

Kuantum Bilgi ve Kuantum Işınlanma

Dr. Öğretim Üyesi Furkan Semih Dündar

Amasya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Bu yazıya kuantum mekaniğine kısa bir giriş ile başlangıç yapacağız. Burada kuantum süperpozisyon ve kuantum dolanıklığa gireceğiz. Daha sonra kuantum bilgi ve kubitler yani kuantum bitlerden söz edeceğiz. Ardından kuantum programlama ve kuantum bilgisayarlara değineceğiz. Daha sonra ise süperyoğun kodlama, kuantum ışınlanma ve bu alandaki bir son gelişmeden bahsedeceğiz. Bildiğiniz kısımlar varsa onları rahatlıkla atlayabilirsiniz. Hadi başlayalım!

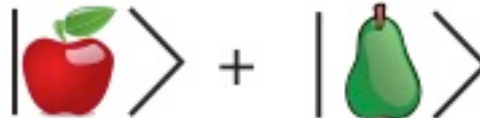
Kuantum Mekaniğine Giriş

Kuantum mekaniği, yirminci yüzyılın başlarında Planck, Heisenberg, Bohr, Schrödinger ve daha birçokları tarafından oluşturulan ve bugün de kuantum alan kuramı ve parçacık fiziğinin standart modeli ile şekillenmiş olan modern fiziğin iki sütunundan birisidir. Diğer sütün ise Einstein'ın izafiyet ya da diğer adıyla genel görelilik kuramıdır ama ona burada değinmeyeceğiz.

Kuantum mekaniğinin insanın doğal içgüdüleriyle ters düşen fakat deneyler tarafından da yanlışlanmamış olan sıra dışı özellikleri bulunur. Bunlar **kuantum süperpozisyon** ve **kuantum dolanıklıktır**. Gelin şimdi onların ne olduklarına yakından bakalım.

Kuantum Süperpozisyon

İlk okulda hepimize elmayla armutun toplanmayacağını öğretilmiştir. Fakat kuantum süperpozisyon bize bunun **mümkün olduğunu** söylüyor! Diyelim ki elimizde çok sayıda elektron (atomun etrafındaki eksi yüklü tanecikler), proton (atom çekirdeğindeki pozitif yüklü tanecikler) ve nötronlar (atom çekirdeğindeki yüksüz tanecikler) olsun. Bunları belirli bir şekilde dizerek ve bağlayarak elma yapabiliriz. Farklı bir dizilim ve bağ kullanırsak da armut yapabiliriz. Kuantum süperpozisyon ilkesi kuantum parçacıkların (ya da daha genel konuşursak kuantum sistemlerin) üst üste binebildiğini söylüyor. Ya da daha çarpıcı bir şekilde ifade edersek, aynı anda farklı hallerde olabildiğini söylüyor. Dolayısıyla bir parçacık hem sol hem de sağ elinizde olabilir. Kuantum mekaniği açısından sorun yok. Aynı şekilde bir elektron, proton ve nötron çorbası aynı anda hem elma hem de armut olabilir. Bunun fizikteki gösterimi şekildeki gibi.



Şekil 1 Kuantum mekaniğine göre elma ile armut toplanabilir. Bu şu demektir: bir şey aynı anda hem elma hem de armut olabilir. Çizim: Furkan Semih Dündar.

Aslında ilk okul öğretmeninizin söylediği klasik açıdan yanlış değil. Çünkü klasik olarak bir cisim aynı anda birden fazla yerde ya da birden fazla özellikte olamaz. Dolayısıyla bir şey aynı anda

hem elma hem de armut olamaz. Peki neden etrafımızda bir şeyi aynı anda iki farklı yerde görmüyoruz? Bunun cevabını kuantum mekaniğinin Kopenhag Yorumu'nda bulabiliriz. Bu yoruma göre cisim aynı anda birden fazla özelliğe sahipse (konum gibi) ölçüm yapıldığından bunlardan sadece bir tanesi ölçülür. Örneğin Elma + Armut durumundaki bir sistemi 100 kere gözlemlerseniz ortalamada 50 tanesinde elma, diğer 50 tanesinde de armut gözlemlenir. Neticede iş olasılıksal olduğu için bu sayılar 49'a 51 gibi de olabilir. Fizikte bu sayıları değiştirmenin yöntemleri var fakat burası için yarı-yarıya olasılık yeterli.

Kuantum Dolanıklık

Kuantum mekaniğinin bir diğer, belki de en önemli, özelliği kuantum dolanıklık. Newton fiziğinde indirgemeci felsefi akım hakimdi. Yani bütün, parçalarının toplamı kadardı; daha fazlası değil. Dolayısıyla laboratuvarında yaptığımız bir deneyin, evrenin geri kalanında hangi şeylerin olduğundan çok da fazla etkilenmediği fikri hakimdi. Bu fikir de pratikte gayet iyi iş görüyordu.

Fakat kuantum mekaniğinde bulunan dolanık durumlar (ki birazdan anlatacağız) indirgemecilikle açıklanamaz. Yani kuantum mekaniğinde sistem ya da evren, parçalarının toplamından daha fazladır. Kuantum süperpozisyonun ne olduğuna daha önce değindik. Kısaca hatırlatmak gerekirse bir sistemin ya da örneğin cismin aynı anda farklı özellikleri taşıyabilmesi kuantum süperpozisyon olarak adlandırılır. Bunun için de elma+armut örneğinden bahsettik.

Bir düşünce deneyi yapalım. Elimizde iki kutu olsun. Eğer ilkinde elma ikincisinde armut varsa bu hal ElmaArmut olsun. Tam tersi durumdaysa ArmutElma olsun. Şimdi elimizde iki adet kuantum hal var. Kuantum süperpozisyon ilkesi gereği bunların toplamı da gayet tabii bir kuantum hal olacaktır: ElmaArmut + ArmutElma. Bu fizikte şekildeki gibi gösterilir.



Şekil 2 İki kutunun içeriğinin kuantum dolanıklık sergilediği durum. Herhangi bir kutu açıldığında %50 ihtimalle elma, %50 ihtimalle ise armut gözlemlenecektir. Fakat sistemin toplamı parçanın toplamından daha büyüktür. Gözlem sonuçları arasında bir korelasyon vardır. Çizim: Furkan Semih Dündar.

Eğer elimizdeki kuantum hal ElmaArmut + ArmutElma ise herhangi bir kutu açıldığında yarı yarıya ihtimalle elma ya da armut gözlemlenecektir. Fakat kuantum mekaniğinde bütün, parçaların toplamından daha fazlasıdır. Kopenhag Yorumu'na göre sistemi gözlemlediğimiz zaman ölçüm sonucu ya ElmaArmut ya da ArmutElma olacaktır. Yani kutudan ne çıkacağı, iki kutu arasında birbirinin zıttıdır. Eğer ilk kutuda elma varsa ikincisi armut; yok eğer ilk kutuda armut varsa ikincisinde de elma gözlemlenecektir. Schrödingerin kedisi deneyinde kuantum dolanık kullanılmıştır (Bu deneyin kökenine yönelik bir yazıyı Bilim ve Ütopya Portalı'na yazmıştım. Yazının sonundaki kaynakça ve ileri okuma bölümünden ilgili bağlantıya ulaşabilirsiniz).

ElmaArmut + ArmutElma sisteminde gördüğümüz üzere dolanık sistemin bir parçası üzerinde gözlem yaparak sistemin diğer tarafında ne gözlemleneceği **anında** belli oluyor. Bu ilk etapta Einstein'ın özel görelilik kuramında ifade ettiği üzere hiçbir şeyin ışıktan hızlı gidemeyeceği

koşulu ile şu açıdan çelişmiyor: kuantum dolanıklığı kullanarak **ışıkta hızlı bilgi aktarmak mümkün değil**.

Kuantum Bilgi

Kuantum bilgiye geçmeden önce dijital bilgisayarlardan ve bit kavramından bahsedelim. Dijital bilgisayarlar, yani bu yazının yazıldığı günümüzde ticari olarak satılan ve hemen hemen herkesin kullandığı bilgisayarlar, bilgiyi ikili olarak kodlarlar. Bu kodlama birimlerinde birine **bit** adı verilir. Bitler 0 ya da 1 olabilirler. Bitlerin çeşitli şekillerde gruplanmasıyla daha büyük birimler oluşur. Mesela 8 bite bir bayt denir. Bu nedenle internet hızınız 10 megabit/s ise bir dosyayı indirirken saniyede yaklaşık 1,25 megabayt hacminde veri iner. Bilgisayarların sabit sürücülerini bitleri uzun süre saklamaya yarar. Bu şekilde dosyalarımızı bilgisayarda saklayabiliriz ve tüm verilerimiz 0 ve 1'lerin çeşitli kombinasyonlarda dizilmesiyle ifade edilir.

Kuantum bilgisayarlar **kuantum bit**, ya da kısaca **kubit**, adı verilen bilgi birimlerini işler. Bir kubit ölçüldüğünde ya 0 ya da 1 olur. Fakat prensip olarak bir kubit 0 ve 1 bitlerinin bir süperpozisyonu olabilir. Tıpkı Elma + Armut hali gibi 0 biti + 1 biti olarak bir kubit değer alabilir. (Bunu matematiksel olarak şöyle gösteriyoruz. $|0\rangle, |1\rangle$ sıfır ve bir kubitlerine karşılık geliyor. Eğer sıfır + bir yazarsak bu şu şekilde yazılır: $|0\rangle + |1\rangle$). Mutlak değerlerinin karaları toplamı 1 edecek şekilde $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ 'in başına herhangi karmaşık sayı konabilir. Bir kubitin en genel ifadesi bu şekildedir).

Kubitler Nelerden Yapılabilir?

Kubit iki boyutlu bir uzayın elemanıdır. Daha özele incek olursak bir kubit, küre üzerindeki bir nokta ile birebir temsil edebiliriz. Burada önemli olan iki boyut. **Elektronların** spin adı verilen bir özellikleri vardır. Bu parçacıklar tıpkı birer küçük mıknatıs gibidirler, elektrik yüklerine ilaveten. Dolayısıyla bir elektronun spinini ölçüldüğünde ya kuzeyi ya da güneyi gösterir. Dolayısıyla bir elektronu kubit olarak kullanabiliriz.

Hidrojen atomu merkezde bir proton ve etrafında bir elektrondan oluşur. Atomun etrafındaki elektron çeşitli yörünge ve enerji seviyelerinde var olabilir. Eğer biz bir hidrojen atomundaki elektronu sadece 1. ve 2. enerji seviyelerinde yer alabilecek şekilde tasarlırsak hidrojen atomundan da bir kubit yapılabilir.

Buraya kadar iki örnek verdik, daha pek çokları da kullanımda: **fotonlar** (ışık parçacıkları), **süperiletkenlerle** yapılan kubitler, **iyon-tuzaklı** kubitler, **topolojik** kubitler ve diğerleri.

Kuantum Bilgisayarlar

Klasik bilgisayarlarla, hesaplanabilecek her şey er ya da geç hesaplanabilir. Peki kuantum bilgisayarlara neden bu kadar önem atfediliyor? **Bunun sebebi kuantum bilgisayarların bazı problemleri çok hızlı bir şekilde çözebilmeleri**. Günümüz kriptografisinin bazı algoritmaları büyük bir sayının asal çarpanlarına makul bir sürede ayıramayacağı hipotezine dayanıyor. Asal sayı, 1 ve kendisi dışında bölünen olmayan sayı demektir. Kabul olarak 1 asal sayı değildir. Asal sayılara örnek verecek olursak 2, 3, 5, 7, 11 sayıları verilebilir. **Kuantum Shor Algoritması** adı verilen bir algoritma bir sayının asal çarpanlarını kuantum bilgisayarlarla çok hızlı bir şekilde hesaplanabilmesine olanak tanıyor. Yani kötü niyetli birisinin elinde yeterince büyük bir kuantum bilgisayar varsa artık **banka hesaplarımız güvende değildir**, ya da internetteki

gizliliğiniz. Öte yandan kuantum bilgisayarlar kuantum fiziği ya da kimyasında bazı problemleri ele almak için de çok uygun olabilir. Şu ana kadar kuantum bilgisayarlar için pek çok algoritma yazıldı. Bunlara ileri okumalar kısmındaki **Quantum Algorithm Zoo** bağlantısı ile ulaşabilirsiniz. O sitede, algoritmaların ne kadar hız kazandırdığı da belirtiliyor.

Kuantum Programlama

Dünya'da kuantum bilgisayarlar sayıca azlar ve fiyatları da çok pahalı. Bu nedenle çoğumuzun elindeki seçenek kuantum bilgisayar simülasyonu kullanmak klasik bilgisayarlar üzerinde. Bunun için **IBM'in geliştirdiği Qiskit Python kütüphanesi** (dokümantasyonunun Türkçe'ye çevirilme süreci başladı başlayacak) ya da **Microsoft'un Q# dili** kullanılabilir. Örnek verecek olursak, 20 kubitlik bir kuantum bilgisayarı simüle etmede bir sıkıntı çıkmıyor. Öte yandan IBM size Qiskit ile yazdığınız programı bulut sistemi üzerinden gerçek bir kuantum bilgisayarda çalıştırma imkânı da sağlıyor.

Kuantum programlama öğrenmek için temel olarak biraz matematik altyapısı (karmaşık sayılar, lineer cebir) gerekiyor. Ayrıca **QTurkey** adındaki bir oluşum ülkemizde zaman zaman **kuantum programlama çalıştayları** açıyor ve kuantum programlamaya giriş seviyesinde bir hazırlık sunuyor. Bir çalıştaylarına ben de katıldım ve gayet verimli geçtiğini söyleyebilirim. Öte yandan zaman zaman **Hackathon**'lar da düzenliyorlar. Site bağlantılarına yazının sonundaki İleri Okuma kısmından erişebilirsiniz daha detaylı bilgi için.

Süperyoğun Kodlama

Kubitler, elma ve armut gibi sistemin bir halidirler: süperpoze ya da dolanık hale gelebilirler. Diyelim ki iki kişi var: Ayşe ve Berk. Ayşe ve Berk önceden hazırlanmış dolanık olan iki kubite sahipler. Ayşe'de bir kubit, Berk'de bir kubit. Daha sonra Ayşe'ye 2 bitlik bir klasik bilgi geliyor. Ayşe ise bu bilgiye göre kendi kubitine bazı işlemler uyguluyor ve ardından bunu Berk'e gönderiyor. Berk ise Ayşe'nin gönderdiği kubiti kullanarak 2 bitlik bilgiye ulaşıyor. Özetle ne oldu diye sorarsak 2 bitlik bir bilgiyi göndermek için sadece 1 kubit kullandık. Bundan dolayı bu protokole **süperyoğun kodlama** adı veriliyor.

Kuantum Işınlanma

Kuantum ışınlanma yada diğer adıyla kuantum teleportasyon, **bir sistemin kuantum bilgisini başka bir sisteme aktarmaktır**. Örneğin bir kubitten bahsedelim. Elimizde bir kubit var. Bunun taşıdığı kuantum bilgiyi çok başka bir yerdeki kubite aktarabilirsek, o kubit ışınlanmış olur. Bir elektronun da spin özelliğinden dolayı bir kubit olabileceğini düşünürsek, bu ışınlanma fikriyle bir anlamda elektronu ışınlamışız demektir.

İnsan moleküller ve atomlardan oluşur. Bunlarsa kuantum mekaniği ile tasvir edilir. Yani insanı bir anda tanımlayan bir kuantum bilgi vardır. Biz eğer bu kuantum bilgiyi başka bir yere gönderebilirsek eksiksiz olarak, o zaman insanı da ışınlamış sayılırız. (Tabi insan çok ama çok fazla parçadan oluştuğu için en azından kısa ve orta vadede insanın ışınlanması pek mümkün durmuyor.) Bu sürece bir anlamda faks makinelerinin çalışması gibi bakabiliriz. Faks makinesine bir belge koyarız ve o belge taranır. Daha sonra telefon sinyali aracılığıyla istenilen bir yerdeki faks makinesinde yeniden basılır. Buna deyim yerindeyse klasik ışınlanma denebilir.

Bir kubitin nasıl ışınlandığı şöyle açıklanabilir. Ayşe'nin ve Berk'in paylaştığı dolanık kubit çifti vardır. Birisi Ayşe'de diğer Berk'te. Bir de Ayşe'de onun Berk'e ışınlamak istediği başka bir

kubit vardır. Ayşe dolanık kubitte ve ışınlamak istediği kubitte iki ölçüm yapar ve bunların sonucunu Berk'e klasik bitler kullanarak gönderir. Berk ise bu bilgiyi kullanarak Ayşe ile zamanında paylaştığı dolanık kubite çeşitli işlemler uygular ve bu sayede de Ayşe kubiti ışınlanmış olur. Tabii ışınlama süreci içinde Ayşe'nin ışınlamak istediği kubit, üzerinde ölçüm yapıldığı için kuantum bilgisini kaybeder, ama Berk kubiti mükemmel olarak tekrar oluşturur. Sanki verilen kağıdı yok edip başka bir yere gönderen faks makinesi gibi.

Kuantum Işınlanma Konusunda Önemli bir Gelişme

23 Aralık 2019 tarihinde **Nature** dergisinde yayınlanan bir makaleye göre araştırmacılar iki çip arasında kuantum ışınlanma gerçekleştirdiler. Bu çalışmada kubitler fotonlarla (ışık parçacıkları) temsil edildi. Fotonların polarizasyon dediğimiz bir özelliği var, bu da elektrik alanın salınım yaptığı eksen olarak ifade edilir. Eğer foton z yönünde gidiyorsa, elektrik alanı x ya da y yönünde salınım yapabilir; ya da bunların herhangi süperpozisyonunda. Yani iki boyutlu bir sistem; tıpkı elektronun spini gibi.

Yukarıda daha önce bahsettiğimiz kuantum ışınlanma protokolü gürültüsüz bir kuantum kanal kullanıyordu. Tabii ki gerçek hayatta sinyalde gürültü vardır. Bu çalışmada birbirlerine 10 metrelik fiber optik kabloyla bağlı iki silisyum tabanlı çip arasında %91 oranında bir başarıyla kuantum ışınlanma yaptıklarını ifade ediyorlar. Bu çalışma ileride daha yüksek ışınlama başarı oranı yakalanmasında ya da daha uzun mesafelere kuantum ışınlama yapılmasına giden yolda önemli bir mihenk taşı olarak ele alınabilir.

Kaynakça ve İleri Okuma

- <https://bilimveutopya.com.tr/makale/schrodingerin-kedisinin-kokeni>
- <https://quantumalgorithmzoo.org/>
- <https://www.nsf.gov/pubs/2000/nsf00101/nsf00101.htm>
- <https://www.ibm.com/quantum-computing/learn/what-is-quantum-computing/>
- <https://docs.microsoft.com/en-us/quantum/?view=qsharp-preview>
- <https://qiskit.org/>
- <https://www.qturkey.org/>
- Llewellyn, D., Ding, Y., Faruque, I.I. *et al.* Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon. *Nat. Phys.* (2019) doi:10.1038/s41567-019-0727-x
- <https://www.bristol.ac.uk/news/2019/december/quantum-teleportation.html>