

KUVANTUM DÜNYASI GERÇEK MİDİR?

Derleyen : **Dr.Hanasi GÜR**

- **Einstein, fiziksel sistemlerin kuvantum mekaniğin anlatımlarının tam olmadığına inanıyordu. Ancak deneyler, onun yanlış olduğunu gösteriyor; artık kuvantum dünyasının tuhaf doğasını benimsememiz gerekiyor.**

KUVANTUM DÜNYASI

Günümüzde deneysel sonuçlar, bilim dünyasına yeni filozofik sorular getiriyor. Özellikle kuvantum mekaniği alanında, başka alanlarda göremeyeceğimiz çarpıcı deney sonuçları ile karşılaşılıyor. Kuvantum mekaniği kuramı, 1920'lerden beri atom, molekül, çekirdek (nükleer), optik, katıhal ve temel parçacık olayları ile ilgili öngörülerin doğruluğu kanıtlandıkça, yankılar yaparak sağlamlaşıyor. Bu başarılarına karşın, kuvantum mekaniğinin acayip ve sezgi-karşıt niteliği geçmişte Einstein da aralarında olmak üzere kimi bilim adamlarını fiziksel sistemlerin kuvantum mekaniğin anlatımının tam olmadığına ve eklemelerle tamamlanması gerektiğine inanmaya zorluyor. Ancak son deneyler, bu görüşün, büyük ihtimalle yanlış olduğunu gösteriyor. Deneysel sonuçlar, kolay ve sağduyulu yorumlara karşı çıkan acayip bir "kuvantum dünyası"nda yaşadığımızı her zamankinden açık biçimde bildiriyor.

Kuvantum dünyasında, benimsemeye başlamamız gereken birkaç yeni ve enteresan buluş var; ilki, birbirlerinden metrelerce uzakta bulunan ve birbirleriyle hiç iletişim imkânı bulunmayan iki varlığın bile, davranışlarında çarpıcı ilişki (*correlation*) ler göstererek, birbirlerini etkileyebildikleri'dir; öyleki, bunlardan biri üzerinde yapılan bir ölçümün, hemen, öbürü üzerinde yapılanın sonucunu etkilediği görülür. Bu buluş, klasik görüş açısı ile açıklanamaz; ama kuvantum mekaniğine tam olarak uyar. İkincisi, ışığın temel birimi olan fotonun, ya *parçacık gibi* ya da *dalga gibi* davrandığıdır: Bir ölçüm yapılmadıkça, fotonun hangi davranışta olduğu bilinemez; *parçacık türü* bir özellik ölçülürse parçacık gibi ve *dalga türü* bir özellik ölçülürse dalga gibi davranır. Deneysel düzener belirleninceye dek, fotonun parçacık gibi mi, dalga gibi mi olduğu belirsizdir. Acayip buluşların sonucusu ise, *belirsizlik kavramının, artık, atom ve ato-*

malıt boyutlarla sınırlı olmadığıdır: Araştırmacılar, makroskopik bir sistemin de kimi koşullarda, makroskopik gözlenebilirlerinin değerlerinin belirsiz olduğu bir durumda bulunabileceğini bulmuşlardır. Bu bulguların her birinin, dünyayı algılama alışkanlığımızı değiştireceği kesindir.

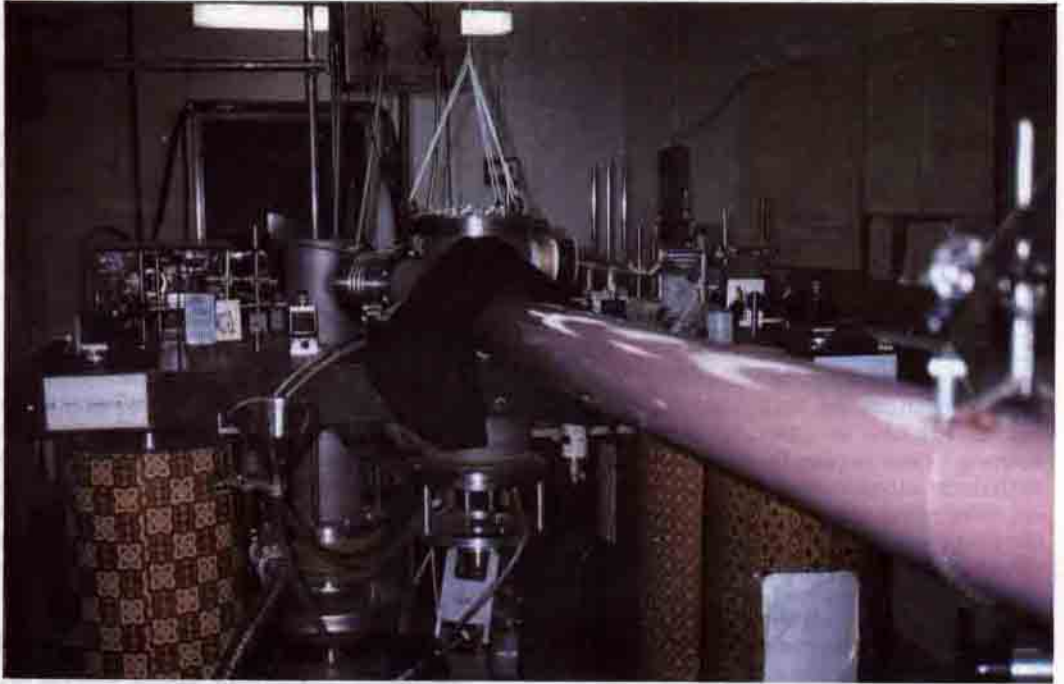
KUVANTUM MEKANIĞININ TEMEL DÜŞÜNCELERİ

Bu yeni tür deneylerin ve filozofik içermelerinin anlaşılması, kuvantum mekaniğinin temel düşüncelerini biraz tanımamızı gerektiriyor. Kuvantum mekaniği kuramını tartışırken kullanılan başlıca kavram, *kuvantum durumu* ya da *dalga fonksiyonudur*. Kuvantum durumu, bir fiziksel sistemi *olabildiğince geniş kapsamlı* olarak belirleyen tüm nicelikleri bir araya toplar. *Kuvantum mekaniğine göre, bir sistemin tüm nicelikleri aynı anda belirlenemeyeceği için, az önceki uyarımız çok önemlidir. Bir parçacığın konum ve momentumunun aynı anda belirlenemeyeceğini söyleyen Heisenberg belirsizlik ilkesi en iyi bilinen örnektir.*

Bir sistemin kuvantum durumu, yalnızca, bu sistem üzerinde yapılabilen her deneyin meydana gelecek her bir sonucunun olasılığını verir. Bu olasılık 1 ise, o sonucun ortaya çıkacağı; 0 ise, ortaya çıkmayacağı kesindir. Oysa, bu olasılık 0 ile 1 arasında bir sayı ise, bir tek deneyin sonucunun ne olacağı söylenemez. Söylenebilecek olan, *eşdeğer çok sayıda sistemin her biri üzerinde yapılacak belli bir deneyin ortaya çıkabilecek sonuçlarının ortalama sayısıdır.*

Örnek olarak, bir foton üzerinde yapılabilecek ölçümleri düşünelim. Fotonun doğrultusu, frekansı ve çizgisel kutuplanması (fotona eşlenmiş elektrik alanının doğrultusu) gibi üç nicelik biliniyorsa, fotonun kuvantum durumu saptanmış olur. Kutuplanmayı ölçmek için uygun bir geçiş bir *kutuplayıcı film yaprağıdır* (Kısaca, *kutuplayıcı* diyeceğiz). Bu ideal filmin, üzerine dik açı ile gelen ve filmdeki *geçirme eksenine* deneni belli bir doğrultu boyunca kutuplanmış ışığı tümüyle geçirdiği düşünülür. Bu filmin, üzerine yine dik açı ile gelen, ancak geçirme eksenine dik olarak kutuplanmış ışığı ise hiç geçirmedeği düşünülür.

Kutuplayıcıyı çeşitli biçimlerde döndürerek çeşitli deneyler yapılabilir. Foton, geçirme eksenine boyunca çizgisel kutuplanmış ise, geçirilme olasılığı 1'dir. Foton, geçirme eksenine göre dik olarak çizgisel kutuplanmış ise, geçirilme olasılığı 0'dır. Oysa fotonun, geçirme eksenine göre herhangi bir açı yaparak çizgisel kutuplanmış olması durumunda, geçirilme olasılığı 0 ile 1 arasında bir sayı (bu özel açının kosinüsünün karesi) olacaktır. Bu olasılık 1/2 ise, geçiş eksenine göre uygun açı ile çizgisel kutuplanmış 100 fotondan ortalama 50'si geçirilmiş olacaktır.



Bugünkü DENEYSEL SINAMALAR, eskiden filozofik tartışmalar alanından öteye geçemeyen kuantum mekaniği konularını aydınlatıyor. Paris Üniversitesi Optik Enstitüsü'nde yapılan bir deneyde, fotoğrafta görülen lazerler boşluk odasındaki (ortada) kalsiyum atomlarını tek tek uyarıyorlar. Her atom, bir foton çifti yayınlarken, kendi uyarılmamış durumuna dönüyor (Foton, ışığın temel birimidir). 6,5 m'lik bir boru boyunca karşıt doğrultularda giden fotonlardan kutuplayıcı filmlerden geçerken fotoanalizlere ulaşıyorlar. Kuantum mekaniği, aynı kaynaktan çıkarak karşıt doğrultularda giden fotonların kutuplanmaları arasında ince ilişkiler bulunabileceğini öngörüyor. Bu ilişkiler, gizli-değişkenler modelleri denen klasik kuramlarla çelişiyor. Ancak, deneyler kuantum mekaniğini doğruluyor.

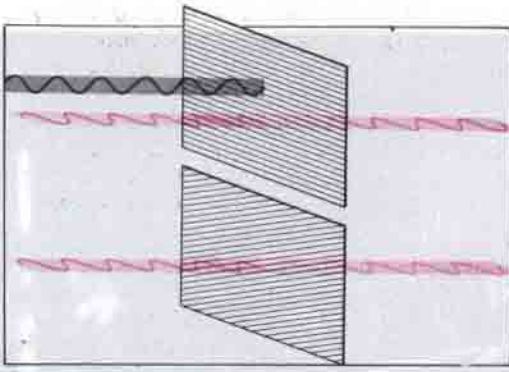
Kuantum mekaniğinin başka bir temel düşüncesi üstüstegelme ilkesidir; bu ilkeye göre, bir sistemin iki kuantum durumundan, bunların üstüstegetirilmesi ile, sistemin başka kuantum durumları kurulabilir. Bu işlem, fiziksel olarak, kurulduğu durumların her biri ile örtüşen yeni bir durum oluşturmak demektir. Bu kavram, bir fotonun, kutuplanma doğrultuları birbirine dik iki kuantum durumunu gözönüne alarak açıklanabilir: Kutuplanma doğrultusunun, bu iki dik doğrultu arasında bir açı ile belirlendiği, herhangi sayıda durum oluşturulabilir.

Yalnız bu iki temel düşünce (belirsizlik ve üstüstegelme ilkesi) ile, şimdiden, kuantum mekaniğinin sağduyu ile çelişeceği kesindir. Bu sistemin kuantum durumu, sistemin tam bir anlatımını veriyorsa, bu kuantum durumundaki değeri belirsiz olan bir nicelik nesnel olarak belirsizdir; yani onun değeri, yalnızca sistemin anlatımını yapmaya çalışan bilim adamı için değil, herkes için belirsizdir. Ayrıca, nesnel olarak belirsiz bir niceliğin bir ölçümünün sonucu, kuantum durumu ile belirlenemediğinden ve kuantum durumu şimdilik, sistemle ilgili bilgilerimizin tümünü kapsadığından, bu ölçümün sonucu tam an-

lamıyla bir nesnel şans sorunudur; yani bilim adamınca öngörülebilen bir şanstır. Sonuç olarak, ölçümün olabilir her sonucunun olasılığı bir nesnel olasılıktır. Oysa klasik fizik, bu temel noktalarda sağduyu ile çelişmez.

Kuantum mekaniğinde, sistem ilişkili (correlated) iki parçadan oluşuyorsa, daha da şaşırtıcı içermeler bile ortaya çıkar. Aynı kaynaktan çıkan iki fotonun karşıt doğrultularda birbirlerinden uzaklaştığını varsayalım. Bu foton, çiftinin olabilir bir kuantum durumunu, iki fotonun da bir dikey eksen boyunca çizgisel kutuplanmış olduğu durumdur. Buradaki iki-fotonun her birinin kuantum durumlarında da, yukarıda açıkladığımız tek-foton kuantum durumlarındakilerden başka tuhaflıklar yoktur. Ancak, üstüstegelme ilkesi gözönüne alınırsa, acayip sonuçlar oluşabilir.

Üstüstegelme ilkesini kullanarak, dikey ve yatay kutuplanmış durumları eşit miktarlarda kapsayan özel bir kuantum durumu kurabiliriz. Aşağıda sık sık karşılaşacağımız bu yeni durumu, Ψ ile gösterebiliriz (Bir kuantum durumunu göstermek için, genellikle Yunan alfabesindeki "psi" harfi kullanılır). Ψ 'in



Bir kuantum sisteminin **BELİRSİZLİĞİNİ**, bir foton üzerinde açıklayalım: Bi kutuplayıcı film yaprağı, kendi üzerine dik açı ile düşen ve filmdeki belli bir doğrultu (çizgilerle taranmış) boyunca çizgisel kutuplanmış ışığı tümüyle geçirir. Fotonun bu kutuplanma durumu, üstte dalgalı renkli çizgi ile gösterilmiştir. Bu film, kendi üzerine yine dik açı ile düşen, ama geçirme eksenine dik olarak çizgisel kutuplanmış ışığı (üstteki dalgalı gri çizgi) ise tümüyle tutar. Şimdi de, bir fotonun, geçirme eksenine göre 0° ve 90° arasında bir açı yaparak çizgisel kutuplanmış olduğunu varsayalım (altta). Bu fotonun geçirilip geçirilmeyeceği belirsizdir; geçirilme olasılığı 0 ve 1 arasında bir sayıdır (Kutuplanma açısının kosinüsünün karesi).

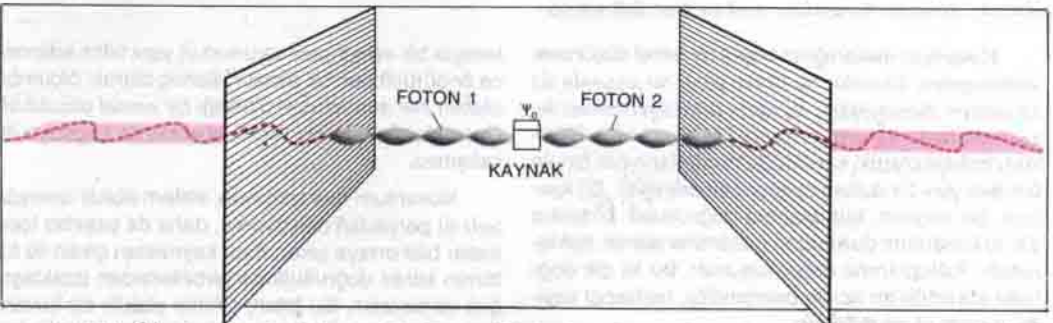
özellikleri gerçekten son derece tuhaftır. Örneğin, fotonların yolları üzerine, her birinin eksenini dikey olarak yönelmiş birer kutuplayıcı koyduğumuzu düşünelim. Ψ , dikey ve yatay kutuplanmış durumları eşit miktarlarda kapsadığından, iki fotonun *birlikte olarak* kendi yolları üzerindeki kutuplayıcılardan geçirme olasılıkları $1/2$ 'dir; *birlikte olarak* tutulma olasılıkları da $1/2$ 'dir. Fotonlardan birinin geçirilip, öbürünün tutulacağı bir sonuç neden oluşamaz? Başka deyişle, bu iki-foton üzerindeki çizgisel kutuplanma deneyinin sonuçları birbirleriyle sıkı sıkıya ilişkili (*correlated*) midir?

Kutuplayıcı filmler yatayla 45° 'lik bir açı yapacak biçimde yönelmişlerse, sonuçlar yine aynı olacaktır: *Ya iki foton da geçirilecek, ya da ikisi de tutulacaktır*. Fotonlardan birinin geçirilip, öbürünün tutulduğu bir sonuç oluşamayacaktır. Aslında, kutuplayıcıların yönelişleri ne olursa olsun, çizgisel kutuplanma deneylerinin sonuçları yine birbirleriyle sıkı sıkıya ilişkili olur.

Her nasılsa, bu iki foton birbirlerinden iyice ayrılmış olsalar ve ikisine de birbirlerinin davranışlarını bildiren bir işleyiş bulunmasa bile, çiftin ikinci fotonu, birincisinin nasıl geçtiğine uymak üzere kendi kutuplayıcısından nasıl geçeceğini "bilir". Kuantum mekaniği, böyle durumlarda, *bir görelilik fiziği kavramı* olan ve bir olayın etkilerinin ışık hızından daha hızlı yayılamayacağını söyleyen *yerellik kavramı* ile çelişir.

KUVANTUM MEKANİĞİNİN İRDELENMESİ

Bir noktayı yeniden vurgulayalım: Şimdiye dek açıklamaya çalıştığımız acayip içermelerin tümü (nesnel belirsizlik, nesnel şans, nesnel olasılık ve yerel olmama) bir sistemin kuantum durumunun o sistemin tam bir anlatımını sağlamadığı varsayımına dayanır. Ama kimi kuramcılar, kuantum durumunun, yalnızca özel olarak hazırlanmış bir eşdeğer sistemler topluluğunu anlatabildiğini ve bu nedenle bu top-



Özel bir Ψ durumunda bulunan bir foton çiftinin fotonlarının kutuplanmaları arasında sıkı İLİŞKİLER bulunur. Bu durumu, çiftin iki fotonunun da bir dikey eksen boyunca çizgisel kutuplanmış olduğu bir durumu, ikisinin de bir yatay eksen boyunca çizgisel kutuplanmış olduğu başka bir durum ile üstüste getirerek kurulabilir. Durumunda, eşit miktarlarda düşey ve yatay kutuplanmış durum vardır. Şimdi, geçirme eksenleri yatay yönelmiş kutuplayıcıların, fotonların yolları üzerine konulduğunu düşünelim. Ψ 'de iki durumdan da eşit miktarlarda bulunduğundan, iki fotonun birlikte olarak kendi kutuplayıcılarından geçirme olasılığı yüzde 50'dir; benzer olarak, iki fotonun birlikte olarak tutulma olasılığı da yüzde 50'dir. Deneyde, fotonlardan birinin geçirilip, öbürünün geçirilmediği bir sonuç neden ortaya çıkamaz? Çünkü, aynı kaynaktan çıkan fotonlar üzerindeki çizgisel kutuplanma deneylerinin sonuçları birbirleriyle sıkı sıkıya ilişkili (*correlated*) dir. Gerçekten, kutuplayıcıların yönelişleri ne olursa olsun, bu foton çiftinin fotonları üzerindeki çizgisel kutuplanma deneylerinin sonuçları birbirleriyle sıkı sıkıya ilişkilidir. Her nasılsa, bu iki foton birbirlerinden iyice ayrılmış olsalar bile, çiftin ikinci fotonu, birincisinin nasıl geçtiğine uymak üzere, kendi kutuplayıcısından nasıl geçeceğini "bilir".

luluğun sistemleri üzerinde yapılan aynı bir deneyin istatistiksel sonuçlarının iyi öngörülebildiğini savunurlar. Ayrıca bu tartışmaya göre, topluluğun sistemleri, kuvantum durumunda verilemeyen kimi özellikler yüzünden birbirlerinden farklı davranabilirler; bu nedenle, tek tek deneylerin sonuçları birbirlerinden farklı olabilir. Topluluğun sistemlerinin, kuvantum durumunda belirlenemeyen özelliklerine *gizli değişkenler* denir.

Gizli değişkenler kuramcıları haklı iseler, nesnel belirsizlik yoktur. Yalnızca, bilim adamının, tek bir sistemle ilgili gizli-değişkenlerin değerlerini bilmemesi söz konusudur. Ayrıca, nesnel şans da, nesnel olasılıklar da yoktur. Daha da önemlisi, birbirlerinden iyice ayrılmış sistemlerin kuvantum ilişkileri de artık şaşırtıcı değildir (Aynı basımevinde basılmış, ama farklı kentlere gönderilmiş iki gazeteyi düşünün).

1964'de, Avrupa parçacık fiziği laboratuvarı CERN'de çalışan John S. Bell, yerel gizli-değişkenler modelleri öngörülerinin kuvantum mekaniği öngörülerine uyumunu göstermiştir. Bell, David Bohm'ün ve Louis de Broglie'nin düşüncelerinden de yararlanarak şu önemli teoremi kanıtlamıştır: *Yerel olan hiçbir model, kuvantum mekaniğinin hiçbir istatistiksel öngörüsü ile uyumamaz. Yerellik koşulu, örneğin bizim yukarıda anlattığımız foton çifti deneyindeki her fotona eşlenen niceliklerin, öbür fotonun yolu üzerindeki kutuplayıcının yönelişinden ve diğer fotonun kutuplayıcıdan nasıl geçtiğinden bağımsız olmasını gerektirir. İşte bu yerellik koşulu, Ψ 'daki ilişkilerin yeniden oluşturulabilmesi için gereken ince ayarlamayı imkânsızlaştırır.*

Bell teoremi, ilke olarak, kuvantum mekaniğinin mi, yoksa yerel gizli-değişkenler modellerinin mi doğru olduğunun deneyle belirlenebileceğini gösterir. Bell'in teoremi kanıtladığı sıralarda, kuvantum me-

kaniğini doğrulayan pek çok kanıt olmasına karşın, kuvantum mekaniğinin sağduyu ile uzlaştırılmadığı kuşkuyla birçok nokta henüz incelenmemiş olduğu için, incelikli deneylerin yapılması önemlidir. Bu deneylerin çoğu, kuvantum mekaniğinin karşılıklı ilişkiler öngörülerine uyumunu, oysa gizli-değişkenler modelleri ile uyummayan sonuçlar vermiştir. Çekişmeli deneylerin güvenilirliği ise, tasarımlarındaki ince kusurlar yüzünden kuşkuludur.

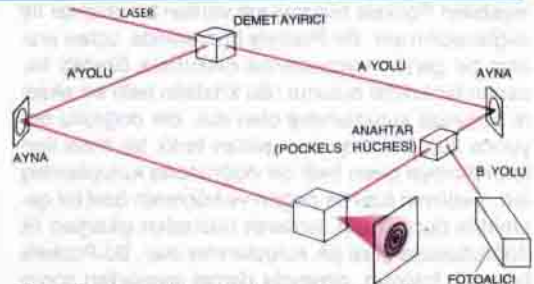
Gelecekteki deneylerin de, kuvantum mekaniği ile çelişen sonuçlar vereceği pek beklenemez; yerel gizli-değişkenler modellerinin kurtarılabilmeye şansı yok gibidir. Kuvantum dünyasının tuhaf özelliklerinin (nesnel belirsizlik, nesnel şans, nesnel olasılık ve yerel olmama), fiziksel kuramdaki yerlerinin gitgide sağlamlaştığı görülüyor.

Yeniden, kuvantum dünyasının tuhaf özelliklerinden biri olan yerel olmamaya dönelim. Yukarıda anlatmaya çalıştığımız foton çifti deneyinde, fotonlardan biri üzerinde yapılan bir ölçümün öbürü üzerindeki etkilemesinden yararlanarak, ışık hızından daha hızlı haber gönderilebilir mi? Özel görelilik kuramına göre, hiçbir işaret ışıktan daha hızlı gidemez. Öte yandan fotonlar arasındaki kuvantum ilişkileri de, ancak fotonların, iki fotoalıcıda toplanan verilerinin çözümlenmesiyle karşılaştırılabileceği için, ışıktan daha hızlı haber iletilmesi başlanamaz. Böylece, *kuvantum mekaniği ve görelilik kuramı birbirleri ile çelişmeden varlıklarını bir arada sürdürebilirler:*

KUVANTUM DÜNYASINDAN BAŞKA İLGİNÇ DENEYLER

(1) 1978'de, o zamanlar Princeton Üniversitesi'nde çalışan John Archibald Wheeler'ın önerdiği, gecikmeli-seçim adı verilen bir başka deney de kuvantum dünyasının tuhaflığını gösterir. Bu deneyin temel aleti, bir ışık demetini ikiye ayırabilen ve sonra

GEÇİKMELİ-SEÇİM DENEYİ, *kuvantum dünyasının tuhaflığını ortaya çıkaran başka bir deneydir. Girişimölçerdeki fotonla ilgili olarak iki soru sorulabilir. Foton, demet ayırıcıya ya geçirilmek ya da yansımak üzere belli bir yol mu tutar; dolayısıyla, parçacık türü bir özellik mi gösterir? Yoksa foton, kendi kendisiyle girişim yapmak üzere, hem geçirilip hem yansır mı; dolayısıyla, dalga türü bir özellik mi gösterir? Bu sorulara cevap verebilmek için, fotonun, demet ayırıcı ile etkileşmesinden sonra tutabileceği iki yoldan biri üzerine bir anahtar konulur (A yolu). Anahtar açıkça, ışık sapırılarak bir fotoalıcıya gelir (B yolu); dolayısıyla, hangi yol sorusuna cevap verilerek, fotonun parçacık özelliği doğrulanır. Anahtar kapalıysa, foton kendi kendisiyle girişim yapabilir (A ve A' yolları) ve fotonun dalga özelliklerini gösteren bir girişim deseni oluşur. Deney sonuçlarına göre, dalga özellikleri ölçüldüğü zaman, foton dalga gibi; parçacık özellikleri ölçüldüğü zaman, parçacık gibi davranır.*



Önemli olan nokta, anahtarın, fotonun demet ayırıcı ile etkileşmesinden sonra işlevli olup olmadığıdır; böylece foton, belli bir yol tutarak parçacık gibi mi, yoksa aynı anda iki yol boyunca da ilerleyerek dalga gibi mi davranacağı konusunda "bilgilendirilmiş" olamaz (Eskiden, 1973-1982 yılları arasında, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğrenci Laboratuvarları'nda laser ışınları ile, fotonlar üzerinde çeşitli kuantum ve girişim deneyleri yapıyordu).

yeniden birleştirebilen bir girişimölçerdir. Bir laserden gelen bir ışık atması (pulsu), ışığın yarısını geçiren, yansını da geliş doğrultusuna dik olarak yansıtan bir demet ayırıcıya düşürülür. Sonra, bu iki yoldan gelen ışık demetleri yeniden birleştirilirse, ışığın dalga niteliğini gösteren bir girişim deseni elde edilebilir.

Şimdi, laser ışığı atmasının öyle zayıflatıldığını varsayalım ki, herhangi bir anda girişimölçerde yalnızca bir foton bulunsun. Bu durumda, fotonla ilgili iki farklı soru sorulabilir: Foton, demet ayırıcıdan ya geçecek ya da yansiyacak biçimde *belli bir yol* mu izleyecektir; dolayısıyla, *parçacık türü bir özellik* mi gösterecektir? Yoksa foton, hem geçirilip hem yansiyarak, kendi kendisi ile girişim mi yapacaktır; dolayısıyla, *dalga türü bir özellik* mi gösterecektir?

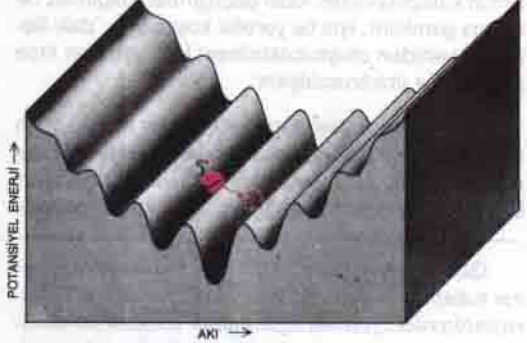
Biri Maryland Üniversitesi'nden, öbürü Münih Üniversitesi'nden iki araştırmacı grubu, birbirlerinden bağımsız olarak şu cevabı bulmuşlardır: *Deneyde, parçacık türü özellikler ölçüldüğü zaman, foton, bir parçacık gibi, dalga türü özellikler ölçüldüğü zaman da bir dalga gibi davranır.* Deneydeki çarpıcı yenilik şuydu: Deney, her fotonun demet ayırıcı ile etkileşmesinden sonra, parçacık türü özellikler mi, yoksa dalga türü özellikler mi ölçülmesi istendiğine göre düzenleniyordu. Sonuç olarak, foton, demet ayırıcı ile etkileştiği, deneyimizin can alıcı noktasını oluşturan anda, bir parçacık gibi davranarak belli bir yol mu tutacağı, yoksa bir dalga gibi davranarak iki yol boyunca da mı ilerleyeceği konusunda "bilgilendirilmiş" olmayacaktı.

Girişimölçerdeki iki yolun da uzunluğu, yaklaşık 4,3 m idi ve bir foton bu yolu yaklaşık 14,5 nanosaniyede (1 nonosaniye = 10^{-9} saniye) alabilirdi. Bu ise, parçacık türü mü yoksa dalga türü mü özellikler ölçüleceğini ayıracak basit bir mekanik düzenek için yeterli bir zaman değildi. Bu ayırmadaki başarı, 9 nanosaniye ya da daha kısa zaman aralığında işleyebilen Pockels hücresi adı verilen bir anahtar ile sağlanabilmiştir. Bir Pockels hücresinde, uçları arasına bir gerilim uygulanınca çiftkırıcılık özelliği kazanan bir kristal bulunur. Bu kristalin belli bir eksenini boyunca kutuplanmış olan ışık, dik doğrultu boyunca kutuplanmış olan ışıktan farklı bir hızla ilerler. Hücreye giren belli bir doğrultuda kutuplanmış ışık, gerilimin özel bir değeri ve hücrenin özel bir geometrik duruşu için, kırılarak hücreden çıkarken ilk doğrultusuna göre dik kutuplanmış olur. Bu Pockels hücresi, fotonun, deneyde demet ayırıcıdan sonra gidebileceği iki yoldan biri üzerine yerleştirilir.

Parçacık türü mü, dalga türü mü özellikler ölçüleceğini ayırmak için gereken başka bir gereç de bir kutuplayıcıdır. Pockels hücresinden kırılarak çıkan ışık, bu kutuplayıcıya düşürülür. Hücre çalışıyorsa ve ışığın kutuplanması da uygunsa, kutuplayıcıdan çıkan ışık bir fotoalciya gelir; böylece *hangi yol* sorusuna cevap vererek, fotonun parçacık özellik-



Bir MAKROSKOPİK SİSTEM de, kimi koşullarda, bir makroskopik değişkeninin değerinin belirsiz olduğu bir durumda bulunabilir. Şekilde görülen sistem, kendi üzerine tam kapanmamış bir süperiletken halkayı gösteriyor. İnce bir yalıtkan madde dilimi, halkanın iki ucunu birbirinden ayırıyor. Yalıtkan içinde oluşan "tünel olayı" yardımı ile, halka içinde bir elektrik akımı dolaşır. Bu akım bir manyetik alan üretir (Halka düzlemine göre simetrik, gri renkli kesik koniler bu manyetik alanı gösteriyor). Halka sürekli olsaydı, halkadan geçen manyetik akı sabit bir değerde tutulurdu; ama aradaki yalıtkan, akımın bir değerden bir başkasına değişmesini sağlar. Böylece, akımın belirli tek bir değeri yoktur.



Süperiletken halka sistemindeki BELİRSİZLİĞİ, çizimle açıklayalım. Süperiletken halkanın yüzeyinden geçen akımın her değerine belli bir potansiyel enerji karşılık gelir. Akımın komşu değerleri, bir potansiyel engeli ile birbirlerinden ayrılmış olduğu için, halkadan geçen akımın bir değerden öbürüne kendiliğinden geçmesi beklenemez. Potansiyel engelleri tepeler olarak; sistemin içinde bulunduğu durum ise, bu tepeler arasındaki bir vadide bulunan bir top olarak düşünülebilir. Klasik fiziğe göre, bir engel ile ayrılmış iki değer arasındaki geçiş bir dış enerji gerektirir (topu tepe üzerinden atlamak için). Oysa kuantum mekaniksel olarak, engel, bir dış enerji kaynağı olmadan da, tünel olayı ile geçilebilir. Tünel olayı, akımın belirsizliğinin temel nedenidir.

Antimadde (Karşıtmadde)

Maddenin temelini oluşturan çok sayıdaki elementer parçacıkların her birinin bir karşıtı vardır. Hatta o temel parçacıklar oluşurken karşıtları ya da eşleri ile birlikte oluşurlar. Örneğin elektron (negatron)-pozitron, proton-antiproton, nötron-antinötron birbirlerinin eşleri veya karşıtlarıdır. Bu karşıt parçacıkların da mevcudiyeti ve her parçacık çiftinin birlikte oluşumu deneysel olarak gerçekleştirilmiş, bu konudaki teoriler doğrulanmıştır.

Antimaddenin de bulunabileceği hakkındaki ilk teori kuantum mekaniğinin babası sayılan Paul Dirac tarafından 1928 yılında ortaya atılmıştır. Dirac'ın bu teorisi, Carl Andersen tarafından 1932 yılında antielektronun (pozitronun) bulunması ile kısmen de olsa doğrulanmıştır.

Nasıl ki enerji, elektrik yükü gibi bazı fiziksel kavramlara "pozitif" veya "negatif" gibi sıfatlandırılmalar yapılabiliyorsa; kütle için de "madde" "antimadde" adlandırmaları vardır. Bilindiği gibi, Einstein'ın meşhur,

$$\text{Kütle (madde)} = \frac{\text{Enerji}}{c^2}$$

formülünden maddesel kütle bulunur. Buna benzer şekilde antimaddenin de

$$\text{Antimadde} = \frac{\text{Antienerji}}{c^2}$$

lerini doğrular. Hücre çalışmıyorsa, ışık olduğu gibi geçerek öbür yoldan gelen katkı ile birleşir; gözlenecek olan *girişim olayları* ise, fotonun dalga özelliklerini doğrular.

İki araştırmacı grubu da, sonuçların kuantum mekaniği ile kusursuz bir uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. Hangi özelliğin geçerli olduğu, tek bir fotonun girişimölçerde incelenmesi ile anlaşılabilir.

Gecikmeli-seçim deneyinin sonuçları nasıl yorumlanacaktır? Öncelikle, arasına ileri sürülen ve kuantum mekaniğinin "geçmişe uzanabildiği"ni söyleyen abartmalı yorumdan vazgeçmek gerekir. Kuantum mekaniği, örneğin gecikmeli-seçim deneyinde, 12 nanosaniye sonra Pockels hücresi çalıştırılacaksa, fotonun, demet ayırıcı ile etkileştiği $t = 0$ anında belli bir yoldan tutmasına neden olamaz; benzer ola-

formülünden bulunması beklenir. Burada hemen belirtilmesi gereken husus, antimadde, ya da antienerji gibi karşıt kavramların, miktar olarak eşleri ile aynı fakat diğer bütün fiziksel özellikleri itibarıyla zıddı birer oluşumlar olduklarıdır. Madde ile antimaddenin ya da enerji ile antienerjinin birleşmesi durumunda elde birşey kalmayacağı öngörülmektedir.

Evren, "Big Bang" patlaması ile oluşurken madde ve antimadde hemzaman olarak eşit miktarlarda oluşurlarsa bunlardan bir kısmının birleşerek birbirlerini yok ettikleri, geriye kalanların birbirlerinden uzaklarda olmaları nedeniyle yokolmaları düşünülmekte ve bizlerin "madde bölgesinde" olduğumuz varsayılmaktadır. Bu teoriye göre uzayın derinliklerinde bir yerde "antimadde bölgesinin" olabileceği düşünülmektedir. Başka bir varsayım da "Big Bang" patlamasında, maddenin, antimaddeden daha çok oluşmuş olabileceği, az oluşan antimaddenin çok oluşan maddenin bir kısmı ile birleşip yok olmuş olabileceği ve geriye bizlerin içinde bulunduğu "artık madde bölgesinin" kaldığı da sanılmaktadır.

Sonuç olarak, antimadde, madde gibi çevremizde bulunmadığı için, onu göremiyor, dokunamıyor, tadamıyor yani gözlemsel olarak henüz "tanımlıyoruz". Ancak fizik teorileri de böyle bir kavramın olabileceğini öngörmektedir. Bu durum sanki, Mendelyef'in elementlerin periyodik tablosunu doldururken; özelliklerini, atom numarasını, bildiği halde adını ve kendisini bilemediği, tanımadığı için, tabloda yerini boş bıraktığı elementlerde olduğu gibidir. Bilindiği gibi sonradan bu elementler keşfedilmiş ve simgeleri tablodaki yerlerine konmuştur. Belki birgün insanoğlu antimaddeyi de keşfeder, bulur ve kullanır. Bu konuda araştırmalar vardır.

rak, hücre çalıştırılmayacaksa, fotonun, her iki yolda birden ilerlemesine de neden olamaz.

Daha doğal bir yoruma göre, girişimölçerdeki fotonun nesnel durumu birçok özelliği belirsiz bırakır. Kuantum durumunun, fotonla ilgili tüm bilgileri kapsamasına karşın, her kuantum durumunda belirsiz özellikler bulunduğu için, bu sonuç şaşırtıcı değildir. Ama başka bir soru ortaya çıkar: *Belirsiz bir özellik, nasıl ve ne zaman belirli hale gelir? Wheeler'in cevabına göre, "Hiçbir temel kuantum olayı, kaydedilmiş bir olay oluncaya dek gerçek bir olay değildir".* Başka deyişle, belirsizlikten belirliliğe geçiş fotoğraf eriyiğindeki bir taneciğin kararması gibi, "tersinmez bir büyüme etkisi" oluşmadıkça tam değildir.

(2) Birkaç araştırma grubunun üzerinde çalıştığı bir başka deneyde ise, kendi üzerine tam kapan-

SİNİR TELLERİNİ İZLEYEN VİRÜS

Cambridge Üniversitesi'nden bazı sinir bilimciler vücudun değişik kısımlarından beyne giden sinir liflerini görüntüleyebilmek için yeni bir teknik kullandılar.

Gabriella Ugolini, Hannicus Kuypers ve Peter Strick bu yeni teknikte sinir yollarını görüntüleyebilmek için Herpes Simplex 1 (cold sore virus) virüsünü kullandılar. Fare sinirlerine canlı olarak ön dirsek üzerinden enjekte edilen virüs, bir sinir hücresinden diğerine geçerek 4 günde beyne ulaştı.

Bugüne kadar, sinir bilimciler, merkezi sinir

sistemindeki karışık ve anlaşılması güç sinir ağlarını görüntüleyebilmek için bazı boya teknikleri kullanmışlardı; fakat bu teknik, tam bir sonuç vermiyordu. Çünkü boya, sinir telleri boyunca ilerledikçe konsantrasyonu düşüyordu. Dolayısıyla "cold sore virus" tekniği bu alanda atılan çok büyük bir adımdır. Bu teknikte, virüsler sinir telleri içerisinde üreyerek ilerlemekte ve sinirlerin en uç noktalarına kadar rahatça ulaşmaktadırlar.

Gabriella Ugolini bu teknik hakkında şöyle diyor: "Bu teknik çok değerli bir gelişmedir; çünkü ilk defa, bir kimse, beynini ve diğer organlarındaki sinirleri bağlayan karmaşık sinir ağları sistemini rahatça görebilecektir."

New Scientist'den çev.: Can ERGİN

mamış bir SÜPERİLETKEN HALKA vardır. *Josephson eklemi* denen ince bir yalıtkan madde diliminin, halkanın kendi üzerine kapanmasını engellemesine karşın, yalıtkan madde dilimi üzerinde oluşan *temel olayı* yardımcı ile, halkada bir elektrik akımı dolaşır. Bu akım, bir manyetik alan oluşturur.

Bu sistemdeki ilginç nicelik, halkadan geçen *manyetik akıdır*. Bu akı, manyetik alanın halka düzlemine dik bileşeninin halka yüzeyi üzerinden yüzey integraline eşittir. Halka kendi üzerine tam kapanıyorsa, akı sabit bir değerde tutulacaktı; ama aradaki yalıtkan, akının bir değerden bir başka değere geçmesine neden olur. Çağdaş manyetometrelerle, bu akı çok duyarlı olarak ölçülebilir. Bu akı, büyük sayıda elektron (10^{23} kadar) un hareketinden oluştuğu için *makroskopik* bir niceliktir. Böylece, süperiletken halkanın durumları hazırlanırken, akının değeri tek bir değer olarak *belirlenememiş* olur. Bu kuantum mekaniksel özellik, önceleri yalnızca mikroskopik sistemler için bulunmuş bir özellikti.

Bu belirsizliğin deneyle nasıl kanıtlandığını anlamak için, akının her değerine karşılık, halkanın belli bir potansiyel enerjisi olduğunu bilmek gerekir. Genellikle, halkadan geçen akının, bir değerden öbürüne kendiliğinden geçmesi beklenemez; çünkü, akının komşu değerleri arasında bir *potansiyel engeli* bulunur. Klasik fiziğe göre, bu engeli aşmak için bir dış enerji kaynağından enerji sağlanmadıkça, iki değer arasında geçiş olması yasaktır. *Oysa kuantum mekaniğinde, bir dış enerji kaynağı olmadan da, potansiyel engeli tünel olayı ile geçilebilir.*

Makroskopik bir değişimdeki kuantum belirsizliğinin deneysel kanıtlanması, Wheeler'in yukarıda sözünü ettiğimiz açıklamasıyla çelişmez; makroskopik yüzeyde de kuantum mekaniksel belirsizlik bulunabileceğini gösterir. Yalnızca, Wheeler'in açıklamasındaki "tersinmez büyüme etkisi" vurgulamasını, zaten büyük boyutlarda olduğumuz için, "tersinmez" olarak değiştirmek yeterlidir. Böylece,

tersinmez süreçlerin oluşum koşulları, çağdaş kuramsal fiziğe girmiş oluyor. Bu konuda çalışan kimi araştırmacılar ve öğrencilerin inandığı yeni fiziksel ilkeye göre, bir sistemin belirsiz bir gözlenebilirliği, bir ölçümle belirlenmesi sırasında ortaya çıkan acayip tersinmezlik türleri anlaşılır, dan önce bulunmuş olmalıdır.

SON ARAŞTIRMALAR

Kuantum dünyasının tuhaflığını araştırarak çalışmalar sürüyor. İlgili iki deneyden söz edelim. Nötron-girişimölçer deneylerinde, bir nötronun dalga fonksiyonu bir kristal yaprak yardımı ile ayrılıp, başka bir ya da iki kristal yaprakla yeniden birleştirilirken gözlenen girişim olayları, nötronun dalga mı parçacık mı belirsizliği üzerinde ilginç özellikler sergiliyor.

Elektron-girişimölçer deneyleri ise, olağanüstü Aharanov-Bohm olayını doğruluyor; bu olayda, bir elektron, kendi bulunma olasılığının 0 olduğu bir bölgedeki bir manyetik alanın varlığını "duyuyor". Bu, ilişkili (correlated) foton çiftinin sergilediği daha önce incelediğimiz yerel olmamadan farklıdır. Bu iki tür yerel olmama arasındaki bağıntı ile birlikte, kuantum dünyasının doğasını araştıran başka deneylerle ulaşılan birçok çarpıcı sonucun da baştan başa anlaşılması, yapılacak bilimsel çalışmaların ne denli çok olduğunu bildiriyor.

Bu yazıda nitel yanlarını sunmaya çalıştığımız kuantum dünyasının nicel yanlarının da öğrenilmesinin, geleceğin araştırmacıları için ayrıca yararlı olacağı kuşkusuzdur. □

* *Ne demek istediğimizi, kuantum mekaniği dersi görmüş olanlar daha iyi anlayacaklardır.*

* *Integral kavramına yabancı olanlar için, akıyı şöyle açıklayabiliriz: Manyetik alan düzgün olsaydı, akı, halkanın yüzölçümü ile manyetik alanın halka düzlemine dik bileşeninin çarpımına eşit olurdu.*