

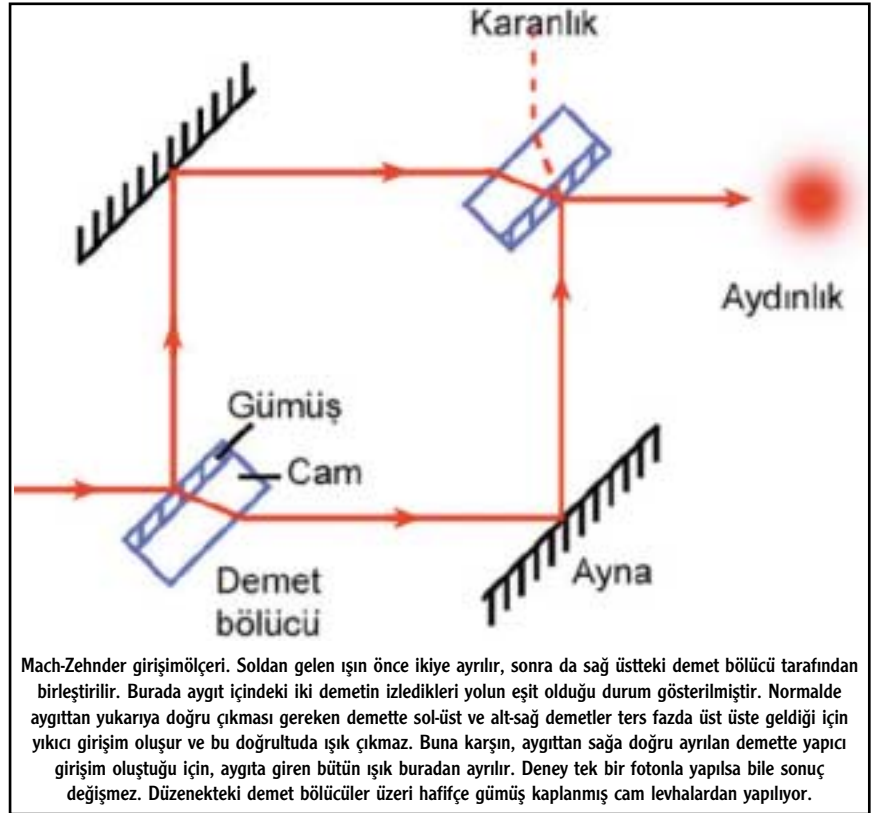
ŞU GARİP KUANTUM-4

KARANLIKTA KUANTUM GÖRME

Yunan mitolojisindeki Perseus ve Medusa'nın karşılaşmasını çoğunuz bilirsiniz. Yılan şeklinde saçlarıyla ünlü Medusa'nın en önemli özelliği, kendisini gören herkesi anında taşla çevirmesiydi. Çok sayıda kurbanı olan Medusa'nın hakkından gelmek için Perseus görevlendirilmişti. Karşılaşmanın en çok anlatılan versiyonunda, Perseus Medusa'ya doğrudan bakmadan, onu sadece elindeki aynalı kalkandan yansıyan görüntüsüne bakarak bulmuş ve onunla savaşmış.

Amacımız bu öyküdeki mantık hataları bulmak değil; bu mit, tarihteki işlevini zaten yerine getirmiş. Ama, Perseus'un yöntemindeki tutarsızlık yine de biraz rahatsız edici. Eğer, Medusa'nın vücudundan çıkan ışık, her canlıyı taşla çevirme özelliği taşıyorsa, yansıdıktan sonra da aynı özelliği taşıması beklenir. Nitekim, mitin başka bir versiyonunda Perseus'un aynayı Medusa'ya doğrulttuğu, Medusa'nın da kendi görüntüsünü gördüğü için taşla dönüştüğü söylenir.

Yaklaşık on yıl kadar önce Tel Aviv Üniversitesi'nden iki bilim adamı, Avshalom Elitzur ve Lev Vaidman, kuantum fiziğinin garipliklerinden yararlanarak bu mite alternatif bir son yazmanın mümkün olduğunu gösterdiler. Bildiğiniz gibi bir nesneyi görmek demek, önce ışığın o nesne üzerine düşmesi, sonra da yansıyarak gözümüze gelmesi anlamına geliyor. "Görme"yi bu şekilde tanımladığımız için, nesne üzerine ışık düşürmeden onu görmemiz ilk bakışta olanaksızmış gibi görünüyor. Öyle ya, eğer gözümüz nesnenin görüntüsünü algılıyorsa, ışık o nesneyle bir şekilde etkileşmiş olmalı ki "görüntü bilgisini" taşıyabilsin. Fakat kuantum dünyasının kendine özgü mantığı, bizim mantığımızı her zaman uymaz.



Bu bilimadamları, nesnenin üzerine ışık düşürmeden onun görüntüsünü oluşturmanın mümkün olduğunu gösteriyorlar. Olay o kadar şaşırtıcı ki, eğer Yunanlılar kuantum fiziği biliyor olsalardı, mutlaka Perseus'un bunu kullanmasını sağlardı. Böylece Perseus, Medusa'yı görerek ama ışığın ondan kaynaklanmadığına emin olarak daha rahat savaşabilirdi.

Bomba

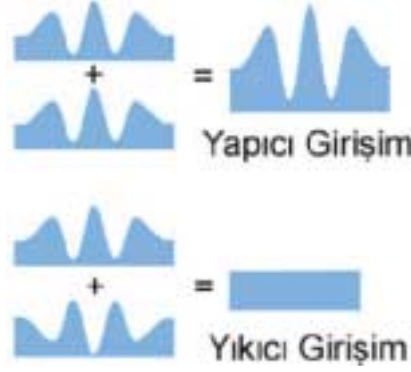
Bir nesnenin fotoğrafını çekerek detaylı bir görüntüsünü oluşturmak yerine, daha basit bir soruyla, "orada bir nesne var mı?" sorusuyla başlayalım. Bu soruyu nesnenin üzerine ışık düşürmeden cevaplayabilir miyiz? Elitzur

ve Vaidman, olayı daha dramatik yapmak için nesnenin çok hassas bir bomba olduğunu düşünmemizi istiyor. Bomba sadece tek bir foton soğurduğunda bile, ateşleme mekanizması harekete geçerek bombayı patlatıyor. Kısacası, elimizde Medusa'nın modern bir versiyonu var. Sadece tek bir foton kullanarak, ama fotonu bomba üzerine düşürmeden bombanın orada olduğunu anlayabilir miyiz?

Elitzur ve Vaidman bu soruyu yanıtlamak için Mach-Zehnder (MZ) olarak adlandırılan bir girişimölçer kullanıyor (kutuya bakınız). Bu aygıtta tek bir foton gönderilirse, fotonun ilk demet bölücüsünde "ikiye ayrılması" beklenir. Fakat, foton bölünemez olduğu için (ışığın bölünemez en küçük parçası) ya

yollardan birini ya da diğeri izlemek zorundadır; ya da ilk başta böyle düşünürüz. Kuantum fiziği ise, fotonun her iki yolu birden aynı anda izlemesine olanak veriyor. Bu, daha önce bahsettiğimiz “üst üste gelme” olgusuyla aynı şey. Nasıl bir elektron aynı anda değişik yerlerde olabiliyorsa, ya da nasıl bir foton hem yatay hem de dikey kutuplaşma durumlarının her ikisinde birden aynı anda bulunabiliyorsa, bu aygıttaki foton da aynı anda iki farklı yolu izler. Fotonun hangi yolu izlediğini anlamamıza yarayan bir ölçüm yapmadığımız sürece, her iki olasılık da gerçekleşir.

MZ girişimölçerinde fotonun aygıtın çıkarken kullanabileceği iki olası çıkış rotası var: üst ya da sağ. Fakat girişim olarak adlandırdığımız bir olgu burada işin içine girer ve fotonun bunlardan sadece birini kullanmasına izin verir (şekilde sağ çıkış). Girişim daha çok dalgalar için geçerli bir kavram ama kuantum fiziğine de büyük oranda taşınmış. Eğer iki farklı dalga, birinin tepesi diğeri çukuru karşı gelecek şekilde üst üste binerse, iki dalga birbirini sönmeler (yıkıcı girişim). Buna karşın, iki dalga birinin tepesi diğeri tepesi-ne denk düşecek şekilde üst üste gelir-



se bu defa dalgalar birbirini güçlendirir (yapıcı girişim). Tüm temel parçacıklar gibi, fotonun nerede hangi olasılıkla bulunduğunu bize söyleyen olasılık dalgaları da aynı girişime uğrar. İşte bu nedenle, MZ girişimölçerini uygun şekilde ayarlayarak fotonun sadece tek bir çıkışı kullanmasını sağlayabiliriz.

Şimdi fotonun aygıt içinde izleyebileceği yollardan biri üzerine bir nesne koyalım. Nesne üzerine düşen fotonu soğuracağı (ya da yansıtacağı) için, dolaylı bir ölçüm görevi görür. Yani, bu olay olursa, fotonun sol-üst yolu mu, yoksa alt-sağ yolu mu izlediğini anlayabiliriz. Kuantum fiziğinde ölçmenin en önemli etkisi, ölçülen şeyi değiştirmesi. Dolayısıyla nesnenin varlığı, fotonun ya sol-üst

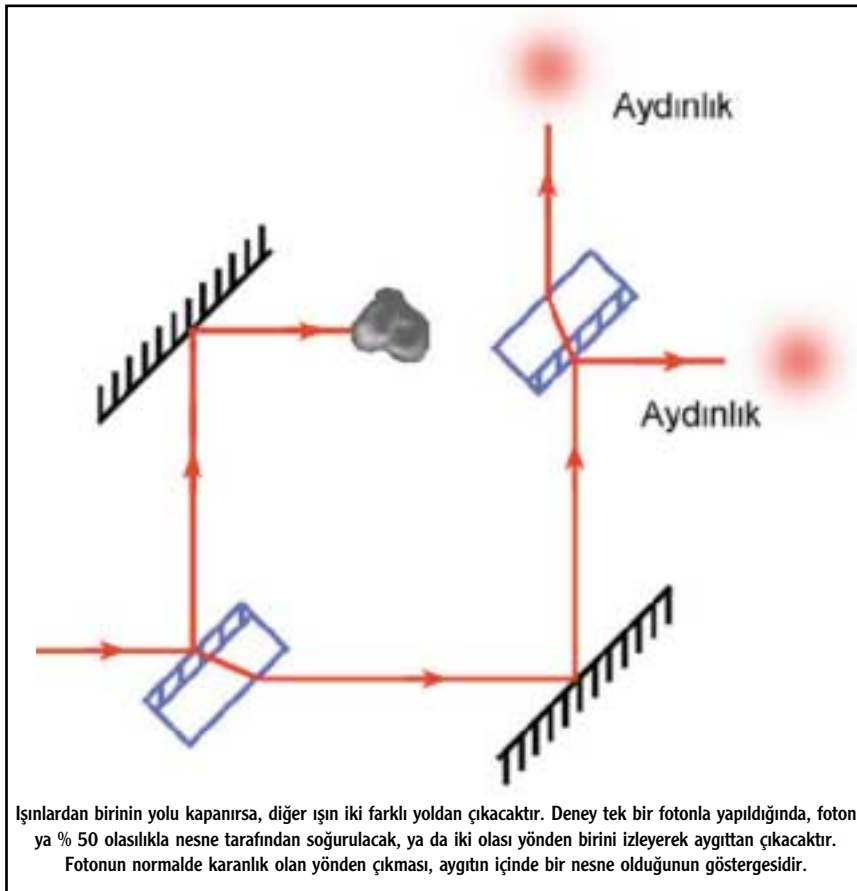
yolu ya da alt-sağ yolu izlemesine neden olur. İkisinin birden aynı anda gerçekleştiği üst üste gelme artık olanaksızdır. Bu nedenle ikinci demet bölücü üzerindeki girişim de gerçekleşmez.

Nesnenin sol-üst yol üzerinde olduğunu varsayalım. Bu durumda ya (1) foton % 50 olasılıkla sol-üst yolu seçer ve Elitzur-Vaidman bombasını patlatır. Ya da (2) alt-sağ yolu seçer ve aygıttan dışarı çıkar. Dışarı çıkarken de iki olasılık vardır, ya (2a) yukarıya doğru gider (toplam içinde %25 olasılıkla) ya da (2b) sağa doğru. Sonuç olarak, tüm olasılıklar şöyle: (1) % 50 olasılıkla bomba patlar ve hala hayattaysak “demek ki bomba oradaymış” deriz. (2a) %25 olasılıkla foton üst çıkıştan çıkar. Bu durumda herhangi bir bilgi kazanmayız çünkü aygıt boşken de fotonlar buradan çıkıyordu. Deneyi tekrarlamaktan başka seçeneğimiz yok. Son olarak, (2b) %25 olasılıkla foton sağ çıkıştan çıkar. Bu durumda da “demek ki bomba oradaymış” der, bomba patlamadığı için seviniriz. Bu son olasılık dikkate değer. Çünkü, hem kullandığımız foton kesinlikle bombaya temas etmedi hem de bombanın kesinlikle orada olduğunu anladık.

Eğer 2a durumunda deneyi tekrarlamakta olasılığını da hesaba katarsak, bombayı patlatmadan varlığını anlama olasılığının 1/3 olduğunu çıkarabiliriz. Ne yazık ki, demet bölücülerin yansıtma oranını düşürerek bu olasılığı en fazla 1/2'ye kadar artırabiliriz. Her ne kadar patlatmadan bombayı görme olasılığı var olsa da, patlama olasılığının varlığı olayın güzelliğine gölge düşürüyor. Peki, deney düzenineğini değiştirerek patlama olasılığını çok daha fazla düşürmek, hatta sıfıra indirmek mümkün değil mi?

Kuantum Zeno Etkisi

Avusturyalı fizikçi Anton Zeilinger ve ekibi, sadece tek bir foton kullanan ve patlama olasılığının çok küçük olduğu düzeneklerin tasarlanabileceğini gösterdiler. Ayrıca bu düzeneklerden birini deneysel olarak sınadılar. Gerçi deneylerinde çok yüksek bir verim yok (patlatmadan bombanın var olduğunu anlama olasılığı % 70 civarında); ama yöntem geliştirilmeye çok açık olduğu için, istenirse bu oran % 100'e çok yaklaştırılabilir.



Ekip bunu gerçekleştirmek için “kuantum Zeno etkisi” olarak adlandırılan kuantum dünyasına ait bir başka garipliği kullanıyor. Yunanlı filozof Zeno hareketin olanaksızlığını göstermek için bir takım paradokslar ortaya atmıştı. Bunları “bakarsanız çaydanlık kaynamaz” şeklinde özetlemek mümkün (en azından bizim için). Daha önce başında bekleyerek çaydanlıkta su kaynatmış olan çoğu kişi bunu “psikolojik” olarak nitelendirip, paradoksun çözümünü filozoflara bırakacaktır. Gerçekten de çaydanlığa bakıyor olmamız suyun kaynama hızını etkilemez. Ama, aynı şeyi kuantum dünyasında olup bitenler için söylemek mümkün değil.

Öncelikle “bakmak” eylemi “ölçme” anlamını taşır ve ölçme de kuantum dünyasına özgü garip sonuçlar doğurur. Örnek olarak iki düzeyli bir kuantum sistemi düşünün. Bu sistemin içinde bulunabileceği durumları ‘0’ ve ‘1’ olarak adlandıralım. Sonra da bu sistemin en başta ‘0’ durumunda bulunduğunu ve doğal evrimi sonucu bir saniye sonra ‘1’ durumuna geçtiğini varsayalım. Buna iyi bir örnek bir atomun enerji düzeyleri olabilir: Atom uyarılmışsa, yani yüksek enerji düzeyindeyse ‘0’, düşük enerji düzeyindeyse ‘1’ gibi. Doğal olarak böyle bir sistem, bir saniyelik süre içinde ‘0’ ve ‘1’ durumlarının üst üste geldiği o garip durumlardan birinde olacaktır. Örneğin, ilk anda kesin olarak ‘0’ durumunda, 50 milisaniye sonra % 99.5 olasılıkla ‘0’ ve % 0.5 olasılıkla ‘1’ durumunda, ... ve tam bir saniye sonra kesin olarak ‘1’ durumunda gibi.

Tabii bütün bunlar, sisteme bakmadığınız sürece geçerli. Eğer bu bir saniye içinde bir ölçüm alırsanız, bu defa sistem üst üste gelmeyle oluşan durumdan ‘sadece 0’ veya ‘sadece 1’ durumlarından birine bir çökme yaşar. Ölçümün kuantum dünyasında “bilgi edinmek” anlamından daha çok “sistemi tamamen değiştirme” anlamı var. İşte bu çok garip bir etkiye neden oluyor. Örneğin, başlangıçtan 50 milisaniye sonra bir ölçüm aldınız diyelim. Bu durumda sistem % 99.5 olasılıkla en baştaki durumuna (0) geri döner (daha küçük bir olasılıkla da en son duruma (1) girer). Eğer, sadece bir değil, arka arkaya çok sayıda ölçüm alırsanız bu defa büyük olasılıkla sistemi sürekli başlangıç durumuna gönderirsiniz.

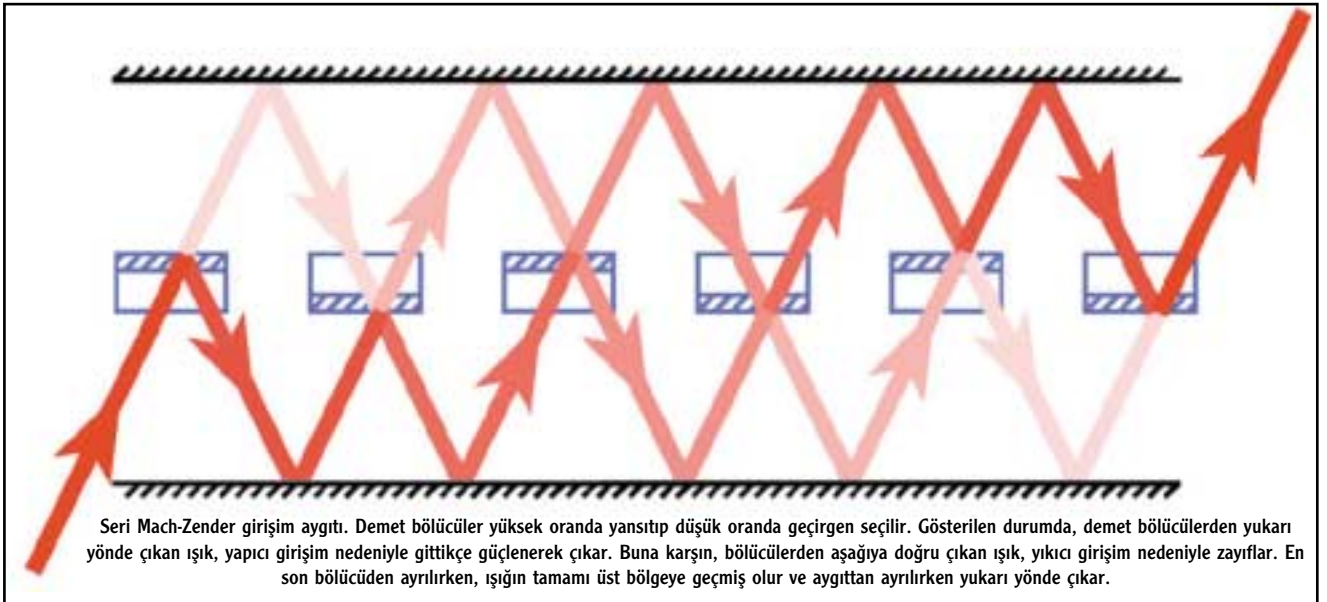
Üstelik aldığımız ölçümleri sıklaştırarak bu olasılığı daha da artırabilirsiniz. Örneğin, bir atomun uyarılmış düzeyden taban düzeye geçip geçmediğini sürekli kontrol ederseniz, o atomun ışımaya yapmasını tamamen engelleyebilirsiniz. Sürekli alınan ölçümlerin bir sistemin evrimini durdurması olayına “kuantum Zeno etkisi” adı veriliyor. Kısacası mutfağımızdaki çaydanlık siz baksanız bile kaynar; ama “kuantum çaydanlıklar”, baktığımız sürece kaynamaz.

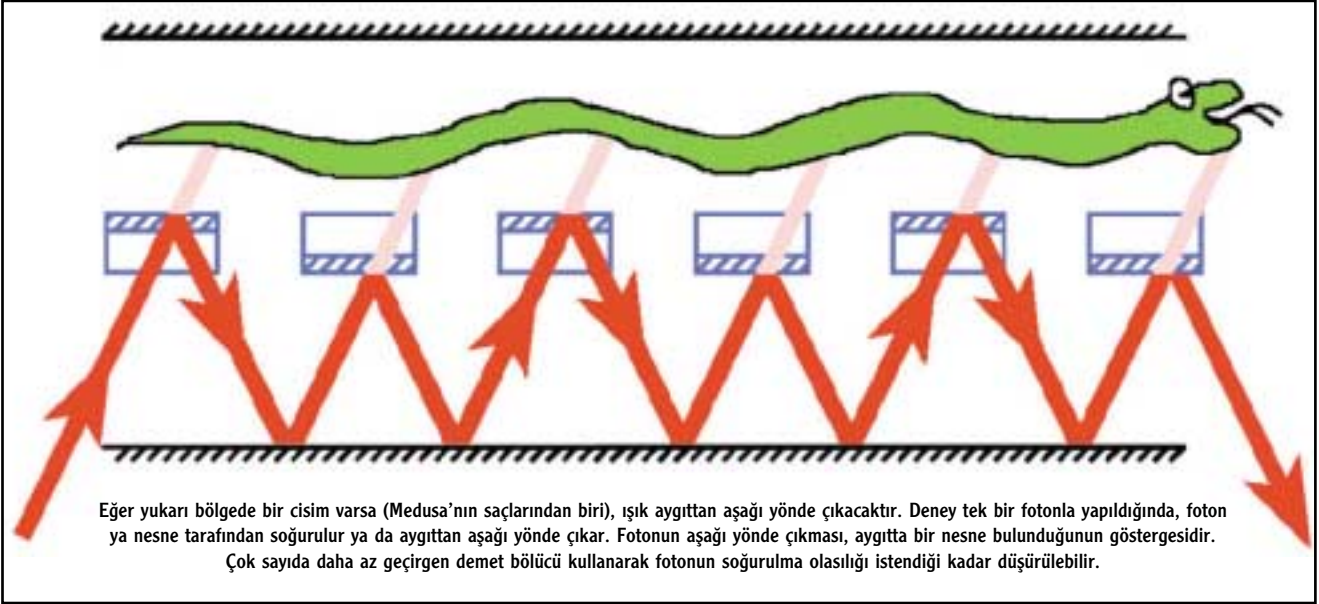
Bombayı Patlatmadan Görmek

Zeilinger’in ekibinin ortaya attığı tasarılardan biri, birden fazla Mach-Zehnder düzeneğini arka arkaya ekleyip, de-

met bölücülerin yansıtma oranını büyük seçerek oluşturulabiliyor. Böyle bir aygıt içine yollanan bir foton, ilk demet bölücüsünde yukarıya düşük olasılıkla sızar ama büyük olasılıkla yansır. İkinci demet bölücüsünde de aynı şey olur. Ama bu defa, yapıcı girişimden dolayı yukarı bölgedeki olasılık çok daha fazla artar; aşağı bölgede de yıkıcı girişim olasılığı daha da azalır. Foton son demet bölücüsüne çarptığında yıkıcı girişim fotonun alt bölgede olma olasılığını tamamen sıfırlamıştır. Dolayısıyla bu aşamada foton kesinlikle üst bölgededir.

Bu nedenle, içi boş aygıtta fotonun bir kuantum evrimi söz konusu. Foton aygıtta girerken tamamen alt bölgede olmasına karşın, bir süre sonra tamamen üst bölgeye geçer. Normal girişimölçerlerdeki gibi burada da foton aygıttan çıkarken sadece yukarıya doğru çıkar. Girişim fotonun aşağıya doğru çıkma olasılığını tamamen sıfırlamıştır. İşte bu evrim süresince fotonun hangi bölgede olduğunu anlamak için ölçümler yapılırsa, Zeno etkisinde olduğu gibi bir durumla karşılaşırız. Örneğin, demet bölücülerin üstündeki bölgeye, varlığını anlamamız gereken bombayı yerleştirelim. Bombanın düzenek içinde olması, fotonun hangi bölgede olduğunu anlamamıza yarayan bir ölçme anlamı taşır. Dolayısıyla, foton demet bölücülerden herhangi birinden ayrıldığında bir ölçüm alınıyor. Bu da fotonun büyük olasılıkla aşağı bölgede kaldığı durumlara çökmeyle sonuçlanıyor. Bu durumda da foton aygıttan ayrıldığında aşağı yöne doğru çıkacaktır.





Şekilde gösterilen düzende, yani toplam 6 demet bölücünün olduğu ve aynı sayıda ölçümün yapıldığı durumda fotonun bombayı patlatmadan dışarı çıkma olasılığı yaklaşık % 66 civarında. Demet bölücülerin sayısını artırarak (bunu yaparken yansıtma oranlarını da artırmamız gerekir) bu olasılığı daha da artırmak mümkün. Örneğin 1000 demet bölücüyle bu olasılık %99.75'e kadar artırılabilir. Kısacası, bombayı patlatma olasılığını istediğimiz kadar düşürebiliyoruz. Düzenegın bir başka önemli özelliği de bir kere dışarı çıktığında, fotonun hangi yöne gittiğine bakarak aygıtta bir bomba olup olmadığını kesinlikle söylememizin mümkün olması. Bu nedenle deneyi sadece bir defa, tek bir fotonla yapmak yeterli.

Son olarak, varlığını anlamak istediğimiz nesnenin yılan gibi upuzun olmasına da gerek yok. Zeilinger ve ekibi yukarıda açıkladığımız deney yerine kutuplaşma durumunun çok defa ölçüldüğü ve fotonun aynı doğru üzerinde ileri ve geri bir çok defa geçmesini sağladıkları bir deney tasarlayıp gerçekleştirmişler. Böylece elde ettikleri deney sonucu, bu yolun kapalı mı yoksa açık mı olduğunu söylüyor. İşte bu nedenle, deneyin bu versiyonu daha detaylı fotoğrafılama uygulamaları için çok uygun. Dolayısıyla, bu yazıda açıklamaya çalıştığımız "üzerine ışık düşürmeden bir nesneyi görüntüleme" tasarısı en azından kuramsal olarak gerçekleştirilebilir. Gerçi, bu özel "fotoğraf makinesinin" ta-

sarlanması mutlaka çok daha karmaşık bir teknoloji gerektirecektir, ama en azından kuramsal olarak olayın doğruluğu çok önemli bir adım.

Peki bu olay ne işe yarar? Bir çoğumuz için olayın ilginçliği teknolojik uygulamalardan çok daha önemli. Ama burada da bir kaç uygulama alanı öngörmek mümkün. Öncelikle bu olay Perseus'un çok işine yarar. Medusa'nın detaylı görüntüsünü görerek ama bu görüntüyü oluşturmak için kullanılan ışığın onun vücuduna değmediğinden, dolayısıyla taşlaşmıyacağından emin olarak Perseus, çok daha rahat savaşıabilir.

Bizim dünyamızda da gerçek Medusalar var. Örneğin, röntgen filmlerini çekmek için kullanılan X-ışınları vücudumuz için çok zararlı. Işıklı aynı yapıda olmalarına karşın, X-ışınlarının fotonları görünür ışığın fotonlarından en az yüz kat daha fazla enerji taşırlar. Bu fotonlar vücudumuzdaki moleküllere çarptıkları zaman, molekülün yapısını bozarak çoğunlukla zararlı değişimlere neden olurlar. Bu nedenle röntgen filmleri sadece gerekli olduğu durumlarda ve aldığımız dozun olduğu kadar az olmasına dikkat edilerek çekiliyor. Karanlıkta kuantum görme olgusu röntgen filmlerine taşınabilir. Böylece, X-ışınlarını vücudumuzdan geçirmeden ama yine de bunları kullanarak daha rahat röntgen çekeitirebiliriz. Buradaki en önemli problem, X-ışınları için optik düzenepleri (ayna, kutuplayıcı gibi) geliştirme konusunda yaşanan güçlük.

Dolayısıyla en azından görünür gelecekte böyle bir uygulamanın ortaya çıkması mümkün değil.

Bazı hassas bilimsel deneylerde fotoğrafılama bir başka olası uygulama alanı. Örneğin atomların olduğu soğutulduğu ve bu nedenle çok yavaş hareket ettiği Bose-Einstein yoğuşması deneylerini düşünün. Böyle bir gazın fotoğrafını çekmek çok güçtür. Çünkü kullandığımız ışık atomlar tarafından soğurulursa gaz ısınır ve ortada Bose-Einstein yoğuşması kalmaz. Buna karşın eğer fotonlar atomlara çarpıp geri yansırırsa bu defa atomlar itildiği için hızla gazdan uzaklaşırlar ve ortada Bose-Einstein yoğuşması kalmaz. Dolayısıyla böyle bir gazı başarıyla fotoğrafılayabilmek için hiç bir fotonun atomlara çarpmaması şart. Bu yazıda anlattığımız olay bu tip durumlarda bize ideal çözümü verir.

Karanlıkta kuantum görme olayı kuantum dünyasının bize sunduğu garipliklerden bir diğeri. Ünlü "kopyalamak yasaktır" teoremi gibi pek çok şeyi yapmamıza izin vermeyen kuantum yasaları, kimi zaman da bize hayal etmekte çok zorlandığımız olanaklar sunuyor ve tam anlamıyla şaşırtıyor.

Dr. Sadi Turgut
ODTÜ Fizik Bölümü

Kaynaklar
P. Kwiat, H. Weinfurter, A. Zeilinger, "Quantum Seeing in the Dark", Scientific American, Kasım 1996.
Kutlusoy, Z., "Sonu Başına Çıkan Çıkamaz Sokak: İşte Paradokslar", Bilim ve Teknik, Mayıs 1995.