newton ve elektromanyetik yasaları çerçevesinde anlam kazanmıştı. Einstein'a göre, kuantum mekaniğinin de

sonu buna benzer olacak ve yerini, olasılıklara sırt vermek zorunda kalmayan daha ayrıntılı bir kuram alacaktı.

İlginçtir: John Dalton'un atom modeli 1803'te önerilmiş olmasına karşın, 20. yüzyıl'ın başlarında hâlâ, maddenin atom ya da moleküllerden oluştuğu düşüncesini ciddiye alan pek az bilim insanı vardı. Daha çok, maddenin 'sürekli ortam' yapısına sahip olduğu kanaati yaygındı. Zaten de, klasik termodinamik ve elektromanyetik, akışkanlar mekaniği gibi konular, maddenin ve 'eter'in bu modelinden hareketle geliştirilmişti. Atomlar ve elektron gibi parçacıklara genelde, bazı bağlamlarda işe yarayan düşünce araçları ya da 'kuramsal yapılar' gözüyle bakılıyordu. İstatistik termodinamiğin temellerini atan Ludwig Boltzmann, içeriğinde 'atom' ya da 'molekül' sözcüğü geçen makalelerini yayınlamakta zorluk çekmişti. Einstein'ın bu makalesinden sonra, maddenin parçacıklı yapısı ciddiye alınmaya başlandı. Atomun varlığını öteden beri savunmakta olan J.B. Perrin, onun Brown hareketiyle ilgili öngörülerini sınavan deneyler yaptı. 1908-1909 yıllarında, 'parçacıkların sıvılarda askıda duruşu'nu ('colloidal suspension') inceleyip, Avogadro sayısının ve Boltzmann sabitinin kuramsal değerlerini deneyle kanıtladı. Ancak bundan sonradır ki, bilim dünyası atom denen minik parçacıkların 'gerçekten var' olduğuna inandı. Boltzmann iki yıl önce ölmüştü. Neyse...

Bu gelişmeleri yakından izlemiş olan Einstein'ın, kuantum mekaniğinin geçici olduğunu düşünmesi doğaldı. Yalnız da değildi. EPR ikilemiyle gündeme gelen 'dolanıklık kavramı', tartışmaları yaygınlaştırdı. Çünkü bu olayda, olasılığın yanında kesinlik de vardı. Ne gibi?...

Örneğin, biz 'yazı-tura' atarken olasılıklardan söz eder, paranın kütle dağılımındaki düzlemsel simetriye ve atış koşullarının gelişigüzelliğine güvenerek, "%50 yazı ya da %50 tura" deriz. Bu tahmin, oldukça iyi çalışır. Örneğin 10 atış yaparsak, 6 biri 4 biri; 100 atış yaparsak, 55 biri 45 diğeri, 1000 atışta sonuç daha da iyi... Ama, paranın belirleyici fiziksel özelliklerini önceden incelemiş ve atış öncesi 'başlangıç koşulları'nı da yeterince belirlemişsek, aslında paranın atış sonrasında nasıl bir hareket biçimi izleyeceğini ayrıntısıyla hesaplayabiliriz. %50-50 olasılık aracını, bu zahmete girmek için kullanıyoruz. Gerekirse girer ve yere düştüğünde yazı mı tura mı geleceğini, her atış için, kesine yakın bir doğrulukla öngörebiliriz.

Kuantum mekaniğinin olasılık hesabı, biraz buna benzetiliyordu. Dolanıklık durumu, daha da karışık. Çünkü burada sanki iki para var; biri atıldığında diğeri de atılmış gibi oluyor ve biri yazıysa, diğeri mutlaka tura... ya da tersi... Bu iki para sanki birbirine metal bir çubukla, güçlü bir bağla bağlı. Biri yazı, biri tura; arada kaynak... Tam da öyle değil ama; parçacıklar birbirinden çok uzaklara gidebiliyor. Gittiklerinde yine öyle; biri yazı çıkarsa, diğeri de atılınca tura... Bu şuna benziyor: Biz bu paraları avucumuzda çalkalar, yani dolanıklık durumuna getirirken, aralarında farkına varmadığımız bir etkileşim oluyor; örneğin birinin yazı yüzünden bir parça kopup, diğeri tura yüzüne yapışıyor. Sonra, birini belli koşullarda fırlattığımızda yazı düşerse eğer; diğeri de 'aynı deney koşulları'nda fırlatıldığı takdirde, tura gelmek zorunda. Kütle simetrileri bozulmuş çünkü, ters yüzlerde; yapısı öyle artık... İşte bu farkına varmadığımız 'alışveriş'ler, gizli değişkenler. Fakat şu var: Bu 'gizli değişken etkisi', az önce sözünü ettiğimiz 'metal çubuk'la birbirine kaynak kadar etkin olamamalı. Yüz atışın, diyelim 90'ında ters düşerler, ama 10'unda da düşmeyebilirler. Oysa arada, paraları farklı yüzleri yukarıdayken birbirine bağlamış olan; bir metal çubuk varsa, her seferinde ters düşmek zorundalar. Kuantum mekaniğinin 'dolanıklık' anlatımı, bu ikincisine daha çok benziyor. Sanki, metal çubuk dışında hiçbir bağlantı, herhangi bir gizli bağlantı, bu paraların kesinlikle ters düşmeleri zorunluluğunu açıklayamaz...

1950'lerin sonlarına gelindiğinde, bir dizi 'gizli değişkenler kuramı' önerilmişti. Önde gelenlerinden biri olan "Bohm'un Yorumu"ydü. Bu 'yerel olmayan' bir kuramdı. Yerel olanları da vardı. 1964 yılında John S. Bell, yerel olan herhangi bir gizli değişken kuramının, kuantum mekaniğinin bağıntı öngörülerini aynı güçlülük düzeyiyle yakalayamayacağını ispatladı. Kendisi aslında, gizli değişkenler kuramı taraftarıydı ve Bohm'un yorumunun en etkin savunucularındandı. Teoremini de zaten, kuantum mekaniğinin 'eksik' olduğunu göstermek amacıyla geliştirmişti. İspatı, dolanık iki parçacığın, örneğin spin ölçümleri arasındaki bağıntı katsayısına dayalıydı. (Bknz. Bağıntı Deneyleri) Herhangi bir gizli değişken kuramının, bu katsayı için verebileceği en büyük değeri, diyelim L olarak hesapladı. Kuantum mekaniğinin aynı katsayı için vermesi gereken değer, L'den daha büyük olduğunu gösterdi.

Bundan sonra demek istediği şeydu: "Yapın dolanıklık deneylerinizi; elde edeceğiniz bağıntı katsayısının L'den küçük olduğunu, yani parçacık özelliklerinin ölçümleri arasındaki bağıntının kuantum mekaniğinin öngördüğü kadar güçlü olmadığını gözlemlenizle göreceksiniz ve biz, gizli değişken kuramı taraftarlarına hak vereceksiniz."

Bohm daha önce, yapılabılır dolanıklık deneyleri önermişti zaten. Deneyler yapıldı. Kuantum mekaniği kazandı. Gerçi, deney sonuçlarıyla üzerinde, algılayıcıların duyarlılığının sınırlı olmasından kaynaklanan bazı soru işaretleri hâlâ vardı. Fakat Bell artık, "algılayıcı duyarlılığının artmasının sonucu değiştireceğini sanmıyorum" diyordu; 1990 yılındaki beklenmedik ölümden önce.

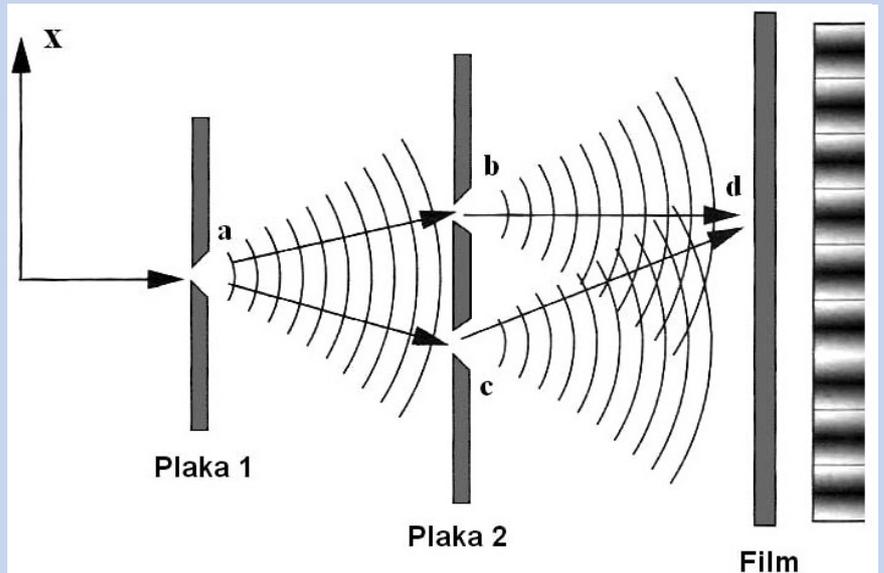
Dolanıklıkla ilgili bağıntı deneylerine, anısına 'Bell deneyleri' deniyor. İkili bir foton sistemi için dolanıklık betimleyen, olası dört ayrı 'Bell durumu' var. Ancak, fotonları kullanan Bell deneylerinde, bilinen optik tekniklerle bunlardan yalnızca ikisi diğerlerinden ayırt edilebiliyor. 'İyon tuzaklama' deneylerinde, atomlar ve hatta oldukça ağır moleküller dahi dolanıklık haline konulabildi. Bunlardaysa, Bell durumlarının dördü de birbirinden ayırt edilebilmekte. Diğer yandan, dolanık ikililer, dolanık sistemlerin en basit hali. Aynı türden çok sayıda parçacığın dolanıklık durumları, uygulama açısından belki daha da büyük bir potansiyel taşıyor. 'Süperyoğun şifreleme' ('superdense coding') gibi...

Afşar Deneyi:

Bu bir optik deney. 2001 yılında Şahriyar S. Afşar ve çalışma arkadaşları tarafından, Rowan Üniversitesi'nin, (ABD)

'Radyasyon Uyarımlı Kütle Çalışmaları Enstitüsü'nde ('Institute for Radiation Induced Mass Studies', IRIMS) yapıldı. 2003 yılında Harvard Üniversitesi'nde tekrarlandı. Savunucuları, kuantum mekaniğinin Kopenhag ve 'Çoklu Dünyalar' yorumlarının geçersizliğinin kanıtlanmış olduğu iddiasında. Fakat, deney hala tartışılıyor, bulgularının sağlıklılığı kesin değil. Bazı konferansların bildiri kitaplarında ve Uluslararası Optik Mühendisliği Derneği ('International Society for Optical Engineering'; ISPE) tarafından, Haziran 2005'te yayınlanmış olmakla birlikte, Mayıs 2006 itibarıyla, hakemli herhangi bir bilim dergisinde yayınlanmış değil. Karşıtları, deneyde elde edilen foton verilerinin yanlış yorumlandığını savunuyorlar. Fakat yine de, deney kurgusu itibarıyla, iddiası doğru olmasa bile, kuantum mekaniği ilkelerinin anlaşılması açısından iyi bir akıl cimnastiği oluşturuyor.

Deney Thomas Young ve A.J. Fresnel'in, klasik çift yarıklı girişim deneyinin farklı bir şekli. Geçen sayımızın ekinden hatırlanacağı üzere, Young-Fresnel deney düzeneği, yandaki şekilde görüldüğü gibi. Biri tek, diğeri çift yarıklı iki plaka ve bir film ekranından oluşuyor. Işık kaynağı şekilde gösterilmemiş, ama soldaki koordinat sisteminin merkezinde. Birinci plakanın amacı, buradaki tek yarıktan geçen ışınları faz açısından uyumlu hale getirmek. Yani, ardışık dalga tepelerini paralelleştirip, birbirini aynı mesafeye izlemesini sağlamak. Bu 'faz uyumlu' ('coherent') dalgalar, ikinci plakadaki yarıklardan geçtikten sonra, fotoğraf filmi gibi duyarlı bir yüzeye ulaşıyor. Filmin herhangi bir noktası için, eğer b ve c yarıklarından gelen dalga tepelerinin o noktaya ulaşana kadar



katettikleri mesafelerin arasındaki fark, dalgaboyunun tamsayı katına eşitse; tepeler o noktada üst üste biner: Genlik, yani ışık şiddeti ikiye katlanmış, o noktanın civarı kararmıştır. Yok eğer, mesafeler arasındaki fark, yarım dalgaboyunun bir 'tek-tamsayı katı' ise, o zaman da; bir dalga tepesiyle diğerinin çukuru üst üste biner: Genlik, yani ışık şiddeti sıfırlanmış, o nokta aynı kalmıştır. Diğer noktalar için, ara durumlar söz konusu. Sonuç olarak filmin üzerinde, en sağda gösterildiği gibi; birbirine paralel, parlak ve karanlık çizgilerden oluşan bir 'girişim saçığı' oluşur. Saçak iki farklı noktadan kaynaklanan su dalgalarının yol açtığı girişim örüntüsüne benzediğinden, oluşumu ancak, ışığın dalga davranışıyla açıklanabilir. Ancak, su dalgaları yüzeysel olduklarından, sergiledikleri girişim saçığı yaklaşık düzlemseldir. Oysa burada, yarıklardan geçen dalga cepheleri silindirik yüzeyleri şeklinde olduklarından, saçığın en az, yarıkların derinliği kadar bir derinliği var.

Deney ilk yapıldığında, ışığın parçacık kuramı taraftarları, saçığın birbirine yakın seyahat eden fotonların arasındaki etikleşmeden kaynaklanabileceğini öne sürdü. Fakat, ışık şiddeti yarıklardan her an için tek bir fotonun geçtiğinden emin oluncaya kadar azaltılarak yapılan deneylerde de saçak oluştuğu gözlemlenince, söylenecek bir şey kalmamıştı. Bu düzeneğe iki şeyden birisi yapılabilir. Birincisi, filme ulaşan fotonların hangi yarıktan geçerek geldiğinin belirlenmesi. Bu, yarıklardan birinin önüne bir foton algılayıcısının konmasını gerektirir. Oysa bu, o yarığın kapatılmış olması anlamına gelir ve filme yalnızca, diğer yarıktan geçen ışık ulaşabilir. Örneğin b kapatılmışsa, a-b doğrusunun, c kapatılmışsa da a-c doğrusunun film düzlemini kestiği noktaya... Birinci plakadan sonra doğrusal bir harekete işaret eden bu durum, ışığın foton olarak parçacık davranışının bir belirtisidir. Sonuç olarak, ışık bir parçacık gibi davranmaya zorlanmış ve fotonun, ikinci plaka düzlemini geçerkenki konumu belirlenmiş olur. Fakat bu arada, girişim saçığı tahrip edilmiştir. Yandaki şeklin üst kısmında bu durum görülüyor. Fotonun hangi yarıktan geçip geldiğini saptamaya yönelik deneylere 'hangi yol?' ('welcher weg') deneyleri deniyor.

İkincisi, yarıkların her ikisini de açık tutmak. Bu durumda; ışık parçacık gibi davranıyorsa eğer, filmin üzerinde tek ve kalın bir parlak çizgi, dalga davranışı ser-

giliyorsa da girişim saçığı beklenir. Gözlemlenen, bu ikincisi. Şeklin en altında, bu durum gösteriliyor. Dikkat edilecek olursa, saçığın ortası parlak. Fakat, bu parlak çizgi filmin üzerine düşürülünce karanlık bir çizgi oluşturuyor. Bir önceki şekilde ortanın karanlık olması bu yüzden, arada bir çelişki yok. Öte yandan, ortadaki parlak çizginin orta noktası, yarıklara eşit uzaklıkta. Fakat, onun bir sağ ya da solundaki parlak çizginin orta noktasının yarıklara uzaklıklarının arasındaki farkın, ışığın dalgaboyuna eşit olması gerekiyor. Dolayısıyla, yarıkların birbirine ve yarıklı plakanın filme uzaklıklarından hareketle λ 'yı hesaplamak mümkün. Bu, momentumun belirlenmesi anlamına geliyor ($p=h/\lambda$). Fotonun momentumu, yarıklardan sonra filme ulaşana kadar değişmediğine göre,

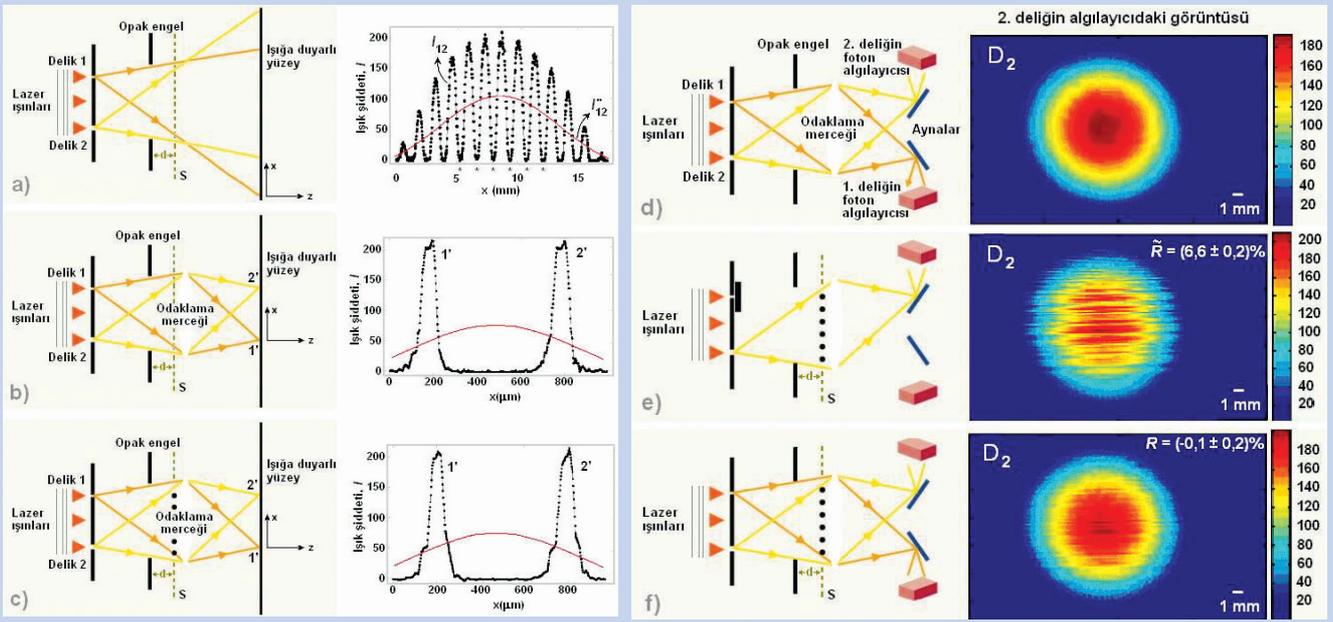


yarıklarda da aynı.

Kısacası, deney ışığın hem dalga hem de parçacık davranışını incelemeye yatkın. Girişim saçığının gözlemlenmesi, ışığın dalga davranışını kanıtlıyor ve fotonun dalgaboyunun belirlenmesine izin veriyor. Filme ulaşan ışığın hangi yarıktan geldiğinin saptanması halinde ise, ışığın parçacık davranışı ortaya konmuş ve fotonun konumu belirlenmiş oluyor. Çift yarık düzeneği bu yapıyla, kuantum mekaniğinin oluşturulma sürecinde, kuramı sınamaya yönelik düşünce deneyleri geliştirmek amacıyla sıkça kullanıldı. Özellikle de, Heisenberg'in 'belirsizlik' ve Bohr'un 'tamamlayıcılık ilkesi'ni... Bunlardan birincisi, genelde ve bu deneyde de, fotonun konumuyla momentumunun aynı anda belirlenememesini yasaklar. İkincisi ise, madde-

nin hem parçacık hem de dalga şeklinde davranabileceğini, fakat bu iki davranış biçiminin tek bir deneyde, yani aynı deney düzeneğinin değişmeyen koşulları altında bir arada gözlemlenemeyeceğini söyler. Yani Bohr'a göre; ya bir parçacığın patikasını izlemek, ya da girişim etkisini gözlemlemek seçeneklerinden birine sahibizdir ve birbirini dışlayan bu iki davranış biçimi ancak, birbirini dışlayan deney düzeneklerinde gözlemlenebilir. Eğer çift yarık deneyinde, hem girişim saçığı gözlenir ve hem de fotonların ikinci plakadaki yarıkların hangisinden geçtiği saptanabilirse, Kopenhag Yorumu'nun temel direklerinden ikisini oluşturan bu ilkeler çığnenir. Çünkü, fotonun konumu ve momentumu aynı anda belirlenmiş olacağı gibi, ışığın hem dalga ve hem de parçacık davranışı aynı deney düzeneğinin değişmeyen koşulları altında gözlenmiş olur. Afşar deneyi bunu yaptığı iddiasında. Deney iki kısımdan oluşuyor, her biri üçer aşamalı. Düzeneği altta...

Bu düzeneğe, ışık kaynağı olarak lazer kullanıldığından, ışınlar zaten uyumlu. Dolayısıyla, uyumlaştırıcı plakaya gerek kalmıyor. Girişime yol açan plakada ise, iki yarık yerine, iki iğne ucu deliği var. Bunun amacı, dairesel girişim halkaları elde etmek ve deliklerin dairesel görüntüleri üzerinde çalışmak. Plakanın sağında opak bir engel, onun da sağında, ışığa duyarlı bir yüzey var. Opak engelin 10,4 mm yarıçapındaki açıklığından, saçığın en parlak 7 halkası geçebilirken, daha üst dereceden halkalar traşlanıyor. Deneyin a) aşamasında, girişim saçığı oluşturuluyor ve karanlık çizgilerin, opak engelle belli bir, diyelim d uzaklığındaki paralel S düzlemini kestiği noktaların, sağda gösterilen x-z koordinat sistemine göre koordinatları, duyarlı bir şekilde belirleniyor. Daha sonra bu konumlara, şekil düzlemine dik yönde ince teller yerleştirilecek. Yandaki grafikte, duyarlı yüzeyde saptanan ışık şiddeti ölçümleri, x'in fonksiyonu olarak gelişigüzel bir birimle verilmiş. Veri noktalarının oluşturduğu I_{12} eğrisi, girişim saçığı. I_{12} eğrisi ise; iki delikten gelen ışınların uyumsuz ('decoherent') olması ve dolayısıyla girişim saçığının oluşmaması halinde, duyarlı yüzeyde beklenen ışık şiddeti dağılımının kuramsal grafiği. Bu aşamada, S düzleminde belirlenmiş olan karanlık çizgi konumlarına teller yerleştirilirse, fotonlar bu konumlardan zaten geçemedikleri için teller tarafından kırınımına uğratılmayacaklarından, girişim saçığı etki-



lenmeyecektir. Dolayısıyla, bunu deneme-ye gerek dahi olmadığı söylenebilir.

Deneyin b) aşamasında, ışığa duyarlı yüzey kaldırılıp, opak engelin sağ tarafına ince kenarlı bir mercekle konuluyor. Bu mercekle, deliklerden gelen ışınları ayrı yollara gönderir ve üstteki 1.'den gelenler aşağıya, alttaki 2.'den gelenleri de yukarıya doğru kırıp, duyarlı yüzeye düşürür. Dolayısıyla, merceğin iki delikten gelen ışınları 'uyumsuz' hale koymuş ve böylelikle, girişimde bulunup saçak oluşturmalarını engellemiş olması beklenir. Nitekim, bu b) şıkkı için duyarlı yüzeye düşen ışımaya şiddeti ölçümleri, sağdaki grafikten görüldüğü üzere, girişim dağılımının tahrip olduğunu gösteriyor. Grafikte iki ayrı zirve var ve bu, farklı deliklerden gelen fotonların birbirleriyle etkileşmeyip, klasik olasılıklara dayalı 'parçacık davranışı' sergilediğine işaret ediyor. En azından mercekten sonrası için durum böyle. Fakat, Bohr'un 'tamamlayıcılık ilkesi'nin kısıtı daha da sert. O da, girişim saçığının mercekten önceki bölgede de ortadan kalkmış olması gereği. Çünkü, aynı düzeneğe aynı koşullar altında, fotonun hem dalga hem de parçacık davranışının gözlenememesi lazım. Yani, mercekten önce dalga, mercekten sonra parçacık; böyle olamaz. Bu, özensilere ters gelen bir durum. R.P Feynman'ın dediği gibi, "tamamlayıcılık ilkesinin özü burada yatıyor ve kuantum mekaniğindeki yegane gizemi oluşturuyor." 'Gizem' şu: Kuramsal olarak, düzeneği uygun şekilde büyütürsek, mercekten S düzlemi arasındaki mesafeyi istediğimiz kadar artırabiliriz. Merceği çıkarıp girişim saçığının oluşmasına imkan verdiğimizizi ve ondan sonra, $t=0$ anına kadar bekleyip, merceği ansızın yerleştirdiğimizi varsayalım: S düzlemindeki girişim noktalarının, hatta mercekten delikli plakaya kadarki tüm girişim saçığının anında yok ol-

ması gerekir. O halde, merceğin etkisi, ışık hızından da hızlı seyahat edebilmesi gereken, 'yerel olmayan' ('non-local') bir etki. 'Dolanıklık'ta olduğu gibi. Gizem burada. Acaba öyle mi?...

Deneyin c) aşamasında, S düzlemi üzerine, girişim saçığının karanlık çizgilerinin geçmiş olduğu noktalara, şekil düzlemine dik yönde, yeterince ince teller yerleştiriliyor. Mercek hâlâ yerinde. Eğer mercekten önceki konumlarda girişim saçığı gerçekten de ortadan kalkmışsa, bu tellerin, deliklerden gelen ve artık kuantum yerine klasik olasılıklarla seyahat etmekte olan fotonlardan bazılarını kırınımına uğratarak, duyarlı yüzeydeki ışımaya şiddeti dağılımının değişmesine yol açması beklenir. Oysa, sağdaki grafikte gösterilen deney verileri, bir önceki durumdan farksız. Bu, ölçümlerde hata yoksa eğer, girişim saçığının hala orada olduğu anlamına geliyor. Yani; mercekten önce dalga, mercekten sonra parçacık davranışı var: Tamamlayıcılık ilkesi zedelenmiş oluyor. Öte yandan, hangi fotonun hangi delikten geldiği bilindiğine göre, bu artık bir 'hangi yol' deneyi. Duyarlı yüzeye düşen fotonlardan herhangi birinin, delikli plakadan geçerkenki konumu biliniyor. Deneyin a) şıkkındaki girişim saçığının mercekten önceki varlığını devam ettiriyor olması, fotonun dalga boyunu da verir. Böylelikle hem konum, hem de momentum belirlenmiş olacağından, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi de zedelenir. Kopenhag yorumu sarsılır. 'Çoklu dünyalar' yorumu da. Çünkü, iki delikten gelen fotonların, merceğin varlığı nedeniyle uyumsuzlaşmış olması, birbirleriyle etkileşimi imkansız kılacak şekilde 'farklı dünyalar'a girmiş olmaları gerekiyor. Hâlâ etkileşebiliyorsa eğer, durum böyle değil. Deneyin bir de ikinci kısmı var...

İkinci kısımda, duyarlı yüzey kaldırılıyor. Merceğin deliklerden gelen ışınları odaklayarak oluşturduğu görüntü noktalarına, uygun açılarla birer ayna konuyor. Aynalardan yansıyan ışınlar, 'eşlenik yük aygıtları'ndan ('charged couple device', CCD) oluşan birer foton algılayıcı tarafından kaydedilecek. Şekilde d) olarak gösterilen aşamada, teller yok ve 2. deliğin görüntüsü, kendisine ait algılayıcıda, diğer delik de açık bırakılmışken belirleniyor. Bu görüntü şeklin en sağında. Bir sonraki e) aşamasında, teller yerleştirilip, 1. delik kapatılıyor. Tek delikle girişim sözkonusu olamayacağından, tellerin açık kalan 2. delikten gelen fotonların bir kısmını yansıtırak, bu deliğin, kendisine ait foton algılayıcısındaki görüntüsünün zayıflamasına yol açması beklenir. Nitekim en sağda, deney ölçümlerine göre bu durum görülmüyor. D_2 'nin görüntüsünde, yaklaşık %6 oranında bir çözünürlük kaybı belirlenmiş. Nihayet, f) aşamasında, 1. delik açılıyor. Teller hala yerinde. Deliklerden gelen ışınlar uyumsuzsa eğer, yani merceğin sol tarafında girişim yoksa, bu tellerin, her iki delikten de gelen fotonlardan bazılarını yansıtırak, deliklerin, ilgili algılayıcılardaki görüntülerini zayıflatması gerekir. Oysa, sağda gösterilen deney sonuçları, D_2 'nin görüntüsünün hemen hemen, tellerin devre dışı olduğu d) şıkkına geri döndüğünü gösteriyor. Bu, tellerin etkisizliği, dolayısıyla da girişim saçığının, mercekten önce hala var olduğu anlamına geliyor. Deneyin birinci kısmında varılan sonucun aynı.

'Kopenhag Yorumu'nun temel direkleri, belirsizlik ve tamamlayıcılık ilkeleri. Bu ilkeler geçersizse eğer, yorum çöküyor. Deneyin bulguları doğru çıkarsa eğer, 'Sayanora Kopenhag'. Kopenhag'ın ortodoks yorumunu özensilere aykırı bulup, bundan rahatsız olanlar arasında söylendiği gibi...