



ŞU GARİP KUANTUM-3

KUANTUM IŞINLAMA

Bu ayki konumuz, bilim-kurgu filmlerinde çok sık rastladığımız, ama “nasıl çalışıyor acaba?” diye sormayı aklımızdan bile geçirmedığımız “ışınlama makineleri”. Fakat bu yazı bilim-kurgu hakkında değil. Aksine geçtiğimiz yıllarda deneysel olarak da sınanan bir olaydan bahsedeceğiz. Fakat, ikisi arasında o kadar çok benzerlik var ki, insan ister istemez bu hayali makinelerin bir gün gerçekleştirilmesinin mümkün olup olmadığını sorgulamaya başlıyor. Şüphesiz, bu yazıyı okuduktan sonra, bu filmleri daha farklı bir gözle seyredecek, “nasıl çalışıyor?” diye kendinize soracak ya da “böyle çalışması imkansız” diye yargıda bulunmaya başlayacaksınız.

Bu filmlerde ışınlamadan kastedilen, bir insanı ya da cisim bir yerden başka bir yere, herhangi bir madde aktarımı olmadan ulaştırmak. Yani, uzay otobüsü ya da dolmuşlarının olmadığı, bütün ulaşımın ışınlama makinesiyle gerçekleştirildiği bir dünyadan bahsediyoruz. Bugünlerde yaşadığımız hızlı teknolojik gelişmenin aynı hızla kesintisiz devam edeceğine inananlar için,

böyle bir makinenin bir gün geliştirilmesi mümkün görünüyor. Üstelik, kullandığımız faks makineleri, ışınlama makinelerinin çok ilkel bir hali olarak düşünülebilir. Bir faks makinesinin temel olarak yaptığı şey, verilen bir kağıdın yüzeyini küçük karelere bölmek, bu bölgeleri tarayarak hangisinin beyaz hangisinin siyah olduğunu anlamak, ‘siyah’ ve ‘beyaz’ bilgilerini ‘0’ ve ‘1’ler olarak kodlamak, en sonunda da bu bilgileri telefon hatlarıyla coğrafi olarak daha uzaktaki bir başka makineye göndermektir. Bilgileri alan makine de bunları başka bir kağıda dökerek orijinal kağıdın bir kopyasını elde eder. Burada en önemli nokta, ikinci makinenin kağıdın kopyasını çıkarmak için sadece telefonla kendisine iletilen bilgiyi kullanmasıdır. Yani makineler arasında sadece bir bilgi alışverişi var, herhangi bir madde ya da enerji alışverişi değil.

Gerçi, faks kullananlar bilirler, elde edilen kopya her zaman orijinalinden daha kötü durumdadır; fakat bu teknolojinin çözemeyeceği bir problem değil. Faks makinesi, kağıdı daha küçük ka-

relere bölerek, daha ayrıntılı tarayabilir. Yeteri kadar yüksek çözünürlükle karşı tarafta elde edilen kopya, gerçeğinden ayırt edilemez hale gelecektir. Teknolojinin bu aşamadan çok daha fazla ilerlediğini, gittikçe kağıdı daha küçük karelere ayıran faks makinesinin bir gün atomik detaylara kadar ayırmaya başladığını düşünün. Bu makine, her bir atomun tipini, konumunu ve ne durumda olduğunu okuyarak, yine telefon aracılığıyla karşı makineye iletebilir. Karşı makine de bu bilgileri kullanarak, kopyayı atom atom dize ve orijinalinden hiç bir şekilde ayırt edilemeyecek bir kopya oluşturur. Üstelik, bu makinelerle sadece kağıdı değil, herhangi bir cisim de fakslandırırsınız. Böyle bir faks makinesi aynı zamanda bir ışınlama makinesi olmaz mı?

Teknoloji ne kadar ileri olsa da yukarıdaki yöntemin işe yaramayacağı açık. Nedenini bu yazı dizisinde daha önce belirtmiştik. Bu kadar detaylı tarama yapan bir faks makinesi, eninde sonunda kuantum yasalarıyla çarpışmak zorunda kalacaktır. Kuantum fiziği büyük cisimlerden oluşan dünyamız-

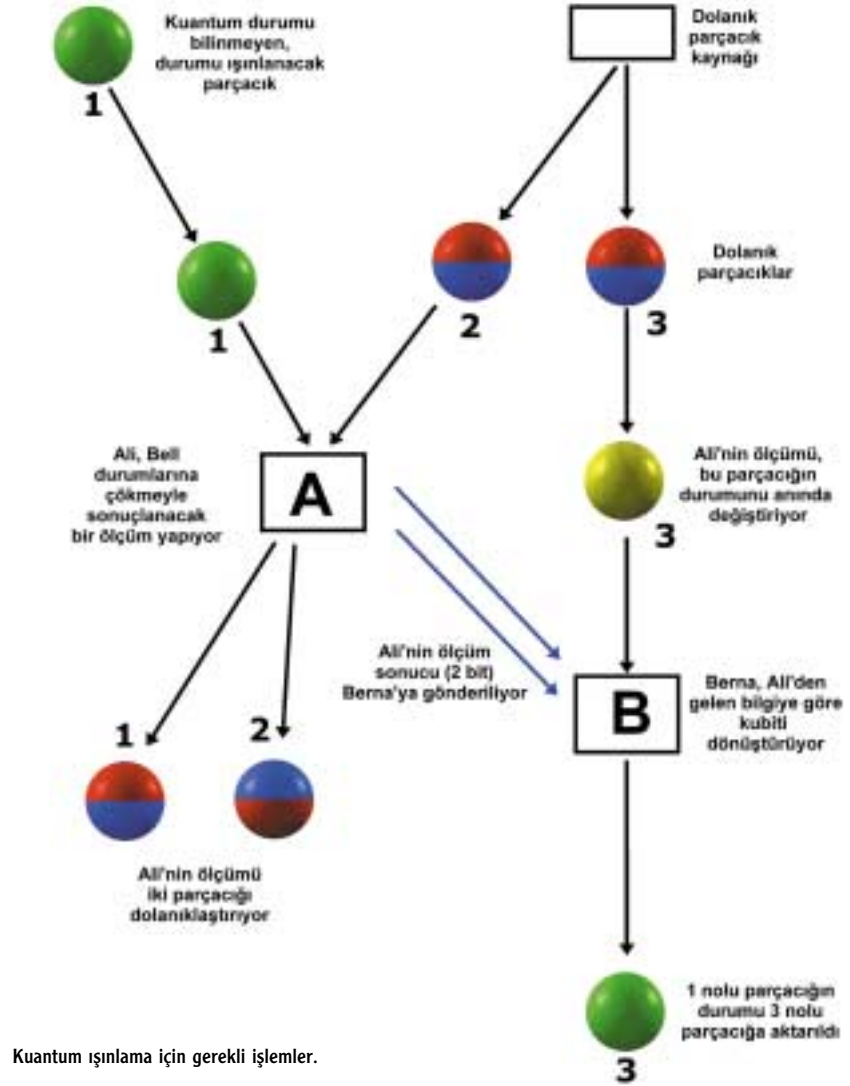
da kendini her nasılsa göstermiyor, ama atomik ölçekteki mikro dünyada bulunan her şey, kuantum yasalarına göre hareket ediyor. Dolayısıyla, aşırı ilerlemiş faks makinemiz, eninde sonunda bu atomların kuantum durumlarını da ölçmek zorunda kalacaktır. Fakat, kuantum yasaları bize herhangi bir sistem üzerinde yapılan ölçümün, o sistemi geri dönülemeyecek bir şekilde değiştirdiğini söylüyor. Bu nedenle, faks makinesi orijinali bozmak gibi büyük bir tehlikle karşı karşıya.

Üstelik, bu da yetmezmiş gibi, kuantum durumları üzerinde yapılan ölçüm sonucu, ölçümden önceki durumu yeniden oluşturmaktan çok uzak. Örneğin, bir kubitlik sonsuz sayıda değişik bilgi taşıyabilen bir sistem üzerinde yapılan ölçüm bize, '0' ve '1' olarak adlandırdığımız iki olası sonuçtan birini veriyordu. Sadece iki farklı değerden birini alan bir sonuçla, ölçümden önceki zengin kuantum durumunu oluşturmamız imkansız. Ölçüm, kuantum durumunu geri dönülmez bir şekilde değiştiriyor. Kısacası, faks makinemiz hem orijinali yok etti, hem de elimizde bir kopya oluşturmak için yeterli bilgi yok.

Fakat, 1993 yılında IBM'den Charles H. Bennett'in aralarında bulunduğu değişik ülkelerden altı bilim adamı tarayıcının ölçüm almamasını sağlayarak bir sistemin kuantum durumunu uzak bir yere aktarmanın mümkün olduğunu gösterdiler. Üstelik, klasik faks makinelerindeki gibi, aktarmayı tamamlamak için sadece bir telefon yeterli. Olaya bilim-kurgu terimi olan "ışınlama" adını yakıştıranlar da onlar. Aşağıda, bunun nasıl mümkün olduğunu, tek kubitlik bir bilginin ışınlaması için neler gerektiğini açıklamaya çalışacağız. Fakat, yeterli teknolojik gelişmeyle, daha büyük fiziksel sistemlerin ışınlaması da mümkün görünüyor. Gerçek insanları bu yöntemle ışınlamak bir gün mümkün olur mu bilemeyiz; bu sorunun cevaplandırılmasını ilgilenen okuyucularımızın hayal gücüne bırakmak en iyisi.

Bir Kubit Nasıl Işınlanır?

İki düzeyli bir kuantum sisteminin bir kubitlik bilgi taşıdığını söylüyoruz. Böyle bir sistem genellikle '0' ve '1' olarak adlandırılan, iki olası durum-



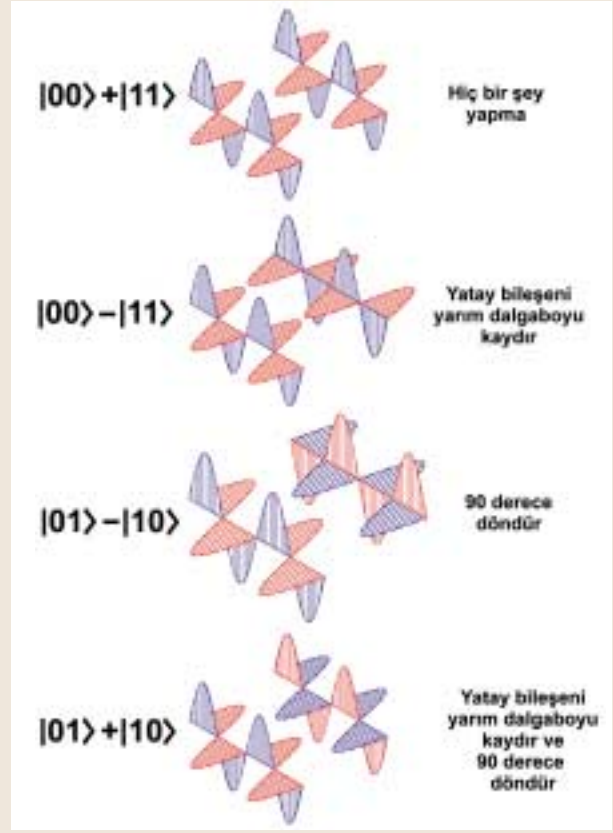
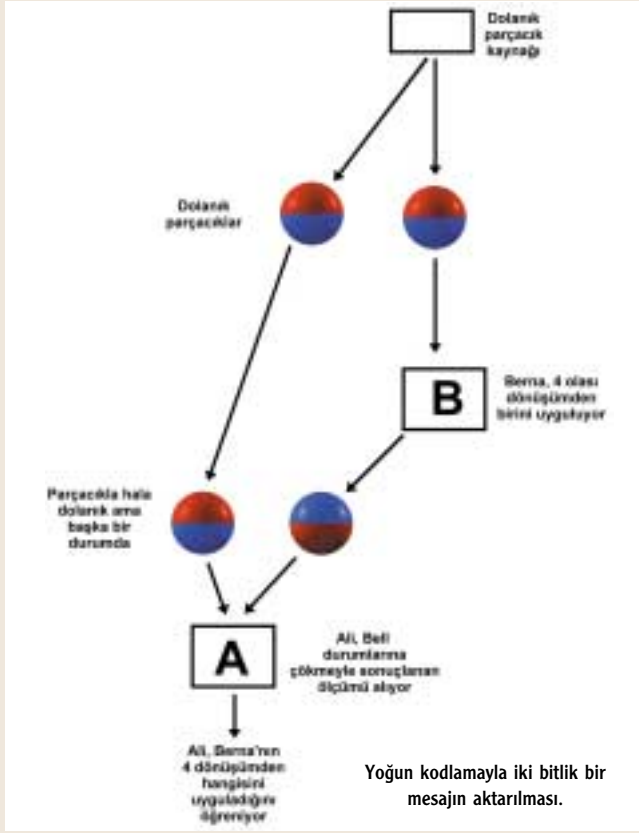
Kuantum ışınlama için gerekli işlemler.

dan birinde olabildiği gibi, bunların değişik olasılıklarla üst üste geldiği sonsuz sayıda durumların birinde de olabilir. Bu sistem bir elektronun spini olabilir (spin seçilen bir doğrultuda yukarı veya aşağı), bir fotonun kutuplaşması (seçilen bir doğrultuda yatay ya da dikey), bir atomun enerji düzeyleri (uyarılmış ya da değil) veya teklif edilen çok sayıda diğer sistemden biri de. Hangi sistemde gerçekleştiriliyor olursa olsun, kuantum durumunu bir kubitlik kuantum bilgi olarak tanımlıyoruz. Kuantum bilginin bu şekilde, gerçekleştiği fiziksel sistemden bağımsız olarak tanımlanmasının büyük kuramsal yararı var. Bu bilgiyi, bir fiziksel sistemden diğerine aktarabilir ve isterse tekrar geri taşıyabilirsiniz. Ama hiç bir zaman, içeriğini bilmediğiniz bir kubitinin birden fazla kopyasını çıkaramazsınız, ya da içerik hakkında bir bittenden fazla bilgi alabileceğiniz bir ölçüm yapamazsınız. Özellikle ölçüm,

kubitinin içeriğini tamamen siler.

Kuantum ışınlama olayında da, bir parçacığın ya da bir atomun uzak bir yere gönderilmesinden çok o parçacığın taşıdığı kuantum bilgisini aktarmaktan söz ediyoruz. Bir ışınlama deneyinde Ali'nin elinde kuantum durumunu bilmediği iki düzeyli bir parçacık olduğunu (1'nci parçacık) ve bu durumu Berna'nın elinde bulunan başka bir parçacığa aktarmak istediğini düşünelim. Bunu gerçekleştirmek için daha önceden bir dolanık parçacık çifti hazırlanıp, Ali ve Berna'ya iletilmiş olması gerekiyor (2'nci ve 3'ncü parçacıklar). Dolanık parçacıklar, kuantum fiziğinin garipliklerinden biri. Bu parçacıklardan biri üzerinde yapılan ölçüm, nerede olursa olsun diğer parçacığın durumunu anında değiştiriyordu. Işınlama olayında da buna benzer bir gariplik yaşanıyor.

Ali'nin elinde durumunu bilmediği 1'nci parçacık ve Berna'nınkine dola-



Bell durumları. Sadece sağdaki foton üzerinde uygulanan dört olası dönüşümle, iki foton bu durumlardan birinden diğerine dönüştürülebilir. Her durumda, dolanıklık en üst düzeyde. Mavi renk iki fotonun kutuplaşma durumunun bir olasılığını, kırmızı renk de bir diğer olasılığını gösteriyor. En üst düzeyde dolanıklık için mavi ve kırmızı durumlar aynı anda eşit olasılıkla gerçekleşmeli.

Yoğun Kodlama

İki düzeyli, bir kubit bilgi taşıyabilen bir parçacık bir bitlik klasik bilgi iletmek için kullanılabilir. Örneğin, bir fotonun yatay kutuplaşması '1', dikey kutuplaşması '0' olarak düşünülürse, fotonu bu iki durumdan istediğinize sokarak bir bitlik herhangi bir mesajı gönderilebilirsiniz. Alıcının bu fotonun kutuplaşması üzerinde yapacağı ölçüm, hangi mesajın kodlandığını şüpheye yer bırakmayacak bir şekilde ortaya çıkarır.

Buna karşın, kuantum yasaları fotona daha zengin içerikli bilgi yüklenebileceğini, fotonun sonsuz sayıda değişik kutuplaşma durumlarından birinde hazırlanabileceğini söylüyor. Fakat yine kuantum yasaları, ölçmenin fotonun kesin durumunu vermekten uzak, sadece bir bitlik bilgi verebileceğini söylüyor. Kısacası, kubit çok zengin bilgi içeriğine sahip olsa da klasik iletişim açısından sadece tek bitlik bir kapasiteye sahip.

1992 yılında, IBM'den C.H. Bennett ve S.J. Wiesner dolanık parçacık çiftleri kullanıldığında, tek bir kubitte iki bitlik bilgi göndermenin mümkün olduğunu gösterdiler. Dört yıl sonra, Avusturya'dan Anton Zeilinger ve ekibi, bu yöntemi fotonlar üzerinde uygulayarak, tasarımı deneysel olarak gerçekleştirdiler.

Yoğun kodlama adı verilen bu yöntemde öncelikle tarafların bir dolanık parçacık çiftini paylaşmaları gerekiyor. Dolanık parçacıkları üçüncü bir kişi hazırlayarak, gönderilecek mesaj belli olmadan çok önce iletişime gireceklere, yani Ali'yle Berna'ya göndermiş olabilir. Kısacası, bu parçacıkların dağıtılması sırasında henüz herhangi bir iletişim olmuyor.

Yöntemin olanaklı olmasının nedeni Berna'nın sadece kendi parçacığı üzerinde bir takım dönüşümler yaparak, iki parçacığın toplam durumunu istediği gibi değiştirebilmesi. Eğer Berna'nın elindeki kubit bir elektronun spiniyse, bu dönüşümler spin doğrultusunun seçilen bir eksen etrafında döndürülmesi şeklinde gerçekleştirilebiliyor. Eğer kubit bir fotonun kutuplaşma durumuna yüklenmişse, bu kez kutuplaşma doğrultusu döndürülebilir ya da fotonun elektrik alanının sadece yatay veya sadece dikey bileşeni diğerine göre kaydırılabilir. Değişik optik aygıtlar bunlar dışında çok değişik dönüşümlere de izin veriyor.

Yöntemin olanaklı olmasının nedeni Berna'nın sadece kendi parçacığı üzerinde bir takım dönüşümler yaparak, iki parçacığın toplam durumunu istediği gibi değiştirebilmesi. Eğer Berna'nın elindeki kubit bir elektronun spiniyse, bu dönüşümler spin doğrultusunun seçilen bir eksen etrafında döndürülmesi şeklinde gerçekleştirilebiliyor. Eğer kubit bir fotonun kutuplaşma durumuna yüklenmişse, bu kez kutuplaşma doğrultusu döndürülebilir ya da fotonun elektrik alanının sadece yatay veya sadece dikey bileşeni diğerine göre kaydırılabilir. Değişik optik aygıtlar bunlar dışında çok değişik dönüşümlere de izin veriyor.

Bennett ve Wiesner, Berna'nın dört farklı dönüşüm seçeneğinden birini kullanarak, iki parçacığı Bell durumları olarak adlandırılan dört özel kuantum durumundan birine sokabileceğini gösterdiler. Bell durumlarının en önemli özelliği, bir ölçümle iki parçacığın bunlardan hangisinde olduğunu belirlelenemesi. Dolayısıyla, Berna dört dönüşümden birini gerçekleştirerek kendi parçacığını Ali'ye gönderir. Ali'de iki parçacık üzerinde yaptığı bir ölçümle bunların hangi Bell durumunda olduğunu anlayarak, Berna'nın seçimini öğrenir. Böylece, sadece tek bir kubit göndererek iki bitlik (dört farklı değer alabilen) bir bilgi iletilmiş olur.

Bu konudaki kuramsal ve deneysel çalışmaları yapanların adlarından da görülebileceği gibi, yoğun kodlama ile ışınlama arasında çok yakın bir ilişki var. Her ikisinde de bir kubit üzerine uygulanan dönüşüm ve iki kubit üzerine Bell durumlarının analizi tamamen aynı nitelikte. Fakat, iki olayda bunlar, farklı amaçlara erişmek için farklı sıralarda uygulanıyorlar.

nık olduğunu bildiği 2'nci parçacık var. Normalde bu iki parçacık birbirinden bağımsız kuantum durumlarına sahipler. Fakat Ali bunları bir bütün olarak, özellikle iki kubit kapasiteye sahip bir fiziksel sistem olarak düşünebilir. Böyle bir sistem üzerinde yapılacak bir ölçüm, ne ölçülüyor olursa

olsun, en fazla dört farklı sonuç verecektir. Bunun dışında böyle bir ölçüm, kuantum yasalarına göre iki kubitin içeriğini geri dönülmez bir şekilde değiştirecektir (çökmeye). Ali özellikle elindeki iki parçacığı en yüksek düzeyde dolanıklaştıracak bir ölçüm alıyor. Bennett ve ekibi, Bell durumları ola-

rak adlandırılan dört olası durumdan birine çökmeye sonuçlanacak bir ölçüm sonucunda, bilinmeyen kubitin içeriğinin deforme olmuş bir şekilde Berna'nın kubitine aktarıldığını gösteriyorlar.

Bu aşamada Ali'nin elindeki kubitlerdeki bütün orijinal kuantum bilgile-

ri siliniyor, 1'nci ve 2'nci parçacıklar dolanıklaşıyor ve son olarak 2'nci ve 3'ncü parçacıklar arasındaki dolanıklık kayboluyor. Berna'nın elindeki parçacık, ışınlanacak olan parçacığın durumuna sahip ama orijinal bilginin yeniden oluşturulması için Berna'nın, Ali'nin elde ettiği ölçüm sonucuna ihtiyacı var. Ali, ölçümü sonucunda parçacıklarının dört olası Bell durumundan hangisine çöktüğünü Berna'ya bildirmek zorunda. Bunu yapmak için Berna'ya telefon ederek hangisi olduğunu söylemesi yeterli. Ali'nin bu aşamada Berna'ya ilettiği iki bitlik klasik bir bilgi (dört olasılıktan hangisi). Son olarak Berna, Ali'den aldığı bilgiye dayanarak elindeki kubit üzerinde bir dönüşüm gerçekleştirir. Sonuçta, elindeki parçacık, Ali'deki 1'nci parçacığın orijinal duruma girecektir.

Bu işlemin en karmaşık aşamasının Ali'nin yaptığı ve Bell durumlarına çökmeyen gerçekleştiği ölçüm olduğunu fark etmişsinizdir. Bu aşamayı kuramsal olarak anlamak ne kadar zorsa, deneysel olarak gerçekleştirmek çok daha zor. Avusturyalı fizikçi Anton Zeilinger ve ekibi, 1997 yılında gerçekleştirdikleri deneyde bu zorluğu kısmen yenmişler. Deneydeki en büyük güçlük, en verimli dolanık parçacık kaynağının fotonlardan oluşmasından kaynaklanıyor. Fotonlar çok hızlı hareket ettiği için, hem Ali'nin ölçümündeki iki fotonun ölçüm aygıtına aynı zamanda girmesi gerekiyor, hem de ölçüm sonucunun üçüncü fotonu dönüştürmek için hızla kullanılması. Ekip, ışınlama deneyini tam anlamıyla gerçekleştiremeye bile, elde ettikleri sonuçlar, Bennett'in öngörülerıyla uyumlu.

Peki, Ali'nin iki parçacık üzerinde gerçekleştirdiği ölçüm aynı zamanda bilinmeyen kubit üzerinde bir ölçüm anlamına gelmiyor mu? Bennett ve ekibi, ışınlanacak olan 1'nci parçacık hangi kuantum durumunda olursa olsun, Ali'nin dört olası sonucu eşit olasılıkla elde ettiğini bulmuşlar. Dolayısıyla Ali, bilinmeyen kubit içeriği hakkında en ufak bir bilgi bile edinemiyor. Ali'nin ölçümünün Berna'nın parçacığına belli bir kuantum durumunu aktarmak dışında başka hiç bir işlevi yok.

Bunun dışında, başarılı bir ışınlanmanın tamamlanması için, Ali'nin Berna'ya en az iki bitlik bilgi iletmesi gerekiyor. Bu gereklilik sadece Bennett'in yöntemi için değil, gelecekte ortaya atılabilecek diğer olası ışınlama yöntemleri için de geçerli. Bir mesaj iletme zorunluluğu, ışınlanmanın ışıktan hızlı bir şekilde gerçekleştirilemeyeceğini söylüyor. Örneğin, Berna'nın bizden dört ışık yılı uzaktaki Borg gezegeninde olduğunu düşünün. Ali, Bell durumlarına çökmeyle sonuçlanan ölçümü aldığı anda Berna'nın kubitini değiştirir. Ama ışınlanmanın tamamlanması için Ali'nin gönderdiği iki bitlik mesajın Berna'ya ulaşması gerekir; bu da aradan en az dört yıl geçmesi anlamına gelir. Dolayısıyla bir mesajın ışıktan hızlı gönderilemeyeceğini söyleyen yasa burada da işin içine giriyor.

Peki bir kubit aktarmak için neden en az iki bit iletme gerekiyor? Bu, kuantum yasalarının matematiksel özelliğinden kaynaklanan bir gereklilik. Aksi halde, eğer daha az klasik bilgi iletmenin yeterli olduğu bir ışınlama yöntemi mümkün olsaydı (örneğin sadece bir bit göndermek gibi), o zaman Berna, Ali'nin klasik mesajını beklemeden rasgele tahminlerde bulunarak ışınlanan kubit üzerinde ölçümlerde bulunabilir ve bir miktar bilgi edinebilir. Bu da, özellikle çok sayıda kubitin ışınlanmasıyla, Ali'nin Berna'ya ışıktan hızlı mesaj gönderebilmesinin yolunu açıyor. Böyle bir şey olanaksız olduğu için en az iki bit bilgi ihtiyacı ışınlama yöntemi ne olursa olsun var.

Son olarak neden ışınlamada dolanık parçacık çiftlerinin kullanılması zorunlu olduğunu açıklayalım. Eğer dolanık parçacıklar kullanılmadan, sadece Ali'nin ilettiği klasik bilgiye dayanarak bir ışınlama gerçekleştirilebiliyor olsaydı, Berna bu kubitin sadece bir değil, birden çok daha fazla sayıda kopyasını çıkarabilirdi. Halbuki, ünlü "kopyalamak yasaktır" teoremi bize içeriği bilinmeyen bir kubitin birden fazla kopyasının oluşturulamayacağını söylüyor. Işınlama olayında da, kubit'in aktarılması sırasında önce Ali'nin kubitindeki bilgi siliniyor, sonra aynı bilgi Berna'nın kubitinde ortaya çıkıyor. Kubitin içeriği aynı anda evrenin iki farklı yerinde birden var olamıyor. Bilim-kurgu filmlerinde de aynı kavram geçerli. Işınlama makinesi önce kahramanlarımızı yok eder,

sonra da başka bir yerde ortaya çıkmalarına neden olur. Makine, hiç bir şekilde, kahramanlarımızın birden fazla kopyasını oluşturmak için kullanılmaz.

Dolanık parçacıklar kullanma zorunluluğu, Ali'yle Berna arasında bu parçacıkların paylaşılması sırasında bir kuantum iletişim kanalının kullanılması gerektiği sonucunu doğuruyor. Eğer böyle bir kanal kullanılabiliriyorsa o halde ışınlamaya ne gerek var diye sorabilirsiniz. Ali, elindeki parçacığı doğrudan gönderebilir, ya da parçacığın kubitini bir fotonla aktarır ve fotonu fiber-optik kablolar aracılığıyla yollayabilir. Bu çoğunlukla doğru olsa da, bazı özel durumlarda ışınlanmanın kubitini doğrudan göndermekten daha pratik olduğu açık. Örneğin, Berna'nın dört ışık yılı uzaklıktaki Borg gezegeninde olduğu durumu düşünün. Ali'nin bu gezegeni hedefleyerek bir foton göndermesi ve Berna'nın doğru zamanda doğru yerde bulunarak bu fotonu yakalaması imkansız. Üstelik, bu fotonun yolda bir toz parçacığına çarparak yolundan sapması ya da kubitinin içeriğinin değişmesi olasılığı da var. Buna karşın, normal radyo dalgalarıyla yapılacak klasik bir iletişim her zaman Berna'ya ulaşabilir. Ulaşmamış olsa bile aynı mesaj tekrar gönderilebilir. Doğal olarak bu yöntemin kullanılabilmesi için, Ali'yle Berna'nın geçmişte bir gün "ne olur ne olmaz" diyerek çok sayıda dolanık parçacık çifti paylaşmış olması ve bu parçacıkların uzun süre saklanabilmesi gerekir. Bunun gibi, ışınlanmanın kullanım alanı bulabileceği bir çok yer düşünebilirsiniz.

Son söz olarak, kuantum ışınlama bilim-kurgu filmlerindeki ışınlamaya bir çok açıdan benziyor. Benzeşmedikleri yönler de var kuşkusuz. Örneğin, Uzay Yolu dizisinde mürettebat daha önce hiç gitmedikleri bir gezegenin yüzeyine kendilerini ışınlayabiliyordu. Kuantum ışınlamadaysa, bunun mümkün olabilmesi için gezegene çok sayıda dolanık parçacığın önceden gönderilmiş olması gerekiyor. Ama, bu konuda kesin konuşmak için henüz erken. Kim bilir, belki bilim adamları bunun da üstesinden gelebilir.

Dr. Sadi Turgut
ODTÜ Fizik Bölümü