

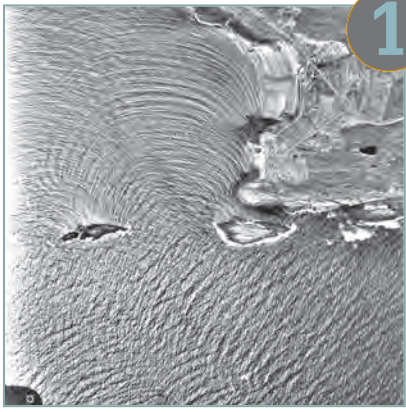
Bakmadan görmek mümkün mü?

Kuantum fiziğindeki dalga - parçacık ikilemi, algılama ve görüntülemenin doğasını değiştiriyor.

Aziz Kolkıran

Mikrodünyada neler olup bittiğine meraklıysanız, mikroskop bulunan bir laboratuvarıda yapacağınız ilk şey birkaç küçük cisim bulup görüntülemeye çalışmak olurdu. Kullandığınız mikroskobun büyütme kapasitesi arttıkça görüntülerin çözünürlüğü de yükselir. Aynı şekilde, çok güçlü teleskoplarla gökyüzüne bakarsanız, çıplak gözle gördüğünüzden çok daha ilginç manzaralarla karşılaşsınız. Bir an için, bu görüntülerde elde edeceğiniz ayrıntıların daha güçlü cihazlar kullandığımızda artacağı hissine kapılabilirsiniz. Ama aslında elde edeceğimiz ayrıntıların bir sınırı var. Ne kadar büyük teleskoplar veya büyük merceklili mikroskoplar kullanırsanız kullanın çözünürlük, kullandığınız ışığın dalga boyuyla sınırlıdır. Görüntülemeye çalıştığımız iki küçük yapı arasındaki uzaklık dalga boyundan küçükse ekranda bunu tek bir nokta olarak görürsünüz. Bu tamamen ışığın kırınımından kaynaklanan bir sınırlama ve su dalgalarında da bu olayı görmek mümkün (Şekil 1). Kuantum fiziğinde, özellikle son yıllarda yapılan deneylerin ışığında, optik görüntülemedeki kırınım sınırının, ışığın tanecek gibi davranma özelliğiyle aşılabileceği gösterildi.

İlk defa “siyah cisim ışması” denen bir problemle karşımıza çıkan ve Max Planck’ın son çare olarak başvurduğu, enerjinin kuantum adı verilen ayrık paketçikler halinde soğurulup yayılması gerektiğini bulmasıyla başlayan kuantum fiziğinin getirdiği yeni kavramlar ölçme, görüntüleme ve algılamada benzeri görülmemiş yeni fırsatlar sunuyor. Bu kavramlar sadece evreni kavrayışımızda durduğumuz zemini değiştirmiyor, evrenin bilinen fiziksel gerçekliğini derinden sarsacak bir paradigma kaymasına da yol açıyor. Kuantum fiziği dalga-parçacık ikileminin yanı sıra, dış dünyadan yeterince yalıtılmış kuantum sistemlerin ancak ve ancak onu gözlemleyecek bilinçli bir varlık olduğu süreç bilinen anlamda sabit fiziksel gerçekliğe sahip olabileceğini söylüyor. Bu yazı, kuantum fiziğinin felsefecileri ilgilendi-



Okyanus dalgalarıyla kırınım. Küçük adacıkların ve uzantıların etrafındaki dalga değişimleri kırınımın kaynaklarıdır. Işık dalgaları da benzer şekilde cisimlerin etrafında kırınım uğrayarak görüntünün oluşmasında rol oynar.

ren yanından öte, teknolojiye getireceği yeni görüntüleme ve algılama yöntemleriyle ilgili.

Süperpozisyon ve dolanıklık

Fizikçilerin geçen yüzyılın başlarında keşfettiği kuantum fiziği, maddenin ve ışığın bazı hallerde sağduyumuza ters, tuhaf davranışlar sergilediğini söylüyor. Belli bir kütleyle sahip atom-altı parçacıklar, örneğin elektronlar, bazen dalga gibi davranabiliyor. Ya da tam tersi, aslında elektromanyetik bir dalga olan ışık, özel deney düzeneklerinde, tanecekli bir davranış sergiliyor ve elektrona çarptığında aynen bir bilardo topu gibi yönünü değiştirebiliyor. Bu, pratikte şu anlama geliyor: Bir kuantum sisteminin herhangi bir durumdaki özelliklerini öğrenmek için yapılan ölçmede kullanılan yöntemler, sonucu etkiler.

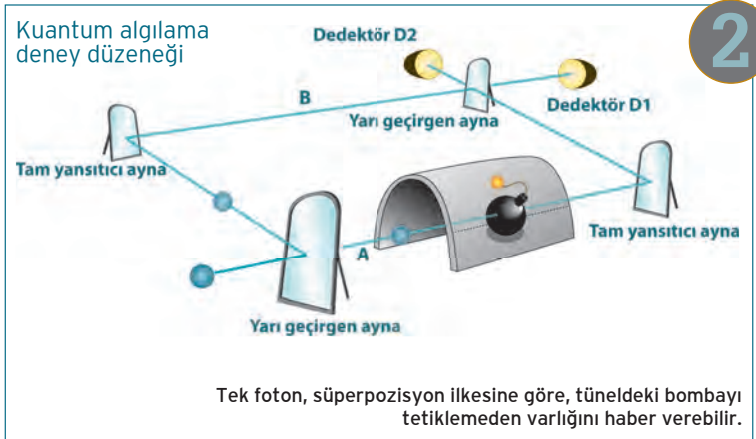
Tek bir düzenekte bir elektronu hem katı bir tanecek hem de bir dalga olarak gözlemleyebilirsiniz. Bunun doğal sonucu, elektronun aynı anda birden fazla yerde bulunması. Fizikçiler bu nedenle elektronun fiziksel durumunu ifade ederken, onu birbirinden tama-

men farklı, bağımsız hallerin toplamı, yani üst üste “bindirilmiş” haller şeklinde yazarlar. Buna “süperpozisyon” ilkesi diyoruz. Buna göre, bir kuantum sistemi birden fazla durumda olma ihtimaline sahipse, onun durumu bütün ihtimallerin iç içe geçtiği şizofrenik bir haldir. Bu durum, ilk bakışta mikrodünyanın tam anlamıyla rastlantısal veya kaotik devindiği hissini veriyor. Einstein, kuantum fiziğinin bu özelliğine, ünlü “Tanrı zar atmaz” deyişyle karşı çıkmıştır.

İlginç olan, bu özelliğin, oldukça işe yarayabilecek tamamen yeni yöntemlerin geliştirilmesinde kullanılabileceğini farketmiş olmamız. 1990’ların ikinci yarısından itibaren, yapılan deneylerle inşasının sadece zaman meselesi olduğu anlaşılan kuantum bilgisayarları ve daha önceleri sadece bilimkurgu filmlerinin konusu olan maddenin ışınlanması, klasik fizikte karşılığı olmayan süperpozisyon ve kuantum dolanıklığının getirdiği yeniliklerden sadece birkaçı.

Kuantum algılama

1993’te Avshalom Elitzur ve Lev Vaidman adında iki kuantum fizikçisi, süperpozisyon ilkesinin kullanılabileceği en çılgın fikri ortaya attı. İçinde bir elmas olan tamamen kapalı cam kürenin içinden, küreyi kırmadan elması alabilmeyi iddia etmek kadar aykırı olan bu fikir, tek fotonla çalışan bir Mach-Zehnder girişimölçeri düzenine (Şekil 2) şöyle uygulanabilir: Karanlık bir tünelde bir bomba olduğunu varsayın. Bombanın tetikleme düzeneği iş-



ğa duyarlı olsun. Tek bir foton düzeneğe çarptığında harekete geçerek bombayı patlatsın. Amacımız tek bir fotonu tünelden geçirerek içeride bomba olup olmadığını saptamak. Ama aynı zamanda bombayı patlatmamak.

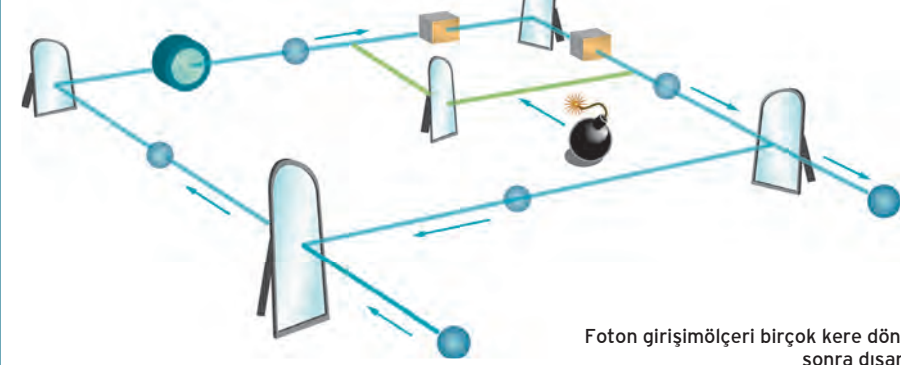
Mach-Zehnder girişimölçeri

İmkânsız gibi görünen bu görevi yerine getirmek için tünelin ağzına yarıgeçirgen bir ayna yerleştirilir. Klasik optikte, yarıgeçirgen ayna, üzerine düşen ışığın yarısını geçirirken diğer yarısını da yansıtır. Bunu basitçe, üzerine düşen fotonların yarısının sapmadan diğer tarafa geçmesi, diğer yarısının da 90 derece yön değiştirmesi olarak düşünebilirsiniz. Yarıgeçirgen aynaya tek bir foton gönderildiğinde iki ihtimalli bir durumla karşılaşsınız. Süperpozisyon ilkesine göre, fotonun izleyebileceği yolların üzerinde ona iz bıraktıracak bir engel yoksa, diğer bir deyişle iki yol birbirinden ayırdedilemezse, foton her iki yolu aynı anda alır (bir kaynaktan yayılan su dalgalarının bir engele çarptıktan sonra iki farklı yola ayrılması gibi). Mach-Zehnder girişimölçer düzeneğinde bu süperpozisyon özelliği, çıkıştaki yarıgeçirgen aynadan sonra fotonun her zaman D1 dedektöründe belirmesiyle kendini gösterir. Foton, hiçbir zaman D2 dedektöründe sinyal vermez. Normalde foton klasik bir parçacık gibi davranıyordu, yani herhangi bir zamanda ya A ya da B yolundan gitseydi, yüzde 50 ihtimalle D2 dedektöründe de sinyal verirdi. Yani deney sürekli tekrarladığında D1 dedektöründe ölçülen “klik” sayısı kadar D2 dedektöründe “klik” duyulur.

Bomba sinyali

Kuantum fiziği bize fotonun A yolunda olma potansiyeliyle B yolunda olma potansiyelinin çıkışta girişime uğrayacağını ve fotonun hep D1’den çıkacağını söyler. B yolundaki tünelle bombayı koyduğumuzu varsayalım. Bu durumda fotonun A ve B yolları prensipte birbirinden ayırdedilebilir özelliğe sahiptir. Bunun sebebi, B yolunda fotonu bir tanecik gibi algılayacak mekanizmanın (bombanın) varlığı. Bu, artık düzeneğin

Geliştirilmiş kuantum algılama deney düzeneği



Foton girişimölçeri birçok kere döndükten sonra dışarı çıkar.

süperpozisyon özelliğini yitirmesine yol açar. Yani foton belli bir anda ya A ya da B yolundadır, ama her ikisinde birden aynı anda olma özelliğini yitirmiştir. Bu durumda, çıkıştaki yarıgeçirgen aynada girişim özelliği kaybolur ve eğer foton A yolunu izleyip, tüneldeki bombayı ıskalamışsa, D1 ve D2 dedektörlerinde eşit olasılıklarla sinyal verir. Sadece dedektörlerdeki sinyale bakan biri D2’de bir sinyal gördüğü anda tünelin içinde bomba olduğunu kesinlikle anlar. Foton bombaya dokunmadığı halde hiç çıkmaması gereken dedektörde ortaya çıkmıştır! Çünkü bomba olmasaydı foton süperpozisyona uygun davranacak ve her zaman D1’de sinyal verecekti.

Bütün ihtimaller göz önünde bulundurulduğunda, bu düzeneğe yüzde 25 ihtimalle tünelin içinden foton geçirmeden ve tüneldeki bombayı patlatmadan, bombanın varlığı saptanabilir. Geri kalan durumlarda, foton B yolundan yüzde 50 ihtimalle geçeceğinden bombaya ulaşır ve patlatır (Bu, istenmeyen bir durum; bombayı patlat-

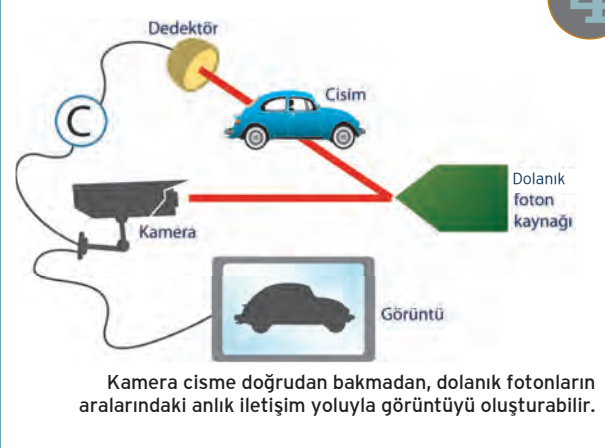
madan tespit etmeye çalıştığımızı hatırlayın). Diğer yüzde 25’lik durumdaysa foton D1 dedektöründe sinyal verir. Bu durum, tünelde bombanın bulunmadığı süperpozisyon hali ile aynı sonucu vereceğinden işimize yaramaz.

Avusturya Innsbruck’taki fizikçiler işe yarayan yüzde 25’lik durumu bir sürekli döngü girişimölçer düzeneği ile “kuantum zeno” etkisi denen bir özelliği birleştirerek foton etkileşimsiz bomba algılamasını yüzde 70’e çıkarmayı başardılar. Bu düzeneğe foton, kollarından birinde bomba bulunan döngüsel bir girişimölçeri birçok defa döndükten sonra dışarı çıkar (şekil 3). Kuantum zeno etkisi, süperpozisyon halinde bulunan bir kuantum sistemi üzerinde tekrarlanan ölçüm yapıldığında, onu istenen kuantum durumunda tutmayı sağlar. Bir bakıma fotonun kuantum süperpozisyon durumunu dondurmaya yarar. Bu deney, ileride verimliliği istenen seviyeye (yüzde 100) çıkarmanın mümkün olacağına işaret ediyor.

Hayalet görüntüleme

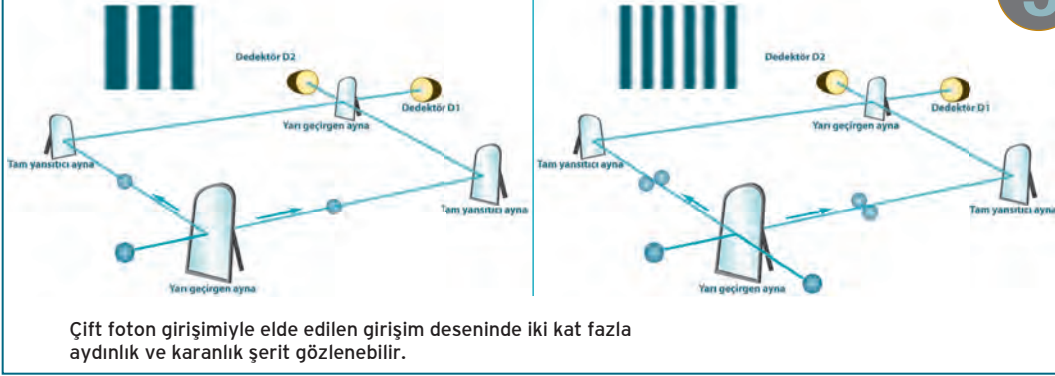
Kuantum dolanıklık ışık kullanarak bir cisme doğrudan bakmadan görüntüsünü oluşturmaya “hayalet görüntüleme” tekniği deniyor. Bu tekniğe göre, birbirine kuantum ilişkisiyle bağlı olan foton demetlerinden biri görüntülenecek cismin üzerine gönderilirken, bunların dolanık eşleniği doğrudan görüntünün elde edileceği kameraya gönderilir. Kameraya giden fotonlar cisme çarpmadıkları halde, cismin üzerine gönderilmiş olan eş fotonlarıyla aralarındaki anlık kuantum bağımlılığı nedeniyle

Hayalet görüntüleme tekniği



Kamera cisme doğrudan bakmadan, dolanık fotonların aralarındaki anlık iletişim yoluyla görüntüyü oluşturabilir.

Tek ve çift foton görüntülemeyle çözünürlük



Çift foton girişimiyle elde edilen girişim deseninde iki kat fazla aydınlık ve karanlık şerit gözlemlenir.

görüntüyü hayali bir şekilde oluştururlar (Şekil 4). Yani çıplak gözle baktığımızda önümüzde bir cisim görmediğimiz halde kameraya düşen aynı ışık, görüntüyü verir. Burada bir noktayı belirtmekte fayda var: Kameraya düşen fotonlar, özel bir elektronik düzenek sayesinde sadece, cismin üzerine giden dolanık eşleri cisme çarptıklarında eşzamanlı olarak kaydedilir. Sonuçta, bu görüntüleme tekniğinde, cisme doğrudan bakma zorunluluğu ortadan kaldırılmış olduğundan, uyduların yeryüzünü bulutlu bir havada görüntülemesi mümkün olur.

Çift foton girişimi

Tek bir fotonun süperpozisyon ilkesine göre aynı anda iki farklı koldan bulunmasından daha ilginç olan şey, iki fotonun aynı anda iki farklı yolda ilerlemesidir. Girişimölçer düzeneklerinde fotonların ekranda oluşturdukları karanlık-aydınlık desenlerinde görüntünün çözünürlüğü, fotonun dalga boyuyla sınırlıdır. Bir girişimölçerde tek bir fotonun aynı anda iki koldan geçmesi yerine iki fotonun aynı anda iki koldan geçmesi, görüntünün çözünürlüğünü iki kat artırır. Bunun sebebi, iki fotonun girişimölçer içinde dolanık duruma gelmesidir. Yani bu iki fotonun birbirinden bağımsız davranışlar sergilemesi artık mümkün değildir; bütün özellikleri birbirine dolanmış durumdadır.

Tek fotonla aynı ışık kaynağından gelmelerine rağmen, birbirine dolanık iki fotonun dalga boyu yarı yarıya düşer. Dalgaboyunun yarıya düşmesi, kırınımdan kaynaklanan sınıra göre iki kat daha yüksek çözünürlük demek. İki fotona dolanıklık kazandıran olay iki

ayrı fotonun yarıgeçirgen aynaya aynı anda iki ayrı koldan gelmeleri (Şekil 5). Fotonların tam buluşma noktalarındaki davranış klasik dünyada hiç görmediğimiz bir etkileşimi doğurur. Kuantum fiziğinde “bozon istatistiği” olarak nitelendirilen davranış biçimine göre, birbirine özdeş iki foton buluştuktan sonra tam anlamıyla kümelenecek aynı şekilde hareket etmeye başlar. Dolayısıyla yarıgeçirgen aynadan sonra fotonlar beraberce A ya da B yolunu seçerler, hiçbir zaman ayrı ayrı yollardan gitmezler. İki fotonun dolanık hale gelmesi ve dalgaboylarını yarıya indirmesi bu “sosyal” davranma eğiliminden kaynaklanıyor.

Buna tam zıt durum, elektronlar için söz konusu: Elektronlar “fermiyon istatistiği”ne göre davranır, fermiyonlar kesinlikle aynı kuantum durumunda bir arada bulunamaz. Buna “Pauli dışlama ilkesi” denir. Bu durumda elektronları son derece bireysel ve sosyal parçacıklar olarak tanımlamak yanlış olmaz.

Küçük adımlar

Girişimölçer düzeneklerinde ikiden daha fazla fotonun dolanıklığı kullanarak çözünürlüğü arttırmak mümkün. Fakat giderek daha fazla fotonu dolanıklığa zorlamak, çözümü zor teknolojik problemler içeriyor. Malzeme bilimindeki gelişmelerle bu güçlüklerin zamanla aşılabacağı inanılıyor. Foton dolanıklığı kullanılarak elde edilen yüksek çözünürlüğün sadece görüntü oluşturmada değil, çok daha küçük elektronik devrelerin litografi yöntemiyle yazılmasında da önemi büyük.

Kuantum görüntülemenin arkasında iki itici güç var. İlki, teknolojik



Aziz Kolkıran
aziz.kolkıran@gediz.edu.tr

Lisans derecesini ODTÜ Fizik Bölümü'nden aldı. Fotonik alanındaki doktora çalışmalarını Oklahoma Devlet Üniversitesi'nde tamamladı. Araştırmalarını dolanık fotonların kuantum girişimölçerlerde kullanılması ve kuantum ölçme yöntemleri üzerine yoğunlaştırdı. Yazdığı makalelerde, dolanık fotonların manyetik alan ölçümlerinde ve lazer cayrolarında klasik optik yöntemlere göre çok daha duyarlı sonuçlar alınabileceğini gösterdi. Halen, TÜBİTAK destekli bir kuantum görüntüleme projesinin yürütücülüğünü yapan Kolkıran, İzmir Gediz Üniversitesi'nde öğretim üyesidir.

uygulamalarda giderek daha küçük cihazlar yapma eğilimi günümüzde nanometre boyutlarına indi. Bu ölçekteyse görünen ışığın dalga boyu çok büyük kalıyor. Sistem yapıları küçüldükçe kuantum fiziğinin etkileri bu sistemlerin tasarımında kaçınılmaz bir şekilde rol alacak. İkinci güçse, daha temel bir nedene dayanıyor. Kuantum fiziğinin getirmiş olduğu temel prensipler, klasik fiziğe oranla çok daha yüksek performans kapasitesinin yollarını açıyor. Fizikte yapılabilecek en büyük ölçüm duyarlılığına kuantum dolanıklığı olgusuyla ulaşılabileceği kesin gibi duruyor.

Kaynaklar

- Elitzur A. C., Vaidman L., “Quantum mechanical interaction-free measurements”, *Foundations of Physics*, 23, 987-997, 1993.
- Kwiat P., ve ark., “Interaction-Free Measurement”, *Physical Review Letters*, 74, 4763-4766, 1995.
- Meyers R., ve ark., “Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons”, *Physical Review A* 77, 041801(R), 2008.
- Kolkıran A., Agarwal G. S., “Towards the Heisenberg limit in magnetometry with parametric down-converted photons”, *Physical Review A* 74, 053810, 2006.
- Kolkıran A., and Agarwal G. S., “Heisenberg limited Sagnac interferometry”, *Optics Express* 15, 6798-68, 2007.