Yirmi birinci yüzyılın rüyası, kuantum bilgisayarlar. Evrenimizi kavrayabilmek, doğa kuvvetlerinin işleyişini ve ilişkilerini tam olarak bilmemiz için gerekli hesaplama gücü, gelişen teknolojik uygarlığımızın gerektirdiği iletişim hızları, askeri sırlarımızı korumak, başkalarının ne yaptığını gizlice öğrenmek için bu bilgisayarları bekliyoruz. Çünkü kuramsal olarak bunların hesaplama güçleri ve hızları, sıradan bilgisayarlardan onlarca kat fazla. Şöyle yalnızca 300 işlem birimli bir kuantum bilgisayarın, 2300 işlemi, yani tüm Evren'deki toplam parçacık sayısı kadar işlemi, birkaç saniyede yapabileceği hesaplanıyor. Bu alanda yapılan çalışmalarsa, hâlâ mikroskobik dünya ile, tanıdığımız büyük ölçekteki dünyanın sınırlarındaki gri bölgede dolaşıyorlar. Kuram, hâlâ deneyin çok önünde koşuyor. Kuantum bilgisayarlar için harıl harıl algoritma üretiliyor. Buna karşılık laboratuarlarda geliştirilen prototipler son derece ilkel. Emekleme çağından yeni çıkan bebekler gibi birkaç adım attıktan sonra düşüyorlar. Ama gene de, içinde el yordamıyla yürüdüğümüz sis giderek aydınlanıyor. Son birkaç ay içinde açıklanan gelişmeler, kuramsal çalışmaların hızla sonuca yaklaştığını gösteriyor. Hatta kuantum şifreleme alanında pratik, kuramın önüne geçmiş bile. Belki de beklentilerimizin körüklediği sabırsızlık nedeniyle ağır gibi görünen ilerleme, çok farklı iki dünyanın araçlarını birleştirmek gibi güç bir işi başarmak zorunda. Telekom şirketlerinin, fizikçilerin ve gizli hükümet kuruluşlarının rüyasını süsleyen bu araçlardan beklenen, atomaltı dünyanın özelliklerini, yaşadığımız makroskobik dünyaya taşımaları. Oysa bu iki dünyanın işleyişi, dinamikleri çok farklı. Bu durumda beklentilerimize koşut hünerlere sahip kuantum bilgisayarların ortaya çıkması, mikroskobik dünyadaki nesnelerle makroskobik ölçüm araçları arasındaki uyumsuzluğun giderilmesine bağlı. Aradığımız köprü de ortaya çıkmış gibi görünüyor. Bu alanın önde gelen kuramcılardan Dmitri Averin'e göre fizikte son 20 yılın en büyük buluşlarından biri, milyarlarca elektron içeren süper iletken gibi makroskobik bir sistemin, mikroskobik dünyayı yöneten kuantum mekaniğinin ilkelerine göre davranabildiğinin kanıtlanmış olması. Bunun önemi şuradan kaynaklanıyor: Kuantum bilgisayar öncülleri, şimdiye kadar atom ya da moleküller içindeki parçacıkların spinlerinden ya da ışığın polarizasyonundan yararlanılarak gerçekleştirildi. Ancak bu modelleri küçültmek olanaksız. Klasik bilgisayarlardaysa katı hal parçalar, devrelerin birkaç yüz nanometreye (metrenin milyarda biri) kadar küçültülmesine olanak sağladı. Katı hal parçalar, şimdiye değin kuantum bilgisayarları için uygun sayılmıyordu. Çünkü bunların üzerindeki elektronların sayılamayacak ölçüde ve karmaşada kuantum durumu bulunur. Oysa kuantum bilgisayarlar kolayca saptanabilen "açık-kapalı" durumlara gerek duyuyorlar. İşte süper iletkenler bu açmazı ortadan kaldırdı. Çünkü üzerlerindeki elektronlar son derece düzenli biçimde hareket ediyorlar. Japon araştırmacılar da geçtiğimiz aylarda bu köprü üzerinde yürüyerek büyük düşün gerçekleşmesi yönünde önemli bir ilerleme sağladılar.

Farklı Dünyalar, Farklı Araçlar...

Böyle bir köprü neden bu kadar önemli? Bizler, dünyamızı, evrenimizi, alıştığımız kesin kurallarla yorumluyoruz. Bilimimiz, uygarlığımız, nesnelerin etkileşiminde bulunduğunu varsaydığımız kesinliğe, neden ve sonuç arasındaki düz akışa dayanıyor. Olağan yaşantımızda bir şey ya vardır, ya da yoktur. Süreçler, belirli, "mantıksal" bir sıra izlerler. Kaçınılmaz olarak, organizmamızdan kaynaklanan bu algılama sınırlamaları, kendi mantığımızı, kendi yaptığımız bilgisayarlara da taşımak zorunda bırakmış bizi. Bilgisayarlarımız, ister oda büyüklüğündeki süper hızlı çeşitleri olsun, isterse hesaplarımızı yaptığımız, yazılarımızı yazdığımız, İnternet'te "dolaştığımız" masaüstü çeşitleri, bu lineer mantığı yansıtıyor. Bildiğimiz, sıradan bilgisayarların tuğlaları, "bit" denen 1 ve 0 sayılarıyla basit işlemler yapan "mantık kapıları". Sözgelimi, bir "OLMAZ" kapısı "1"i "0"a "deviriyor", ya da bunun tersini yapıyor. Peki sıradan bilgisayarlarımız

bu girdilerin "1" ya da "0" olduğunu nasıl anlıyorlar? Basit: Elektrik akımının varlığı ve yokluğuyla. Yani "1", akımın varolduğunu, "0"sa yokluğunu gösteriyor. Bilgisayarlarımızın mantık kapıları da, cereyanı iletip kesen transistör dizilerinden oluşuyor. Karmaşık hesaplar, sıradan bilgisayarlarca sayıları seri halde dizilmiş kapılardan geçirerek yapılıyor. Kuantum dünyasındaysa işler farklı. Bir kere, bizim kavradığımız anlamda kesinlik diye bir şey yok. Zaten atomaltı ölçekteki doğa kuvvetlerinin (elektromanyetik, şiddetli ve zayıf çekirdek kuvvetleri) etkileşimini açıklayan kuantum mekaniğinin temel direği de ünlü "belirsizlik ilkesi". Alman fizikçi Werner Heisenberg'in ortaya koyduğu bu ilkeye göre bir parçacığın konum ve momentumunun çarpımı, her zaman sıfırdan büyük olmak zorunda. Bunun nedeni de parçacığın konumunu ya da hızını ölçmek için yapılan her gözlemin, gözlenen niceliği değiştirmesi. Kuantum alanlarında küçük çarpılmalar olarak yorumlanan parçacıkların kesin durumlarını belirlemek olanaksız. Parçacıklar ancak farklı konumlardan oluşan bir olasılık bulutu içinde bulunabilir. Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger'in bir "dalga fonksiyonu" olarak betimlediği bu üst üste binmiş gerçekler, sürekli bir uyum içinde bulunuyorlar. Ancak en ufak bir dış etken (örneğin gözlem) bu uyumu bozuyor ve biz olası durumlardan yalnızca birisini görebiliyoruz.

Deneyim çerçevemizde bulunmadığı için kavramakta zorlandığımız çoğul, yada paralel gerçekler olgusu, aslında bilgisayarlar için olağanüstü ufuklar açıyor. Bu, kuantum bilgisayarların "kuantum bit", ya da kısaca "kubit" denen işlem birimlerinin çok farklı bir özelliğinden kaynaklanıyor. Klasik bilgisayarların işlem birimlerinin "1" ve "0" olan iki ayrı "bit"ten oluştuğunu görmüştük. Oysa bir kubit, aynı anda hem "1", hem de "0". Yani kuantum mekaniğindeki gibi, olası durumların üst üste binmiş hali. Klasik bilgisayar, "bit"lerden oluşan dizileri sırayla teker teker inceleyip bir sonuca oluşurken, bir kuantum bilgisayar, tüm hesapları "aynı anda" yapabiliyor.

Kuantum mekaniğinde bir başka gariplik de, parçacık çiftleri arasında "dolanıklık" (entanglement) denen çok özel bir ilişkinin bulunması. Sistemdeki parçacıklardan biri üzerinde bir ölçüm yaptığınızda, öteki, binlerce ışık yılı ötede bile olsa, anında bu ölçümün etkisini duyuyor. Bu da, kuantum bilgisayarlarda kubit zincirleri oluşturulmasına olanak tanıyor.

Öncü Çalışmalar

Kuantum dünyasındaki dolanıklıktan makroskopik dünyada yararlanma düşüncesi, 1980'li yıllarda bilim dünyasında aniden fırtına gibi esti. ABD Argonne Ulusal Laboratuarı fizikçilerinden Paul Benioff, kuantum bilgisayar için bir mantık kapısı tasarladı. Onun düşünceleri, daha sonra IBM araştırmacılarından Charles Bennett ve Oxford Üniversitesi'nden David Deutsch tarafından daha da geliştirildi. 1994 yılındaysa AT&T Laboratuarları fizikçilerinden Peter Shor, kuantum bilgisayarlar için bir algoritma geliştirdi. Shor'un, yüzlerce haneden oluşan sayıları çok kısa sürede çarpanlarına ayırmak için geliştirdiği algoritma, araştırmaları daha da hızlandırdı ve bir ya da birkaç mantık kapısından oluşan ilkel "kuantum bilgisayarlar" ortaya çıkmaya başladı. California Teknoloji Enstitüsü fizikçisi Jeff Kimble, bir sezyum atomu aracılığıyla iki fotonu "doladı". Kimble ve ekibi, sezyum atomunu, optik resonator denen ve fotonları ileri geri yansıtan iki aynadan oluşan küçük bir odacığa yerleştirdiler: Böylelikle fotonların, sezyum atomunun dış elektronu ile etkileşme olasılığının artacağını düşündüler. Sezyum atomunda bu elektron, değişik enerji düzeylerinde bulunur. Aradaki farka eşit enerjili bir foton yakalarsa, bir düzeyden ötekine atlar. Araştırmacılar, sezyum içinde bir fotonun polarizasyonuna (kutuplanmasına)

duyarlı bir enerji geçişinden yararlandılar. Kutuplanma, fotonun elektrik alanının salınım yönüyle ilgilidir. Örneğin, alan kendi çevresinde dönüyorsa ve böylece foton ilerlerken bir heliks çiziyorsa, foton "dairesel kutuplanmış" demektir. Araştırmacılar, sezyum atomunda, yalnızca saat yönünde dönen alanlara sahip fotonlara duyarlı, ters yönlü fotonlardan etkilenmeyen bir elektron geçişi belirlediler.

Bu durumda, saat yönlü alana sahip bir foton "1", ters yöndeki alana sahip bir başka fotonsa "0" olarak kabul edilebilir. Kimble ve arkadaşları bu foton çiftlerini odacığa gönderdiler ve çıktıkları andaki kutuplanmalarını incelediler. Görüldü ki, 0-0, 0-1 ve 1-0 gruplarından oluşan çiftlerin etkileşimlerinde dikkat çekici bir şey yok. Oysa 1-1 çifti odacıktan şaşırtıcı bir değişiklikle çıktı. Kuantum fiziğinde parçacıklar birer "dalga fonksiyonu" ile betimlenirler. Bu dalganın da ötekiler gibi tepe noktaları ve çukurları vardır. 1-1 çifti odacıktan çıktığında dalga fonksiyonunun fazı (yani tepe ve çukurların konumu) değişmişti. Bunun da anlamı, fotonların, sezyum atomu aracılığıyla birbirleriyle etkileşmiş olmalarıydı. Fotonlar, tek bir düzlemde titreşen, yatay ya da dikey kutuplanma diye bilinen elektrik alanlarına da sahip olabilirler. Bunlar da dairesel kutuplanmış ışığın farklı konumlarının üst üste binmiş durumları, başka bir deyişle 0 ve 1'in üst üste binmiş durumları olarak kabul edilebilir. Böyle çoğul durumlu bir foton çifti de odacığa gönderilirse, bu çoğullukların 1-1 parçaları da etkileşerek dalga fonksiyonunun fazını değiştirirler. Yani çoğul kutuplanmış bu fotonlar, çıktıklarında daha da karmaşık bir çoğul kutuplanma durumu alırlar. Artık iki foton arasında dolanıklık bağı kurulmuş olur.

Jeff Kimble, fotonların dalga fonksiyonlarını değiştirerek bir mantık kapısı kurdu. Shor'un algoritması için tasarlanmış başka düzeneklerse, klasik bilgisayarlar gibi 1'leri ve 0'ları baş aşağı devirmek temeline dayalı kapılardan yararlanıyorlar. ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) araştırmacılarından Dave Wineland'in tasarladığı bir "OLMAZ" kapısı, hedef olarak seçilmiş bir "bit"i "0"dan "1" konumuna, ya da tersine deviriyor. Ancak bunu, "kontrol" denen ikinci bir girdi "1" değerindeyse yapıyor. Eğer kontrol "bit"i "0"sa , o zaman hedef in çıktısı, girdisiyle aynı konumda oluyor. Aynen Kimble'ınki gibi, Wineland'in kapısı da 1 ve 0'ların üst üste binmiş durumlarını da işlemden geçirebiliyor.

NIST ekibi, aynı nesne içindeki iki ayrı kuantum sistemi arasında dolanıklık bağı kuruyor. Bu, artı elektrik yüklü bir berilyum iyonu. Araştırmacılar önce iyonu Paul Kapanı denen bir elektrik alan ağı içinde hapsediyorlar. Merkeze itilen iyon titreşmeye başlıyor. Burada iyon, 1 milikelvin (-272,99°C)'ye soğutuluyor, böylece her türlü hareket durduruluyor ve dış etkiler perdeleniyor. İyonun titreşim enerjisinin düzeyi kontrol "bit"i oluyor. En düşük titreşim düzeyindeki bir iyon "0", bir sonraki en yüksek titreşim düzeyindeki bir iyon da "1" oluyor. Hedefse, dönmesine (spin) bağlı olarak iki enerji düzeyinden birinde bulunan dış elektron. Spin, dönen bir topun açısal momentumu gibi canlandırılabilecek bir kuantum mekaniği terimi. Bu örnekte, spin, üst ve alt yönde olmak üzere iki ayrı değer taşıyor. Wineland ve ekibi, lazer darbeleriyle elektronu bu iki değer arasında oynatabiliyorlar. Örneğin bir vurduğunuzda elektron üst spin durumuna, bir daha vurulduğunda gene eski alt spin konumuna geçiyor. Lazer darbesinin süresi önemli. Eğer elektronu bir durumdan ötekine geçirmek için t süresi gerekiyorsa, 2t, onu bir düzeyden diğerine götürüp geri getirir. İşin garibi, 1/2 t uzunluğunda bir lazer darbesinin, elektronu üst ve alt spin konumlarının üst üste binmiş durumuna getirmesi. Peki kapı nasıl işliyor? Elektronun alt

spinde ve "1"e karşılık gelen titreşim durumunda olduğunu varsayalım. Araştırmacılar üç lazer darbesi kullanıyorlar. Birincisi, 1/2 t süreli; elektronu alt ve üst spinlerin üst üste bindiği duruma getiriyor. İkinci darbe, deneyin bir özelliğine göre ayarlanmış. İki spin durumunun dışında, üçüncü bir enerji düzeyine sahip ve bu düzeye erişmek için gereken enerji, iyonun titreşim durumuna bağlı. İkinci lazer darbesinin enerjisi, elektronu, ancak üst spin konumundayken ve iyon'un titreşim düzeyi de "1"e karşılık gelecek konumdayken bu üçüncü düzeye fırlatacak biçimde ayarlanmış. Dolayısıyla da, üst üste binmiş konumların sadece bu parçası etkileniyor.

Bu arada bir "hile" daha yapılıyor. NIST ekibinden Dawn Meekhof bunu şöyle açıklıyor: İkinci lazer darbesi 2t süreyle veriliyor. Yani, elektronu üst konuma yükselttikten sonra tekrar geri getiriyor. Elektron döndüğünde dalga fonksiyonunun fazı 180 derece dönmüş oluyor. Yani dalganın tepeleri, eskiden çukur olan yerlere geliyor. Gelelim üçüncü darbeye. Bu kez lazer, ilk darbe gibi 1/2 t süreyle veriliyor ve elektron'un alt spinden üst spin konumuna dönme süreci tamamlanıyor. Böylece başlangıçtaki alt spinli elektron, üst spinli konuma çevrilmiş oldu. Bu da klasik bilgisayarlarda "0"ın "1"e devrilmesine benziyor. İyonun titreşim durumu "0"sa, ara (ikinci) lazer darbesinin elektron üzerinde hiçbir etkisi olmuyor. Ayrıca 180 derecelik faz değişimi olmadan, elektron , üçüncü darbeyle vurulduğunda da üst spin durumuna geçmeyip, alt spin durumuna geri dönüyor. Bu, klasik bilgisayarların "0 girdi-0 çıktı" durumuna karşılık geliyor.

Şimdi de şöyle bir deney düşünün: Başlangıçta iyonun titreşim durumu, 0 ve 1 konumlarının üst üste binmiş durumu olsun ve elektron da alt spinli konumda bulunsun. Lazer darbeleri peş peşe gelmeye başlayınca iyon, üst üste binmiş çok sayıda konumdan geçtikten sonra, "0 titreşim durumu-alt spin" ve "1 titreşim durumu-üst spin" konumlarının üst üste binmiş durumuna gelecektir. Dolayısıyla, titreşim ve spin durumları arasında dolanıklık bağı kurulmuş oldu. Artık elektronun spin konumunu "alt" olarak ölçerseniz, iyonun titreşim durumunun 0 olduğunu herhangi bir ölçüme gerek duymadan bileceksiniz.