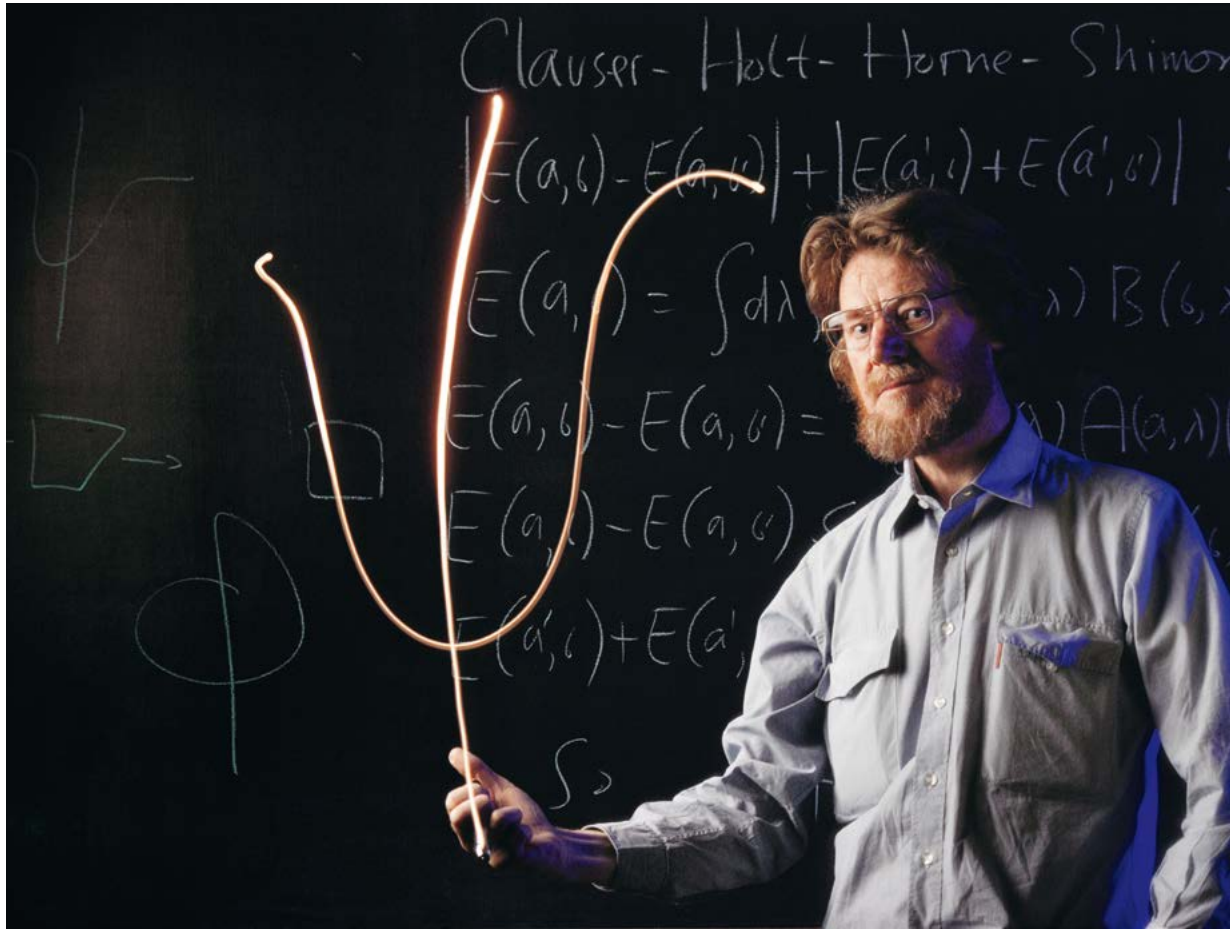


Bell Teoreminin 50. Yılı



John Stewart Bell

Kuzey İrlandalı fizikçi John Stewart Bell'in kendi adı ile anılan teoremi yayımlamasının üzerinden elli yıl geçti. Ancak teorem hâlâ kafa karıştırmaya ve tartışma konusu olmaya devam ediyor. Kimilerine göre bugüne kadar geliştirilmiş en derin anlamlara sahip teorem olan Bell teoreminin ifade ettiği şey özetle şudur: *Kuantum mekaniğinin tüm sonuçları, yerel gerçeklik özelliğine sahip bir*

kuram ile elde edilemez. Teoremin kendisinin doğruluğu tartışılmaz olsa da sonuçları kafa karıştırır. Yerellik ve gerçeklik, klasik mekaniğin iki vazgeçilmez unsuru olduğu için, Bell teoremi kuantum mekaniğinin, klasik mekaniğe benzetilemeyeceğini söyler. Bu durum kuantum mekaniğinin herhangi bir yorumunda ya yerellikten ya gerçeklikten ya da her ikisinden de vazgeçilmesi gerektiği anlamına gelir.

Fizikçi N. D. Mermin'e göre çağdaş fizikçiler Bell teoremi karşısındaki tavırlarına göre ikiye ayrılır:

1. Bazı fizikçiler Bell teoremi karşısında sıkıntıya düşerler ve sinirlenirler.
2. Bazı fizikçiler ise sıkıntıya düşmezler ve sinirlenmezler. Mermin, fizikçilerin çoğunun bu sınıfa girdiğini söyler. Ancak bu sınıfın da ikiye ayrılması gerektiğini belirtir.

- Bazı fizikçiler neden sinirlenmediklerini açıklamaya çalışırlar. Ancak ya teoremi tam anlamıyla kavramamışlardır ya da açıklamalarının yanlışlığı gösterilebilir.

- Bazı fizikçiler ise sıkıntıya düşüp sinirlenmezler ancak bu durumun nedenlerini açıklamazlar. Mermin bu sınıfa girenlerin durumunun anlaşılmasız olduğunu söyler ve Princeton'da çalışan bir arkadaşının Bell teoremini anlayıp da sinirlenmeyen birisinin "kafasının içinde taş olduğunu" söylediğini de ekler.

Bell teoreminin neden sinir bozucu olduğu, yerellik ve gerçeklik terimlerinin ne anlamda kullanıldığının kavranmasıyla daha iyi anlaşılır.

Önce kuantum mekaniğinin en yaygın yorumu olan Kopenhag yorumunun kısa bir özetini yapalım. Daha sonra bu yorumun yerellekle ve gerçeklikle ilgili nasıl kafa karışıklığına sebep olduğuna bakalım.

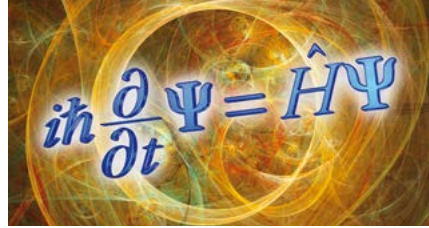
Kuantum mekaniğinin fiziksel sistemlere uygulanması, üç aşamaya bölünebilir:

1. Temsil: Sistemin durumunu dalga fonksiyonu adı verilen bir fonksiyonla temsil eder.
2. Evrim: Sistemin belirli bir andaki dalga fonksiyonu biliniyorsa, Schrödinger denklemi kullanılarak herhangi bir andaki dalga fonksiyonu hesaplanabilir.
3. Ölçüm: Sistemin herhangi bir özelliği ölçüm yaparak belirlenir. Ölçüm sonucunda bulunabilecek sonuç, Schrödinger denkleminin özdeğerlerinden biridir. Dalga fonksiyonu, farklı özdeğerlerin ölçülme *ihtimalleri* hakkında bilgi verir. Ayrıca ölçümden sonra sistemin durumu, hangi durumda olduğu bulunmuşsa o duruma çöker. Ancak ölçümden önce sistemin belirli bir özelliği yoktur.

Aksi açıkça belirtilmedikçe yazının devamındaki kuantum mekaniği ile ilgili ifadelerin tamamı Kopenhag yorumuna aittir.

Gerçeklik

Gerçeklik terimi en genel anlamıyla bir nesnenin, üzerinde yapılan ölçümlerden bağımsız olarak bir özelliğe sahip olması olarak tanımlanabilir. Klasik mekanik de gerçeklik özelliğine sahiptir. Örneğin bir nesnenin üzerinde yapılan ölçümlerden bağımsız olarak her zaman belirli bir konumu ve belirli bir enerjisi vardır. Bu özellikler yapılacak ölçümlerle istenilen bir kesinlikle belirlenebilir. Ölçümlerde az da olsa belirsizlik olması, sistemin belirli özelliklere sahip olmadığı anlamına gelmez. Klasik mekanikte hareketi hesaplamak için kullanılan denklemler belirlenimci olduğu için, bir sistemin belirli bir andaki özellikleri biliniyorsa gelecekteki özellikleri de hesaplanabilir. Ölçümler sadece sistemin sahip olduğu özelliklerin belirlenmesine yarar.



Kuantum mekaniğine göre bir sistemin gerçekten bir özelliğe sahip olup olmadığı çetrefilli bir konudur.

Kuantum mekaniğinin uygulanması ile ilgili, yazının başında bahsedilen üç aşamanın, en sorunsuz olanı ikincisidir. Schrödinger denklemi de klasik mekanikteki hareket denklemleri gibi belirlenimcidir. Ancak Schrödinger denkleminin çözümleri konum, momentum, enerji gibi sistemin özelliklerini tanımlayan değişkenler değil dalga fonksiyonlarıdır. Dalga fonksiyonları ise sistemin hangi özelliklere sahip olduğunu değil hangi özelliklere sahip olma ihtimali olduğunu söyler. Bazı durumlarda olasılık 1 olabilir (ölçüm sonucunda elde edilebilecek sadece bir sonuç olabilir), ancak bu sonuçların olasılığa dayalı olduğunu değiştirmez.

Sistemin özelliklerinin belirlenmesinde ölçümlerin rolü nedir? Ölçümlerle elde edilen sonuçlar, ölçüm cihazından bağımsız mıdır yoksa bir cisim ölçümler sonucunda bulunan özelliklerini ölçüm cihazı ile etkileşmesi sonucunda mı kazanır? Kuram herhangi bir ölçüm yapılmadan önce sistemin özelliklerinin belirsiz olduğunu söyler. Üstelik bu belirsizlik bilgi eksikliğinden kaynaklanan bir durum değil sistemin içkin bir özelliğidir. Yani ölçüm yapılmaya kadar sistemin belirli bir özelliği yoktur. Dolayısıyla kuantum mekaniğinin en yaygın yorumu gerçeklik özelliğine sahip değildir. Einstein bu durumu eleştirmek için "Birisin kafasını kaldırıp gökyüzüne bakmasa Ay yerinde olmayacak mıydı?" diye sormuştu.

Yerellik

Özel görelilik kuramının evreni kavrayışımızda sebep olduğu en önemli değişiklik etkileşimlerin doğası ile ilgilidir. Daha önceleri etkileşimlerin uzayda sonsuz bir hızla yayıldığı düşünülürdü. Bu durumda uzayın herhangi bir noktasında gerçekleşen bir olay uzayın tamamında anında algılanırdı. Örneğin elinizde konumunu kontrol edebildiğiniz elektrik yüklü bir cisim ve sizden on ışık yılı mesafede (ışığın on senede katettiği mesafe) konumu sabitlenmiş, elektrik yüklü başka bir cisim olsun. Siz elinizdeki cismin konumunu değiştirdiğiniz zaman cisimlerin birbirine uyguladığı elektromanyetik kuvvetin büyüklüğü de değişecektir. Özel görelilik kuramı öncesi bakış açısına göre bu değişiklik siz elinizdeki cismin konumunu değiştirdiğiniz anda olur. Başka bir deyişle konum değişikliği bilgisi on ışık yılı mesafedeki cisme sonsuz bir hızla yol alarak anında ulaşır. Özel görelilik kuramının geliştirilmesinden sonra bu anlayış tamamen değişti. Deneylerle doğrulanan yeni anlayışa göre etkileşimler uzayda sonsuz değil sonlu bir hızla yayılırlar. Elektromanyetik kuvvet için etkileşimin yayılma hızı ışık hızıdır. Dolayısıyla özel görelilik kuramına göre, on ışık yılı mesafedeki cisme etki eden elektromanyetik kuvvet, siz elinizdeki cismin konumunu değiştirdikten on yıl sonra değişir.

Etkileşimlerin uzayda sonlu bir hızla yayılması “yerel” oldukları anlamına gelir. Uzayzamanın bir noktasında gerçekleşen bir olayın başka bir noktada gerçekleşen bir olayı etkileyebilmesi için iki olay arasındaki mesafenin ışık hızı ile aşılabilecek kadar küçük olması gerekir. Eğer mesafe bu kadar küçükse zamansal olarak önce gelen olay diğerini etkileyecektir. Ancak eğer iki olay arasındaki mesafe ışık hızı ile aşılamayacak kadar büyükse olayların birbirinden bağımsız olduğu söylenir. Bu olayların biri diğerini etkileyemez, biri diğerinin geçmişinde ya da geleceğinde değildir.

Etkileşimlerin sonlu bir hızla yayılması, olayların bir nedensellik sıralaması içinde gerçekleşmesini sağlar. Eğer gözlem yapılan bir referans sisteminde bir olay (sebebe) başka bir olaya (sonuç) neden oluyorsa, yerellik, gözlemlenebildikleri diğer tüm referans sistemlerinde de bu olayların aynı zaman sırasıyla gerçekleşeceğini söyler. Yani klasik mekanikte, olaylar hangi referans sisteminde gözlemlenirse gözlemlensin her zaman sebep sonuçtan önce gelir.

Kuantum mekaniğinin, klasik mekaniğin vazgeçilmez bir unsuru olan yerellik özelliğine sahip olup olmadığı ise tartışmalıdır. EPR paradoksu kuantum mekaniğinin yerellik ile ilgili sebep olduğu kafa karışıklıklarını örnekendirir.

EPR Paradoksu

Kuantum mekaniğinin yerellik ve gerçeklik konusunda neden sorunlu olduğunu anlamak için Einstein, Podolsky ve Rosen tarafından kuantum mekaniğini eleştirmek için öne sürülen bir paradoksa (EPR paradoksu) bakabiliriz. Bu paradoksu anlamının en iyi yolu Yakir Aharonov ve David Bohm tarafından öne sürülen bir düşünce deneyine odaklanmaktır.

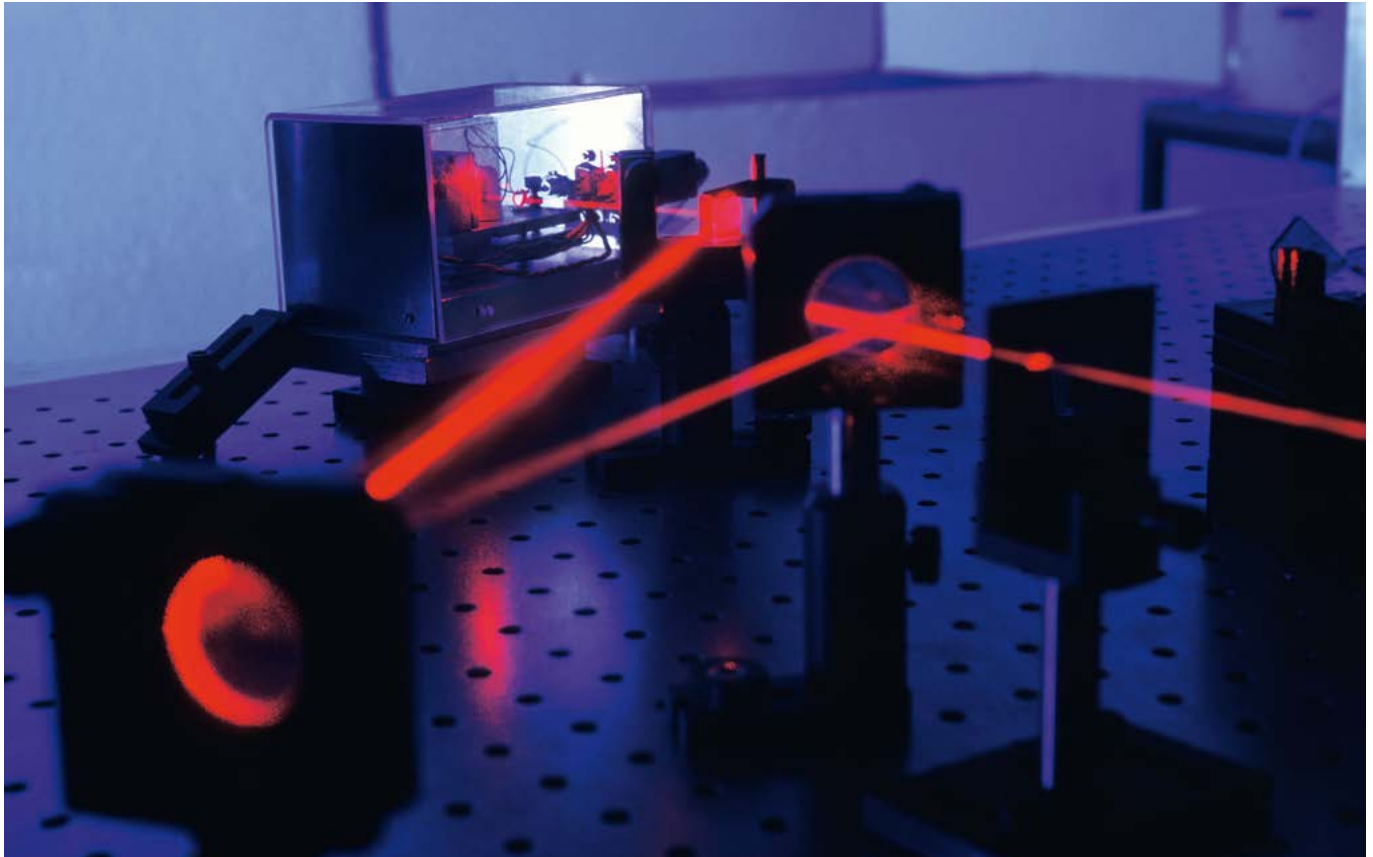
Düşünce deneyi şöyledir. Önce spinleri birbirine dolanık (dolanıklık ile ilgili açıklayıcı bir yazıyı 562. sayının Merak Ettikleriniz köşesinde bulabilirsiniz) durumda iki elektrondan oluşan bir sistem hazırlanır. Daha sonra bu elektronsuz zıt yönlere doğru yol alarak birbirinden uzaklaşır. Daha sonra elektronsuz birinin spini ölçülür.

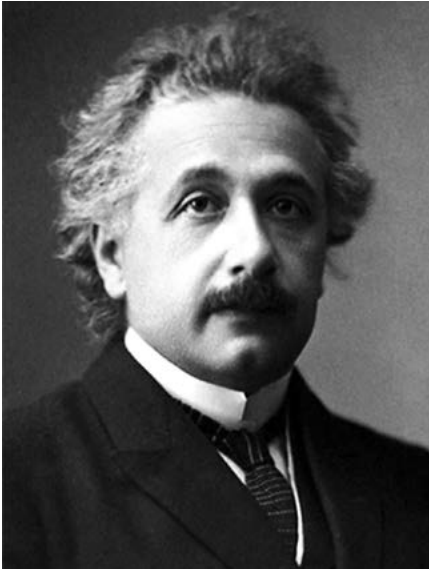
Bu durumda sistemin durumu ne olacaktır ve bu durum nasıl yorumlanmalıdır?

Bu yazının başında bahsettiğimiz kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumuna göre, ölçüm yapıldığı anda sistemin durumu belirli bir duruma çöker. Düşünce deneyinde bu ölçüm elektronsuz sadece biri üzerinde yapılmaktadır. Ancak çöken sadece bir elektronsuz durumu değildir. Kuantum mekaniği -elektronsuz durumu birbirine dolanık olduğu için- her iki elektronsuz durumunun da “anlılık” olarak çökeceğini söyler. Bu durumu ikisi ölçüm cihazlarına biri de sistemin hazırlandığı yere yakın üç gözlemci açısından ele alalım.

Sistemin hazırlandığı yerdeki gözlemci, her iki elektronsuz da aynı mesafede olduğu için elektronsuzların durumunun eş zamanlı olarak çöktüğünü gözlemler. Ancak elektronsuzların yakınlarındaki gözlemciler için durum farklıdır. Birinci elektronsuzya yakın olan gözlemci -özel görelilik kuramına göre bilgi uzayda sonlu bir hızla yayıldığı için- önce birinci elektronsuzunun durumu-

Dolanıklık ile ilgili bir deney düzeni





Albert Einstein



Boris Podolsky



Nathan Rosen

nun sonra da ikinci elektronun durumunun çöktüğünü gözlemleyecektir. Bu gözlemciye göre ikinci elektronun spin durumunun çökmesine birinci elektron üzerinde yapılan ölçüm “sebebe” olmuştur. Ancak aynı olay ikinci elektrona yakın gözlemci tarafından bunun tam tersi şekilde yorumlanır. Bu gözlemciye göre önce ikinci elektronun spin durumu daha sonra birinci elektronun spin durumu çökmüştür. Dolayısıyla birinci elektronun spin durumunun çökmesinin nedeni ikinci elektron üzerinde yapılan ölçümdür. Dolayısıyla üç farklı gözlemcinin olayı gözleme şekilleri nedensellik ilkesi (sebebin sonuçtan önce olması) ile uyumsuzdur. Aynı olay farklı referans sistemlerinde gözlemlendiği zaman “sebebe” ve “sonuç” yer değiştirmektedir. Bu durumun sebebi kuantum mekaniğine göre bir sistemin bir parçası üzerinde yapılan ölçümün sistemin tüm parçalarını aralarındaki mesafeye bakmaksızın anlık olarak etkilemesidir. Yani sistemin bir parçası üzerinde yapılan ölçümün bilgisi diğer parçalara sonsuz bir hızla ulaşır ki bu durum özel görelilik kuramından kaynaklanan yerellikte çelişir.

Kuantum mekaniğin ölçümlerinin nedensellikte çelişmesinin neden bir sorun olduğu makroskobik dünyadan örneklerle daha iyi anlaşılır. Örneğin sebebin sonuçtan önce gelmediği bir referans sisteminde bir çocuk annesinden önce doğmuş ola-

bilir! Ancak kuantum mekaniğin ölçümlerinin nedensellikte çelişmesinin bir sorun olmadığını düşünenler de var. Fizikçi John G. Cramer, nedensellik ilkesinin “zayıf” ve “güçlü” olarak ikiye ayrılması gerektiğini belirtiyor. Güçlü ilke tüm fiziksel olaylarda sebebin sonuçtan önce gelmesi gerektiğini belirtir. Zayıf ilke ise sadece makroskobik nesnelere ve gözlemciler arasındaki iletişim için geçerlidir. Cramer'e göre makroskobik nesnelere için nedenselliğin geçerli olmaması mantığa aykırı durumlara yol açsa da aynı şeyin mikroskobik nesnelere için de geçerli olduğunu düşünmek için bir sebep yok. Dolayısıyla zayıf ilke yeterlidir.

Ölçümlerle ilgili bir diğer sorun bir parçacık üzerinde yapılan ölçümün diğer parçacığın durumunu da belirlemesidir. Bir parçacık üzerinde yapılan ölçüm sonucunun o parçacığın ölçüm cihazıyla etkileşmesinin sonucu olduğu söylenebilir. Ancak ölçüm cihazı etkileşmediği ikinci parçacığın durumunu nasıl belirleyebilir? Einstein, Podolsky ve Rosen bu durum için “gerçekliğin hiçbir mantıklı tanımı böyle bir şeye izin vermez” diye yazmıştı.

Einstein, Podolsky ve Rosen'in EPR paradoksundan çıkardığı sonuç, kuantum mekaniğinin hâlâ eksiklikleri olduğuydü. Kuantum mekaniğinin yerini alabilecek, yerellik ve gerçeklik özelliklerine sahip bir kuramın geliştirilebileceğini düşünenlerdirdi.

Gizli Değişkenler

Einstein ve arkadaşları kuantum mekaniğinin yerel gerçeklik ile çelişmesinin sebebinin, kuramın içermediği “gizli değişkenler” olduğunu düşünüyordu. Gizli değişkenler ile kastedilenin ne olduğunu anlamak için istatistiksel mekaniğin makroskobik sistemlere uygulanmasının ne anlama geldiğine bakabiliriz.

İstatistiksel mekaniğin sistemin durumunu tanımlamak için kullanılan değişkenler -örneğin sıcaklık ve basınç- tek tek sistemin içerdiği parçacıkların değil sistemin tamamının özellikleridir. Kuram sistemin belirli bir andaki özelliklerinin istatistiksel ortalamalarını tahmin eder ancak tam değerlerini vermez. Örneğin kapalı bir kabın içindeki gazın kabın duvarlarına yaptığı basınç, kabın duvarlarına çarpan taneciklerin momentumlarına ve kaba çarpma yönlerine göre anlık olarak sürekli değişir. Kuramın tahmin ettiği ise sürekli olarak değişen anlık değerlerin istatistiksel ortalamasıdır. Eğer kabın içindeki tüm taneciklerin belirli bir andaki konumları ve momentumları belirlenebilseydi, kabın duvarlarına etki eden basıncın anlık değerini hesaplamak mümkün olurdu. Ancak bu bilgiye ulaşmak imkânsızdır. Dolayısıyla istatistiksel mekanik göz önüne alındığında, taneciklerin konumlarının ve momentumlarının, kuramda yer almayan gizli değişkenler olduğu söylenebilir.

Kuantum mekaniği için geliştirilmiş gizli değişken kuramlarından biri David Bohm'a aittir. Bohm'un kuramı esasen kuantum mekaniğinin yeniden yorumlanmasıdır ve kuantum mekaniğinin standart formülasyonu ile tamamen aynı tahminleri yapar. Bohm'un kuramında dalga fonksiyonları ölçüm sonuçları hakkında bilgi vermenin yanı sıra yeni bir rol daha üstlenir. Dalga fonksiyonları, parçacıklara etki eden kuantum mekaniğine özgü bir kuvvetin kaynağı olan bir alan da tanımlar. Bu kuantum mekaniğine özgü kuvvet, kuantum mekaniğinin yaygın yorumlarında, parçacıkların potansiyel enerji engellerini sanal momentumla tünellere geçmesi gibi mantığa aykırı gözükten olguları daha mantıksal bir çerçevede açıklar. Bohm'un kuramına göre gizli değişkenler, sistemin içerdiği parçacıkların konumları ve momentumlarıdır. Bohm'un yorumuna göre parçacıkların belirli konumları ve momentumları vardır yani kuram gerçeklik özelliğine sahiptir. Kuantum mekaniği ile yapılan olasılığa dayalı tahminler, parçacıkların konumlarını ve momentumlarını belirlemenin imkânsızlığından kaynaklanır. Bohm'un kuantum mekaniği yorumu gerçeklikle değil ama yerellelikle çelişir. Bu durumun nedeni kuantum mekaniğine özgü kuvveti tanımlayan dalga fonksiyonunun, aralarındaki mesafe ne olursa olsun parçacıkların anlık olarak iletişim kurmalarına izin vermesidir.

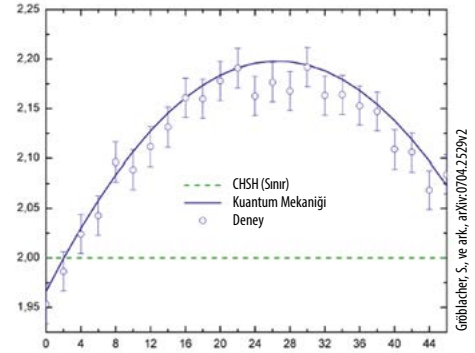
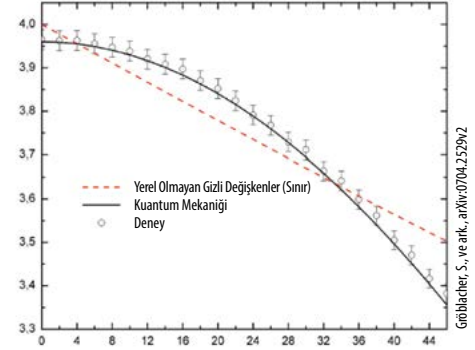
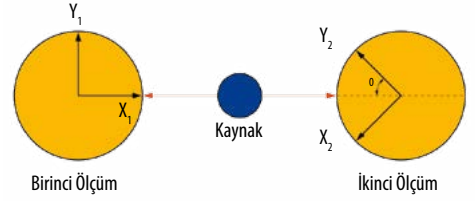
Bell Teoremi

John Steward Bell 1954'te yayımladığı makalede EPR paradoksunu ele alarak, kuantum mekaniğinin yerel gerçeklik özelliğine sahip olacak şekilde yeniden formüle edilmesi durumunda, iki parçacık üzerinde yapılacak spin ölçümlerinin sonuçları arasındaki bağılımlarla ilgili bir eşitsizlik türetti. Yerel gerçeklik özelliğine sahip bir kuramın eşitsizlikleri sağlaması gerekir. Ancak kuantum mekaniği kullanılarak yapılan hesaplar eşitsizlikleri sağlamaz. Bell makalesini şöyle sonlandırmıştı:

“İstatistiksel tahminleri değiştirmeden ölçümlerin sonuçlarını belirlemek amacıyla kuantum mekaniğine parametrelerin eklendiği bir kuramda, aralarında ne kadar mesafe olursa olsun bir ölçüm cihazının diğer ölçümün sonuçlarını etkileyebileceği bir mekanizma olmalıdır. Üstelik sinyal anlık olarak yol almaldır, dolayısıyla böyle bir kuram Lorentz değişimsiz [özel görelilik kuramı ile uyumlu] olamaz.

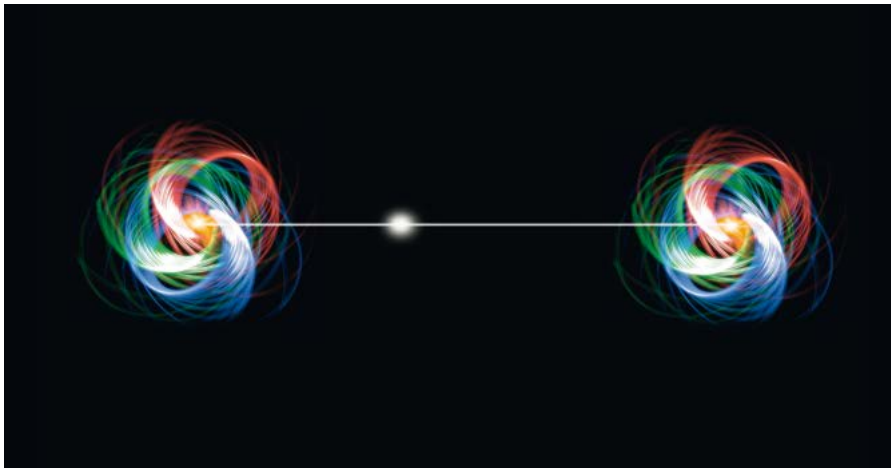
Ancak kuantum mekaniğinin tahminlerinin geçerliliği sınırlıysa durum değişir.”

Özetle Bell teoremi, kuantum mekaniğinin tahminlerinin, kuramın yerel gerçeklik özelliğine sahip olacak biçimde yeniden yorumlanamayacağını söyler. Eğer kuantum mekaniğinin tahminleri doğruysa, kuantum mekaniğinin yerini alabilecek daha gelişmiş bir kuram da yerel gerçeklik özelliğine sahip olamayacaktır. Dolayısıyla yapılması gereken şey, deneyler yaparak sonuçların Bell eşitsizliklerini sağlayıp sağlamadığını kontrol etmektir.



Deneysel Çalışmalar

Bell eşitsizlikleri ile ilgili deneylerin yapılması pek çok bakımdan zordur. Öncelikle iki ayrı ölçüm cihazının konumlarının, parçacıkların birbirleriyle ışık hızıyla iletişim kuramayacak şekilde ayarlanması gerekir. Işık hızının yaklaşık saniyede 300.000 kilometre olduğu düşünülürse ya ölçüm zamanları çok hassas bir biçimde ayarlanmalı ya da mesafe büyük olmalıdır. İkinci olarak ölçümler sırasında kullanılan dedektörler mükemmel değildir. Dolayısıyla ya deney düzeneklerini mükemmel yakın bir biçimde ölçüm yapacak şekilde düzenlenmeli ya da sonuçları analiz ederken Bell eşitsizliklerinin yerine dedektörlerin kusurlarını göz önüne alan başka eşitsizlikler kullanılmalıdır.



Bugüne kadar yapılan deneylerin hiçbiri tamamen kusursuz değil. Ancak sonuçların Bell eşitsizliklerini sağlamadığı görülüyor. Araştırmacılar gelecek birkaç sene içerisinde kusursuz bir deneyin yapılabilirliğini düşünüyor.

Esasen Bell teoremi ile ilgili deneylerde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer etken daha var: özgür irade. Deneyler sırasında parçacıkların spinlerinin hangi yönde ölçüleceğini deneyicilerin özgür iradeleri ile belirleyeceği varsayılıyor. Ancak özgür irade nedir? Hatta özgür irade diye bir şey var mıdır?

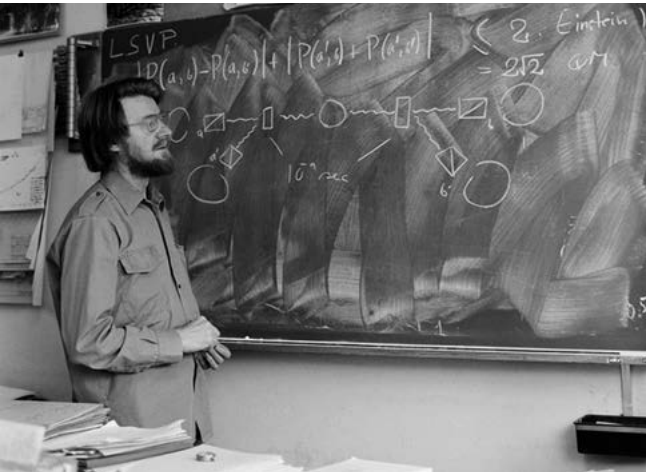
Bell teoremi ve benzeri konularla ilgili deneyler yaparken özgür iradenin de dikkate alınması gerektiğini düşünen pek çok bilim insanı var. Nobel Fizik Ödülü sahibi Gerard 't Hooft özgür irade diye bir şey olmadığını düşünenlerden. "Kuantum Mekanikinde Özgür İrade Varsayımı" başlıklı makalesinden alınan şu metin Prof. 't Hooft'un görüşlerinin özeti niteliğinde:

Sadece ölçüm cihazlarının bugünkü kurulumunu değiştirecek şekilde geçmişi değiştirilebilir mi? Bizce yaklaşan parçacıkların dalga fonksiyonlarını değiştirmeden ölçüm cihazlarında değişiklik yapabilir miyiz? (.....) 'Özgür irade', yani geçmişimizi değiştirmeden davranışlarımızı değiştirmek, imkânsızdır."

Jason Gallicchio, Andrew Friedman ve David Kaiser 2014'te *Physical Review Letters*'de yayımladıkları bir makalede, Bell teoremi deneylerinde özgür iradeden kaynaklanabilecek kusurları gidermek için kuasarlardan yayılan ışıklardan yararlanılacak bir deney yapılmasını önerdiler. Araştırmacılar, Büyük Patlama'dan beri aralarında hiçbir iletişim olmamış iki kuasarın gözlemlenmesi sonucunda elde edilen verileri kullanarak hangi özellikler hakkında ölçüm yapılacağına belirlenmesi durumunda özgür iradeden kaynaklanabilecek kusurların giderilebileceğini ileri sürüyor.

Bell Teoreminin Sonuçları

Eğer gelecekte yapılacak "mükemmel" deneyler de Bell eşitsizliklerinin sağlanmadığını gösterirse bundan ne sonuç çıkarmalıyız? Bell teoremine giden yol, kuantum mekaniğinin hâlâ eksiklikleri olan bir kuram olduğu düşüncesinden çıkmıştı. Fakat deney sonuçları Bell eşitsizliklerinin sağlanmadığını gösterse bile, bu kuantum mekaniğinin eksiklikleri olmadığı anlamına gelmez. Ancak Bell teoremi, kuantum mekaniğinin eksikleri olsa bile onun yerini alacak daha gelişmiş bir kuramın da yerel gerçeklik özelliğine sahip olamayacağını söyler. Bu durumda ya yerellikten ya gerçeklikten ya da her ikisinden vazgeçmek gerekecektir.



"Kendi irademizle üzerinde ölçüm yaptığımız parçacıkları etkilemeden cihazların kurulumunu değiştirebilir miyiz? Etrafımızdaki mikroskobik değişkenleri ve özellikle de incelemek istediğimiz parçacığı etkilemeden spinin z bileşenini ölçmekten çayıp x bileşenini ölçmeye karar verebilir miyiz? Makinelerimizi ve kendi karar verme sürecimizi mikroskobik cihazlarla -örneğin yörüngelerinde hareket eden gezegenlerle- değiştirdiğimizi varsayalım. Merkür, Plüton üzerinde 'ölçüm yaparken' kendi iradesiyle ve Plüton'un hareketini etkilemeden yörüngesindeki konumunu değiştirebilir mi? Tabii ki hayır. Merkür'ün yörüngesindeki konumunu değiştirdiğinin hayal edilebilmesi için -Plüton'un hareketi de dahil olmak üzere- gezegenler sisteminin bütün geçmişi de değiştirilebilmelidir. Kısacası geçmişi ve tabii ki geleceği değiştirmeden bugünü değiştiremezsiniz.

Kaynaklar

- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N., "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physical Review*, Cilt 47, s. 777, 1935.
- Bohm, D., "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. I", *Physical Review*, Cilt 85, s. 166, 1952.
- Bohm, D., "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. II", *Physical Review*, Cilt 85, s. 180, 1952.
- Bohm, D., Aharonov, Y., "Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky", *Physical Review*, Cilt 108, s. 1070, 1957.
- Bell, J. S., "On the Einstein Podolsky Rosen paradox", *Physics*, Cilt 1, s. 195, 1964.
- Bell, J. S., "On the problem of hidden variables in quantum mechanics", *Reviews of Modern Physics*, Cilt 38, s. 447, 1966.
- Mermin, N. D., "Is the Moon there when nobody looks? Reality and quantum theory", *Physics Today*, s. 38, Nisan 1985.
- Cramer, J. G., "The transactional interpretation of quantum mechanics", *Reviews of Modern Physics*, Cilt 53, s. 647, 1986.
- Leggett, A. J., "Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: an incompatibility theorem", *Foundations of Physics*, Cilt 33, s. 1469, 2003; Hooft, G., "On the free will postulate in quantum mechanics", arXiv:quant-ph/0701097v1, 2007.
- Gröblacher, S. ve ark., "An experimental test of non-local realism", arXiv:0704.2529v2 [quant-ph], 2007.
- Guistina, M. ve ark., "Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption", *Nature*, Cilt 497, s. 227, 2013.
- Christensen, B. G. ve ark., "Detection-loophole-free test of quantum nonlocality and applications", arXiv:1306.5772v2 [quant-ph], 2013.
- Gallicchio, J. ve ark., "Testing Bell's inequality with cosmic photons: Closing the setting-independence loophole", *Physical Review Letters*, Cilt 112, Makele No. 110405, 2014.