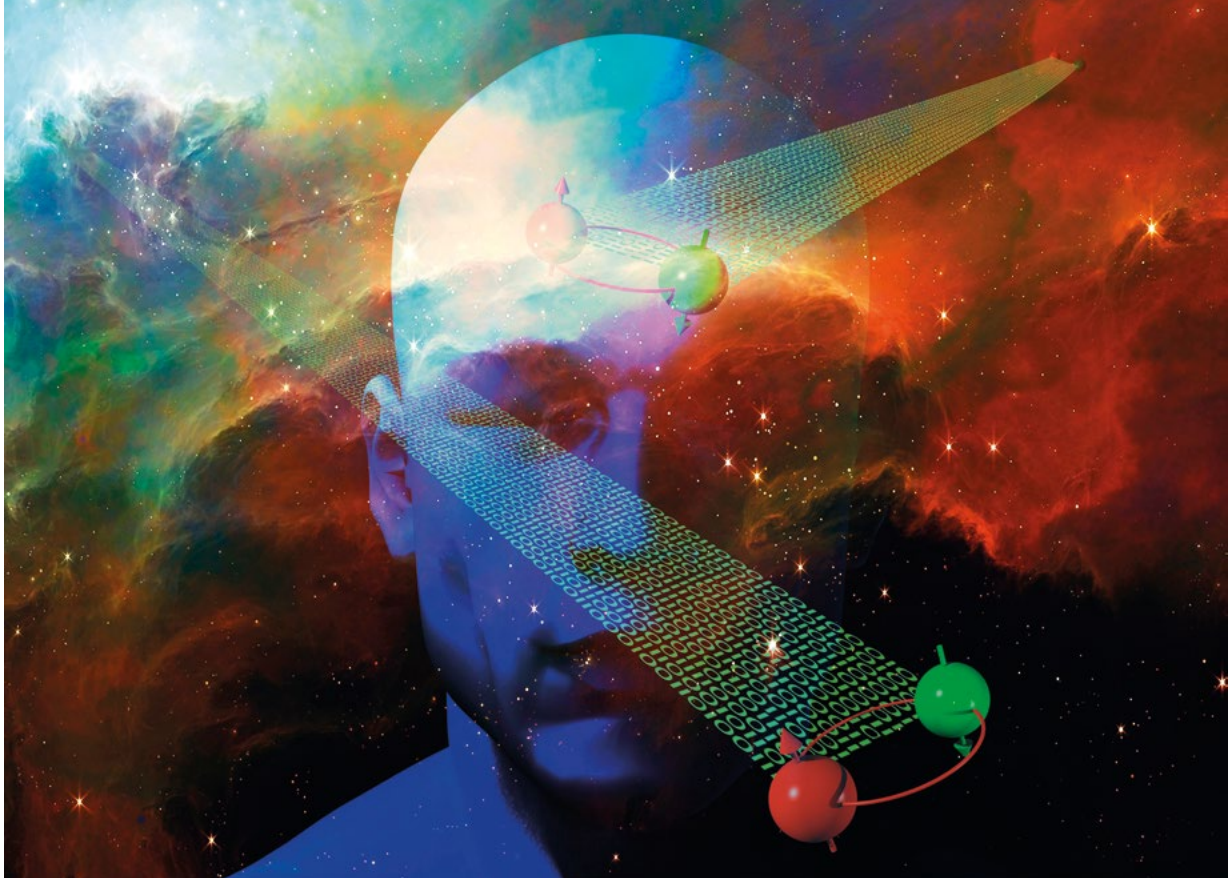


Kuantum Fiziğinin Temellerinden Eş Zamanlı İletişime

Bu yazı, günün birinde milyarlarca kilometre uzaklıklar arasında eş zamanlı ve yüzde yüz güvenli iletişim kurulmasına yol verebilecek olağanüstü bir teknolojinin fizik altyapısını anlatmaya çalışıyor. Bahsedilen teknoloji kuantum fiziğinin en çetrefilli kavramlarını barındırdığı için, fizikçi olmayan bir okura konuyu anlaşılır bir şekilde aktarmak gerçekten çok güç. Hatta konunun meraklıları ek okumalar yapmak durumunda kalacaktır. Ne var ki modern fiziğin bizi davet ettiği dünya, belki de Alice'in Harikalar Diyarı'ndan bile daha renkli. Bunu görebilmek, okurun harcadacağı tüm emeğe değer. Çünkü bilim ile bilimkurgu arasındaki makas giderek daralıyor.



2006 yılında Plüton'a gönderilen *Yeni Ufuklar* adlı minik uzay aracı, yaklaşık on yıl süren yolculuğu sonunda 5 milyar kilometre uzaktan bize Plüton'un ve uydularının fotoğraflarını göndermeye başladı. Mesafe o kadar büyüktü ki, uzay aracına bir mesajın ışık hızıyla da olsa iletilmesi ve cevabının gelmesi on saati buluyordu. Yakın gelecekte gerçekleşebilecek olan gezegenler arası insanlı yolculuklarda iletişim için bunca süre beklemek, yaşamsal tehlikelere neden olabilir. Peki aradaki mesafeleri boşa çıkaracak ve anında haberleşmeye fırsat tanıyacak yepyeni bir teknoloji geliştirmek mümkün mü?

Kuantum Dolanıklık ve EPR Paradoksu

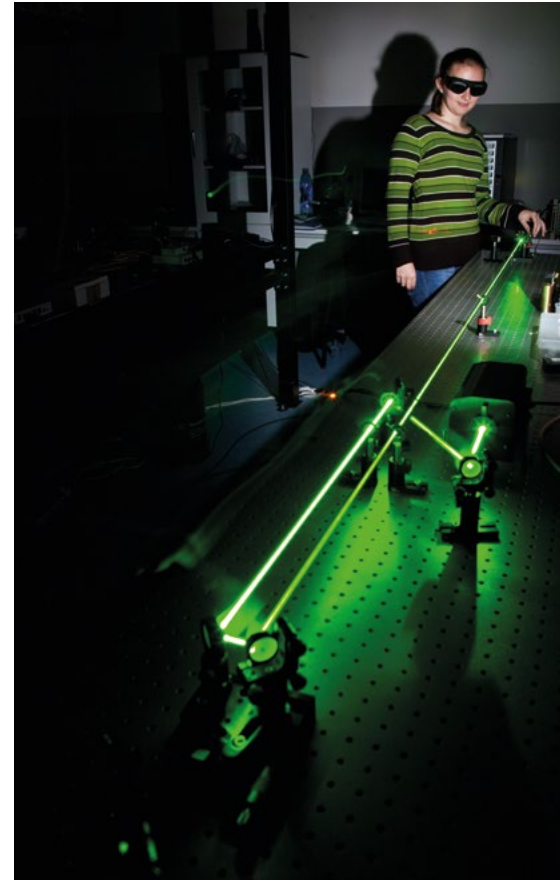
Kuantum mekaniğinin temellerinin atıldığı yıllarda, atomaltı dünyada hüküm süren fizik yasalarını anlamaya başladıkça duyu organlarımızın şekillendirdiği gerçeklik algımız öyle derin darbeler almıştı ki, en başta kuantum mekaniğinin doğmasını sağlayan fizikçilerin kafası karışmıştı. Kuantum mekaniği temelde istatistiksel bir kuramdır. Fiziksel bir olayın sonucu hakkında kesin bir öngöründe bulunamaz. Bunun yerine, olay ile ilgili birtakım olasılıkları sıralar. Örneğin hidrojen atomu etrafında dönen bir elektronun hangi yörüngede bulunduğunu değil, hangi yörüngede hangi olasılıkla bulunabileceğini söyler. Gözlem yapıp kesin konumu belirlenene kadar, "parçacık olası durumların hepsinde belli oranlarda bulunuyor" deriz (Schrödinger'in kedisi örneğini hatırlayalım: Kedi biz bakana kadar hem sağ, hem ölüdür). Newton fiziği ve hatta görelilik kuramları olaylar arasında kesin bir neden sonuç bağı kurarsa da, kuantum fiziğinde bu tip bir belirlenimcilikten bahsedemeyiz. Olaylar arasında, bilimin en temel parametresi olan neden sonuç ilişkisini kuramayan bir kuram, eksik demektir. Doğal olarak, o günkü fizikçilere saçma gelen bu sonuçtan kurtulmanın yolları uzun süre araştırıldı. Tabii ki Einstein bu isyanın başını çekiyordu.

1935 yılında Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen (EPR), kuantum fiziğinin bütünselliğini sorgulayan ve çok meşhur olan bir makale yazdılar. Onlara göre, belli ki kuantum sistemler bizce henüz meçhul olan bazı gizli değişkenler tarafından kontrol ediliyordu. Bu gizli değişkenleri anladığımız takdirde kuantum fiziğinin olasılıklı görünen yapısı ortadan kalkacak, kesin bir öngörü gücüne ulaşılacaktı. Bu durumu bir örnekle açıklamak gerekirse, bir zarı attığımızda kaç geleceğini bilemeyiz ve olasılık diliyle sözcüğünü 5 gelme ihtimalinin altında bir olduğunu söyleriz. Ama zarın hangi yönde hangi yükseklikten hangi hızla atıldığı gibi değişkenleri kesin bir şekilde bilirsek, zarın kaç geleceğini biliriz. Yani ölçmediğimiz, henüz bilmediğimiz ve sistemi etkileyen birtakım değişkenler bilinirse, olasılık dilini kullanmamıza gerek kalmaz.

EPR paradoksu makalesinde iddia edilen neydi? Kuantum fiziğine özgü bir sistem düşünelim: Örneğin eş zamanlı yaratılmış ve toplam spinleri sıfır olan iki elektron. Spinin ne olduğuna dair ayrıntıları şimdilik göz ardı ederek, değerlerinin sadece +1 veya -1 olabileceği kabulüyle devam edelim. Şimdi, elimizdeki bu iki elektronun spinlerinin toplamı sıfırdır ama, hangisinin +1, hangisinin -1 olduğunu ölçmeden bilmenin bir yolu yok. Bunun için herhangi birinin spinini artı ve eksi değerlerin bir kombinasyonu olarak kabul edilir. Ancak, birinin spinini ölçüp +1 olduğunu gördüğümüz an, diğerinin spininin -1 olduğunu mutlak olarak biliriz. Kaderleri bir şekilde bağlı bu tip parçacıklara *kuantum dolanıklığına* sahip parçacıklar diyoruz. Buraya kadar her şey normal ve bunda şaşılacak bir şey yok. Ancak kuantum yasaları bu kadar basit çalışmıyor. Çünkü ölçmediğimiz bir elektron spinini, aynı anda hem +1 hem -1 değerinin bir çeşit toplamını içeriyor. Biz ölçüm yaptığımız anda sistem bir tercihte bulunuyor ve biz ya +1 ya da -1 değer görüyoruz. Yani, biz bu iki elektrondan birinin spinini ölçtüğümüz anda o elektronu bir tercih yapmak zorunda bırakıyoruz. Diğer elektron da ölçüm yaptığımız elektronun tercihinden bir şe-

kilde haberdar oluyor ve ölçtüğümüz değer zıt değerini alıyor. İşte az önce bahsettiğimiz gizli değişkenler burada devreye giriyor. Bu iki elektron birbirinden ayrıldığı anda belirlenen bir gizli değişken ile ölçüm anında ne olacağı belirleniyor olmalı, ancak bu durum kuantum formalizmine aykırı. Çünkü kuantum fiziğine göre dolanıklığa sahip iki parçacık, birbirlerinden bağımsız olarak tanımlanamaz. Ya da elektronlar arasında meçhul bir iletişim ağı olmalı ve bu iletişimin doğada izin verilen maksimum hızı ışık hızına eşit olmalı.

Eğer kuantum dolanıklığına sahip iki elektronu birbirlerinden çok uzak yerlere götürürsek ve birinin spinini ölçtüğümüz anda diğerinin spinine bakarsak ne görürüz? Kuantum fiziğine göre, örneğimizde toplam spinin sıfır olacağı bir durumla karşılaşmamız gerekir. Ancak eş zamanlı yapılan bir ölçümde birbirlerinden çok uzakta-ki elektronlar nasıl haberleşecek? Diyelim ki biz elektronun birinde +1 değer ölçtük.



Diğer elektrona bu tercihin yapıldığı nasıl aktarılacak ve -1 değer alması nasıl sağlanacak? Işık hızından daha hızlı mesaj göndermek mümkün olmayacağına göre, diğer elektronun -1 değerli olmama olasılığı var. Bu da kuantum fiziğine aykırı çünkü dolanık iki parçacığın toplam spini sıfır olmak zorunda. İşte EPR makalesinde bu paradoksa vurgu yapılıyor.

Yerel Gerçeklik ve Bell Teoremi

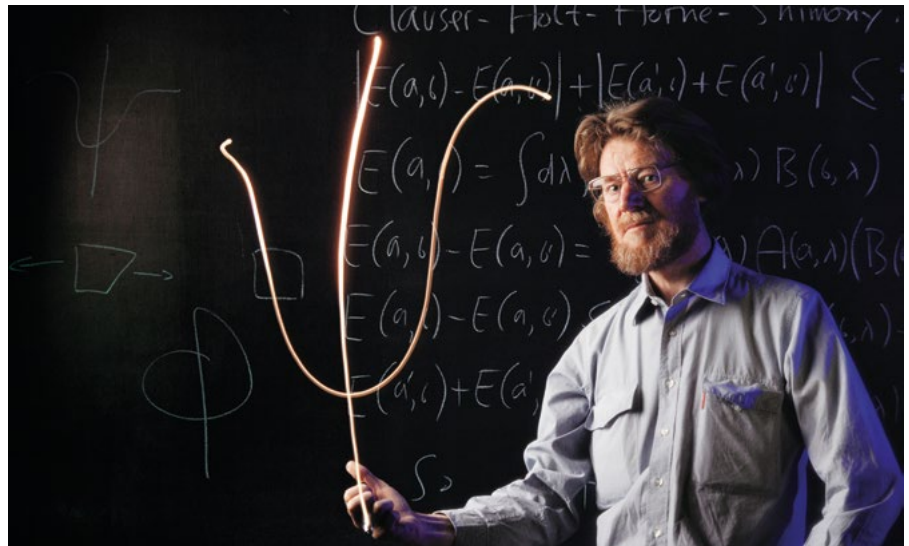
Klasik fiziğe ve görelilik kuramlarına göre tüm olaylar neden sonuç ilişkisiyle birbirlerine bağlıdır. Yaptığımız bir tercihin sonucu gelecek zamanda karşımıza çıkar. Örneğin bir cep telefonu ile sinyal gönderdiğimizde mesaj hedefe ulaştığında belli bir süre geçmiş olur. Doğada ışık hızından daha hızlı hiçbir şey olmadığına göre mesajın gönderilmesi ile mesajın alınması arasında belli bir süre geçmesi gerekir. Eğer ışık hızından hızlı bir iletişim mümkün olsaydı, görelilik kuramına göre gelecekte geçmişe mesaj göndermek mümkün olabilirdi. Kısacası, nedensel etkiler ışık hızından hızlı veya zamanda geriye doğru ilerleyemez. Buna yerel gerçeklik diyoruz. Einstein'a göre kuantum dolanıklığına sahip parçacıklar bize kuantum fiziğinin yerel gerçekliğe aykırı, dolayısıyla eksik bir kuram olduğunu söylüyor. Bunu sınamanın tek yolu, deneyler yaparak dolanık parçacıkların spinlerini ölçmek ve yerel gerçeklik ilkesinin mi yoksa kuantum fiziğinin mi doğru olduğunu görmektir. 1964'te John Stewart Bell adlı kuramsal fizikçi, fizik tarihinin en önemli makalelerinden birini yazarak EPR paradoksunu sınamanın bir yolunu önerdi. Ona göre, Einstein haklıysa, burada bir tercihin ölçümü, ötede bir ölçümü etkilememeliydi. Matematiksel bir formül ile de gizli değişkenlerin olup olmadığını sınavabileceğimizi gösterdi. 1972'den itibaren tasarlanan çeşitli deneyler Bell'in geliştirdiği formülasyona göre bu sınamayı yaptı. Sonuç hep kuantum fiziğinin lehine çıksa da, bazı deneysel eksiklikler nedeniyle her deneyde yerel gerçekliğe açık kapılar bırakılıyordu. Eş zamanlı yaratılan iki parçacığın fark-

lı yerlerdeki algılayıcılarda aynı anda yokalanması, tek bir parçacığın algılayıcıyı uyarmasındaki zorluklar gibi pratikteki pek çok problem, kesin sonuca ulaşılmasını engelliyordu. Einstein'ın ve yerel gerçekliğin avukatlığına soyunanları net bir şekilde susturmak mümkün olmamıştı. Ta ki 2015 yılına kadar: Ronald Hanson öncülüğünde Hollanda'da, yerel gerçekliğe açık kapı bırakmayacak şekilde bir deney gerçekleştirildi. Deneyde, aralarında 1,3 km mesafe bulunan dolanık elektronlar kullanıldı. Elektronların spinleri tam da kuantum fiziğinin öngördüğü şekilde çıkıyordu. Aradaki onca mesafeye rağmen, elektronlar bir şekilde aynı anda spin değerlerine karar veriyor ve bu değerler kuramsal öngörülerdekiyle bire bir aynı çıkıyordu. Artık biliyoruz ki, kuantum dolanıklığına sahip iki parçacıktan birinin değerini ölçtüğümüzde, eş zamanlı olarak diğerinin de değerini belirlemiş oluyoruz. Bu iki parçacık, aralarında ki mesafeden bağımsız olarak, bir şekilde birbirlerine bağlılar ve tek bir gerçekliğin ayrılmaz iki parçası olarak karşımızdalar. Peki elektronlar arası iletişim nasıl sağlandı? **Yoksa o elektronlar zaten tek bir varlığı mı temsil ediyorlar ki iletişim kurmalarına gerek kalmıyor?**

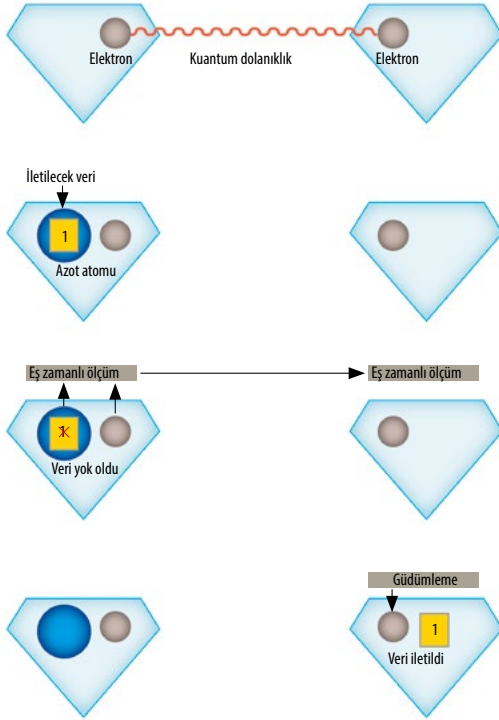
Bell teoremi her bir algılayıcıda gerçekleştirilen ölçüm türlerinin, deneyler tarafından özgürce seçilebileceğini ve böylece gizli değişkenlerin olup olmadığının saptanabileceğini varsayar. Ancak kimi

belirlenimci kuramlar, algılayıcılarda deneyi gerçekleştiren kişilerin tercihlerinin kendi özgür iradeleriyle değil fizik yasalarıyla çok önceden belirlendiğini savunur. Süperbelirlenimcilik denilen bu uç fikir, bizim özgür irade diye bir şeye sahip olmadığımızı, tüm fiziksel olayların ta Büyük Patlama anında belirlendiğini savunur ve olacak olan neyse onun yaşandığını ve gözlemlendiğini iddia eder. Kuantum dolanıklık üzerine kafa yoranlar arasında çoklu evren kuramlarından süperbelirlenimciliğe kadar çok farklı fikirlere sahip olanlarla karşılaşmak mümkün. Tüm bunlar bir yana, fizik ile felsefenin sınırlarının flulaştığı bu alanın teknolojiye bakan bir yönü olup olmadığı üzerinde durulmaya başlandı. Acaba kuantum dolanıklığına sahip parçacıklar kullanılarak bir eş zamanlı iletişim kaynağı yapmak mümkün mü?

Kuantum dolanıklığına sahip parçacıklar kullanılarak mesafeden tamamen bağımsız eş zamanlı iletişim için bilim insanları çoktan yola koyuldu. Ancak bu öyle zor bir hedef ki, hâlâ bunun mümkün olmayacağını söyleyen pek çok fizik kuramı var. Kuantum dolanıklığına sahip parçacıklara bakan iki kişi, tıpkı radyo dinleyen iki insana benzer. İki radyo alıcısıyla mesaj iletmek mümkün değildir. Fakat bilim, şimdiye dek sayısız tabuyu yıkmayı başardı. Washington Üniversitesi'nden John Cramer 2007'den beri kuantum dolanıklığına sahip fotonlarla eş zamanlı bilgi aktarımı üzerine deneyler gerçekleştiriyor.



Yaptığı çalışmalar hakkında “bu deney, masaüstünde ölçümler gerçekleştirerek fiziğin sınırlarını zorlamak için nadir bir fırsat” diyor ve henüz pes etmiş değil. Belki de fotonlar, eş zamanlı bilgi aktarımı için doğu parçacık değildir.



Qubitler ve Kuantum İletişim

Günümüzde bilgisayar teknolojisi veri iletiminde ikili sistemi kullanıyor. Bilgisayar ortamında sesler, yazılar, görüntüler, sayısal veri namına ne varsa hepsi elektronik cihazlarımızın içindeki milyonlarca minik transistörün yaptığı 1’lerden ve 0’lardan oluşuyor. Her (1,0) durumunu saklayan en küçük bellek birimine bir bit diyoruz.

Kuantum fiziği geliştikçe, bilim insanları atomaltı parçacıkların içerdiği bilgiyi de sayısal veri olarak kullanabileceğimizi hayal etti. Örneğin bir elektronun spininin artı ve eksi olması durumu, transistörlerdeki 1 ve 0 durumlarına karşılık gelebilir. Bunun ötesinde, bir elektronun aynı anda hem artı hem eksi olan spin değerlerinin bir bileşimini içerdiğini hatırlayacak olursak, kuantum yasalarının geçerli olduğu bitler (kuantum bit yani qubit) oluşturulduğunda, bu qubitlerin içereceği ve işleyebileceği bilgi klasik bitlerin işleyebileceğinden çok daha fazla olacak. Qubitler kullanan bir kuantum bilgisayarın, bildiğimiz en hızlı bilgisayarlardan binlerce kat daha hızlı işlem yapabilme ve daha çok veri depo-

layabilme potansiyeli var. Şu an tüm dünyada son derece aktif olarak ele alınan kuantum bilgisayar teknolojisinde her gün yeni bir gelişme oluyor ve bu hayal, gerçekleşmeye çok yakın. Hatta D-Wave Systems adlı bir de kuantum bilgisayar şirketi çoktan kuruldu ve birkaç ay önce 1000 qubit içeren bir işlemci geliştirdikleri duyuruldu bile.

Qubitler kuantum fiziksel yapılar oldukları için kuantum dolanık qubitler üretilebilir. Tabii herkesin ilk aklına gelen şey, kuantum dolanık qubitler kullanarak eş zamanlı haberleşmenin mümkün olup olmadığı. Şimdilik qubitler kullanılarak dışarıdan asla müdahale edilemeyen, yüzde yüz güvenli ve ışık hızında iletişim mümkün görünüyor. Bu yolla inanılmaz miktarda veri işlenebilir ve ışık hızıyla aktarılabilir. Eş zamanlı iletişim için kuantum bilgisayarların gelişmesini ve kuantum dolanıklık üzerine daha yoğun deneyler yapılmasını beklemeliyiz.

Delft Teknoloji Üniversitesi’nden Ronald Hanson ve grubunun duyurduğu sonuçlar “imkânsız” demeden önce bir daha düşünmemizi gerektiriyor. Deney kabaca şu yöntemle çalıştı: Grup azot atomu içeren iki elmas üretiyor ve elmasların içindeki dolanıklığa sahip elektronlar tuzaklanıyor. Deneyde bu elektronların oluşturduğu qubitler kullanılıyor. Daha sonra elmaslardan birindeki azot atomuna iletmek istenen kod yükleniyor. Azottaki kod dolanık elektrona aktarıldığında diğer elmas içindeki elektronda eş zamanlı olarak bu kod okunabiliyor. Sonuçta ilk azota aktarılan veri yok oluyor ama ikinci elmasın içinde aynı bilgi elde ediliyor. Bu çalışma *NY Times*’tan *Telegraph*’a düzinelerece gazeteye haber oldu, ama bilginin eş zamanlı aktarılması o kadar şaşırtıcı bir başarı ki, şüphe duymamak elde değil. Bu yüzden çalışma daha çok kuantum fiziğinin yerel gerçeklik karşısındaki başarısını göstermesiyle ön plana çıktı. Kim ne derse desin, bu deneyle daha şimdiden kuantum kriptografi çağını başlatacak sonuçlara ulaşmış durumdayız ve eş zamanlı iletişim ufukta görünmüş olabilir.

Kaynaklar

- Prof. Hanson grubunun sayfası: <http://hansonlab.tudelft.nl/teleportation/>
- Hensen, B., “Loophole-free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres”, *Nature*, Cilt 526, Sayı 7575, s. 682, 2015.
- Giustina, M., “Significant-Loophole-Free Test of Bell’s Theorem with Entangled Photons”, *Physical Review Letters*, Cilt 115, Sayı 25, s. 250-401, 2015.
- Shalm, L. K., “Strong Loophole-Free Test of Local Realism”, *Physical Review Letters*, Cilt 115, Sayı 25, s. 250-402, 2015.
- Bell, J. S., “On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox”, *Physics*, Cilt 1, Sayı 195, 1964.
- Aspect, A., Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate, <http://physics.aps.org/articles/v8/123>, 2015.
- Cramer, J., Quantum Entanglement, Nonlocality, and Back-In-Time Messages, http://faculty.washington.edu/jcramer/PowerPoint/Norwescon_20100403.ppt, 2010.
- Markoff, J., Scientists Report Finding Reliable Way to Teleport Data, <http://www.nytimes.com/2014/05/30/science/scientists-report-finding-reliable-way-to-teleport-data.html>, 2014.
- Young, B., Quantum Entanglement And Faster Than Light Data Transmission, http://www.legitreviews.com/quantum-entanglement-faster-light-data-transmission_143076, 2015.