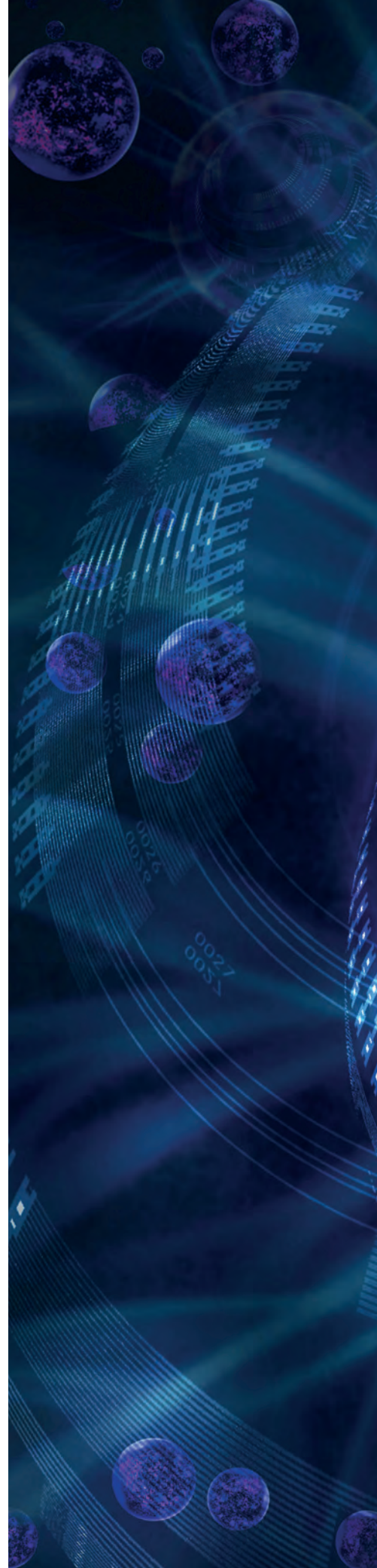


Kuantum Mekaniği ve Nedensellik

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Yakın zamanlarda klasik bilgisayarlardan çok daha hızlı çalışan kuantum bilgisayarlar geliştirmek için çalışmalar yapan çeşitli araştırma grupları, yeni kuantum devreleri geliştirdi. Bu devrelerin en önemli özelliği, içlerinde meydana gelen fiziksel süreçler arasında belirli bir sebep-sonuç ilişkisi olmaması. Sağduyu birbiriyle ilişkili iki olaydan birinin diğerinden önce olması gerektiğini söyler. Fiziksel süreçlerde sebebin sonuçtan önce gelmesi gerektiğini söyleyen ilke, nedensellik olarak adlandırılır. Ancak yakın zamanlarda yapılan deneylerdeki süreçler arasında belirli bir nedensellik sıralaması yok.

Üstelik bu durum bilgi eksikliğinden de kaynaklanmıyor. Kuantum mekaniği ilkeleriyle matematiksel olarak tutarlı bir biçimde açıklanabiliyor. Geliştirilen yeni teknolojinin yakın gelecekte günlük hayatımızda yer edeceği düşünülüyor. Üstelik daha da önemlisi yapılan deneyler çok önemli kuramsal gelişmelere de yol açabilir.



Kuantum mekaniğindeki sebep-sonuç ilişkisi, kuramın geliştirildiği ilk yıllardan beri tartışma konusudur. Bir sistem üzerinde belirli bir özellik ile ilgili ölçüm yapıldığında çıkabilecek çeşitli sonuçlar vardır. Bu sonuçların hangi olasılıkla ortaya çıkacağı kuramsal olarak hesaplanabilir. Ancak sonucun ne olacağı kesin olarak söylenemez. Kuantum mekaniğinin standart yorumu olan Kopenhag yorumuna göre ölçüm sonuçları tamamen rastlantısaldır, sonuçlara hiçbir sebep atfedilemez.

Niels Bohr ve Werner Heisenberg tarafından geliştirilen Kopenhag yorumuna karşı çıkanların başında Albert Einstein geliyordu. 1935 yılında çalışma arkadaşları Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile beraber yayımladıkları bir makalede Kopenhag yorumuyla açıklanamayacak bir düşünce deneyi ortaya attılar. Bugün EPR paradoksu olarak anılan bu düşünce deneyinde birbirine “dolanık” iki parçacık vardır. Önce parçacıklar birbirinden uzaklaştırılır, daha sonra biri üzerinde ölçüm yapılır. Parçacıkların birbirine dolanık olması biri üzerinde yapılan ölçümün diğerinin durumu hakkında da bilgi vereceğini söyler. Kısa süre sonra ikinci parçacık üzerinde yapılacak bir ölçümün sonucu, birinci parçacık üzerinde yapılan ölçümle zaten önceden belirlenmiştir. Einstein bu düşünce deneyinin Kopenhag yorumunu yanlışladığını düşünüyordu. Çünkü bir parçacık üzerinde yapılan ölçümün, anında diğerinin durumunu da belirlemesi için iki parçacığın ışıktan daha hızlı bir biçimde etkileşmesi gerekir ki özel görelilik kuramına göre bu durum imkânsızdır.



Werner Heisenberg

Einstein’a göre parçacıkların sahip olduğu özellikler sadece rastlantısal olarak ölçüm anında belirlenemezdi. Parçacıklar ölçüm yapılmadan önce de belirli özelliklere sahip olmalıydı. Ancak bugüne kadar yapılan deneysel çalışmalar Einstein’ın bu düşüncesini doğrulamadı. Dolanık parçacıklar üzerinde yapılan deneyler, ölçüm sonuçları arasındaki bağlantının parçacıkların önceden belirli özelliklere sahip olmasıyla açıklanamayacağına işaret ediyor.

Kopenhag yorumu her ne kadar bugün hâlâ tartışılıyor olsa da, bu yorumda hemen hemen herkesin hiç tartışmasız doğru olarak kabul edeceği bir şey vardır: Olaylar belirli bir sırada gerçekleşir. Önce bir ölçüm yapılır. Daha sonra bu ölçümün sistem üzerindeki etkileri görülür.

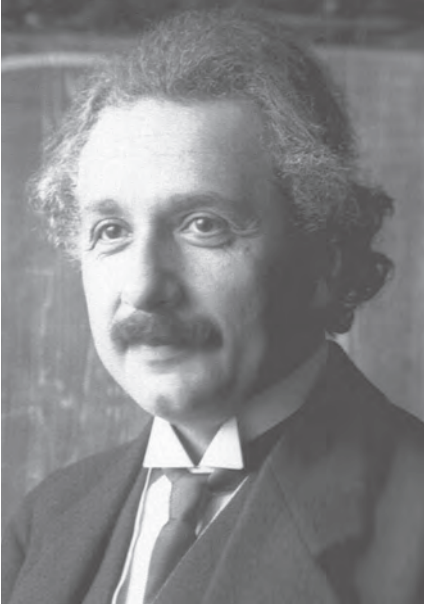
Nedensellik, bir olayın başka bir olay üzerinde etkisi olabilmesi için zaman sıralamasında ondan önce gelmesi gerektiğini söyler. Geçmişte olanlar bugün olanları etkileyebilir.



Niels Bohr

Gelecekte olacakların bugün olanlar üzerinde bir etkisi olmasını ise beklemeyiz. Olaylar arasında belirli bir nedensellik sıralaması vardır. Ancak geçtiğimiz yıllarda yapılan çalışmalar gösteriyor ki bu mantık her zaman doğru olmayabilir. Birbiriyle ilişkili iki olayın hangisinin daha önce hangisinin daha sonra olduğunu söylemenin imkânsız olduğu sistemler tasarlamak mümkün. İlk bakışta bu durumun sadece bilgi eksikliğinden kaynaklandığını, biz olayların hangi sırada olduğunu bilmesek de birisinin daha önce diğerinin daha sonra meydana geldiğini düşünebilirsiniz. Ancak doğru değildir.

Kuantum mekaniğindeki belirsizlikler bilgi eksikliğinden kaynaklanmaz. Sistemlerin içkin özelliğidir. Dolayısıyla bu sistemlerde belirli bir nedensellik sıralaması yoktur. Meydana gelen fiziksel süreçler sırasunda zaman hem geleceğe hem de geçmişe doğru akıyormuş gibidir.



Albert Einstein

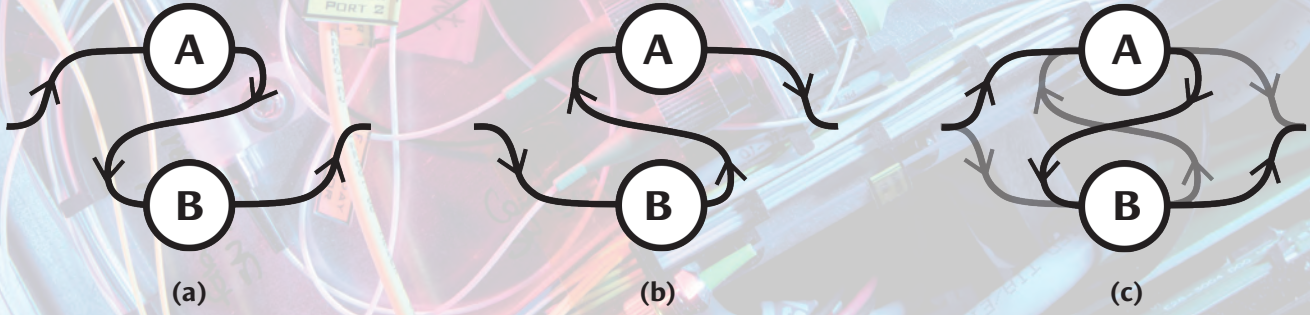
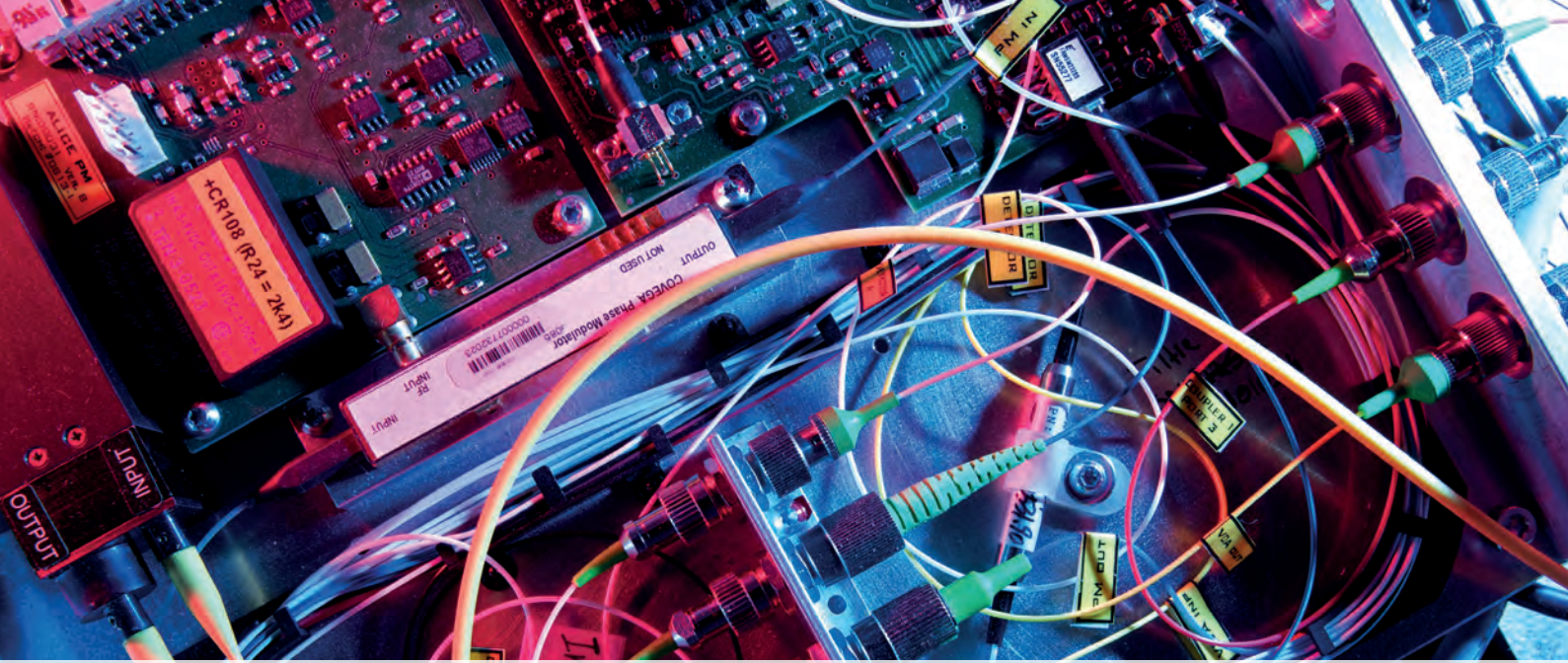
Nedensellik sıralaması belirsiz sistemlerin nasıl tasarlandığını ve üretildiğini anlamak için önce süperpozisyon kavramının ele alınması gerekiyor. Bir elektronun spinini ölçtüğümüzü düşünelim. İki muhtemel sonuç vardır: Elektronun spininin ya ölçüm yapılan yönde (yukarı) ya da zıt yönde (aşağı) olduğu bulunur. Ancak elde edilen sonuç elektronun spininin ölçümden önceki durumu hakkında bilgi vermez. Bir elektronun spini ölçümden önceki bir anda iki muhtemel sonucun herhangi bir süperpozisyonunda da bulunabilir. Bu durumdaki bir elektronun spini ne aşağı ne de yukarı yönde değil, bu iki durumun doğrusal bir kombinasyonundadır.

Olaylar arasında belirli bir nedensellik sıralaması olmayan sistemler tasarlayan araştırmacılar, bir sistemdeki farklı nedensellik sıralamalarının süperpozisyon durumlarını oluşturuyorlar. Aşına olduğumuz makroskobik dünyadan bir

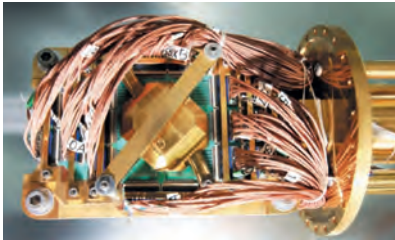
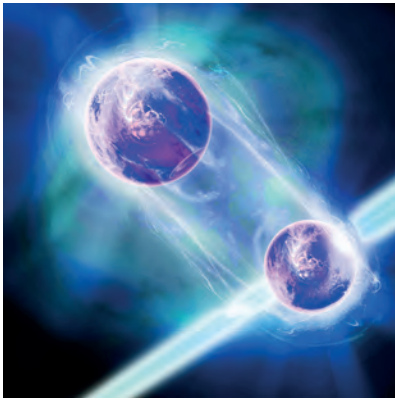
benzetme yaparak bu durumu anlamaya çalışalım. İki şehir arasında yolculuk edecek bir tren olsun. Trenin takip edebileceği iki yol vardır. Ya önce A şehrinden sonra B şehrinden geçebilir ya da önce B şehrinden sonra A şehrinden geçebilir. Trenin takip edeceği rotayı bir anahtar belirler. Anahtar bir yöne çevrilmişse AB, diğer yöne çevrilmişse BA yolundan gider. Rotayı belirleyen anahtar süperpozisyon durumunda olduğundaysa her iki rotayı da takip eder. Bu durumda iki olay (trenin A ve B şehirlerinden geçmesi) arasında belirli bir nedensellik sıralaması yapılamaz. Tren önce A şehrinden ya da önce B şehrinden geçti demenin bir imkânı yoktur. Üstelik bu durum bilgi eksikliğinden de kaynaklanmaz. Her ne kadar ilke olarak mümkün olsa da makroskobik büyüklükteki böyle bir sistemi tasarlamak ve gerçeğe dönüştürmek neredeyse imkânsızdır. Ancak araştırmacılar buna benzer sistemleri mikro ölçekte üretmeyi başarıyor.

Avusturyalı bir grup araştırmacı 2015 yılında daha önceleri başkaları tarafından öne sürülmüş prosedürleri takip ederek süperpozisyon durumunda kuantum devreleri üretti. Kuantum bilgisayarlar için tasarlanan bu devrelerden geçen parçacıkların takip edebileceği iki rota var. Ya önce A kapısından sonra B kapısından ya da önce B kapısından sonra A kapısından geçebilirler. Parçacıkların takip edeceği yolu anahtar işlevi gören bir kübit (kuantum bit) belirliyor. Kübit 0 durumunda olduğunda parçacık önce A kapısından sonra B kapısından geçiyor. Parçacığın B kapısına girdiği sıradaki durumu A kapısından çıktığı sıradaki durumu tarafından belirlendiği için iki olay arasında belirli bir sebep-sonuç ilişkisi var. Kübit 1 durumunda olduğundaysa parçacık önce B kapısından sonra A kapısından geçiyor ve bu durumda yine belirgin bir sebep-sonuç ilişkisi var. Kübit 0 ve 1 durumlarının süperpozisyonunda olduğundaysa parçacık her iki rotayı da takip ediyor.





İki kapı (A ve B) içeren bir devrede parçacık (a) ya önce A kapısından, sonra B kapısından (b) ya da önce B kapısından, sonra A kapısından geçebilir. Yakın zamanlarda geliştirilen kuantum devrelerindeyse (c) bir parçacık her iki rotayı da takip edebiliyor.



Bu durumda birbirleriyle ilişkili olayların (parçacığın A ya da B kapısından geçmesi) biri diğerinden daha önce olmadığı için aralarında belirgin bir sebep-sonuç ilişkisi yok.

Başka araştırma gruplarının farklı sistemler üzerinde yaptığı benzer çalışmalar da var. Bu çalışmaların, gelecekte çok daha hızlı bilgi aktarım yöntemlerinin geliştirilmesiyle sonuçlanacağı düşünülüyor. Bilgi taşıyan sinyallerin geçtiği kapılar süperpozisyon durumunda olduğunda her iki kapının da aynı anda birbirine sinyal gönderdiği söylenebilir ki bu durum iki işlemin aynı anda yapılması ve böylece ka-

pılar arasındaki iletişimin çok daha hızlı ve verimli hale gelmesi demek. Gerçi geçmişte de kuantum süperpozisyon ve kuantum dolanıklıktan yararlanılarak hız artırımının mümkün olduğu biliniyordu. Ancak geçmişte kullanılan yöntemlerde belirli bir nedensellik sıralaması vardı. Sistemde nedensel süperpozisyon durumlarının olmasıysa başka yöntemlerle mümkün olmayan biçimlerde bilgi aktarımına izin veriyor ve hızın daha da artmasını sağlıyor. Araştırmacılar, geliştirilen yeni yöntemin yakın gelecekte çeşitli uygulamalarda kendine yer bulabileceğini belirtiyor.

Yapılan çalışmalar önemli kuramsal gelişmelere de yol açabilir. Kuantum nedenselliğın daha iyi anlaşılmasıyla modern fiziğın en temel sorularının bazılarının çözülebileceğı düşünülüyor. Örneğın kuantum mekaniğinin temelini oluşturan Schrödinger denklemi kullanılarak yapılan hesaplar, her ne kadar deney sonuçlarını tahmin etmekte çok başarılı olsa da denklemin ne anlama geldiğı hâlâ tartışma konusu. Eğer kuantum mekaniğı düşünülğü gibi doğanın bilgiyi işleme ve dağıtmasıyla ilgili bir kuramsa, nedensellik üzerine yapılan çalışmalar kuramı daha iyi anlamamızı sağlayabilir. Örneğın kimilerine göre kuantum mekaniğinin “nedensellik yapısını” daha iyi anladığımızda, fotonları hem parçacık hem de dalga olarak tanımlamaktan ya da belirsizliklerden kurtulabilir, kuramı daha sezgisel bir biçimde yeniden ifade edebiliriz.

Kuantum nedensellik üzerine yapılan araştırmalar, yaklaşık 100 yıldır üzerinde çalışılan bir başka konuda da yararlı olabilir: kuantum mekaniğı ve genel görelilik kuramlarının birleştirilmesi. Nedensellik, görelilik kuramında önemli bir rol oynar. Işığın sonlu bir hızla hareket etmesi (etkileşimin yayılma hızının sonlu olması) tüm fiziksel olayların bir nedensellik sıralaması içinde düzenlenmesini sağlar. Dolayısıyla kuantum mekaniğı ve genel göreliliğın bir araya getirilmesi çabalarının başarıya ulaşabilmesi için kuantum nedenselliğın tam anlamıyla anlaşılması çok önemli. ■

Kaynaklar

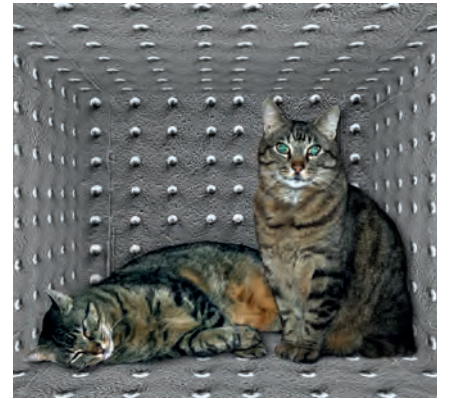
Ball, P., “A world without cause and effect”, *Nature*, Cilt 546, s. 590, 2017.

Procopio, L. M. ve ark., “Experimental superposition of orders of quantum gates”, *Nature Communications*, Cilt 6, Makale No:7913, 2015.

Rubino, G., ve ark., “Experimental verification of an indefinite causal order”, *Science Advances*, Cilt 3, Makale No:e1602589, 2017.



Erwin Schrödinger



Kuantum nedenselliğın daha iyi anlaşılmasıyla modern fiziğın en temel sorularının bazılarının çözülebileceğı düşünülüyor.