

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



TÜBİTAK

YENİ UFUKLAR

KUANTUM ÖLÇEĞİ

AĞUSTOS 2006 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

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

KUANTUM

Sağ elimi açıp yatay olarak uzattım diyelim, avucumda da bir taş parçası var. Şekli kusursuz küresel olsun, kütle merkezi geometri merkezinde, bilye gibi bir şey. Elimde böyle bir nesnenin var olduğundan nasıl emin olabilirim, bunu nasıl bilebilirim?... Bir kere, elimi yatayda sabit tutabilmek için, kolumun ağırlığını taşıyor olmanın yanında, bilyeye de, üzerindeki yerçekimi kuvvetini dengeleyecek bir kuvveti, yukarıya doğru uyguluyor olmam gerekir. Bu kuvveti uygulayan kol kaslarındaki gerilimi, beynimin motor merkezinde hissedirim. Ayrıca motor merkezin, ilgili kasların uyguladığı kuvvet üzerinde sürekli olarak ince ayarlar yapması gerekir. El, hedeflenen yatay konumun biraz altına düştüğünde kuvveti artırmak, yukarı kaydığında da azaltmak şeklinde... Bu sırada ayrıca, avuç içi derisindeki basınca duyarlı sinir uçları, taşın ağırlığından üzerlerine düşen payları algılamakta ve elektrokimyasal sinyallere dönüştürüp, beyne iletmektedirler. Dolayısıyla, taşa dokunmakta olduğumu da hissedirim ve bu uyarılar, bana avucumda bir şeyin bulunduğunu söyler. Bir de tabii görme olayı var; duyarlarımızın en önemlilerinden birisi, belki de en önemlisi. Taştan yansıyan ışıklardan gözün retina katmanına ulaşanların soğurulması sonucunda oluşan enerji uyarısı, bir önışlemler tabii tutulduktan sonra, keza elektrokimyasal sinyallere dönüştürülüp, beynin görme merkezine gönderilmektedir. Görme merkezi de bu sinyallere dayanarak, beynin içinde taşın görüntüsünü inşa eder. Işıklar gözün ince kenarlı merceğinden geçerken kırılarak odaklandıklarından, retina üzerinde oluşan görüntü, aslında terstir. Bu görüntü beyinde, tersine çevrilerek düzeltilir. Beynin bu yeteneğini öylesine kanıksamışızdır ki, retinadaki asıl görüntünün ters olduğunun farkında bile değilizdir. Bu sayede, seyrettiğimiz dünya manzarasında, yerükünün bize göre altında başaşağı yürümek yerine, üstünde dikine yürümekte ve gökyüzünü yerin altında değil de üstünde görmekteyizdir. Retinaya düşen görüntü, frekans ayrımı yapabilen koni şeklindeki hücreler tarafından işlendiğinde renkliyen, retinanın dış çeperinde yoğunlaşmış bulun ve zayıf ışık şiddeti ortamlarında 'gözücü'yla bakarken ağırlıklı olarak devreye giren çubuk hücreler tarafından işlendiğinde, bu hücreler frekans ayrımı yapamadığından, 'siyah-beyaz'dır. 'Renk', 'siyah' ve 'beyaz' her ne demekse... Sonuç olarak; ağırlık hissi, dokunma ve görme duyarlarımızın yardımıyla, avucumda bir taşın bulunduğunu kanaatene kapılırım. Hatta, avucumun içindeki sinir uçlarından bazıları 'sert-yumuşak' ayrımı yapabildiğinden, taşın katı bir cisim olduğunu da hissedebilir ve bundan emin olmak için, taşı ağzıma götürüp ısırma da deneyebilirim. Ki bu

sırada, tad alma duyusu da devreye girer. Biz insanlar için artık bir hayli zayıflamış olmakla beraber, hâlâ önemli bir duyu. Ne de olsa, besin kaynakları arayışı ve temini, tanıdık tadların diğerlerinden ayırılabilmesi, yaşamsal öneme sahip etkinlikler. Zaten bu yüzden, bekleğimizin 'oral' evresinde elimize geçen nesnelere incelerken, bir kere de ağzımıza götürüp tadına bakarız. Ancak, bütün bu algı süreçlerini, avuçta taş yokken yaşamamız da mümkün. Ne de olsa, beynimizde oluşan resim, taşın kendisi değil, sadece görüntüsü. Seyrettiğimiz her şey; okyanuslar, dağlar, bulutlar, gökyüzü ve yıldızlar, hepsi; dışarıda bir yerlerde değil, aslında beynimizin içinde. Halbuki bu görüntüler zahiri de olabilir, örneğin rüyada olduğu gibi. Keza diğer algı süreçleri... Duyularımız, 'dış dünya' unsurlarıyla aramızda tercüman işlevi gören bir 'arayüz' oluşturuyor. Nesnelere kendileriyle hep duyarlarımızın 'öte tarafında', 'sınır ötesi', 'transandantal.' Hal böyleyken, avucumda 'gerçek' bir taşın var olduğundan nasıl emin olabilirim?

Akla ilk, taşın bir duvara karşı fırlatıp, 'tak' diye bir ses çıkartıp çıkarmadığına bakmak gelebilir. Ancak, böyle basit bir deneyi rüyamda da yapıyor olabilirim. Daha iyisi; ayrıntılı bazı deneyler yapmak ve taşın, bir taştan beklenen şekilde davranıp davranmadığına bakmaktır. Ama bir taşın, "taştan beklediği şekilde davranması" ne demek?... Aynı taşın, örneğin aynı insanda olduğundan farklı biçimde, benzer koşullar altında her seferinde aynı şekilde davranması, istikrarlı ve tutarlı olması beklenmesi nereden kaynaklanıyor?

İnsan olarak taşların davranışına ilgili deneyimler açısından engin bir birikimimiz var. Yaklaşık 3,5 milyon yıl önce ayaklarımızın üzerine doğrulmamızla birlikte kollarımız serbest kalalı beri, taşları yontup balta, mızrak ve ok ucu yapımı, savunma veya av amacıyla çeşitli hedeflere doğru fırlatıp durmuşuz. Örneğin, mızrağı kütle merkezine yakın bir yerinden tutmayı ve kah durduğumuz yerde yaylanarak, kah da önce koştuğuktan sonra ansızın durarak verdiğimiz ilk hızı artırmayı, değişik açılarla fırlatıp erimini ayarlamayı keşfetmişiz. Bu sırada el-göz eşgüdümünü sağlarken bir yandan da dengemizi korumamız gerektiğinden, çeşitli kaslarımızı uyumlu bir şekilde kullanmayı, uyguladıkları kuvvetleri amacımıza uygun biçimde zamanlamayı öğrenmişiz. Bu sayısız deney sırasında yaşadığımız tartım süreçleri, denge organımızın gelişmesine ve beynin öge korteksinin oluşmasına önemli katkılarda bulunmuş olsa gerek. Başarısız her denemeden sonra kaçırduğumuz avın ardından hayıflanmış ve neyi nerede yanlış yaptığımızı gözden geçirip, çıkaradığımız dersleri sonraki denemelerimize ak-

tarmışız. Attığımız oklar, mızrak ve baltaların havada kesintisiz birer seyir izleyerek süzülüğünü, bazılarının bir ağacın iki dalı arasından geçip, arkadaki gövdeye saplandığını görmüşüz. Düşlerimize konu olmuş taşlar, mitlerimize girmiş. Örneğin Eski Sümer ve Babil'de taşların, Mezopotamya'yı kuraklaştırma girişiminde buldukları için tanrılar tarafından kendilerine ceza olarak verilen fiziksel özelliklere sahip olduklarına inanılmış. Kafamızda artan sayıda yeni kavramlar oluşmuş ve bu kavramları sözcüklerle etiketlemişiz: Uzay, zaman, konum, hız, yön; patika, yürünge, kütle, ivme. Duyularımızın, birer ayna misali dış dünyadan yakalayıp 'içimize' yansıttığı algılarımızın özel etiketleri zamanla günlük anlatımlarımızın parçası haline gelmiş. Hepsini de çevreye uyum çabalarının ürünü, yaşamın ve neslin devamına yönelik içgüdüsel dürtülerin sonucu. Onca vasat fiziksel donanımımıza karşın, geliştirdiğimiz bu kavramlar ve uygulamaları sayesinde ki, geniş bir canlılar yelpazesinin en başarılı türlerinden biri haline gelmişiz; bize sorarsanız 'kralı'.

Son birkaç binyıldır bu kavramları, bizleri büyüleyip hayallerimizi süsleyen gökcisimlerinin, zamanı ve mevsimleri belirlemek amacıyla gözlemediğimiz hareketlerini açıklamak amacıyla kullanmaya başlamışız. Taşların ve genelde cisimlerin hareketlerini yöneten ortak ve soyut bazı ilkelerin varolması gerektiği inancıyla Newton yasalarını keşfedip, kalasik mekanik kuramını oluşturmuşuz. Gök cisimlerini yöneten yasaları yeryüzüne indirip kullanmaya başlamışız. Dolayısıyla, taşla bir deney yapıp, kurama uyup uymadığına bakardım. Rüyada uyum olasılığı düşük...

Peki, avucumdakinin taş olduğunu 'biliyor', fakat davranışının kurama uymadığını görüyorsam, o zaman ne yaparım?... Kuramı değiştirmek gerekir. Klasik mekanikle ışık hızına yaklaşıldığında görelilikle, atom ölçeğine inildiğinde, kuantum karşıtıyla karşılaşıldı. İzleyen sayfalarda bu ikinci süreçten, kesikli bazı görüntüler var.

Tarihçe

20. yüzyıl'ın başlarına gelindiğinde, klasik mekaniğin açıklayamadığı, önem sırasına göre olmayarak; Gibbs çelişkisi ve entropinin sıfır noktasının olamayışı, morötesi çöküş, fotoelektrik olayı, ışınetkinlik (radyoaktivite) gibi bazı problemler vardı...

Bu olguların açıklanabilmesi için, maddenin yapısının anlaşılması gerekiyordu. 1897 yılında J.J. Thomson, bir katot ışını tüpü kullanılarak ürettiği ışınlar üzerinde, o zamana kadarki en kapsamlı deneyi yapmıştı. Gözlemlerinden türettiği sonuçlar, çarpıcı ve sağlamdı. Tüp bir elektrik alanına yerleştirildiğinde

M ÖLÇEĞİ

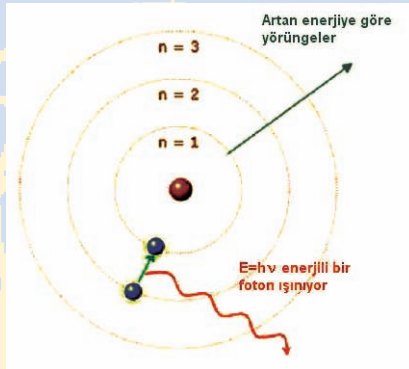
katot ışınları saptırılıyor, manyetik alana yerleştirildiğindeyse, dairesel biçimde kıvrılıyordu. Işınların eksi yüklü parçacıklardan oluştuğu kanısına vardı. Gerçi bu zaten biliniyordu. Fakat Thomson, elektrik ve manyetik alanların ışınlara uyguladığı kuvvetlerden hareketle, katot ışınları için 'elektrik yükü bölü kütle' (q/m) oranını belirledi. Tüpteki katot hangi malzemeden yapılmış veya tüpün içi hangi tür gazla doldurulmuş olursa olsun, karşısına hep aynı q/m oranı çıkıyordu. Demek ki bu eksi yüklü parçacıkların, hepsi de aynıydı. Gerçi bu parçacıklara 'korpüskül' adını vermiş, ama aslında George Stoney'in 1891'de varlığını önermiş olduğu elektronu keşfetmişti. Bu elektronlar, gazdaki veya metal elektrotun içindeki atomlardan geliyor olmalıydı. Onca farklı türdeki atomların hepsi aynı parçacığa yol açtıklarına göre, elektronlar bütün atomların temel bir parçasıydı. Öte yandan, q/m oranı çok yüksek olduğuna göre, elektron çok küçük bir parçacıktı. Elektronlar eksi yüklü, halbuki atomlar nötr olduğuna göre, atomun bir yerlerinde artı yükler bulunmalıydı. Elektronlar atomlardan çok daha küçük veya hafif olduğuna göre, bu artı yüklü parçacıklar elektrondan çok daha ağır olmak zorundaydı. Thomson bu sonuçlardan hareketle, atomu 'üzümlü kek'e benzeten modelini önerdi. Buna göre, atomun büyük bir kısmı artı yüklerden oluşuyor, elektronlar ise yer yer serpiştirilmiş duruyordu. Aynı yöntemleri kullanarak ayrıca, 'kanal ışınları'nın H^+ iyonlarından oluştuğunu saptadı. John Dalton'un yüzyılın başında önerdiği modele göre bölünemez olan atom, parçalanmıştı. Pandora'nın kutusu açıldı...

1906 yılında R.A. Millikan, yağ damlacığı deneyiyle, elektronların yükünü ölçtü. Thomson'un bulduğu q/m değerinden hareketle kütlesi hesaplandı ve ortaya, atomun çok küçük bir kısmını oluşturduğu sonucu çıktı. Ernest Rutherford bu arada, alfa ışınlarını keşfetmişti. Daha sonra bu ışınların, artı yüklü helyum çekirdeklerinden oluştuğunun farkına vardı. Nitrojen atomlarını alfa parçacıklarıyla bombardıman ettiğinde, alfa parçacıklarından daha hafif, artı yüklü bir parçacık elde etti. 'Proton' adını verdiği bu parçacıkların, atomun çekirdeğini oluşturan temel bir parçacık olduğu sonucuna varmıştı. 1911 yılında, Thomson'un atom modelini sınamak amacıyla, ünlü 'altın folyo deneyi'ni yaptı. Altın atomlarının üzerine yönlendirilen alfa parçacıkları, bazen 180 dereceye varan açılarla sapıyor ve bu, atomların merkezinde sert birer çekirdek kısmının varlığına işaret ediyordu. Rutherford'un önerdiği yeni atom modeli, merkezdeki, 'proton' adını verdiği artı yüklü parçacıklardan oluşan ağır bir çekirdekle, çekirdeğin etrafındaki yörüngelerde dolaşan ha-

J.J. Thomson



fif elektronlardan oluşuyordu. Model mantıklı görünse de, iki temel sorunu vardı. Ortada, elektronların yörüngelerde dolaştığına dair hiçbir kanıt yoktu ve neden farklı yörüngelerde dolaştıklarıysa, hiç anlaşılammıştı. Model açısından da, ciddi bir başka sorun daha yaratıyordu. Çünkü daireler içinde dolaşan, dolayısıyla ivmelenen elektronların, klasik elektromanyetik kurama göre; ışınarak enerji kaybetmeleri ve protonların çekim gücüne kapılarak çekirdeğe düşmeleri gerekiyordu. Yapılan hesaplamalar, Rutherford atomunun milyarda bir saniye içerisinde çökmesi gerektiğini gösterdi. Ama çökmüyordu...

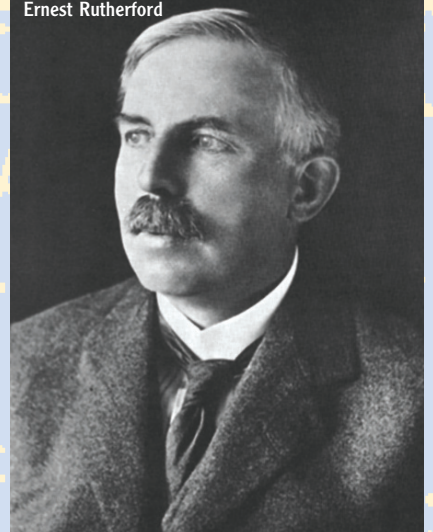


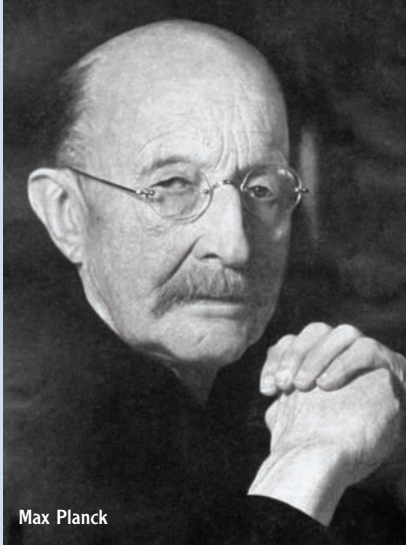
Rutherford'un eski öğrencilerinden Danimarkalı Niels Bohr 1913 yılında, atomların ışın spektrumlarıyla Rutherford'un bulgularını bir araya getirip, yeni bir model önerdi ve ikinci sorunun yanıtını, kuantum varsayımından hareketle verdi. Bohr, atom yörüngelerinde dolaşan elektronların, Rutherford modelinde önerildiği gibi sürekli enerji değerlerinden herhangi birine sahip olabilmek yerine, çekirdekte ancak belli uzaklıklarda bulunabilip, ancak belli enerjilere sahip olabildiklerini düşünmüştü. Bu 'kuantum modeli'nde, yörüngedeki bir elektronun enerjisi, Planck sabiti h 'nin tamsayı katlarıyla değişebiliyor ve açısal momentumun değeri, $h=2\pi$ 'nin tam-

sayı katları olabiliyordu. Işın tüpleri içindeki gaz atomları elektrik akımından enerji soğuyor, uyarılan yörünge elektronları daha üst enerji düzeylerine sıçrayıp, sonra da eski düzeylerine inerken kaybettikleri enerjiyi ışık olarak yayıyorlardı. Aralarında geçiş yapılan enerji düzeyleri arasında belli miktarlarda farklar bulunduğundan, ışıyan spektrumda da, bu enerji farklarına $h\nu=hc/\lambda$ ilişkisiyle bağlı olan dalgaboylarına karşılık gelen çizgiler görünmekteydi.

Bohr, 1913 yılında Manchester'de ziyaret ettiği Rutherford'a, onun yeni atom modeline kuramsal destek sağlayan matematiksel tasarımından söz etti. Bohr'un bu modelinin, klasik fiziğin ilkeleri açısından garip görünen bazı yönleri vardı. Klasik mekaniğin tanıışık olmadığı bir 'kesiklik' ve 'belirsizlik' barındırıyordu. Örneğin; hidrojenin çekirdeği etrafında dolaşan elektron, civardaki uzayın her noktasına ulaşamıyordu. Klasik yörüngelerde dolaşıyor, fakat durağan durumlar arasında geçiş yaparken, bu yörüngeler arasında belli bir konuma sahip olamıyordu. Elektronun yapacağı geçişi önceden kestirmek ve geçiş sırasında neler yaptığını söyleyebilmek mümkün değildi. Ayrıca, bir kez uyarıldıktan sonra, elektronun en düşük 'temel enerji' durumuna geri dönmesini sağlayan herhangi bir dış etken yoktu. Uyarılmış elektron, kendiliğinden herhangi bir alt ya da temel enerji durumuna inebilirdi. Rutherford'un ilk tepkisi; eğer Bohr'un yaptığı gibi, elektronun bir geçiş sırasında yaydığı ışığın frekansı ν , ilk ve son enerji düzeyleri arasındaki farka, $\Delta E=h\nu$ ilişkisiyle bağlınıysa, elektronun doğru frekansta ışık yayması için, hangi son enerji düzeyine geleceğini baştan bilmesi gerekiyordu. Einstein'ın ilk merak ettiği husus ise, ışıması sırasında fotonun elektrondan hangi yönde ayrıldığıydı. Elektron çekirdeğe doğru yaklaştığı-

Ernest Rutherford



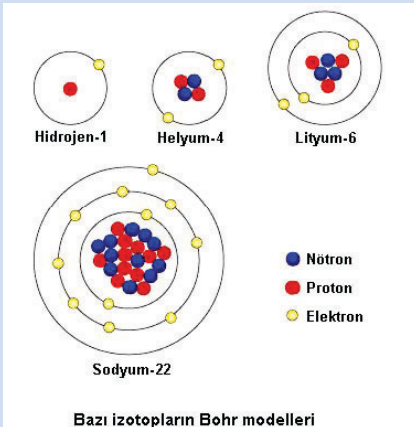


Max Planck

na göre, momentum korunumu, fotonun salındığı yönü kısıtlıyor olmalıydı.

1915 yılında Einstein, Hilbert'le yarışını önde bitirerek genel görelilik kuramını yayınladı. Şansı yardım etmiş ve kuramı, yıldızlardan gelen ışığın Güneş tarafından saptırılmasından kaynaklanan kanıtlarla desteklenmişti. Çok geçmeden, Merkür gezegeninin yörüngesindeki düzlemsel yalpanın, Newton yasalarıyla açıklanamayan bileşenin hesabında kullanıldı.

1920 yılında Otto Stern ve Walter Gerlach tarafından yapılan bir deney, atomların yörünge açısız momentumlarının kesikli değerler aldığını gösterdi. Deneyde, kurşun gibi bir elementin atomlarından oluşturulan bir demet, homojen olmayan bir manyetik alandan geçirildiğinde, atomların, açısız momentumlarının manyetik alan yönündeki bileşenlerinin değeri göre, birden fazla sayıda demetlere ayrılıp, farklı patikalar izledikleri görülmüyordu. Demetlerin sonuçta bir ekrana çarparak oluşturdukları lekelerin sayısı, açısız momentum kuantum sayısı l olan atomlar için $2l+1$ tane idi. Bu, açısız momentumun kuantumlaştığını ve manyetik alan yönündeki bileşeninin $-l$ ile $+l$ arasında kesikli değerler aldığını gösterdi.



Bohr 1922 yılında modelinin, Arnold Sommerfeld'le birlikte geliştirdikleri, ilkinde göre daha kapsamlı olan şeklini açıkladı. Model bu haliyle, hidrojen atomunun ışın spektrumu-

nu ana hatlarıyla verdiği gibi, elementlerin kimyasal davranışlarını da, atomlarının yapısındaki elektronların birbirini izleyen yörünge kabuklarıyla ilişkilendiriyordu. Atomların ışın spektrumundaki kesikliliğin yanında, elementler tablosundaki periyodiklik de açıklanmıştı. Buna göre; her enerji düzeyine karşılık gelen yörünge; birinci kabuk 2 ve ikinciler 8'er olmak üzere, yalnızca belli sayıda elektron barındırabiliyordu. Kabuklardan biri dolunca, elektronlar bir üst kabuğa yerleşiyordu. Kimyasal özellikleri dış kabuktaki elektron sayısıyla açıklamak mümkündü. Dış kabuğu dolu olan elementler tepkimeye girmezken, diğerleri, dolu bir dış kabuk edinmeye yönelik olarak, elektron alıyor veya veriyordu. Daha önceleri kütle numarasına göre düzenlenen elementler tablosu, atom numarasına göre yeniden düzenlendi. Bununla beraber; elektronların neden belli enerji düzeylerinde bulunmak zorunda oldukları ve neden sürekli ışıyıp enerji kaybederek çekirdeğe düşmedikleri gibi yanıtlanmamış sorulara, yenileri eklenmişti: Neden çok elektronlu atomlarda elektronların hepsi, en düşük enerji düzeyine karşılık gelen 'temel durum' yörüngesinde toplanmayıp, diğer yörüngelere de dağılıyordu? Neden birinci kabukta sadece 2 ve sonraki kabuklarda sadece 8'er elektron vardı?

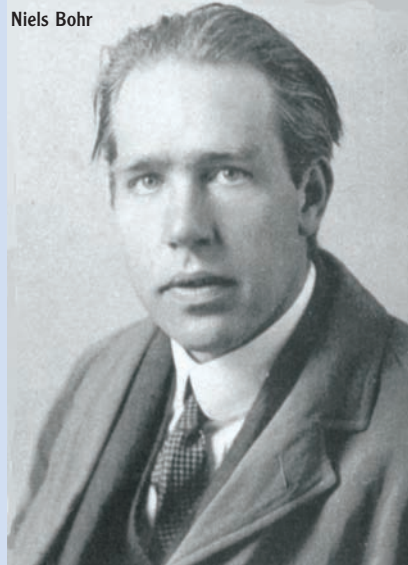
1923 yılında Arthur Compton, x-ışınlarının elektronlardan saçılmaları sırasındaki frekans değişimlerini inceliyordu. Işın dalga davranışından yararlanan bir deneyle, fotonların parçacık gibi davrandığını kanıtladı. Çelişkili görünen bu deney aslında, fotonların ikili davranışına işaret ediyordu. O sıralar doktora çalışmasını yapmakta olan Louis de Broglie, elektronların da ışık gibi, hem parçacık hem de dalga gibi davranabileceğini düşündü. Çünkü Einstein'ın 1905 yılında ortaya attığı görelilik kuramı, kütleyle enerjinin birbirine dönüşebilir olduğunu ve bir parçacığın toplam enerjisinin, momentum p cinsinden, $E^2=mc^2+p^2c^2$ şeklinde yazılabileceğini göstermişti. Fotonlar için kütle sıfır olduğundan, bu ilişki $E=pc$ biçimine indirgeniyordu. Öte yandan, fotoelektrik olayının açıklığa kavuşma-

sıyla anlaşılması olduğu üzere, yine fotonlar için $E=hc/\lambda$ olduğuna göre, $p=h/\lambda$, yani $p=h/\lambda$ olmalıydı. DeBroglie 1924 yılında, maddenin de dalga davranışı sergilediğini ve $p=h/\lambda$ ilişkisinin elektron için de geçerli olduğunu öne sürdü. Onun bu varsayımını, Young'ın ışıkla yaptığına benzer bir deneyle sınamak mümkündü. Elektronların, ince bir yarıktan geçirilerek eşyönlüleştirildikten sonra çift yarıklı bir plakanın üzerine düşürülmele-ri halinde, tıpkı ışığın yaptığı gibi, bu yarıklardan geçerken bükülüp, sonuç olarak ulaşacakları duyarlı bir ekranda girişim örüntüsü vermeleri gerekirdi. Bu deney çok sonraları yapılabilecekti.

1924 yılı sonlarına doğru, Wolfgang Pauli, bir atomdaki elektronların aynı kuantum durumunu paylaşmasını yasaklayan 'dışlama ilkesi'ni keşfetti. 1925 yılı başlarında yayınlandığı bu ilke, çok sayıda elektronu olan atomlardaki elektronların neden farklı yörüngelerde bulunmaları gerektiğini açıklıyor, fakat neden her yörüngede iki elektron bulunduğu sorusunu yanıtlamıyordu. İki elektronun aynı yörüngeyi paylaşabilmeleri, aralarında bir farkın bulunmasını, bu da elektronların o zamana kadar bilinmeyen 'gizli' bir kuantum sayısının daha var olmasını gerektiriyordu. Öte yandan, hidrojen atomu için hesaplanan enerji düzeylerine ait spektrum çizgilerinden bazılarının yerinde, bir yerine, ait oldukları enerji düzeyinin biraz altına ve biraz üstüne karşılık gelen ikişer çizgi ('doublet') vardı. Bu ayrışma açıklanamamıştı. Elektronlarla ilgili bir fiziksel değişken eksikti. Yıl sonuna doğru Ralph Kronig, Bohr'un yardımcılarından Werner Heisenberg'le Pauli'ye, elektronun kendi etrafında dönme gibi bir momentumunun olabileceğinden bahsetti. Küçük ölçekteki dünya hakkında klasik hareket biçimleriyle düşünmeye şiddetle karşı çıkan Heisenberg bu fikirden hoşlanmamıştı. Sert eleştirileriyle ün kazanmış olan Pauli'nin yanıtı ise, "Bu çok parlak bir fikir" oldu, "ama gerçeklerle, kesinlikle ilgisi yok!"

1925 yılına gelindiğinde Bohr-Sommerfeld modeli, gözlenen spektrumu; hidrojenin ikili çizgileri ve daha sonra görelilikten kaynaklandığı anlaşılan ince yapı kaymaları haricinde açıklar hale gelmişti. Fakat, birden fazla elektronu olan atomlar için çalışmıyordu. Öte yandan, model yapısı itibarıyla, deneyde gözlemlenen açıklamaya yönelik ('heuristic') çabalardan ibaret kalmıştı. Hidrojen atomundaki elektronun nasıl davrandığını oldukça iyi yakalıyor, fakat elektronun neden böyle davranması gerektiği konusunda bir şey söylemiyordu. Mikro ölçekteki madde, De Broglie'nin önerdiği gibi, dalga davranışı sergiliyor olsa da, örneğin elektronun bu davranışını betimleyecek herhangi bir denklem yoktu ortada. Newton'un klasik mekanik denklemleri parçacıklar içindi. Onlar da zaten, görelilik kuramıyla değişikliğe uğramıştı. Kuantum görüşü artık tartışılır olmaktan çıktığından, ifadesi için matematik formüllerinin aranmasına yönelik, hızlı bir süreç başladı.

Heisenberg 1925 yılında, 23 yaşında genç bir araştırmacıyken, Bohr modelinin yapmaya



Niels Bohr

çalışmalarının matematiksel anlatımını türetmeye koyuldu. Heisenberg hidrojen atomunu, Bohr'un düşündüğü gibi, yay ucunda salınan yüklü parçacıklar olarak ele almıştı. Ancak, çekirdeğin çekim kuvveti $1/r^2$ türü olduğundan, sistem doğrusal bir salınmaç oluşturuyordu. Böyle, doğrusal olmayan salınmaç denklemlerini, Fourier dönüşümünü alarak 'faz uzayı'nda çözmek daha kolaydı. Hem o zamanlar, salınmaç hareketlerini betimleyen dalga fonksiyonlarını faz uzayında irdelemek adettendi. Heisenberg bundan öte, salınmaçın olası hareketlerine, Bohr'un kuantum kısıtlarını uyguladı. Faz uzayını, açısal momentumun kuantum birimi \hbar 'a karşılık gelen küple bölüştü. Böylelikle elektron, faz uzayında kesintisiz bir patika izleyebilmek yerine, en fazla bir küpten diğerine sıçrayabiliyordu. Hidrojen atomundaki elektronun 'yörünge'lerini oluşturan 'durağan' haller, faz uzayında bazı dağılımlara karşılık geliyor ve enerji düzeyleri arasındaki geçişlere karşılık gelen hareketler; aradaki noktalardan geçmeksizin, bir bölgeden diğerine sıçramayı, birinde kaybolup diğerinde belirmeyi gerektiriyordu. Bu tıpkı, tatile niyetlenen bir insanın kendisini, Ankara'daki evinden çıkar çıkmaz, Antalya'daki bir otelde bulmasına benzeyen esrarengiz bir durumdu. Heisenberg bu yaklaşım çerçevesinde, konum ve momentum gibi fiziksel değişkenlerin değerlerini nasıl hesaplayabileceğine baktı. Bohr'un öngörülerine uygun konum ve momentum değerlerini elde edebilmek için, birer işlem dizisi geliştirdi. Elektronun davranışını betimleyen bir mekanik anlatım ortaya çıkmıştı. Sonuçlarını, Temmuz 1925'te 'Kinematik ve Mekanik İlişkilerin Kuantum-mekaniksel Olarak Yeniden Yorumlanması' başlığıyla yayınladı (*Z. Phys.* vol. 33, p. 879-893.) Bohr'un 'yarı klasik' mekaniği sona ermişti. 'Kuantum mekaniği' doğdu.



Heisenberg'in aklında, klasik fiziksel herhangi bir resim yoktu. Sadece, Bohr modelinin öngördüğü sonuçları elde etmeyi hedeflemişti. Tıpkı Planck'ın, siyah cisim ışınmasının formülünü deney verilerine uygun hale koymak amacıyla, kuantum varsayımında bulunurken cesurca yaptığı gibi. Geliştirdiği işlemler, karmaşık ve biraz da gelişigüzel. O zamanlar matris cebri pek bilinmiyordu. Max Born ve Pascual Jordan, Heisenberg'in yaptıklarının aslında bu olduğuna işaret ettiler.

Sonra da Heisenberg'le birlikte, kuantum mekaniğinin matrislerle anlatımını geliştirdiler. Kuram, daha kolay anlaşılır, uygulanabilir ve anlatılabilir bir hale gelmişti. Bu anlatımda, elektronun durumu bir x vektörüyle betimleniyor, fiziksel değişkenlerin değerleriyse, ilgili matrisi sağdan ve soldan bu vektörün uygun şekilleriyle çarparak elde ediliyordu. Ancak, matris çarpımının değişme özelliği olmadığından, $AB \neq BA$ durumları mümkündü. Nitekim, örneğin konum ve momentum operatörleri A ve B ise, AB ve BA 'nın uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, birbirinden biraz farklıydı. Heisenberg bu matematiksel durum nedeniyle, elektronun konum ve momentum değerlerinin, aynı anda ve keskin bir duyarlılıkla ölçülemeyeceği kuşkusuna kapılmıştı. Olgunun asıl nedenini bir yıldan uzun bir süre sonra anlayacaktı. 1926 yılında, kuantum mekaniğinin matris kuramı yayınlandı. Wolfgang Pauli hemen ardından, bu kuramı kullanarak hidrojenin gözlemlenen spektrumunu hesapladı.

Bir vektör (x) bir matrisle (A) çarpıldığında (Ax), genelde hem yönü, hem de büyüklüğü değişir. Yön değişmemişse eğer, vektörün o matrisin bir 'özvektör'ü olduğu söylenir. Bu durumda, matrisle çarpım, özvektörün yalnızca büyüklüğünü değiştirir ve vektör bir skalarla çarpılmış olur ($Ax = \lambda x$). Söz konusu skalere, yani büyüklükteki değişme çarpanına 'özdeğer', söz konusu vektöre de; o matrisin, bu özdeğere ait 'özvektör'ü denir. Her durumda, matrisle çarpım, vektörlerin büyüklük veya yönlerinde kesikli sıçramalar gerçekleştirir. Yani, matris cebri işlemlerinin yol açtığı değişimler, örneğin bir duvara çarpıp seken bir parçacığın hızında veya momentumunda olduğu gibi, anidir. Gerçi matrislerle süreklilikleri de betimlemek mümkündür, fakat bu durumda, örneğin konum bağlı bir dağılımın gösterimi için sonsuz boyutlu vektörlerin kullanılması gerekir. Dolayısıyla matris cebrinin, maddenin parçacık davranışını betimlemek açısından daha yetkin olduğu söylenebilir. Ancak, maddenin bir de dalga davranışı vardı, uzay-zamanda kesintisiz gelişen. Elektronların bu davranış biçimini betimleyen bir denklem olmalıydı ve çözüm olarak, yörüngelerde durağan elektron dalgaları vermeliydi...

1926 yılında Erwin Schrödinger, De Broglie'nin varsayımından hareketle, elektronlar için; zamana göre birinci, uzay koordinatlarına göre ikinci dereceden diferansiyel bir 'dalga denklemi' türetti. Denklem hidrojen atomu için elde edilen zamandan bağımsız çözümleri, enerji 'özdeğer'lerini veriyor ve bu özdeğerlere ait çözümler, belli dalgaboylarına sahip durağan dalgalar niteliğindeki 'özfonksiyon'ları oluşturuyordu. Sistemin herhangi bir andaki durumunu, özfonksiyonların kat sayılarıyla çarpılıp toplanmasından oluşan doğrusal bir bileşimi temsil etmekteydi. Buna 'dalga fonksiyonu' dendi. (Bknz. Schrödinger Dalga Mekaniği.)

Schrödinger, elde ettiği çözümleri klasik olarak yorumlamaya çalışıyordu, dalga fonksiyonunu elektronun kütle ve yük dağılımıyla ilişkilendirdi. Halbuki Max Born, dalga fonksiyonunun mutlak değerinin karesinin, elektronun uzayın farklı bölgelerinde bulunma olasılığına karşılık geldiğini gösterdi. Bohr da bu görüşteydi ve 'Kopenhag Yorumu' böyle başladı. Einstein, kuantum mekaniğinin getirdiği başarılı açıklamaları etkileyici bulmakla birlikte, bu yoruma katılmıyordu. Born'a yazdığı bir mektubunda, "Tanrı doğayla zar oynamaz" görüşünü belirtti. Bohr'un buna yanıtı, "Tanrı'ya ne yapması gerektiğini söylemeye kalkışma Einstein" olacaktı.



Schrödinger denklemi, uygulaması kolay olduğundan yaygın kabul gördü. Dalga fonksiyonuna uygulanan ve 'dinamik operatör' adı verilen bazı işlem dizileri, sisteme ait fiziksel değişkenlerin değerlerini veriyordu. Sistem durağan durumlara karşılık gelen özfonksiyonlardan birindeyse eğer, elde edilen değer, o özfonksiyonun ait olduğu özdeğer oluyordu. Yok eğer sistem, özfonksiyonların bir bileşiminden oluşan karmaşık bir dalga fonksiyonunun betimlediği bir durumdaysa, operatörlerin uygulanması, ilgili fiziksel değişkenin 'beklenen değer'ini vermekteydi. Bu bir bakıma ortalama bir değeri. Dalga fonksiyonunun zamanla gelişimini, dalga denklemini yönetiyordu. Atomların ışınma spektrumundaki kesikli frekanslar, matris mekaniğindeki gibi 'kuantum sıçramaları'ndan değil, rezonans olayından kaynaklanmaktaydı. Schrödinger çok geçmeden, kendi yönteminin Heisenberg'in matris mekaniğine eşdeğer olduğunu göstermişti. Ama aslında, yaklaşım ve yorumları hayli farklıydı. Heisenberg hayalde canlandırma resimlerinden kaçınır ve kesikli geçişleri temel bir kavram olarak görürken, Schrödinger, kendi kuramının daha 'göz önünde canlandırılabilir' ('anschaulich') olduğunu savunuyordu. Ona göre bunun anlamı, kuramın gözlem verilerini, uzay ve zamanda nedensellik ilişkisiyle birbirine bağlı olarak gelişen süreçler kapsamında açıklıyor olmasıydı ve bu, kabul edilebilir her fizik kuramının sağlaması gereken bir koşuldü.

Heisenberg, Schrödinger'in dalga denklemine bakarak, konum ve momentum operatörleri A ve B için, $AB-BA$ 'nın değerinin, en az $\hbar/2$ olması gerektiğini hesaplamıştı. Bohr, enerji ve zaman değişkenleri için de benzeri



Solvay Konferansı, 1927. Öndekiler: Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles Guye, Charles Wilson, Owen Richardson. Ortadakiler: Peter Debye, Martin Knudsen, William Bragg, Hendrik Kramers, Paul Dirac, Arthur Holly Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr. Arkadakiler: Auguste Piccard, Emile Henriot, Paul Ehrenfest, Edouard Herzen, Theophile de Donder, Erwin Schrödinger, Emile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Fowler, Louis Brillouin.

bir durumun varlığını önerdi. Böyle, operatörlerinin değişme özelliği olmayan fiziksel değişken çiftlerine ‘eşlenik’ (‘conjugate’) değişkenler dendi. Heisenberg, daha sonra “Heisenberg’in belirsizlik ilkesi” adını alacak olan ve ‘kuantum belirlenemezliği’ dediği ilkeyi keşfetmişti. Einstein bu ilkeyi, insanın kuantum dünyasında olan biteni anlama yeteneğine gereğinden fazla kısıtlama getirdiği için reddetti.

1926 yılında ayrıca, hidrojen spektrumundaki ikili çizgilerin açıklaması geldi. Sorun, George Uhlenbeck ve Samuel Goudsmit’in, elektronun $\hbar/2$ büyüklüğünde bir eksenel açısal momentuma sahip olduğu yönündeki önerisiyle aşılmıştı. Gerçi bu, fiziksel anlamda gerçek bir dönme olamazdı. Çünkü, noktaya yakın bir parçacık olan elektronun, $\hbar/2$ gibi ‘boy’una göre büyük bir miktarda eksenel dönme momentumuna sahip olması için, ekvatoru üzerindeki noktaların ışık hızından hızlı hareket ediyor olması gerekiyordu. Ancak, 1927 yılında hidrojen atomlarıyla yapılan yeni bir Stern-Gerlach deneyi, yapılan öneriyi doğruladı. Sonuç olarak, elektronun o zamana kadar bilinmeyen bir fiziksel özelliğinin daha var olduğu ve kesikli değerler aldığı ortaya konmuştu. Yeni deyişkene ‘spin’ dendi. Bohr modelinin öngördüğü spektrum çizgilerinin ikişere ayrışması, atomdaki elektronun yörünge ve açısal momentumlarının ‘eşleşme’sinden (‘coupling’) kaynaklanıyordu. Model bu etkileşmeyi de hesaba katacak şekilde uyarlandı ve elektronun atomdaki durumunu belirleyen kuantum sayılarına (n,l,m) bir yenisini daha eklendi (s). Kronig’in bir yıl önce keşfettiği bu fikir, başkalarına mal olmuştu. Goudsmit’e yazan bir arkadaşı mektubunda, “İyi ki buluşunuzu yayınlamadan önce Pau-

li’ye göstermediniz” diyordu: “Çünkü anlaşılabilir, Tanrı’nın yanılmazlığı yeryüzündeki sözde vekilini kapsamıyor.”

Eğer hidrojen atomundaki elektronun davranışı, Schrödinger’in dalga denklemine bu denli uyuyorsa, elektron uygun deney ortamlarında dalga gibi davranmalıydı. Nitekim, 1927 yılında Clinton Davisson ve Lester Germer, elektronlarla yaptıkları kırınım deneyinde, elektronun dalga davranışı sergilediğini kanıtladılar. Hemen ardından şunlar soruldu: Peki, elektron bir dalga olarak seyahat ediyorsa, bu dalga elektronun kendisi midir, yoksa elektron bir parçacık olup, bu dalga tarafından mı yönetilmektedir? Bu ikinci durumda, acaba dalga içindeki konumu kesin olarak belirlenebilir mi? Heisenberg bu soruya, belirlenemezlik ilkesine dayanarak olumsuz yanıt verdi. Çünkü elektronun yörüngedeki konumunu belirleyebilmek için, üzerine kendisinden daha kısa dalgalı bir ışık fotoğrafı göndermek gerekiyordu. Küçük dalgalı bir yüksek enerji demeti ve izleyen Compton saçılması sırasında, elektronun momentumu değişirdi. Hal böyle olunca, bir elektronun konumunu ve momentumunu aynı anda ölçmek, dolayısıyla da bilmek imkansızdı. Bu erken aşamada durumu, daha sonra “Heisenberg’in Mikroskopi” olarak anılmaya başlanan fiziksel bir örnekle açıklamaya çalıştı. (Bknz. Heisenberg’in Mikroskopi.) Elektronları çekirdek etrafındaki belli yörüngelerde dolaşan parçacıklar gibi düşünmemek gerektiği sonucuna varmıştı. Kuantum mekaniğinde ‘ölçüm sorunu’ başladı.

Kuram pek çok sorunu açıklamış bulunmakla ve kanıtları her geçen gün artıyor olmakla beraber, Einstein, kuramın öngörülerinin olasılıklardan öteye geçemeyişini yadırgı-

yordu. Bu durumun, maddenin davranışıyla ilgili henüz bilinmeyen bazı ‘gizli değişkenler’in keşfiyle aşılabileceğini düşünüyor, belirsizlik ilkesine de karşı çıkıyordu. 1927 yılındaki Solvay Konferansı’nda, ilkenin eşlenik konum ve momentum bileşenlerine uygulamasını hedefleyen bir düşünce deneyini tartışmaya sundu. (Bknz. Girişim Deneyi.) Bohr bu tasarımdaki görünür ikilemi, ikna edici bir şekilde açıklamayı başardı. Halbuki bazı kuramcılar, kuantum mekaniğinin yorumuna yönelik tartışmaları yersiz bulmaktaydı. Örneğin Paul Dirac fizik modellerinin, küçük ölçekteki fiziği bizim için, günlük yaşamda karşılaştığımız nesnelere ilişkilerimiz çerçevesinde geliştirmiş olduğumuz ‘günlük dil’de anlayabileceğimiz hale koymak zorunda olmadığı görüyordu. İyi bir modelin yargıci, deneysel olarak sınamabilen fiziksel nicelikleri hesaplayabilmemiz açısından kullanışlılığı, bu yöndeki becerilerimize katkısıydı. Model başarılı olduğu sürece, ‘asgari’ (‘minimalist’) yorumla yetinip, çalışmaya devam etmek lazımdı. Bu yüzden, kuantum kavramları hakkında somut canlandırmalar talep edenlere, “kapa çeneni ve hesapla” diyordu. Kendi öyle yaptı...

1928 yılında Paul A.M. Dirac, elektron için görelilik kuramına uygun bir kuantum denklemi yazdı. Denklem dört çözümü vardı. İki, elektronun iki ayrı spin durumunu veriyordu. Spin açıklığa kavuşmuştu ve yörüngedeki üç kuantum sayısına dördüncüsü olarak eklendi. Çözümlerden diğer ikisi, garip bir şekilde, elektron için negatif enerjiye sahip sonsuz sayıda kuantum durumunun varlığını gösteriyordu. Bunlar adeta, ‘var olma düzlemi’nin altındaki ‘deşik’lerde yatan parçacıklardı. Dirac, ‘deşik kuramı’ olarak bilinen çarpıcı bir varsayımında bulunarak, artı

yüklü elektronlar gibi davranan parçacıkların varlığını önerdi. Önce bunların proton olduğunu sandı. Halbuki, elektronun kütlesine sahiptiler. 1932 yılında 'pozitron' keşfedildi. Kendisine, neden 'artı yüklü elektron' öngörüsünde bulunmadığı sorulduğunda, verdiği yanıt, "sırf korkaklık!" olmuştur. Yine de 1933 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Çünkü denklemleriyle, elektronun manyetik momenti isabetle hesaplanmış, atomların ışına spektrumlarındaki ince yapının çoğu açıklanmıştı. Pozitron, karşıt parçacıkların ilk örneğiydi ve ilk defa, bir denklemin çözümü, daha önce bilinmeyen bir parçacığın varlığını öngörmüştü. Max Born'un tepkisi, 'bildiğimiz şekliyle fizik, altı ayda sona erecek' şeklinde oldu. Elektronun kuantum resmi tamamı. Dirac ayrıca, manyetik monopollerin varlığını, yükün kuantumlaşması sonucuna yol açacağını gösterdi. Aynı yıl; Werner Heisenberg, Hermann Weyl ve Eugene Wigner, kuantum mekaniğindeki simetri gruplarını incelemeye başlamıştı.

Fizikçi arkadaşımız Sadi Turgut, bundan sonra ortaya çıkan; dolanıklık olgusu, EPR (Einstein-Podolski-Rosen, 1935) ikilemi, Bell Teoremi Schrödinger'in Kedisine gibi konuları, 2003 Nisan ve Mayıs sayılarımızda ayrıntılı olarak incelemiştir. Bugün, çağdaş teknolojinin önemli bir kısmı, kuantum etkilerinin belirgin olduğu küçük ölçeklerde çalışıyor. Örnekleri arasında; lazer, transistör, elektron mikroskopu, manyetik rezonansla görüntüleme sayılabilir. Kuantum şifreleme piyasada, bilgisayarlarından sözediliyor. Kuantumun serüveni devam ediyor.

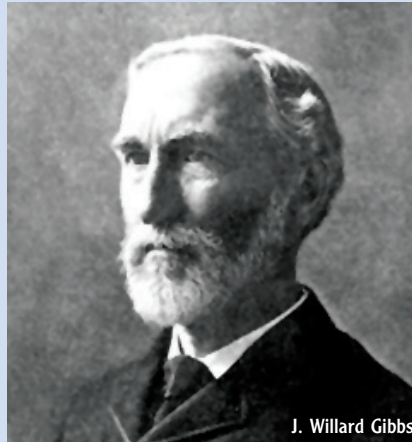
Bu kısa tarihçeyi, arkadaşlarımızın Bohr'la ilgili bir anısıyla kesmek uygun olabilir. Kuantum mekaniğinin düşünsel temellerinin uzun süren sohbetlerde atıldığı sıralarda bir grup arkadaş, Bohr'la görüşmek üzere Kopenhag'daki evinde ziyaretine gider. Kapıyı çalarken yan tarafında, tavşan ayağı gibisinden, halk arasında uğur getirdiğine inanılan bir nesnenin aslı olduğunu görüp şaşırırlar. Bohr kapıyı açtığında içlerinden biri hayretle, "sen buna inanıyor musun?" diye sorar. Bohr, "tabii ki hayır" der. Sonra da ilave eder: "Ama duyduğuma göre, inanmayanlara da uğur getiriyormuş..."

Bu dahi belki de, nükte yapmanın yanında; arkadaşlarına kendisini bir kuantum sistemi olarak, bir batıl ile dolanıklık halindeymiş gibi sunarak, geliştirmekte olduğu kuantum kavramlarından birine örnek vermek istemiştir.

Gibbs İkilemi

Klasik mekaniğin karşılaştığı ilk sorunlardan birisi, J. Willard Gibbs'in istatistik mekanik yöntemlerini kullanarak; örneğin V hacmine dağılmış, iç enerjisi U olan, termodinamik dengeye ulaşmış ve dolayısıyla Boltzmann dağılımına sahip bulunan, çok sayıda ki aynı tür atom veya molekülden oluşan bir 'ideal gaz' sisteminin entropisi için türetmiş olduğu ifadeyle ilgiliydi. Soruna işaret etmeden önce, 'yoğun' ('intensive') ve 'yaygın' ('extensive') değişkenlerinin tanımını yapmak ge-

reliyor. Herhangi bir sistem için; sistemin büyüklüğünden bağımsız olan değişkenlerin 'yoğun', büyüklüğüne bağlı olanların 'yaygın' olduğu söylenir. Örneğin kütle yaygın bir değişkendir. Çünkü, kütlesi M olan iki sistemi yan yana getirip bitiştiirdiğimizde, sonuç sistemin kütlesi 2M olur. Halbuki, sıcaklık 'yoğun' bir değişkendir. Çünkü, sıcaklığı T olan iki sistemi yan yana getirip bitiştiirdiğimizde, sonuç sistemin sıcaklığı hâlâ aynı ve T'dir. Kütlele yoğunluk da keza, yoğun bir değişkendir. Halbuki entropinin yaygın bir değişken olması gerekir. Dolayısıyla; V hacmini kaplayan, iç enerjisi U olan, aynı türden N parçacıklı bir sistem için Gibbs'in sözkonusu ifadesi kullanılarak hesaplanan entropi S ise, böyle iki ayrı sistemin yan yana getirilmesiyle elde edilen daha büyük sistemin toplam entropisi 2S olmalıdır. Sistemler birbirinin aynı olduğundan, aralarındaki duvar kaldırıldığında, toplam entropinin değişmemesi gerekir. Halbuki, elde edilen 2V hacmindeki 2N parçacıklı sistemin entropisi, yine Gibbs'in ifadesi kullanılarak hesaplandığında, bulunan sonuç 2S'den daha büyük bir değer vermekte ve bu durum, entropinin yaygın bir parametre olması gereğiyle çelişmekteydi. İkilemin ortadan



J. Willard Gibbs

kalkması için, sistemi oluşturan parçacıkların birbirlerinden ayırilemez olduğunun varsayılması gerekti. Örneğin, yalnızca iki parçacıklı bir sistem düşünelim, ve birinci parçacığı A, ikinci parçacığı B ile gösterelim. Parçacıkların ilgilendiğimiz fiziksel özelliği, ya da onları ayırilemek açısından kullandığımız değişken, örneğin momentum p olsun. Birinci parçacığın (A) momentumunun p_1 , ikinci parçacığın (B) momentumunun p_2 olduğu durumu AB, ikinci parçacığın (B) momentumunun p_1 , birinci parçacığın (A) momentumunun p_2 olduğu durumu da BA ile gösterelim: Bu iki durum birbirinden ayırilemezdir. Yani, p_1 ve p_2 momentumlarına sahip olduğunu bildiğimiz bu iki parçacıktan, hangisinin p_1 , hangisinin p_2 momentumuna sahip olduğunu söylemek mümkün değildir. Ortada aynı türden iki parçacık bulunduğu ve bu parçacıkların sahip olabildiği fiziksel özelliklerden birisi için iki değer sözkonusu olduğunda, değerlerden hangisinin hangi parçacığa ait olduğunun belirlenemez olduğunu söyleyen bu durum, makroskopik dünyadan tanışık olduğumuz önemli bir kavramdı. Çünkü, makroskopik dünyadaki, örneğin taşlar gibi büyüköl-

çekli parçacıklar, şöyle veya böyle birbirlerinden ayırilebilirken, mikroskopik dünyadaki parçacıklar, atom ve moleküller, birbirlerinin tıpatıp aynı olabiliyordu. Örneğin, aynı enerji durumundaki iki hidrojen atomuna bakıp da, "bu biri, bu da diğeri", "bu Ali", "bu Ayşe" diyerek etiketleyebilmek, birbirlerinden ayırilemek mümkün değildi. Hal böyle olunca, parçacıkların aralarındaki yer değiştirmeler, sistemin durumunu etkileyemezdi. Gibbs'in türettiği entropi ifadesi, bu varsayım-dan hareketle, parçacıkların yer değiştirme sayısına ('permutasyon') bölünüp düzeltilerek 'Sackour-Tetrode denklemi' elde edildi. Öte yandan, aynı türden parçacıkların ayırilebilmeleri halinde, çok parçacıklı herhangi bir sistemde, parçacıkların aralarında yer değiştirmesi ('permütasyon') sistem için farklı durumlara karşılık geliyor ve sonuç olarak, sistem entropisi daima sıfırdan büyük oluyordu. Ayırilemezlik ilkesi, bu, 'entropinin sıfır noktasının olmayışı' sorununu da halletmişti.

Morötesi Çöküş

'Morötesi çöküş' ikilemi, klasik fiziğin, T sıcaklığında ısı dengeye ulaşmış olan ideal bir siyah cismin sonsuz güçte ışımada bulunacağını öngörüyor olmasından kaynaklanıyordu. Nedeni şu: T sıcaklığında ısı dengede bulunan herhangi bir cisim, çok değişik frekanslarda fotonlar ışımakta, bir yandan da soğurmaktadır. Böyle bir cismin içindeki üç boyutlu bir kovukta, çok çeşitli frekanslardan elektromanyetik 'durağan dalgalar', yani bir ışın spektrumu oluşur. (Bknz. Siyah Cisim Işınması.) 'Siyah cisim ışınması' denilen bu spektrumun farklı frekanslarındaki ışınlar; kovuğun iç yüzeyindeki nokta çiftleri arasında uzanan doğru parçaları üzerine yarım dalga boyunun tamsayı katlarının sığdırılabildiği farklı 'modlar' halinde ve ilgili doğru parçasına dik yönde salınan harmonik salınma çarları gibidir. Klasik elektromanyetik kurama göre, herhangi bir birim frekans aralığındaki böyle salınma çarlarının sayısı, frekansın karesiyle artmaktadır. Öte yandan, klasik istatistik mekaniğin 'eşpaylaşım' ('equipartition') kuramı, T sıcaklığında ısı dengedeki bir sistemin sahip olduğu her hareket serbestliği derecesinin, ortalama $kT/2$ enerjiye sahip olmasını öngörür. Dolayısıyla, siyah cisim ışınmasındaki 'salınım modlarından herbirinin payına düşen enerji $kT/2$ kadardır. Hal böyle olunca, birim frekans aralığında ışınan enerji miktarı da keza, frekansın karesiyle artmak zorundadır. 1905 yılında türetilen ve Rayleigh-Jeans yasası olarak bilinen bu sonuç, dalga boyu cinsinden, $f(\lambda)=8\pi kT/\lambda^4$ ifadesiyle verilmekte ve buna göre, herhangi bir frekans için ışınan güç, frekans arttıkça sonsuza gitmekteydi. Bu, ışınan toplam enerjinin de sonsuza doğru gitmesini, yani cismin morötesi bölgede sonsuz enerji ışınarak 'çökme'sini gerektirir. Halbuki gözlenen durum bu olmadığına göre, klasik mekaniğin bir sorunu vardı. Bu ikilem aslında, Planck 1900 yılında siyah cisim ışınmasını enerjinin kuantumlar halinde ışındığı varsayımıyla ele alarak çözdüğünde ortadan

kalkmıştı. Çünkü Planck'ın elde ettiği ifade, düşük frekanslarda Rayleigh-Jeans yasasıyla uyusurken, yüksek frekanslarda sifira gidiyordu. Ancak, Planck türettiği ifadenin bu yönüyle ilgilenmemişti. Çünkü, eşpaylaşım teoreminin temel bir teorem olduğunu düşünmüyordu. İkilemin kuantum varsayımıyla çözülmüş olduğuna, Einstein, Rayleigh ve Jeans 1905 yılında işaret ettiler.

Fotoelektrik Olay

Fotoelektrik olayda, bazı metallerin yüzeyine ışık tutulması, metalin bağlandığı bir devrede akım üretir. Fakat bu, herhangi bir frekanstaki ışıkla değil de, belli bir metal için belli frekanslardaki ışıkla mümkündür. Örneğin, düşük frekanslı kırmızı ışık akım üretilmezken, daha yüksek frekanslı mavi ışık üretilir. Öte yandan, akıma yol açabilen frekanstaki ışığın şiddeti artırdığımda, akım büyür. Akım bir gerilimin sonucu olduğuna göre, bu durumda; metalin üzerine düşen ışınların frekansı gerilimin oluşup oluşmayacağını, şiddeti ise gerilimin oluşması halindeki akımın büyüklüğünü belirlemektedir. Bunu klasik mekanikle açıklamak mümkün değildir. Çünkü, Young'ın çift yarık girişim deneyinden sonra, ışığın dalga olduğu kanaati hakim olmuştu. Halbuki klasik dalgaların, örneğin su ve ses dalgalarının taşıdığı enerji miktarını, frekans değil genlik belirler. Genlik ise şiddetin ölçüsüdür. Işık da bu klasik dalgalar gibi olsaydı eğer; örneğin belli bir şiddetteki kırmızı ışık elimizdeki bir metalin üzerine düşürüldüğünde akım üretmiyorsa dahi, şiddetin yeterince artırılması halinde, enerjisinin artması gerekeceğinden, üretilmesi gerekirdi. Halbuki yapılan deneylerde bu gözlenemedi. Çok zayıf bir mavi ışık akım üretilirken, kırmızı ışık kullanıldığında şiddeti ne kadar arttırılırsa arttırılsın, akım üretmiyordu. Einstein 1905 yılında yayımladığı, fotoelektrik olayıyla ilgili makalesinde; Planck'ın siyah cisim ışımasını açıklarken yaptığı; ışığın enerjileri paketler halinde taşıdığı ve her bir paketin taşıdığı enerjinin büyüklüğünün, u frekanslı ışık için hu kadar olduğu varsayımını kullandı. Gerçi, ışık dalgalarının elektronlarla enerji alışverişinin paketler halinde gerçekleşmesi, klasik fiziğe aykırı bir kavramdı. Fakat bu aykırılık sayesinde, klasik mekanığın bir ikilemi daha çözülmüştü. Işığın taşıdığı enerji paketlerine foton denmeye başlandı.

Einstein aynı yıl 'Özel Görelilik Kuramı'nı yayımlayarak, enerji ve kütlenin eşdeğerliğini ortaya koydu. 20. yüzyıl fiziğindeki devrim yaratan bu çalışmasını yalnızca, fizik yasalarının ve ışığın hızının tüm başvuru sistemlerinde aynı olması gerektiği şeklindeki iki varsayımdan hareketle geliştirmişti. Sonuç, klasik fizik kavramlarının kuantum varsayımından sonra aldığı, bir başka yöndeki ağır bir darbe oldu. Çünkü klasik fizikte, örneğin bir parçacığın en önemli fiziksel özelliği uzaysal konumuydu. Parçacığın hareketi, zamana göre konumundan oluşan patikasıyla belirleniyordu. Bu patika hesaplandığında, hareketin tüm diğer

özelliklerini, zamanın her anı için, bu patikadan hesaplamak mümkündü. Newton bu yüzden, uzay ve zamanı "Tanrı'nın duyu organları" olarak nitelendirmişti. Buradaki uzay, iki noktası arasındaki uzaklık, tüm başvuru sistemlerinde aynı olan bir Öklid uzayıydı. Zaman ise, tüm başvuru sistemlerinde tek yönlü olarak sabit hızla 'akıp' giden, hepsinde aynı olan, hepsinin ortaklaşa kullanılabileceği bir değişken, 'mutlak zaman'dı. Halbuki özel görelilik kuramına göre zaman, bağımsız ve mutlak bir değişken olmaktan çıkmıştı. Çünkü, herhangi bir olayın yer aldığı konumun ve zamanın her ikisi de artık, bir başvuru sisteminden diğerine geçişte değişiyordu. Zaman dördüncü boyut haline gelmiş ve uzayla bütünleşerek, 'uzay-zaman'a vücut vermişti. Gerçi bu uzay-zaman hala bir Öklid uzayıydı ve bir parçacığın hareketi bu uzay-zamanda, bir patika olarak betimlenebiliyordu. Fakat, 'aynı anda'lık anlamındaki 'eşzamanlılık' ortadan kalkmıştı. Olayların zaman sıralaması, başvuru sistemine göre değişebiliyordu. Nedenlilik ilkesi hala korunmakla beraber... 1916 yılında genel görelilik kuramı yayınlandığında, uzay-zaman bir Öklid uzayı olmaktan da çıktı.

Radyoaktivite



Klasik fiziğin bir diğer sorunu, 1895 yılında Henry Becquerel'in, uranyumun gama ışınları bozunduğunu keşfiyle başladı. 1898 yılında Marie ve Pierre Curie, uranyum ve toryumla çalışmaları sırasında rastladıkları kendiliğinden bozunma süreçlerine 'ışınletkinlik' ('radyoaktivite') adını verdiler. 1900 yılına gelindiğinde, İngiliz radyokimyacı Frederick Soddy, bazı ışınetkin elementlerin kendiliğinden bozunarak; ya aynı elementin 'izotop' adını verdiği başka türlerine veya tümüyle yeni elementlere dönüştüğünü saptadı. Yarı ömrü keşfetmişti. Bu olgu, klasik fizik tarafından açıklanamıyordu. Çünkü klasik fiziğe göre, bir sistem eğer kararsızsa hemen bozunmalı, kararlıysa da kararlılığını, ta ki bu durum bir dış etken tarafından bozulana kadar koruma-

lıydı. Örneğin tersine çevrilmiş bir kasenin sırtına konan bir bilyanın, kararsızsa hemen yuvarlanması, yok eğer 'orta kararlı ise de, 'bıçak sırtı'ndaki bu dengeğin en azından ufak bir esinti gibi bir dış etken tarafından bozulmasına kadar kasenin sırtında kalması gereğinde olduğu gibi. Halbuki ışınetkinlik olayında; malzemeyi oluşturan yapıtaşlarının hepsi benzer olmalarına karşın, bazıları varlıklarını sürdürmeye devam ederken, bazıları durup dururken bozunuyor.

Siyah Cisim Işıması

Elimizde kapalı bir tüp ya da odacık bulunduğunu ve içinin yarıya kadar suyla dolu olduğunu düşünelim. Oda sıcaklığı sabit olup suyun, odanın iç basıncındaki kaynama noktasının altında olsun. Bu durumda; suyun üzerinde bazı buhar molekülleri dolaşacak ve odanın içerisinde, suyla buhar fazları bir arada bulunacaktır. Ancak bu statik bir durum değildir ve iki faz, aralarındaki yüzey üzerinden birbirleriyle alışveriş halindedir. Şöyle ki; buhar fazındaki moleküllerden bazıları, su yüzeyine çarpıp yapışarak sıvılaşmakta; su yüzeyindeki moleküllerden bazıları da, raslantı sonucu yeterli miktarda enerji kazanıp fırlayarak buharlaşmaktadır. Yeterince uzun süre beklenmişse eğer, arayüzeydeki sıvılaşma ve arayüzeyden buharlaşma süreçleri, birbirini dengeler hale gelir. Yani birim zamanda arayüzeye yapışan buhar molekül sayısı, arayüzeyden ayrılan sıvı molekül sayısı, yaklaşık olarak eşitlenmiştir. Odanın içindeki sıvıyla buharın, 'termodinamik denge'ye ulaştıkları söylenir.

Şimdi de biraz farklı bir durum düşünelim ve bu sefer elimizde herhangi bir malzemeden yapılmış bir topak olsun. Topağın ortasında küçük bir kovuk, yani yine minik bir odacık var diyelim içi boş. Ve biz topağın sıcaklığını, sabit bir T değerinde tutuyor olalım. Bildiğimiz gibi, topak malzemesini oluşturan atomların; farklı enerji düzeylerine karşılık gelen, çok sayıda farklı kuantum durumları var. Bu olası kuantum durumlarından herhangi ikisini, diyelim $E_2 > E_1$ enerji düzeylerine karşılık gelenlerini ele alacak olursak; her an için atomlardan bazıları E_1 , diğer bazıları da E_2 düzeyinde bulunuyor olacaktır. Ancak bu statik bir durum olmayıp, iki düzey arasında gidiş gelişler yer almaktadır. Yani bazı atomlar E_2 düzeyinde, yani 'uyarılmış' halde iken, $\Delta E = E_2 - E_1$ kadar enerjiye sahip bir foton ışımlayarak enerji kaybediyor, bazıları da tam tersine; başlangıçta E_1 düzeyinde iken, aynı ΔE miktarı kadar enerjiye sahip bir foton soğurup uyarılıyor olur. Yeterince uzun süre beklenmişse eğer, bu iki enerji düzeyi arasındaki gidiş gelişler, birbirini dengeler hale gelir. Yani birim zamanda; ΔE enerjili bir foton ışıyarak E_2 'den E_1 'e geçen atomların sayısıyla, yine ΔE enerjili bir foton soğurarak E_1 'den E_2 'ye geçen atomların sayısı, yaklaşık eşitlenir. Bu eşitlik, aralarında geçişin mümkün olduğu kuantum durumu çiftlerinin, her

birisi için ayrı ayrı geçerlidir. Buna 'ayrıntılı denge ilkesi' deniyor. Bu ilke de keza, bir termodinamik dengeyi betimlemekte, ancak bu termodinamik denge, suyla buhar örneğine oranla çok daha ayrıntılı bir biçimde betimlenmektedir. Sonuç olarak topak malzemesinin içinde; çok çeşitli frekanslara sahip fotonlar, değişik sayılarla uçuşup durmakta ve bazıları atomlar tarafından soğurulup ortamdan kaybolurken, yeni ışınlanan bazıları ortaya çıkmaktadır. Ortada bir boşluk vardı, o niyeydi?...

Malzemenin içindeki bu dinamizm devam ederken fotonlardan bazıları değişik yönlerden gelip boşluğa girecek ve bir olasılıkla yollarına devam edip, boşluğun diğer ucunda tekrar malzemeye ulaştıktan sonra, soğurulacak veya yansıtılarak malzeme ortamında dolaşmayı sürdüreceklidir. Bu durumda tabii, boşluğun içerisinde de her an için; değişik frekanslardan, farklı sayılarda foton bulunur. Ama, fotonlar hareket halinde olduklarına göre, öyle boşlukta asılıymış gibi nasıl durur?...

Zıt yönlerde hareket eden eşit frekanslı iki dalganın toplamı, durağan bir dalga oluşturur ve söz konusu boşlukta böyle, değişik frekanslardan, çok ve farklı sayılarda durağan dalga vardır. Boşluğa çok çeşitli açılarla gerilmiş, hayali çamaşır iplerinde asılı durmakta gibidirler. Gerçi fotonları, duvar malzemesini oluşturan atomlar ısıtmakta, fakat bunlardan hangilerinin durağan dalga oluşturabileceğine, boşluğun boyutları karar vermektedir. Şöyle ki; herhangi bir doğrultuda hareket etmekte olan bir dalganın, zıt yöndeki eşiyile bir araya geldiğinde durağan dalga oluşturabilmesi için, o dalganın yarı boyunun tamsayı bir katının, boşluğun o doğrultudaki boyutuna, yani o doğrultuda gerilmiş hayali bir ipin uzunluğuna eşit olması gerekir. Çünkü ancak bu durumda, dalganın genliği; malzemenin bitip de boşluğun başladığı ve boşluğun bitip de malzemenin başladığı yüzey noktalarında, yani ipin iki ucunda sıfır değerini alabilecek ve böylelikle sınır koşullarını sağlayabilecektir. Kısacası bu boşluğa, hangi doğrultuda olursa olsun, yarım dalgaboyunun tamsayı katlarının tam sığıyor olması gerekir. Tabii, belli bir doğrultuda durağan dalga oluşturmayı mümkün kılan pek çok frekans bulunduğu gibi; aynı doğrultuda aynı frekansa sahip, birden fazla ve hatta pek çok sayıda durağan dalga da oluşmuş olabilir. Bu sonuncusu; fotonların bozon olup, aynı kuantum durumunu paylaşabilmeleri nedeniyle ve sayesinde mümkündür. Hatta bu paylaşımın, bozonlarca tercih edildiği dahi söylenebilir. (lazer, lazer)

Dolayısıyla, tekrarlamak pahasına; hangi frekanslardaki fotonların boşlukta durağan dalga oluşturabileceğine, boşluğun geometrisi karar verir. Ancak, makro ölçekteki bir boşluk bu açıdan pek seçici değildir. Çünkü minik bir boşluğun boyutları dahi, sözkonusu dalgaların boylarından o denli büyüktür ki; sonuç olarak, durağan dalga oluşturabilecek farklı frekansların bolluğu açısından sorun yaşanmaz. Hem de, belli bir boyutun ötesindeki boşluklar için, izin verilen frekanslar kü-

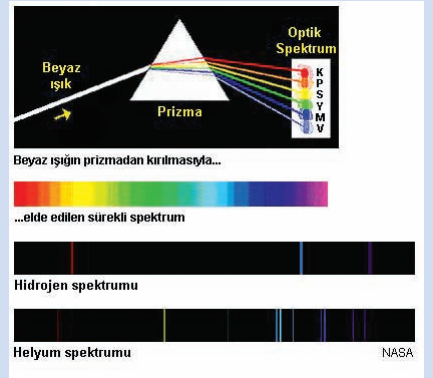
mesi aynışmaya başlar. Yani, toplu iğne başı büyüklüğünden tutun da, evrenin tamamını kapsayanına kadar, boşlukların hepsinde, izin verilen frekanslar kümesi, hemen hemen aynıdır. Peki, frekans kümeleri aynı da; her bir frekansdaki foton sayıları?... Bu sayıların belirleyicisi, fotonları ışışyan atomlar olduğuna ve onların ışışma spektrumu da sıcaklığa bağlı olduğuna göre; aynı T sıcaklığındaki tüm malzemeler, aynı frekans dağılımını verir. E, o aynı, bu aynı farklı olan ne kaldı?...

Böyle; T sıcaklığında termodinamik dengeye ulaşmış bulunan bir malzemenin içindeki boşlukta asılı olan durağan dalgaların; frekansları ve her bir frekansdaki foton sayıları, yalnızca T'ye bağlı olup, duvar malzemesinin cinsinden ve boşluğun geometrisinden bağımsızdır. Bu; frekansa bağlı foton sayısı dağılımına 'siyah cisim spektrumu' denir. 'Siyah'ın nedeni şu: Bu kovuğun duvarlarının iç yüzeyi, mükemmel bir soğurucudur. Çünkü, üzerine düşen bütün ışınları soğurmaktadır ve buna görülebilir ışışın frekansları da, tabii ki dahil olduğundan, yüzey mükemmel bir siyahlıkta olur. Öte yandan, mükemmel bir soğurucu, aynı zamanda mükemmel bir ışışıcıdır da. Ya da başka türlü ve daha genel bir ifadeyle, herhangi bir malzemenin yüzeyi; ne kadar soğurgansa, o kadar ışışıcı veya ışışıcı olduğu kadar soğurgandır. Öyle olmak zorundadır. Çünkü, eğer bir yüzey ışışıcı olmaktan ziyade soğurucu ise, olabilsydi; vakum içine konup geniş spektrumlu bir ışışmaya tabi tutulup beklendiğinde, net olarak sürekli enerji soğurur ve altındaki malzeme devamlı ısınır, sonunda patlardı. Tersi durumda ise; alttaki malzeme sürekli ısı kaybedip, 0 K'e kadar gider. Bu mümkün değil.

Bu haliyle kapalı bir kutuya benzeyen bir siyah cismin ışışma spektrumunu incelemek için, topağın dışından kovuğa doğru çok ince bir delik açılabilir. Yeterince büyük bir kovuksa eğer, örneğin toplu iğne ucuyula. Ve o ince delikten sızan ışışık, bir prizmadan geçirilip, tayfına ayrılabilir. Tabii; elde edilen frekansların spektrumu ve ışışığın bu frekanslar üzerine yayılmış olan şiddetleri, mükemmel bir siyah cisiminkinden biraz farklılaşmış; çünkü duvarındaki delik nedeniyle 'ışışın kaynağı,' siyah cisim olmaktan, az biraz uzaklaşmıştır. Fakat, gerçek hayat uygulamalarında zaten mükemmel diye bir şey yoktur. Dolayısıyla, bu topağı ortasından keserek, bir kavun gibi ikiye ayırıp, kovuğun açığa çıkan iç kısmının veya hatta topağın arkasının ışışmasına bile bakılabilir. Siyah cisim yüzeyinin soğurganlığı 1 olarak alınır ve diğer yüzeylerinki, siyah cisim yüzeyine oranla değerlendirildiğinden, 0 ile 1 arasında değerler alır. Herhangi bir yüzeyin soğurganlığı ('absorbtivity'), ışışıcılığına ('emissivity') eşittir. Bu eşitlik, bulucusunun adıyla, Kirchoff kanunu olarak bilinir ve soğurganlığı 0.99-1.00 arasında olan yüzeylerin hepsi, siyah cisim yüzeyi kabul edilir. Dolayısıyla, siyah cisim ışışması yaklaşık olarak; duvarında ince delikli minik kovuklar bir yana, bir malzemenin dış yüzeyinin ışışmasıyla dahi incelenebilir. Ancak bu durumda tabii, cismin; yüzeyinden ışışmayla kay-

betmekte olduğu enerjinin, bir yandan sürekli ısıtılması suretiyle telafi edilmesi gerekir.

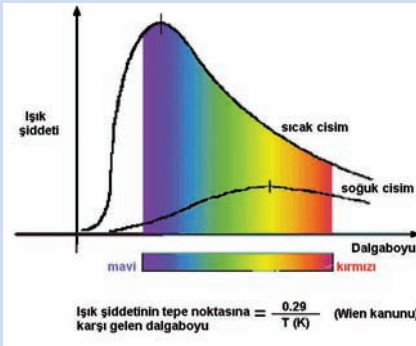
1800 yılında İngiliz astronomu William Herschel, siyaha boyalı bir termometreyi, güneş ışınlarını prizmadan geçirerek elde ettiği tayf üzerinde gezdirdi. Termometredeki ısınma, görülebilir ışışın sınırını oluşturan kırmızıya doğru ilerledikçe artıyordu. Bu beklemediği durum karşısında şaşırılmıştı. Termometreyi kırmızının da ötesindeki karanlık bölgeye götürdüğünde, sıcaklık artmaya devam etmişti. Hatta en yüksek sıcaklık, kırmızının bir hayli ötesinde, 'kırmızı altı' denilen bölgedeydi. Demek ki güneş, en yoğun ışışmasını kırmızı altı bölgede yapıyordu. Işıma şiddetinin maksimum değere ulaştığı dalgaboyunu 0.85 mikron olarak belirledi. 'Siyah cisim ışışması problemi', bunun neden böyle olduğu sorusuyla doğdu.



Sıcak cisimlerin yüzeylerinden kaynaklanan ışışmanın toplam enerji yoğunluğu, 1879 yılında Josef Stefan tarafından yapılan deneyel çalışmalarda, sıcaklığa bağlı olarak incelenmiş ve sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle doğru orantılı olduğu gösterilmişti (σT^4). 1884 yılında Ludwig Boltzmann'ın kuramsal türetimini yaptığı bu ilişkiye, Stefan-Boltzmann Yasası dendi. Sıra, ışışma enerjisi şiddetinin frekansa göre dağılımının belirlenmesine gelmişti. 1893 yılında Wilhelm Wien, bu dağılımın zirve değerine karşılık gelen dalgaboyunun, sadece sıcaklığa bağlı olduğunu gösterdi ve kendi adıyla bilinen, $\lambda_m T = 0.2898 \text{ cm-K}$ şeklindeki Wien Yasası'nı türetti. Bu arada, dağılımın kendisi için de klasik kuramsal türetimler yapıldı.

Bu türetimlere göre; T sıcaklığında ısı dengede bulunan herhangi bir cisim, çok değişik frekanslarda fotonlar ışışmakta, bir yandan da soğurmaktadır. Böyle bir cismin içindeki üç boyutlu bir kovukta, çok çeşitli frekanslardan elektromanyetik 'durağan dalgalar', yani bir ışışma spektrumu oluşur. 'Siyah cisim ışışması'nı oluşturan bu spektrumun farklı frekanslarındaki ışımlar; kovuğun iç yüzeyindeki nokta çiftleri birbirine bağlayan doğru parçaları üzerine yarım dalgaboyunun tamsayı katlarının sığıdığı farklı 'modlar' halinde, bu doğru parçalarına dik yönlerde salınan harmonik salınmaçlar gibidir ve klasik elektromanyetik kurama göre, herhangi bir birim frekans aralığındaki böyle salınmaçların sayısı, frekansın karesiyle artar. Öte yandan, klasik istatistik mekaniğin 'eşpaylaşım' ('equ-

ipartition') teoremi, T sıcaklığında ısı dengedeki bir sistemin sahip olduğu her hareket serbestliği derecesinin, ortalama $kT/2$ enerjiye sahip olmasını öngörür. Dolayısıyla, siyah cisim ışımasındaki 'salınım modları'ndan herbirinin payına düşen enerji $kT/2$ kadardır. Hal böyle olunca, birim frekans aralığında ışınan enerji miktarı da keza, frekansın karesiyle artmaktadır. 1905 yılında türetilen ve Rayleigh-Jeans yasası olarak bilinen bu sonuç, dalgaboyu cinsinden, $f(\lambda)=8\pi kT/\lambda^4$ ifadesiyle verilmekteydi. Buna göre, herhangi bir frekans için ışınan güç, frekans arttıkça sonsuza gitmektedir. Bu, ısıyan toplam enerjinin de sonsuza doğru gitmesini, yani cismin morötesi bölgede sonsuz enerji ışıyarak 'çökme'sini gerektirir. Bu sonuç, bir fırının içindeki ışıma enerjisinin en yoğun olarak, yüksek frekanslı x-ışını bölgesinde gerçekleşeceği anlamına geliyor ve kapağının açılması halinde, yüzümüzün anında kavrulmasını gerektiriyordu. Halbuki gözlenen durum böyle değildi. Deneysel gözlemlerle kuramsal türetim arasında böyle bir uyumsuzluk, cisimlerin ısı kapasitelerinin hesabında da vardı. İlgili ifadelerin türetilmesinde kullanılan klasik fizik varsayımlarında bir sorun olmalıydı.



Rayleigh-Jeans ifadesinin türetiminden sonra, sunduğu ikilemin aslında, Max Planck tarafından 1900 yılında çözülmüş olduğu fark edildi. Planck, siyah cisim ışımasını farklı bir şekilde ele almıştı. Önce eldeki deneysel verilere uyan bir fonksiyon belirleyip, sonra da bu formülün nereden gelmiş olabileceğini veya nasıl türetilebileceğini anlamaya çalıştı. Bu doğru ifadeyi elde edebilmek için, klasik fizik yasalarının atom ölçeğinde geçerli olmayabileceği düşüncesiyle, alışılmadık bir varsayım da bulunması gerekmişti. Varsayım şuydu: Frekans ν olan bir salıngacın ortalama enerjisi $h\nu$ olmak zorundaydı ve salıngaç en az, $h\nu$ kadar enerji ışıyabiliyor veya soğurabiliyordu. Kendi adıyla anılan h sabitini, deneysel verilerden hareketle hesapladı. Sonuç olarak; ışınan fotonların frekansa bağlı sayısal yoğunluğunun dağılımını

$$N(\nu, T) = 8\pi\nu^2/c^2 [\exp(h\nu/kT) - 1]$$

(ν =frekans, h =Planck sabiti, k =Boltzmann sabiti, T = sıcaklık K)

olarak türetmişti. Gerçi Planck o zaman farkında değildi, ama bu, türetilmiş olan ilk kuantum mekaniksel ifadeydi. Planck'ın bu türetim sırasında yaptığı, maddenin enerji paketçikleri halinde ışıdığı şeklindeki varsayım, gerçeği tam olarak yansıtmamakla birlikte, kuantum mekaniğinin doğumunu zorladı. Fo-

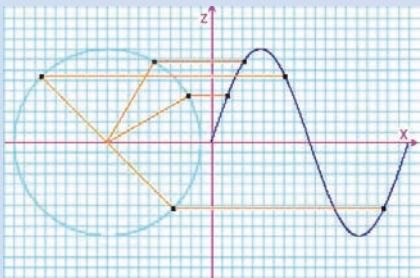
tonların kuantum enerji paketçikleri taşıdığı şeklindeki doğru olan varsayımı, Albert Einstein 1905 yılında yayınladığı, fotoelektrik olayını inceleyen çalışmasında yapmış ve siyah cisim ışımasını da, tümüyle açıklığa kavuşturmuştu.

Yukarıdaki ifade, foton enerjisi $h\nu$ ile çarpılırsa, frekansa göre enerji dağılımı elde edilir ve sonuç, frekans yerine dalgaboyu cinsinden

$E(\lambda, T) = 2\pi hc^2 / \lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]$ şeklinde yazılabilir. Burada $E(\lambda, T)$; birim alan ve birim dalgaboyu başına ışınan enerji miktarı olup, birimi $W/m^2/m'$ 'dir. Planck'ın elde ettiği ifade, düşük frekanslarda Rayleigh-Jeans yasasıyla uyuyor, yüksek frekanslarda sıfıra gidiyordu. Dağılımın maksimum değeri $\lambda_m T = 0.2898 \text{ cm}\cdot\text{K}$ değerine karşılık gelirken, tüm frekanslar üzerinden integrali, birim alan başına ışınan toplam enerji miktarını σT^4 olarak verir. Bu ilişkilerden birincisi Wien, ikincisi ise Stefan-Boltzman Yasası.

Parçacık-dalga İkili Davranışı ve Dalga Fonksiyonu Çöküşü

'Parçacık-dalga ikili davranışı'nın bir örneği vardı zaten: ışık dalgaları ve foton; biri dalgaydı, diğeri parçacık. Yayılırken dalga, etkileşirken foton: Nasıl bir şey bu?.. Örneğin $\sin(2\pi/\lambda)x$ fonksiyonu, tek frekanslı bir dalganın hareket yönüne dik olan kesitinin anlık fotoğrafı gibidir. Yandaki şekilde görüldüğü gibi, aynı zamanda düzgün dairesel bir yörünge hareketini de betimler ve z eksenine göre grafiği çizildiğinde, x ekseninde ortalanmış, ondülin kesitine benzer bir eğri verir. Bükümlerin dalgaboyu λ' 'dir. Bu eğriyi alıp, y eksenini boyunca, eksi sonsuzdan artı sonsuza kadar, döndürmeksizin ötelerseniz; x-y düzleminde ortalanmış, sonsuz düzleminde elde edilir. Bu; 'sonsuz düzlemsel', 'durağan' bir dalgaydır. Bu ondülinin şimdi, x ekseninde bir yılan gibi, bükümlerinin şeklini aynen koruyarak ilerlediğini düşünelim. Bu, hareket halindeki sonsuz düzlemsel dalga olur. Hızı eğer c ise: $\sin(2\pi/\lambda)(x-ct)$. Bu ifade bize; x ekseninde c hızıyla ilerleyen, λ dalgaboyuna sahip bir dalga verir. Şöyle ki, x ekseninin herhangi bir noktasında durur ve üzerimizden bir dalga tepesi geçer geçmez saatimizi çalıştıracak olursak, izleyen saniye içerisinde üzerimizden $\nu=c/\lambda$ sayıda dalga tepesi geçer: frekans bu. Klasik bir dalgayla etkileşme söz-



konusu olduğunda; üzerimize doğru gelen bir dalganın taşıdığı enerji miktarı, dalgaların frekansıyla değil, sadece o dalganın yüksekliğiyle (genlik) orantılıdır: Dalga ne kadar yüksek ise, enerji o kadar büyük; ne kadar alçaksa o kadar küçük. Yoksa, bize enerji aktaracak olan dalga, izleyen saniyede arkasından gelecek olan dalgaların sayısını nasıl ve nereden bilebilirsin de, ona göre kendi payına düşeni aktarsın ki?... Bizim dalga davranışı hakkında, örneğin su ve ses dalgalarıyla deneyimlerimizden edindiğimiz 'klasik fiziksel' resim bu. Parçacık ise malum; fırlatırsınız hedefe; ya çarpıp yapışır, ya da düşer ve her iki halde de hedefin, bazen nokta kadar küçük sayılabilecek sınırlı bir bölgesine, kısa bir süre içerisinde enerji ve momentum aktarır. Halbuki ışık dalgalarında durum, bu 'klasik' dalgalarda olduğu gibi değil: Bizle veya herhangi bir maddesel hedefle etkileşimlerinde aktardıkları enerji, ya $h\nu$ kadar, ya da hiç; başka seçenek yok. Dalganın maddeyle her etkileşiminde $h\nu$ kadar enerji aktarması demek, frekans birimi başına h kadar enerji taşıyor olması demek: $E=h\nu$. Birim frekans bir dalga boyuna veya 2π radyana karşı geldiğine göre, radyan başına $h/2\pi$ kadar enerji. Ondülin örneğini düşünecek olursak; ışık dalgaları uzayda, yası bir yılana benzer şekilde kıvrımlarını koruyarak ilerleyen eni sonsuz bir ondülin gibi seyahat ediyor. Fakat madde tarafından soğurulması söz konusu olduğunda madde, bu ondülinin çukur ve tepelerinden, ν tanesinin taşıdığı enerjini bir anda yutuyor. Sanki, ondülinin dalgalarından ν tanesini aynı anda yiyor. Burada, uzay ve zaman birbirine karışmışa, bütünleşmişe benzemekte: Genel görelilik kuramından beklendiği gibi...



Öte yandan, daha önce sonsuz enli bir ondülin gibi seyahat etmekte olan dalga, madde tarafından soğurulması söz konusu olduğunda, sanki ansızın şeklini değiştirip uzayın sınırlı bir bölgesinde toplanarak, parçacık gibi davranıyor. Öyle olmasaydı, ışığın bir fotoğraf filminde soğurulması bir 'noktada koyulaşma'ya ('gren') yol açmazdı. Aktarılan $h\nu$ kadarlık enerjini 'foton' denilen bir parçacığın taşıdığı düşünülüyor. Işığın böyle ikili, şizofrenik bir davranışı var. Maddenin neden olmasın? De

Brogie'nin kuramı bunu öne sürdü. Bohr ve Heisenberg 1927 yılında, Kopenhag sokaklarında yaptıkları yürüyüşleri bu konuyu tartışarak geçirdiler.

Örneğin $\sin(2\pi/\lambda)(x-ct)$ dalgası, saf veya ideal dalga davranışını betimleyen tek frekanslı ('monokromatik') bir seyahat dalgası, tüm uzaya yaygın. Halbuki bir parçacık, uzayın belli bir bölgesinde yoğunlaşan özelliklere sahip. Dolayısıyla, böyle bir dalga ile temsil edilmesi mümkün değil. Ancak, bir frekansın tamsayı katlarından oluşan frekanslara sahip dalgaların ('harmonik'ler) uygun katsayılarla çarpılıp toplamı alınarak üst üste bindirilmesiyle, belli bir nokta civarında yoğunlaşan bir fonksiyon elde edilebiliyor. Böyle, değişik frekanslara sahip dalgalardan oluşan gruplara 'dalga paketi' denmekte. Harmoniklerin sayısı arttıkça, fonksiyonun temsil ettiği dağılım o kadar yerleşir. Hatta, kesin bir x_0 konumunu temsil eden delta fonksiyonu $\delta(x-x_0)$, böyle sonsuz sayıda harmoniğin bileşimi olarak yazılabilir. O halde, ideal dalga davranışını tek biriyle, nokta parçacık davranışını da sonsuz sayıda harmoniğin 'doğrusal bileşimi'yle temsil etmek mümkündür. Maddenin dalga-parçacık ikili davranışı, ancak bu çerçevede açıklanabilir. Şöyle...

Tek frekanslı bir dalganın konumu, dalga tüm uzaya yaygın olduğundan, tümüyle belirsizdir. Halbuki momentumu, tek bir dalgaboyu nedeniyle keskin bir değere ($p=h/\lambda$) sahiptir. Halbuki nokta parçacığı temsil eden delta fonksiyonuna karşılık gelen dalga paketinin, konumu keskin, fakat bu sefer de, paket tüm harmonikleri içerdiğinden, momentum tümüyle belirsizdir. Demek ki maddenin davranışı genelde, arada bir yerde: Sonlu sayıda harmonik içeren, oldukça yerleşmiş, fakat konum hala biraz bulanık. Momentumu da keza, farklı harmoniklerin taşıdığı momentum değerlerinin bir kısmı olduğundan dolayı keskin bir değere sahip olmayan... Konum ve momentumdaki belirsizliklerin çarpımı en az $h/2$ olmak zorunda: Heisenberg ilkesi.

Maddenin atom ölçeğindeki davranışını anlayabilmemiz için, tanışık olduğumuz parçacık kavramı yanında, alışık olmadığımız türden bir dalga davranışının birlikte önem taşıdığını vurgulamak isteyen George Gamow, 'dalgacık' terimini önermişti. Bohr ise bu duruma, dalga-parçacık 'ikili davranışı' ('duality') adını verdi. Bir de şu vardı tabii; madde veya ışık hangi şartlar altında dalga, hangi şartlar altında parçacık gibi davranır?

Bohr'a göre bu; ışık ya da parçacığı temsil eden dalga paketiyle, bir deney süreci sırasındaki etkileşme biçimimize, yani paketle etkileşen deney düzeneğinin yapısına bağlıdır. Örneğin, belli bir deney düzeneğini kullanarak momentum ölçmeye çalıştığımızda, adeta dalga paketini içine elimizi daldırıp, harmoniklerden rastgele birini çıkartır ve onun sahip olduğu keskin momentum değeriyle karşı karşıya kalırız. Elimizi daldırdığımızda hangi harmoniğin yakalanacağı, o harmoniğin, paketi oluşturan doğrusal bileşimdeki katsayısının karesiyle orantılıdır. Ancak, iş konum ölç-

meye gelince; bir parçacığı temsil eden dalga paketinin ve özellikle de, tek frekanslı bir ışığı temsil eden sonsuz düzlemsel dalganın, nasıl olup da tüm etkisini, örneğin bir fotoğraf filmindeki minik bir noktanın üzerine odaklayabildiği, tartışmalı bir konu. Bohr, büyük bir sabun köpüğünün iğne batırıldığında patlayıp küçük yerel bir damlacığa dönüşmesine benzeyen bu durumu, 'dalga fonksiyonu çöküşü' olarak nitelendirdi. Olay göz önünde canlandırılabilir gibi değildi. Ancak yapılan hesaplamalar, deney sonuçlarıyla çok uyumluydu. "Demek ki, küçük ölçekteki fizik olaylarının 'canlandırılabilir' olması şart değil" sonucuna vardılar. Yaygın kabul gören görüşleri, kuantum mekaniğinin Kopenhag Yorumu'nu oluşturdu.

Schrödinger'in Dalga Mekaniği

Kuantum mekaniğine göre; örneğin hidrojen atomunun, tek bir protondan oluşan çekirdeğinin etrafındaki elektron; sürekli değil, ancak kuantum sıçramalarıyla değişebilen enerji değerleri alabiliyor. Yörüngedeki açıl momentumun büyüklüğü de; yine kesintili bir şekilde, sıçramalarla değişebiliyor. Öte yandan, açıl momentumun sadece büyüklüğünü bilmek yetmiyor. Uzaydaki yönelişini de bilmek gerekiyor ve bu; belli bir, örneğin seçilen herhangi bir koordinat sisteminin z eksenini üzerindeki izdüşümünün bilinmesini gerektiriyor. Durum öyle ki; bu z bileşeni, yani açıl momentumun yönü de ancak kesintili bir şekilde, h sıçramalarla değişebiliyor. Fiziksel değişkenlerin değerlerini belirleyen kesintili sayılara, 'kuantum sayıları' deniyor. Dolayısıyla elektronun fiziksel durumunu; sırasıyla n , l ve m ile gösterilen; enerji, açıl momentum ve yön (manyetik) kuantum sayıları belirliyor.

Şöyle ki; enerji kuantum sayısı n , 1'den başlayarak pozitif tamsayı değerler (1, 2, 3,...) alabiliyor ve artan n değerleri; çekirdeğe en yakın olan en düşük enerji düzeylisinden başlayarak, giderek artan enerjilere sahip olup yükselen 'yörünge kabukları' veriyor. Belli bir n değeri için, açıl momentum kuantum sayısı l ; sıfırdan $n-1$ 'e kadar, n tane farklı değer (0, 1, ..., $n-1$) alabiliyor ve l 'nin her değeri, o kabuk içerisindeki farklı bir yörünge grubunu veriyor. Belli bir l değerine ait m değerleri ise; $-l$ den $+l$ 'ye kadar, $(2l+1)$ tane farklı değer $(-l, -l+1, ..., 0, 1, ..., l-1, l)$ alabiliyor ve bu değerlerden her biri, ilgili gruptaki yörüngelerden birini belirliyor.

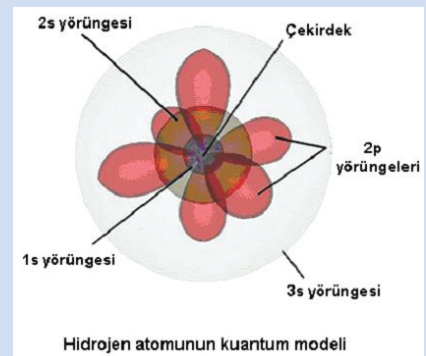
Dolayısıyla; kuantum mekaniği denklemlerinin çözümü, (n, l, m) değerlerinin olası her üçlüsü için bir 'dalga fonksiyonu' veriyor ve bunlara, 'özdurum' ('eigenstate') dalga fonksiyonları deniyor. Bu fonksiyonların şeklini, sadece l kuantum sayısı, tek başına belirlemekte. Örneğin, n değeri ne olursa olsun, $l=0$ fonksiyonları hep küresel simetrik. $l=1$ fonksiyonları ise; üç ayrı koordinat eksenini üzerinde oturmuş, birer çift simetrik lob şeklinde. $l=2$ veya 3 için şekiller daha karmaşık. Elek-

tron bu 'kuantum özdurumları' arasındaki geçişleri sırasında, aradaki enerji farkına eşdeğer frekansta ışınlar yayıyor veya soğuruyor. Dolayısıyla söz konusu kuantum durumları, tarihsel bir alışkanlıkla; bu ışınların, atomların ışına spektrumunda sergilediği niteliklere bağlı olarak isimlendirilmekte. Örneğin küresel simetrik $l=0$ dalgalarına, keskin spektrum çizgilerine yol açtılarından, bu sözcüğün İngilizcesinin ('sharp') başharfiyle 's dalgaları' deniyor. $l=1$ dalgalarına, 'birincil' ('primary') anlamında 'p,' $l=2$ dalgalarına da, 'dağınık' ('diffuse') anlamında 'd' dalgaları deniyor. Hal böyle olunca; $l=3$ ve 4 dalgaları da, 'f' ve 'g' simgeleriyle devam ediyor.

Sonuç olarak; $n=1$ değeri için, l ancak 0 olabiliyor ve m de yine, ancak 0 değerini alabiliyor. Bu durumda sadece bir 's' dalga fonksiyonu var. Buna 1s dalga fonksiyonu deniyor. $n=2$ için, $l=0$ veya $l=1$ olabiliyor. Birinci durumda m ancak 0 değerini alabilirken, yani yine tek bir 's' dalga fonksiyonu (2s) varken; $l=1$ halinde m , (-1, 0, 1) değerlerine sahip olabiliyor ve ortaya üç farklı 'p' dalga fonksiyonu (2p) çıkıyor. $n=3$ için, $l=2$ değerini de alabiliyor ve bu durumda, öncelikle ek olarak; m kuantum sayısı 5 farklı değer alabildiği için, çözümlerden 5 farklı 'd' dalga fonksiyonu (3d) çıkıyor. Nihayet $n=4$ halinde, l 'nin üst değeri 3 için, m 'nin olası değerlerinin sayısı 7'dir ve 7 adet 'f' dalga fonksiyonu (4f) vardır. $n=5$ halinde de, $l=4$ için 9 dalga fonksiyonu (5g)...

Her kabuktaki yörünge grupları, ilgili n değerinin ardından; o n için mümkün olan l değerleri için, l 'nin değerine işaret eden ve yörüngenin şeklini belirleyen harflerle gösteriliyor. Şöyle ki:

- $n=1$: 1s
- $n=2$: 2s 2p
- $n=3$: 3s 3p 3d
- $n=4$: 4s 4p 4d 4f
- $n=5$: 5s 5p 5d 5f 5g



Yalnız bir hidrojen atomundaki elektronun fiziksel çevre koşullarını sadece, protonun çekme kuvveti belirlemektedir. Bu çevre koşulları; elektronu belki de uzayda özgürce seyahat ederken yakalamış ve kendisine, özdurum dalga fonksiyonları torbasından oluşan bir dizi seçenek sunmuştur. Elektron bu özdurum fonksiyonlarından, yani yörüngelerden herhangi birine yerleşebilir. Hangisine yerleşeceği, tarihesine bağlıdır.

Hangisi olursa olsun; yerleştiği yörüngenin dalga fonksiyonu, elektron hakkındaki tüm fiziksel bilgileri içerir. Örneğin, dalga fonksiyonunun mutlak değerinin karesi, elektronun konumuyla ilgili bir olasılık dağılımı verir. Bu olasılık dağılımının, uzayın herhangi bir bölgesi üzerindeki toplamı (integrali), elektronun o bölgede bulunma olasılığına eşittir. Dolayısıyla elektron herhangi bir anda; uzayın bir veya diğer bölgesinde, hatta her ikisinde birden bulunabilir. Olasılık dağılımının konuyla çarpımının tüm uzay üzerinden toplamı (integrali), elektronun o özdeğerde ikenki 'ortalama konum'unu verir. Bu değer, küresel simetrik s yörüngeleri için, doğal olarak sıfırdır. Elektronla ilgili; örneğin enerji, momentum ve açısal momentum gibi diğer fiziksel değişkenlerin ortalama değerleri de keza, özdeğer dalga fonksiyonundan, uygun operasyonlarla elde edilebilir. Ama bu değerler, çözüm sırasında zaten elde edilmiştir ve her özdeğerin (n, l, m) kuantum sayıları tarafından, tek birer değer olarak belirlenmektedir. Aslında, kuantum mekaniğinde fiziksel değişkenlerin her birine, matematiksel birer 'operatör' karşılık geliyor. Özgün durumlardan birinin işgali halinde, ilgili operatörün o öz dalga fonksiyonu üzerine doğrudan etkisiyle, ilgili fiziksel değişkenin değeri elde edilebiliyor.

Ancak, elektronun illa da bu özdeğerlerden, sadece birini veya diğerini işgal ediyor olması gerekmiyor. Geçmişteki etkileşimlerinin tarihçesine, yani yapılan incelemenin başlangıç koşullarına bağlı olarak, devreye birden fazla özdeğer fonksiyonu da girebiliyor. Dolayısıyla elektronun herhangi bir andaki 'kuantum mekaniksel durum'u genelde, illa da bu olası özdeğer fonksiyonlarından tek biri veya diğeriyle değil ve fakat birkaçının; büyüklüklerini o anki fiziksel koşulların belirlediği ağırlık katsayılarıyla tartılmış bir toplamı tarafından veriliyor. Örneğin; belli bir başlangıç enerji düzeyindeki elektronun daha yüksek bir enerji düzeyine uyarılması veya uyarılmış bir atomdaki elektronun, daha düşük bir enerji düzeyine geçişi sıralarında olduğu gibi... Elektronun o anki durumunu betimleyen bu, daha karmaşık olan 'toplam dalga fonksiyonu' da keza, elektron hakkındaki tüm fiziksel bilgileri içeriyor. Fiziksel değişkenlerden herhangi birinin değeri, ilgili matematiksel operatör kullanılarak bu dalga fonksiyonundan türetilebilmekte. Bu durumda doğal olarak; konum zaten öyleydi; ama enerji ve açısal momentum gibi diğer fiziksel değişkenlerin de, kesin değerleri değil, ancak ortalamaları hesaplanabiliyor. Kesin değerler belirsiz...

Fiziksel değişkenlerin değerlerindeki bu belirsizlikler, kuantum mekaniğinin yetersizliğinden kaynaklanmıyor, maddenin dalga davranışı öyle olduğu için böyle. Örneğin bir parçacığın, diyelim konumunun x koordinatıyla, momentumunun x bileşeninin (p_x) 'eşlenik çift' oluşturduğu söylenir ve böyle değişken çiftleri için kesin değerlerin, aynı anda belirlenmesi mümkün olamıyor. Çünkü Heisenberg'in ortaya koyduğu temel bir kuantum mekaniği ilkesine göre; örneğin x ve p_x

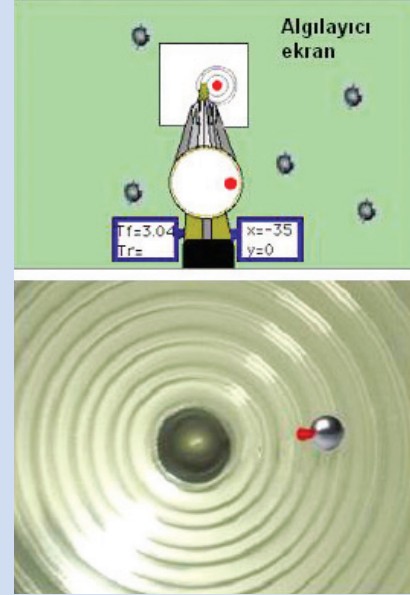
değerlerindeki belirsizliklerin, $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$ eşitsizliğini sağlaması gerekiyor. Bu 'belirsizlik ilkesi', tüm 'eşlenik çift'ler için geçerli. Örneğin zaman ve enerji için; $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ olması gerekiyor. Yani eşlenik çiftlerden birinin değeri ne kadar büyük bir kesinlikle ölçülmeye çalışılırsa, ölçülebilmişse; diğerinin değeri o kadar belirsizleşiyor. Bu durum ölçüm sürecinin sağlıksızlığından değil; ölçüm amacıyla kullanılan herhangi bir düzeneğin, ölçüm değerlerini kaçınılmaz olarak etkilemesinden kaynaklanıyor. Örneğin, parçacığın x koordinatının belirlenebilmesi; üzerine o parçacığın boyutları düzeyinde dalga boyuna sahip bir fotonun gönderilip, parçacıktan geri yansıtılmasını gerektiriyor. Halbuki bu süreç, fotonun aktardığı momentum nedeniyle, parçacığın konumunu etkiliyor. Bu nedendir ki, atomlardaki elektronların, iyi tanımlanmış net yörüngelerde hareket ediyorlarmış gibi düşünülmemesi lazım. Öte yandan, parçacığın enerjisini kesin olarak belirleyerek $\Delta E=0$ 'ı yakalamak, sonsuz zaman alan bir ölçüm sürecini gerektirir. Veya parçacığın ömrü ne kadar kısa ise, enerjisindeki belirsizlik de o kadar artıyor. Dolayısıyla, çok kısa ömürlü parçacıklar, enerjinin korunumu ilkesini zedelemeksizin; ansızın ortaya çıkıp, varlıklarını sürdürdükleri çok kısa sürelerle çok büyük enerjilere sahip olabiliyorlar ve böyle parçacıklara, onca kısa ömürleri nedeniyle adeta 'realite'nin gözünden kaçabildiklerinden dolayı, 'sanal' ('virtual') parçacıklar deniyor.

Bu belirsizlikler çerçevesinde, hidrojen atomununun da keza, net ve kesin yörüngelerden oluşuyormuş gibi düşünülmemesi gerekir. Yani atomun net bir yarıçapı yoktur. Ancak ortalama değerlerden söz edilebilir. Elektron eğer $n=0$, yani $1s$ yörüngesine yerleşmişse, 'temel durum' dalga fonksiyonunu işgal ettiği veya atomun 'temel durum'da bulunduğu söylenir. Elektron bu durumda iken, uygun miktarlarda enerji soğurduğu takdirde, daha yüksek enerji düzeylerine geçiş yapabilir. Soğurması gereken 'uygun' enerji miktarı, arasında geçiş yaptığı iki düzeyin enerjileri arasındaki fark kadardır. Daha yüksek enerji düzeylerine trmandıkça, elektron çekirdekte daha uzaklarda, daha fazla zaman harcamaya başlar. Yani uyarılmış atomun, ortalama yarıçapı büyümüştür. Eğer bu geçiş başka bir kabuğun yörüngelerinden birine yapılmışsa, yarıçap daha da fazla büyür. Nihayet; elektron temel durumda iken, yeterince enerji soğurduğu takdirde, protonun çekim kuvvetinden kurtulup serbest hale gelebilir. Bunu ancak başarabileceği enerji miktarına, 'iyonlaşma enerjisi' denir. Daha da fazla enerji soğurması halinde, iyonlaşma enerjisinden geriye kalan miktar kadar kinetik enerji kazanmış olur ve protondan uzaklaşır.

Hidrojen atomu için elde edilmiş olan bu çözümlerle birlikte, artan sayıda elektron yerleştirmek suretiyle, diğer atomların yörünge şemalarını elde etmek de mümkün. Pauli'nin dışlama ilkesi elektronların aynı 'kuantum durumu'nu paylaşmasını yasakladığından, ay-

nı yörüngede en fazla iki elektron bulunabiliyor ve bunların da hiç değilse, 'spin kuantum sayıları'nın farklı olması, yani spinlerinin zıt yönlerde kutuplanması gerekiyordu. Buna göre; 2 elektronu olan helyumun yörünge şeması $1s^2$, sonra gelen lityumun $1s^2 2s^1$ idi. Berilyumun $1s^2 2s^2$, boronun $1s^2 2s^2 2p^1$ vs.

Heisenberg'in Mikroskopu



Kuramsal çalışma sırasında dinamik operatörleri uygulayarak ilgili fiziksel değişkenlerin değerlerini hesaplamak, deney ve gözlem sırasında ölçmeye karşılık geldiğine göre; eşlenik operatörlerin değişme özelliğinin olmayışı, bu operatörlere karşılık gelen değişkenlerin ölçüm süreçlerinin birbirini etkilemesi anlamına geliyor olmalıydı. Halbuki, örneğin bir taş parçası gibi büyük ölçekli bir cismin konumunu, üzerinden yansıyan fotonlar aracılığıyla belirleriz ve bu süreç, taşın fiziksel değişkenlerinin değerlerini, hemen hiç etkilemez. Fakat, elektron gibi küçük ölçekli bir parçacık için, durum biraz farklıdır ve üzerinden foton yansıtarak konumunu belirlerken, fotonun Compton saçılması sırasında aktardığı bileşen nedeniyle, momentumunu kaçınılmaz olarak değiştirmiş oluruz. Gerçi benzer bir durum, büyük ölçekli bir sistemle ilgili bir ölçüm sürecinde de söz konusu olabilir. Örneğin, çim bir sahada yuvarlanmakta olan golf topunun konumunu eğer, gözlerimizi kapatıp elimizdeki golf sopasını sallayıp durarak ve 'çat' diye bir ses duyup duymadığımıza bakarak ararsak; sesi duyup da topun yerini belirlediğimizde, topun momentumunu değiştirmiş ve onu bambaşka yerlere göndermiş oluruz. Fakat, golf topunun yerini, onu sistem olarak etkilemeksizin belirlemenin, örneğin golf sahasını bir video kamerayla veya gözlerimizle taramak gibi, başka yöntemleri de vardır. Halbuki, elektron gibi küçük ölçekli bir sistem için böyle bir yöntem yoktur, olamaz.

Çünkü, küçük ve büyük ölçekli sistemlerin fiziksel özelliklerini ölçme işlemleri, doğaları itibarıyla birbirlerinden farklıdır. Yandaki şekilde Heisenberg'in, bu kavramı somutlaştırmak amacıyla bir düşünce deneyi olarak tasarladığı mikroskopi görülüyor. Mikroskopun önünde atomlar veya elektronlar gezinmekte. Düzlemsel bir koordinat sistemi üzerinde hareket ettirilebilen mikroskop aralıklı olarak, arka fondaki duyarlı ekrana dik yönde birer foton fırlatıyor ve gönderdiği fotonların, ekran tarafından algılanıp algılanmadığına bakıyor. Foton algılanmamışsa eğer, mikroskop, 'foton tabancası'nın x-y düzlemindeki konumunu kaydediyor. Çünkü bu durumda fotonun, yolda bir elektrona çarparak yansımış ve ekrana yüzden ulaşamamış olması gerekiyor. Altta ise, hidrojen atomunun yörüngelerinde dolaşan hayali bir elektron var. Kırmızı nokta, elektrona isabet eden bir fotonu temsil etmekte. Elektronun konumunu, üzerine düşürülen fotonun dalga boyu düzeyinde bir duyarlılıkla belirlemek mümkün. Dolayısıyla, gönderilen fotonun dalga boyu ne kadar küçük, yani frekansı ne kadar yüksekse; elektronun konumu da o kadar büyük bir duyarlılıkla belirlenebiliyor. Buna karşılık, yüksek frekans yüksek enerji ve momentum anlamına geldiğinden, elektronun momentumu da o kadar fazla belirsizleşiyor. Heisenberg bu duruma kuantum 'belirlenemezliği' ('indeterminacy') diyordu. Düşünce deneyi, üzerine inşa edilmiş olduğu ilkelere saldırıyı amaçlayan türdendi ('reductio ad absurdum').

Bohr'a göre bu mikroskop deneyinde önemli olan; elektronun momentumundaki sıçrama değil, bu değişikliğin büyüklüğünün aynı deneyde kesin olarak belirlenemez olmasıydı. Heisenberg'in görüşlerine genelde katılmakla beraber, belirsizlik ilkesiyle ilgili olarak 'kesik sıçrama' kavramını ön plana çıkarıp vurguluyor olması nedeniyle kendisini ciddi şekilde eleştirdi de. Çünkü onun için belirsizlik ilkesi, daha temelde duran 'tamamlayıcılık ilkesi'nin ifade biçimlerinden biriydi, belirtisi ya da sonucu.

Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi bir sistemin, birbirlerinin eşleniği olarak nitelendirilen iki fiziksel değişkeninin, örneğin bir parçacığın konum ve momentum vektörlerinin x bileşenlerinin, aynı anda kesin bir duyarlılıkla belirlenemeyeceğini söyler. Böyle bir eşlenik değişken çiftini p ve q ile gösterelim. Örneğin p konum bileşeni, q da momentum bileşeni olsun. İlkeye göre, p ve q'nun ölçüm değerlerindeki belirsizlikler $\Delta p, \Delta q \geq \hbar/2$ eşitsizliğini sağlamak zorundadır. Yani; konumu ne kadar kesin belirlersek, momentum o kadar belirsizleşir, ya da tersine. İlişki, ilgili fiziksel değişkenlere karşılık gelen operatörlerin değişme özelliğinin olmayışından kaynaklanıyor. Kuantum mekaniğinin kuramsal çerçevesi içinde ispatı mümkün. İlkeye ilk itirazlar şöyleydi...

Parçacığın t_1 anındaki momentumunu, kesin duyarlılıkla, p_1 olarak ölçtük diyelim. Konum belirsizleşti; fakat parçacık, belirlemiş olduğumuz momentumuyla yoluna devam ediyor. Sonra da t_2 anında, parçacığı her neredeyse bulup, bu sefer de kesin konumunu, q_2 olarak ölçtük diyelim. Şimdi, parçacığa bu arada müdahale edilmediğine göre, momentumu değişmemiş; yani parçacık q_2 konumuna, t_1 anında sahip olduğu p_1 momentumuyla ulaşmış olmalı. E, o zaman biz, parçacığın t_2 anındaki, hem konumunu hem de momentumunu kesin olarak bilebiliriz: q_2 ve p_1 ikilisi?... Bunun yanıtı şöyle: " t_2 anında konumu ölçerken, momentumu bir miktar değiştirmiş olursunuz. Parçacığın t_2 anındaki momentumu, t_1 anındaki p_1 olmaktan çıkıp, başka bir şey olur. Dolayısıyla, konum q_2 tamam da; p_1 artık, parçacığın t_2 anındaki kesin momentumu değildir." E, o zaman; daha sonraki bir t_3 anında, parçacığın kesin momentumunu bir daha ölçeriz, konuma aldığımızı. Diyelim p_3 . Bu p_3 , parçacığın t_2 anındaki değiştirmiş olduğumuz momentumudur. Dolayısıyla, q_2 ile p_3 ; parçacığın t_2 anındaki kesin konum ve momentum ikilisini oluşturur. Benzer şekilde, ölçümlere devam ederek, parçacığın t_3, t_4, \dots vb anlarındaki kesin konum ve momentum bileşenlerini belirlemek mümkün hale gelir. Belirsizlik ilkesi çalışmaz...

Heisenberg, ilkenin geçmişe doğru çalışmadığını kabul ediyor, fakat geçmişte yapılmış olan ölçümlerin, klasik düşüncede olduğu kadar anlamlı olmadığını söylüyordu. Nedeni şu: Bu verileri kullanarak, başlangıç koşulları olarak alarak, gelecek hakkında kesin öngörülerde bulunamazsınız. Çünkü bir an için Δq duyarlılıkla konum ölçümü yaptığımızda, momentuma en az $\Delta p \geq \hbar/(2\Delta q)$ kadar belirsizlik kazandırmış değerine 'sıçrama' katmış olursunuz. Bu belirsizlik, ölçme işleminin yetersizliğinden veya deney aracının duyarlılığının sınırlı olmasından kaynaklanmıyor. Tabiatın doğasında var bu, küçük ölçekli sistemlerin davranışında. O zaman da şu soru doğuyor: Peki, bu iki değişkenin kesin değerleri aynı anda ölçülebilir; ama sistemin kendisi 'aslında' ölçülemeyen bu kesin değerlere sahip mi? Değişkenlerin sahip olduğu böyle kesin değerler 'gerçekten' var mı?... Heisenberg'in bu soruya da yanıtı "hayır"dı. Nedeni şu...

Bir sistemi, fiziksel değişkenleri betimler ve değişkenlerinin hepsi belirlenmişse, sistem tam olarak, yani 'iyi tanımlanmış' olur. Fiziksel değişken nedir? Sistemin ölçülebilir bir özelliği. O halde, bir 'fiziksel değişken'in ölçülebilir olması şart; ölçülebilirse anlamlı, aksi halde anlamsız. Demek ki, fiziksel değişkenin anlamı, ölçülebilir olmasında yatar. Örneğin bir 'parçacığın konumu' ifadesi, 'parçacığın konumu'nun ölçülebileceği uygun bir deney tanımlanabiliyorsa anlam taşır, aksi halde taşımaz. O halde ölçme, anlam kazandıran bir eylem: "ölçme eşittir anlam." Öte yandan, fiziksel değişken ne zaman var?... Fiziksel değişkenin anlamı ölçülebilir olmasında yattığına göre; ölçüldüğünde var, aksi halde yok. O halde ölçme, aynı zamanda yaratıcı bir eylem: "ölçme eşittir yaratmak". Ölçüm, fiziksel değişken olmaya aday bir niteliğe sadece

anlam kazandırmakla kalmıyor, onun için özgün bir de değer yaratıyor. Sonuç?... Fiziksel değişkenler ölçüm anında var ve anlamlı, aksi halde yok ve anlamsız. Ama biz, parçacık üzerinde yaptığımız bir dizi gözlemden hareketle, geçmişine ait anlık fotoğraflar oluşturup, bunları birleştirerek ve hatta, üzerinde gözlem yapmadığımız zaman aralıklarındaki boşlukları da doldurarak; "parçacık önce şuradaydı, sonra şu momentumla buraya geldi, arada şu patikayı izlemiş olmalı" gibi tasarımlar inşa edebiliriz. Büyük ölçekli dünyamızdaki deneyimlerimizin kazandırdığı alışkanlıklardan hareketle... Böyle bir tasarımı gerçek saymak, ona gerçeklik atfetmek; bu isteğe bağlı, kişisel bir tercih. Heisenberg'in tercihi, bunların gerçek olmadığı yönündeydi. Ona göre durum; üzerinde ölçüm yapılmadığı sırada, elektronun belli bir konumda değil, olasılık dağılımına karşılık gelen 'elektron bulutu'ndaki her yerde olduğu şeklindeydi. Yani, kuantum mekaniği kesin sonuçlar değil, yalnızca, bir dizi olası sonucun gerçekleşme olasılıklarını verir. "Parçacığın klasik 'patika'sı sadece, biz o gözlem dizisini yapmış olduğumuz için ortaya çıkıyor", belirtiyor, varlık kazanıyor: Aksi halde yok, gözlem yapmasaydık oluşmazdı. Einstein'ın buna yanıtı, "Ay kimse bakmazken de orada" oldu, Dünya'nın etrafında dolanıyor...

Belirsizlik ilişkilerinin yorumu yoğun tartışmalara konu edildi: Bu ilişkiler kuantum sistemleri üzerinde yapabileceğimiz deneylere, dolayısıyla da böyle sistemler hakkında edinebileceğimiz bilgilere kısıtlamalar mı getiriyor, yoksa kuantum sistemlerini betimlemek için kullandığımız kavramları mı kısıtlıyor? Ya da kuantum sistemlerinin, konum ve momentum gibi eşlenik fiziksel değişkenlerinin aynı anda keskin değerlere sahip olmadığı gibisinden, yapısal bir kısıtlama mıdır? İlişkiler, sorulan sorulara ve üzerlerinde yapılan yorumlar arasındaki farklara göre; 'hata payı' ('inaccuracy'), 'belirlenemezlik' ('indeterminacy'), 'bulanıklık' ('unsharpness') ilişkileri gibi sözcüklerle tanımlandı. Sonunda 'belirsizlik' ('uncertainty') ilişkilerinde karar kılındı. Farklı görüşler arasındaki tartışmalar halen sona ermiş değil. Halbuki, Heisenberg'e göre bu sorular önemsizdi. Gerçi onun için 'belirlenemezlik ilkesi', doğanın yapısında yatan, 'yapısal' ('ontolojik') bir ilkeydi. Fakat, örneğin; "kuantum sistemleri, deney süreçleriyle ulaşılamaz olmakla birlikte, aslında belirsizlik ilişkilerinden etkilenmemiş olan, keskin konum ve momentum değerlerine sahip olabilirler mi veya onların böyle bir 'gizli gerçeklik'leri var mıdır?" gibisinden yapısal sorular ilgisini çekmiyordu. Ona göre tür sorular, yararsız ve anlamsız tahminlerden ibarettir ve fizik, sadece gözlemlenebilen verileri betimlemelidir. Benzeri şekilde, Chicago Konferanslarında insan dilinin, deneysel herhangi bir içeriği olmayan, fakat hayalimizde bir resim canlandırılmaya yardımcı olduğu için sık kullandığımız cümlelerle dolu olduğunu; özellikle 'gerçek', 'aslında', 'gerçekten oldu', 'patika', vb sözcükleri kullanırken dikkatli olmak gerektiğini söyler. Eğer, iki eşlenik de-

ğişkenin keskin değerlerini aynı anda ölçülecek herhangi bir deney yoksa, o zaman bu iki değişken “aynı anda iyi tanımlanmış” değildir.

Heisenberg belirsizlik ilkesini kuantum mekaniğinin temel ilkesi olarak sunmaya çalışmadı. Ama ilke daha sonra kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunun ‘temel taşı’, kuramın dayandığı temel ilke olarak gösterilmeye başlandığında, buna da karşı çıkmadı. Halbuki çağdaş düşünürlerden Carl Popper, belirsizlik ilkesinin bir ‘kuram ilkesi’ olduğu düşüncesine katılmıyor. Çünkü, her ne kadar belirsizlik ilkesi kuramdan türetilbiliyorsa da, kuram bu ilkedan türetilmiyor. Kuram ilkelerinin ise, böyle bir gücünün olması lazım. (Bknz. Yapısal Kuram, İlkeci Kuram.)

Yapısal Kuram, İlkeci Kuram

Einstein 1919 yılında, kuramlar arasında bir ayırım önermişti. Yapısal (‘constructive’) kuramlar, olayların arkasında basit unsurların yattığını varsayar ve olayları, bu unsurlar hakkındaki varsayımlardan hareketle, yeniden kurgulayıp inşa çalışır. İlkeci kuramlar ise, deneysel verilerden türetilen genellemeler niteliğindeki ilkelere hareketle, kuramsal terimler kullanmaksızın veya olası en az sayıdasını kullanarak yola çıkar. Amaç, kuramı ilkelere hareketle inşa etmek, yani bu deneysel ilkelerin nasıl, daha ileri düzeydeki kuramsal kavramların ve yapıların devreye sokulabilmesi için yeterli koşul oluşturduklarını göstermektir.

İlkeci bir kurama en büyük örnek, klasik termodinamik. Örneğin, herhangi bir devir daim makinasının imkansızlığı gibi sayısız deneysel kanıtla desteklenmiş apaçık gerçeklerin anlatımı, enerji ve entropi kavramlarının ve özelliklerinin tanıtımı için uygun koşulları sağlamış; enerjinin korunumu ve entropi artışı gibi kuramsal türetilmeye yol açmış. Bu türetilmelerden hareketle, klasik termodinamik kuramı oluşturulmuş. Kuram bir kez oluşturulduktan sonra, geriye dönüp; bir devir daim makinası yapmanın, enerjinin korunumu veya entropi artışı yasalarıyla çelişeceğinden dolayı imkansızlığını göstermek mümkün. Ancak bu, devir daim makinası yapmanın imkansızlığını anlatan ifadeleri, başlangıç ilkesi olmaktan çıkarmaz, ispatlanmış gerçekler haline koymaz. Önemli olan şu ki; deneysel ilkelere, anlam taşımak açısından, bu örnekteki enerji ve entropiye benzer kuramsal kavramlara dayanmazlar. Bu kavramlardan bağımsız olarak anlamlıdır.

İlkeci kurama bir diğer örnek, Einstein’ın termodinamik kuramı bilinçli olarak örnek olarak tasarımı olduğu özel görelilik kuramı. Kuramın iki varsayımı var: Görelilik ilkesi ve ışık varsayımı. Birincisini, eşdeğer değişik biçimlerde ifade etmek mümkün: Aynı fiziksel olayları gözlemleyen farklı atalet sistemlerindeki gözlemcilerin gerçeğin doğası üzerinde uzlaşabilmeleri gerekir, ya da; bir gözlemci

için evrenin görüntüsü, içinde bulunduğu atalet sistemini değiştirmesiyle değişmemelidir, ya da; fiziksel bir kuram, tüm atalet sistemlerindeki gözlemcilerin hepsine matematiksel olarak aynı görünmelidir, ya da; evrenin yasaları, hangi atalet sisteminin içinde bulunulduğundan bağımsız olarak aynıdır. İkinci varsayım, ışık hızının değişmezliği hakkındadır: Işık boşlukta, ışılan cismin hareketinden bağımsız olan sabit bir c hızıyla yayılır. (Çoğu ders kitabı; “ışık hızının tüm ataletli gözlemciler için aynı olması gerekir” şeklindeki, aslında türetilmiş bir sonucu da, bu varsayımın parçası olarak sunar. Gözden kaçırılan bir diğer husus, ışık hızının yönden bağımsızlığının (‘izotropi’), varsayım olarak değil, tanım olarak devreye girmesidir.) Einstein özel görelilik kuramını, sadece bu iki varsayımdan türetti. Dolayısıyla, bu iki varsayım, birer kuram ilkesidir. Tabii, kuramın bir kez inşa edilip de ‘Minkovsky uzay-zamanı’ kurulduktan sonra, bu iki varsayımın geçerliliğini ispatlamak mümkün. Ancak bu, onların başlangıçta geçerliliği varsayılmış olan ilkeler olmadıkları anlamına gelmiyor.

Heisenberg’in belirsizlik ilişkilerinin bu açıdan ‘ilke’ sıfatını haketmeleri için, deneysel ilkeler olarak doğmuş olmaları gerekiyor. Halbuki, Heisenberg’le Bohr’un başını çektiği Kopenhag Yorumu’nun oluştuğu sıralarda, belirsizlik ilişkilerini destekleyen deneysel veriler yoktu. Bu yüzden daha çok düşünce deneylerin başvuruldu. Kuantum sınırına yaklaşan hata paylarıyla ölçümler ancak, 1980’li yıllarda yapılmaya başlandı. Heisenberg, ‘Parça ve Bütün’ (*Der Teil und das Ganze*) başlıklı otobiyografisinde, ilkelerini Einstein’ın bir sözünden aldığı cesaretle oluşturduğunu söyler: “Gözlemlenebilecek olanı, kuram belirler.” Bu cesaretle, kuramı mevcut deneysel verilerin önünde tutmuş, düşünce deneyleriyle yetinmişti. Hal böyle olunca da, oluşturulan kuramın belirsizlik ilişkilerini desteklemesi doğaldı. Bu durum, diğer ilkesel kuramlarda da böyle. Deneysel ilkeler üzerine inşa edilmiş bir kuram, ilkelerin geçerliliğini ispatlayan birer de teorem veriyor.

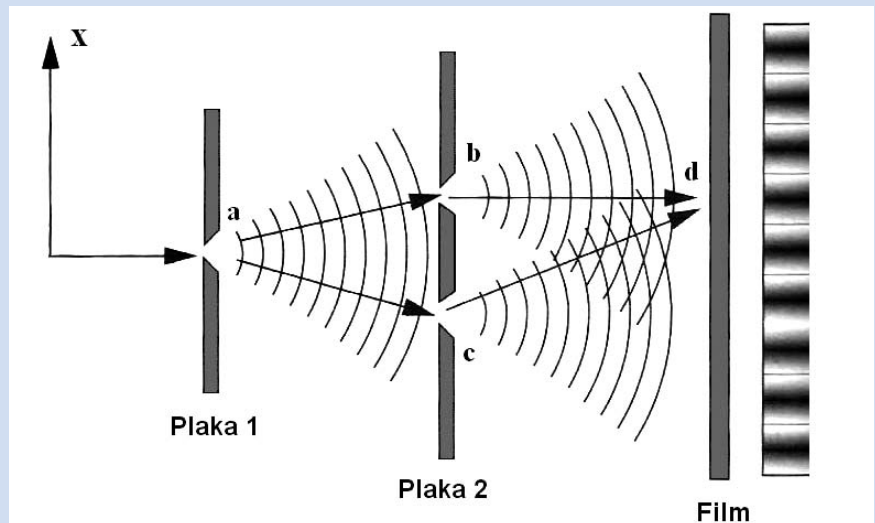
Bir süre sonra, zaman ve enerji, eylem (‘action’) ve açı için benzer eşitsizliklerin olmadığı anlaşıldı. 1927 yılında Jordan eylem

ve açı için bu ilişkilerin yanlış olduğuna işaret etti. 1933 yılında Pauli, Hamilton operatörünün, alttan sınırlı olması halinde, kanonik eşleniğinin var olmadığını gösterdi. Bu, pek çok sistem için zaman operatörünün var olmadığı anlamına geliyor. Bu gözlemler, zaman-enerji ve faz-eylem belirsizlik ilişkileriyle ilgili pek çok çalışmaya yol açtı.

Girişim Deneyi

Çift yarıklı girişim deneyi, ilk kez 1801 yılında Thomas Young ve A.J. Fresnel tarafından yapıldı. Deney düzeneği, yandaki şekilde görüldüğü gibi; biri tek, diğeri çift yarıklı iki plaka ve bir film ekranından oluşuyordu. Işık kaynağı şekilde gösterilmemiş, ama soldaki koordinat sisteminin merkezinde. Birinci plakanın amacı, buradaki tek yarıktan geçen ışınları faz açısından uyumlu hale getirmek. Yani, dalga tepelerinin birbirini sabit mesafelerle 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 kattıkları 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 ‘tektamsayı katı’ ise, o zaman da; bir dalga tepesiyle diğeri çukuru üst üste biner: Genlik, yani ışık şiddeti sıfırlanmış, o nokta aynı kalmıştır. Diğer noktalar için, ara durumlar söz konusudur. Sonuç olarak filmin üzerinde, en sağda gösterildiği gibi; birbirine paralel, parlak ve karanlık çizgilerden oluşan bir ‘girişim saçacağı’ oluşur. Saçak iki farklı noktadan kaynaklanan su dalgalarının yol açtığı girişim örüntüsüne benzediğinden, oluşumu ancak, ışığın dalga davranışıyla açıklanabilir.

Deney ilk yapıldığında, ışığın parçacık kuramı taraftarları saçığın, birbirine yakın seyahat eden fotonların arasındaki etkileşmeden kaynaklanabileceğini öne sürdü. Fakat, ışık şiddeti yarıklardan her an için tek bir fotonun geçtiğinden emin oluncaya kadar azaltılarak



yapılan deneylerde de saçak olduğu gözlemlenince, söylenecek bir şey kalmamıştı. Halbuki, ikinci plakadaki yarıklardan birinin kapatılması halinde, ışık sadece diğer yarıktan geçerek, film üzerinde tek bir çizginin oluşmasına yol açar. Örneğin b kapatılmışsa, a-b doğrusunun, c kapatılmışsa da a-c doğrusunun film düzlemini kestiği x değerinde... Birinci plakadan sonra doğrusal bir harekete işaret eden bu durumu, ışığın foton olarak parçacık davranışının bir belirtisi olarak düşünmek mümkündür. Yani deney, ışığın hem parçacık, hem de dalga davranışını incelemeye yatkındır. Çünkü, girişim saçığının oluşması dalga davranışının, oluşmaması da parçacık davranışının kanıtıdır. Çift yarık düzeneği bu yapıyla, kuantum mekaniğinin oluşturulma sürecinde, kuramı sınamaya yönelik düşünce deneyleri geliştirmek amacıyla sıkça kullanıldı. Özellikle de Bohr'un ortaya koyduğu 'tamamlayıcılık ilkesi'ni... Bu ilke, madde'nin hem parçacık hem de dalga şeklinde davranabileceği, fakat bu iki davranış biçiminin tek bir deneyde, yani aynı deney düzeneğinin değiştirilmeden koşulları altında bir arada gözlemlenemeyeceğini söyler. Eğer çift yarık deneyinde, hem girişim saçığı gözlenir ve hem de fotonların ikinci plakadaki yarıkların hangisinden geçtiği saptanabilirse, Bohr'un, Kopenhag Yorumu'nun temel direklerinden birini oluşturan bu ilkesi çığnenir. Çünkü bu ilkeye göre, yani Bohr'a göre; ya bir parçacığın patikasını izlemek, ya da girişim etkisini gözlemlemek seçeneklerinden birine sahibiz ve birbirini dışlayan bu iki davranış biçimini, birbirini dışlayan deney düzeneklerinde gözlemleyebiliriz. Fotonun hangi yarıktan geçip geldiğini saptamaya yönelik deneylere 'hangi yol' ('welcher weg') deneyleri deniyor. Bir de şu var...

Fotonlar deney düzeneğinden teker teker geçtiklerine göre, eğer fotonlardan birinin, b ve c yarıklarının hangisinden geçtiğini saptayacak olursak; fotonun yarıktan geçerkenki konumunun x bileşenini, soldaki koordinat sistemine göre belirlemiş oluruz. Eğer bir de x yönündeki momentum bileşenini de belirleyebilirsek, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi çığnenmiş olur. Einstein 1927 yılındaki Solvay Konferansı'na, momentum ve enerjinin korunumu ilkelerine dayanarak, belirsizlik ilkesinin geçersiz olduğunu göstermek amacıyla, buna benzer bir düşünce deneyi sundu. Şöyle...

Soldaki koordinat sisteminin merkezinden çıkan fotonlardan, birinci plakadaki a yarığına ulaşanların, yatay doğrultuda seyahat ettiklerinden, a yarığına vardıklarında, momentumlarının x bileşeninin sıfıra yakın olması gerekir. Teker teker geldiklerine göre, tek birine bakalım. Bu foton eğer, ikinci plakanın üst kısmındaki b yarığına ulaşmışsa, a yarığından geçerken yukarıya doğru (+x) bir momentum kazanmış ve bunu, birinci plakaya aşağıya doğru (-x) bir momentum aktararak başarmış olmalı. Yok eğer c yarığına ulaşmışsa da; a yarığından geçerken aşağıya doğru (-x) bir momentum kazanmış ve birinci plakaya yukarıya doğru (+) momentum aktarmış... Do-

layısıyla biz, foton düzeneğinden geçip filme ulaştıktan sonra birinci plakanın kazandığı momentumu ölçersek; momentumun korunumu gereği, bunun negatifi bize, fotonun x yönündeki momentum bileşenini verir. Bu momentumun işareti önemli: Çünkü yönü yukarı doğruysa, foton üst, aşağı doğruysa alt yarıktan geçmiş demektir. Can alıcı nokta şu: Bir yandan girişim saçığı oluşurken, diğer yandan 'hangi yol' sorusu da yanıtlanmış olacağına göre, Bohr'un 'tamamlayıcılık ilkesi' geçerliliğini yitirir. Bu momentumun büyüklüğü de önemli: Çünkü, a yarığından sonra filme kadar momentumda bir değişiklik olamayacağına göre; foton, diyelim üst yarığa vardığında, momentumu aynıdır. O halde, foton tam yarıktan geçerken, hem konumunun ve hem de momentumunun x bileşenlerinin kesin değerleri bellidir: Heisenberg'in belirsizlik ilkesi çığnenir.

Bohr bu engeli kolay aştı... Birinci plakanın fotonla etkileşimi sırasında kazandığı momentumu, etkileşim sonrasında ölçebilmek için, ilk konumunun yeterli duyarlılıkla belirlenmiş olması gerekir. Halbuki konum belirlenmesi, momentumu bir miktar belirsizleştirir. Eğer, plakanın momentumundaki belirsizlik, fotonun kazandıracağı momentumdan büyükse; ki öyle olacaktır, çünkü plaka büyük ölçekli bir cisimdir; fotonun kazandığı momentumu belirlemek mümkün değildir. Çünkü, bu minik olan ikincisi, dev birincinininkisinin içinde kaybolur.

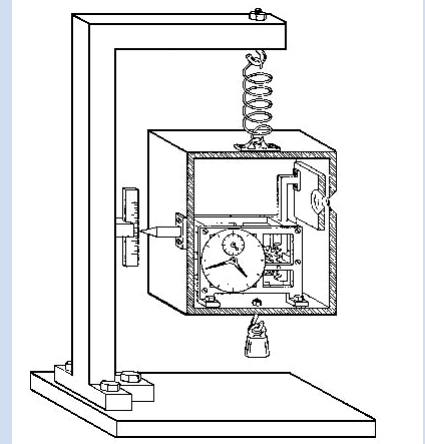
Enerji-zaman Belirsizliği

İçinde bir saat, yan duvarında da bir kapak bulunan kapalı bir kutu düşünelim. Saat kapağı yönetebiliyor ve arada bir açıp, Δt süreyle açık tuttukten sonra kapatıyor olsun. Δt aralığını dilediğimiz kadar küçülttüğümüzü varsayalım. O kadar ki, kapağın açık kaldığı sürede, kutudan dışarı sadece bir foton kaçabilin. Kapağın karşısında, dışarıda da bir foton algılayıcısı var. Algılayıcı ilk fotonu belirlediğinde deney sona erecek ve algılayıcı tarafından durdurulan saat, kapağı son kez açtığı anı gösterecek. Şimdi, eğer kutuyu deneyden önce tartmışsak, sonra da bir daha tartarsak; ağırlıklara karşılık gelen iki kütle arasındaki farkın c^2 ile çarpımı, bize fotonun enerjisini verir: $E=mc^2$. Odayı terkettiği anı da, sıfıra yakın bir Δt duyarlılığıyla bildiğimize göre; enerji ile zaman arasındaki $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ eşitsizliği şeklindeki belirsizlik ilkesi zedelenir.

Einstein'ın bu düşünce deneyi karşısında Bohr şaşkına uğramıştı. O gün bir açıklama bulamadı. Akşam katılımcıların birinden diğerine gidiyor ve "Einstein haklı olamaz" diyordu, "bu fiziğin sonu olur." Ertesi sabah yanıtını bulmuştu. Einstein'ın genel görelilik kuramının temel ilkesini oluşturan 'atalet kütle siyle kütleçekimsel kütlenin eşdeğerliliği'ni kullandı. Kutunun tartılabilmesi için bir yaya asılı olması; ayrıca yaya bağlı bir ibre ile, yanında bir ölçeğin de bulunması gerekiyordu. Kutuyu tartmak için, ibrenin konumunun belirlenmesi lazımdı. Kendisi zaten bir miktar

belirsizlik taşıyan bu işlem, yayla kutunun momentumunu da, keza bir miktar belirsizleştirirdi. Bu; kutunun kütesinin, dolayısıyla da fotonun enerjisinin tam olarak belirlenememesi anlamına geliyordu. Bohr bu aşamada, genel görelilik kuramına bir kez daha sırt verdi: Kutu aşağıya doğru inerse, artan yerçekimi saati yavaşlatır, yukarı çıkarsa hızlandırır. Zamanın da tam olarak saptanması mümkün değildi. Sonuç olarak, ΔE ile Δt 'nin çarpımı, eşitsizlik ilişkisini sağlar.

Bohr bu türden düşünce deneyi tartışmalarında, örneğin deney düzeneğinin kendisi gibi büyük ölçekli nesnelere de kuantum mekaniksel sistemler gözüyle bakılması gerektiğini vurgulamaya başladı. Çünkü ona göre; atomun küçük ölçekli dünyası hakkında bilgi edinmek, bizim için ancak dolaylı olarak mümkündü ve o dünyada yer alan olguların zayıf etkilerini algılayabilmek için, onları büyültmemiz ('amplification'), bunun için de araya büyük ölçekli deney düzeneklerini sokup, ikisini etkileştirmemiz gerekiyordu. Bu etkileşimin büyüklüğü en az kuantum birimi (\hbar) kadardı ve bu, örneğin bir elektron için çok büyük bir miktardı. Golf topuna sopa darbesi...



Bohr'un bu düşünceleri o kadar isabetliydi ki... Örneğin yerkağıtu ölçeğindeki dahil katı cisimler, sertliklerini, kuantum mekaniğinin temel kavramlarından birisi olan Pauli'nin dışlama ilkesinden kaynaklanan 'elektron basıncı'na borçlu. Gözlemi aktif bir eylem haline getiren de bu zaten; elindeki düzenekle birlikte bir kuantum sistemi oluşturan gözlemcinin eğilip gözlemlenenle etkileşmesi, onunla daha büyük bir 'dolanık' kuantum sistemi haline gelip davranışını etkilemesi, kaçınılmaz olmalı. O kadar ki, gözlemleyenin gözlemlenenin durumunu etkileyebilmesi için, onun yakınında bile olması gerekmiyor. Dolanıklık durumunda bulunan bir kuantum ikilisinin bileşenlerinden biri üzerinde yapılan gözlem, diğerinin durumunu, aralarında ışık yılları mesafe bulunsada dahi, anında belirliyor, yani etkiliyor. Einstein'ın, "uzaktan hortlak etkisi" olarak nitelendirdiği biçimde... Korktuğu başına geldi: Fizik yasaları hala yerel, ama etkileşmeler değil. Dolanıklık deneylerinden sonra böyle. Gerçi bu deneylerde bazı gedikler var ama, yenileri üzerinde çalışılıyor.

Prof. Dr. Vural Altın
Bilim ve Teknik Dergisi Yayın Kurulu Üyesi

Yenilendi!

BİLİM ve TEKNİK

Bilim ve Teknik Kulübü Bilim&Teknik Dükkanı Gökbilim Fotoğraf Oyunlar Sandık Odası

Kendimiz Yapalım
Elektronik bağınızı ürüne dönüştürmek ister misiniz? Sıkça sorulan sorular...
[tıklayın...](#)

HAYDI ÇEVİRİ

Kaç pound ağırlığında olduğunuzu merak ettiniz mi?
[tıklayın...](#)

Sınırsız Sayılar
On, yüz, bin, milyon, milyar, ya sonra??? Okunuşunu merak ettiğiniz sayıyı yazın, sizin için okuyalım.
[tıklayın...](#)

Psikoloj
Kendinizi tanımak mı istiyorsunuz? Fobiler, kompleksler - Psikolojik boyutlan ve kurtulma yolları Önlü kuramcılar Kendinizi geliştirme yolları

Sanal Sergi
BİLİM ve TEKNİK sizlerin ürettiği fotoğrafların sergileneneği **sanal fotoğraf sergileri** düzenliyor


Bilim İnsanları
Geçmiş ve günümüz Türk bilim insanları Tarih boyunca büyük kuramlar geliştirenler ve bilime katkı yapanlar...

Mesaj Panosu
İletmek istediğiniz kısa mesajları **Mesaj panosu** bölümümüzde bırakabilirsiniz.

Nerede Ne Var?
Üniversitelerin, kamu kurum ve kuruluşlarının, demek vakıf ve meslek odalarının düzenlediği etkinliklerden buradan izleyebilirsiniz.

Poster ve Kitapçıklar
Bilim ve Teknik Dergisi'nin eki olarak verilen Poster ve Kitapçıkların bilgisayarıza indirmek için [tıklayın...](#)

Teknotezgah
Ayağı yere basan, uygulanabilir yaratıcı fikirler için paylaşım köşesi...

TÜBİTAK BİLİM VE TEKNİK DERGİSİ 39 YILLIK BİLGİ HAZİNESİ DVD'Sİ KULLANIM KILAVUZU
TIKLAYINIZ !!

Türkiye'de Güneş Enerjisi
 Güneş enerjisi insanlığın düşlemini süslüyor. Henüz pahalı olmakla birlikte bu temiz enerjiye tüm dünyada büyük devlet destekleri sağlanıyor. Ülkemizde de değerli çalışmalara konu olan fotovoltaik teknolojisi...

ARŞİV DVD'Sİ ÇİN SON FIRSATI!
Sizlerden gelen yoğun talep üzerine, arşiv DVD'mizi Temmuz sayımızla yeniden veriyoruz. Son fırsatı kaçırmayın!!

Yeni Ufuklara Cilt-2 KİTAPÇILARDA!!

Formula '06

FOTOĞRAFLAR VE SONUÇLAR İÇİN TIKLAYIN...

Merak Ettikleriniz

- Çift sarı yumurtalardan çift civciv çıkar mı? (Tuğba Işık) [tıklayın...](#)
- Uçaklarda yıldırımdan korunma nasıl yapılıyor? (Ramazan Çakıroğlu) [tıklayın...](#)
- Bitkilerde cinsiyet belirleyen kromozomlar var mıdır? Varsa nasıl ifade edilir? (Pelin Bayram) [tıklayın...](#)

Bilim ve Teknoloji Haberleri

- İlaç Alırken Greyfurt Suyuna Dikkat
 Her derde deva greyfurtun, özellikle de tansiyonu kontrol altında tutan ya da kolesterol düzeylerini düşürücü bazı ilaçlarla birlikte alındığında istenmeyen etkiler ortaya çıkarabileceği, yaklaşık 9-10 yıldır biliniyor... [tıklayın...](#)

EN ÇOK MERAK EDİLENLER

- Boyum Nasıl Uzar? [Genel Görelilik Nedir? \(Einstein'in kütle çekimi kuramı\)](#)
- Sürünme Nedir? [Özel Görelilik Nedir? \(Einstein'in ışık ve zaman kuramı\)](#)
- Beynimizin yüzde kaçını kullanıyoruz? [Devri Daim makineleri neden çalışmaz?](#)

Bilgi Paketleri

Ders kitaplarında okuduğunuz zihninizde canlandıramıyorsanız Bu köşe sizler için...

Dünyamız	Üreme	Hücreye Yolculuk	Genler ve DNA
			
			
			

Renko
Fizik Deneysel ve Oyunları
Tıklayınız

Yeni Ufuklara Cilt-2 KİTAPÇILARDA!!

BİLİM ve TEKNİK
Kullanıcı Adı
Şifre
Bağlan

Arşivi Gez
Abone Ol

Etkinlikler & Şenlikler

Formula  2006
Heyecan devam ediyor!!

Gökyüzü Gözlem Şenliği

TÜBİTAK BİLİM KAMPİ

Başvurular devam ediyor!!

Biyoloji-Genetik-Tıp-Veterinerlik Projeleri