



# Bohr-Einstein Tartışması

**Y**İRMİNCİ YÜZYIL, iki büyük fizikçinin yıllar süren tartışmasına sahne oldu. Bu fizikçilerden biri Albert Einstein. Einstein'ın kim olduğunu bilmeyen herhalde yoktur. Özel ve genel görelilik kuramları ve fiziğe yapmış olduğu diğer çok önemli katkılarıyla Einstein gelmiş geçmiş en iyi fizikçilerden biri olarak kabul edilir. Ötekirse fizik dışında Einstein kadar tanınmasa da fizikçiler arasında en az onun kadar saygıyla anılan Niels Bohr. Niels Bohr, kuantum kuramının gelişmesinde en önemli rollerden birinin oynamış bir fizikçi.

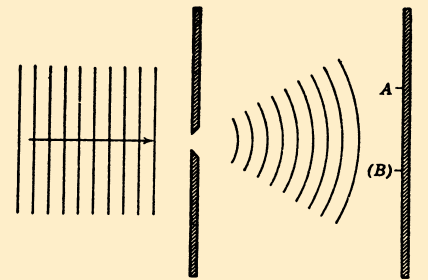
Einstein ve Bohr, uzun yıllar birbirlerine karşı sevgi ve saygılarını hiçbir zaman yitirmeden kuantum mekaniğinin temel kavramları üzerine tartıştılar. Kuantum mekaniğinin ilk ortaya çıktığı yıllarda fotoelektrik olayını açıklayarak kuantum kuramına çok önemli bir katkı sağlamış olan Einstein, daha sonraları kuantum kuramının geliştiği yönden hiç memnun kalmamıştı. 1927 Ekim'inde Brüksel'de yapılan beşinci Solvay konferansı ile başlayarak Einstein önceleri Heisenberg'in belirsizlik ilkesinin ve kuantum kuramının getirdiği olasılık kavramının yanlış olduğunu, dolayısıyla kuantum kuramının tutarsız olduğunu göstermeye çalıştı. Her defasında öne sürdüğü fikirleri ve örnekleri Bohr tarafından çürütülen Einstein, daha sonraları kuantum kura-

minı reddedilemeyecek bir olgu olduğunu ve doğanın gerçeklerini açıklamada önemli bir rolü olduğunu istemeyerek de olsa kabullendi. Bundan sonra Einstein çabalarını kuantum kuramının eksikleri olduğunu göstermeye yoğunlaştırdı. 1935 yılında Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile birlikte yazmış olduğu ünlü makalede, günümüzde EPR paradoksu olarak adlandırılan paradoksu ilk olarak ortaya koydu.

## İlk Raund: Beşinci Solvay Konferansı

Bohr 1927 yılında Brüksel'de yapılan beşinci Solvay konferansında 'Kuantum Postulatu ve Atom Kuramında Yeni Gelişmeler' başlıklı bir konuşma sundu. Bu konuşmada yeni geliştirmiş olduğu tamamlayıcılık (complementarity) prensibinin ana hatlarını anlattı. Einstein, Bohr'un fikirlerini çürütmek amacıyla şöyle bir düşünce deneyi önerdi: bir elektron demeti, üzerinde ince bir yarık bulunan bir perdeye çarpsın. Yarık çok ince olduğu için, yarıktan geçen elektronlar kırınımına uğrarlar ve olası her yönde hareket edebilirler. Birinci perdenin arkasında ikinci bir perde daha olsun. Bu durumda kırınımına uğrayan elektronlar ikinci perdenin herhangi bir yerine çarpabilirler. Kuantum mekaniği elektronların ya-

rıktan geçtikten sonra ikinci perdeye doğru olan hareketlerini küresel bir dalga olarak açıklıyor. Bu dalga fonksiyonun karesinin ikinci perde üzerindeki herhangi bir yerdeki değeri, elektronun o noktaya çarpma olasılığını verir. Buna göre elektron, perdeye varmadan hemen önce potansiyel olarak perdenin her yerinde bulunur fakat perdeye tek bir noktada çarpar. Einstein'e göre bunun anlamı, dalga fonksiyonunun perdenin iki farklı yerinde aynı andaki davranışının birbiriyle bağlantılı olduğudur. Bu da görelilik kuramına aykırıdır. Ayrıca kuantum kuramı, elektronun neden B noktasına değil de, A noktasına çarptığını açıklamıyordu. Einstein'a göre bu, kuantum kuramının eksik olduğunun bir göstergesiydi. Einstein bunun çözümünün olasılıkların tek bir elektron için değil çok sayıda elektronun istatistiksel bir özelliği olduğunu öne sürdü. Bohr diğer fizikçiler bunun bazı elektronların negatif kinetik enerjiye sahip olmasına neden olacağını göstererek Einstein'ın fikir-



lerini bir ölçüde çürüttüler. Ancak ilk raund bir çözüme ulaşmadan bitti.

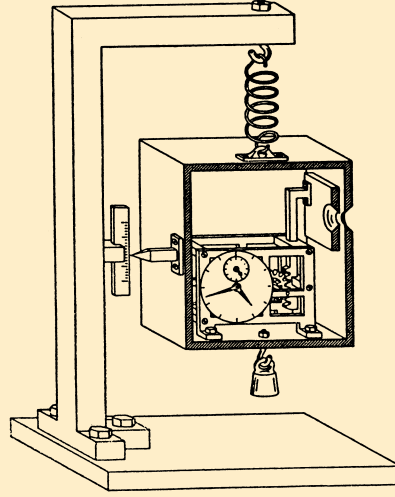
## İkinci Raund: Altıncı Solvay Konferansı

1930 yılında yapılan altıncı Solvay konferansına Einstein dahice tasarlanmış bir düşünce deneyi ile geldi. Belirsizlik ilkesinin tutarsız olduğunu göstermek için, kendisinin genel görelilik kuramı ile ortaya atmış olduğu enerji ile kütlede eşdeğer olduğunu gösteren  $E=mc^2$  formülünü kullandı. Buna göre kütledeki değişimi ölçerek enerjideki değişimi bulmak mümkün. Eğer aynı anda bu değişimin olduğu zamanı da tesbit edebilirse, enerji ile zaman arasındaki belirsizlik ilişkisinin yanlış olduğunu göstermiş olacaktır.

Einstein bunun için bir terazinin ucunda asılı duran bir kutu tasarladı. Kutunun içi ışık dolu ve iç duvarları mükemmel yansıtıcılıkta, dolayısıyla ışık duvarlardan sürekli yansıyor daima kutunun içinde kalıyor. Kutunun yüzlerinden birinde bir delik var. Bu deliğin üstünde de bir saat tarafından kontrol edilen bir açma kapama mekanizması var (bkz şekil). Belli bir anda delik açılıyor ve içeriden dışarıya tek bir foton bırakılıyor. Aynı anda kutunun içindeki ışığın toplam enerjisinin değişimi, terazinin göstergesinde kütledeki değişim olarak okunuyor. Her iki ölçüm, yani fotonun bırakıldığı zaman ve kütledeki, dolayısıyla da enerjideki değişim, istenen kesinlikte ölçülebilir. Böylece Einstein'a göre enerji ile zaman arasındaki belirsizlik ilişkisinin yanlış olduğu gösterilebilir.

Bu düşünce deneyi Bohr için tam bir şok oldu. Bohr'un o günkü halini yakın arkadaşı ve meslektaşı Rosenfeld şöyle anlatıyor:

Bohr şok olmuştu... çözümü bir türlü bulamıyordu. Bütün gece son derece mutsuzdu. Toplantıya katılan fizikçilerin birinden diğerine giderek Einstein'ın haklı olamayacağına onları ikna etmek için çabalıyordu. Eğer Einstein haklıysa bunun fiziğin sonuna olacağını söylüyordu. Fakat bir türlü Einstein'ın iddialarını çürütmeyi başaramıyordu. İki rakibin kulübü terkedişlerini hiçbir zaman unutamayacağım: Einstein yüzünde alaycı bir gülümseme, heybetli bir şekilde sessizce yürüyor, Bohr ise son derece heyecanlı sanki Einstein'ı



yakalamak için koşturuyormuş gibi görünüyor.

O gece Bohr, sabaha kadar uyumadan Einstein'ın iddialarını çürütmek için çalıştı. Bunda da başarılı oldu. Einstein'ın genel görelilik kuramına göre, bir saatin kütle çekimi alanı içindeki konumu, saatin hızını belirler. Başka bir deyişle kütle çekimi içindeki farklı konumlarda zaman farklı hızlarla değişir. Kutudan bir foton bırakıldığında kutu hafiflediği için kütle çekimi alanı içindeki yeri de değişir. Bu da zaman ölçümünde bir belirsizliğe yol açar. Genel göreliliğin öngördüğü bu faktörleri gözönüne alınca Bohr, birkaç satırlık basit bir hesapla Heisenberg belirsizlik ilkesinin tutarlı olduğunu göstermeyi başardı. Einstein'ın tasarladığı kutuyu kullanarak hem enerjiyi, hem de zamanı istenen kesinlikte ölçmek mümkün olamaz. Einstein'ın geliştirmiş olduğu genel görelilik kuramı Einstein'ı sırtından bıçaklamış oldu. Bunun üzerine Einstein belirsizlik ilkesinin yanlışlığını gösterme çabasından vazgeçti. Ama yine de kuantum mekaniği ile yıldızları barışmamıştı.

## Üçüncü Raund: EPR Paradoksu

Nazilerin iktidara gelmesi sonucu Einstein 1933 yılında Almanya'yı terketmek zorunda kaldı ve Amerika'ya yerleşti. Burada Einstein, çabalarını kuantum mekaniğinin bütünlüğü olan bir kuram olmadığını, yani eksiklikleri olduğunu göstermeye yoğunlaştırdı. 1935 yılında Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile yazdığı "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekansel Anlatımının

Tam Olduğu Kabul Edilebilir mi?" başlıklı makalesinde Einstein'ın niyeti, artık kuantum mekaniğinin yanlış olduğunu değil fakat tüm gerçeği söylemediğini göstermekti. Einstein ve arkadaşları bir fizik kuramının bütünlüğü için ise şu kriteri kullandılar: her fiziksel gerçeklik için kuramda bir kavram varsa kuram bir bütündür. Eğer kuantum kuramının açıklamadığı ya da hiç dokunmadığı bir takım gerçekliklerin varlığını gösterebilirse kuantum kuramının eksik olduğunu göstermiş olacaktır. Böylece Bohr'un kuantum kuramının bütünlüğü olan bir kuram olduğu iddiasını çürüterek tartışmayı kazanıp konuyu da kapamış olacaktır.

Einstein'ın savında anahtar konumunda olan kavram fiziksel gerçeklik kriteriydi. Einstein fiziksel gerçekliği şöyle tanımladı: Eğer bir sistemi hiç bir şekilde rahatsız etmeden o sistemle ilgili bir fiziksel miktarın değerini kesin olarak tahmin edebiliyorsak o fiziksel miktara karşılık gelen bir fiziksel gerçeklik vardır. Bohr'un bu konuda konumu biraz daha farklıydı. Bohr fiziksel gerçekliğin var olduğunu varsayıyor ve fiziğin amacının bu gerçeklikle ilgili sınırları olabildiğince ortaya çıkarmak olduğunu söylüyordu.

Einstein, Podolsky ve Rosen şu iki alternatifi önerdiler: (1) ya gerçeğin dalga fonksiyonu ile kuantum mekansel betimlenmesi eksik (2) ya da birbirini tamamlayıcı olan özelliklere karşılık gelen fiziksel miktarlar aynı anda gerçekliğe sahip olamazlar yani biri gerçekse diğeri gerçek olamaz. Einstein birinci alternatifi Bohr ise ikinci alternatifi savunuyordu. EPR'in fiziksel gerçeklik kriterini kullanırsak ikinci alternatifi savunmak çok güçleşmektedir. (EPR deneyinin daha geniş bir anlatımı için Sadi Turgut'un bu sayıdaki 'Parçacıklar Telepati Yapar mı?' yazısına bakınız.)

EPR makalesi tartışmayı bitirmedi. Tartışma odağı daha farklı eksene kaydı: Gerçeğin doğası ve bunu açıklamada kuramın rolü. Bu tartışma günümüzde de devam etmekte ve fizik var olduğu sürece devam edecek gibi görünüyor.

Yusuf İpekoğlu

Kaynaklar  
Honer, J., *The Description of Nature*, Clarendon Press Oxford 1987  
Whitaker, A., *Einstein Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge University Press 1996

# Kuantum Mekaniğinin Değişik Yorumları

Kuantum mekaniği en fazla tartışılan kuramlardan biri olagelmıştır. Tartışılan şey kuantum mekaniğinin matematiksel yapısı değil. Fizikçiler bu yapıyı kullanarak maddenin değişik ortamlardaki davranışlarını açıklamakta şu ana kadar son derece başarılı oldular. Kuantum mekaniği, fizikteki en başarılı kuramlardan biri olarak kabul edilir ve fiziğin temel taşlarından biridir. Bir fizikçinin kuantum mekaniği bilmemesi bugün kabul edilebilir bir şey değil. Tartışılan şeyse kuantum mekaniğinin yorumu. Bir kuramın yorumundan kasıt şu: fiziksel olayları ve bu olayları anlamak için yaptığımız deney ve gözlemlerin sonuçlarını, sadece o kuramın temel kavramlarını kullanarak açıklamak. Yani kuramın matematiksel dilini günlük yaşamda kullandığımız dile çevirmek.

Normalde herhangi bir kuramın tek bir yorumunun olması gerekir. Fakat kuantum mekaniğinin karmaşık ve sağduyu zorlayan yapısından dolayı fizikçiler henüz herkesin kabul ettiği bir yoruma ulaşabilmiş değiller. Değişik ölçülerde kabul gören bir kaç yorum var. Bunlar Kopenhag yorumu, çoklu dünyalar ya da paralel evrenler yorumu, Bohm yorumu, tutarlı geçmişler yorumu gibi adlarla anılıyorlar. Bunlar içinde en çok yandaş toplananlar.

## Kopenhag Yorumu

Kopenhag yorumu, büyük ölçüde Danimarkalı fizikçi Niels Bohr'un bilimsel ve felsefi düşünceleri üzerine kurulu. Bu yüzden Bohr'un hayatının büyük kısmını geçirdiği Kopenhag'ın adıyla anılıyor. Bu yorumun temel prensipleri şöyle:

Bireysel nesnelere ilgili kuram. Kuantum mekaniği nesnelere ya da sistemlerin bireysel olarak davranışlarını inceler ve açıklamaya çalışır. Yani tek bir atomun ya da tek bir elektronun ya da bir kaç atomdan veya birkaç parçacıktan oluşan tek bir sistemin veya çok sayıda atomdan oluşan bir kristalin (tek bir sistem oluşturur) davranışını inceler. Burada bireysellikten kasıt şu: Kuantum mekaniği, istatistiksel mekanik gibi aynı türden çok sayıda sistemin istatistiksel özellikleriyle değil, tek bir sistemin davranışlarıyla ilgilenir. Kuantum mekaniğindeki olasılıklar bu yüzden istatistik mekanikteki olasılıklardan temelde farklıdır.

Olasılıklar temel özelliklerdir. Schrödinger fonksiyonunun belli bir sistem için çözümüne o sistemin dalga fonksiyonu adı verilir. Kuantum mekaniğinde dalga fonksiyonunun karesi ile betimlenen olasılıklar gözlemcinin ya da kuramcının eksik bilgisinden kaynaklanmaz. Bu olasılık ve ona bağlı olan belirsizlikler doğanın özünde bulunur.

Gözlenen sistem ve gözlemci arasındaki ilişki. Heisenberg'e göre fiziksel dünya iki parçaya ayrılır, gözlenen sistem ve gözleyen sistem. İkisi arasında bir sınır vardır. Bu sınır hangisinin kuantum fiziği (gözlenen sistem) hangisinin klasik fizikle (gözleyen sistem) betimleneceğini belirler. Heisenberg'e göre bu sınırın nereye konacağı tamamıyla bizim özgür irademize bağlıdır. Bohr'un bu konudaki görüşleri daha radikal. Bohr'a göre böyle bir sınır yoktur. Gözlenen sistemle gözleyen sistem bölünmez bir bütün olarak ele alınmalıdır. Gözlenen sistemin, gözleyen sistemden ba-

ğımsız olarak özelliklerinden bahsetmek anlamsızdır.

Gözlemlerin açıklandığı dil. Günlük yaşamda çevremizde gördüğümüz bir sürü basit gerçeklik vardır. Kullandığımız dil, algılarımız, sağduyumuz bu gerçekliklere göre gelişmiştir. Bütün bunlar klasik fiziğin dilini oluşturur. Dolayısıyla bir kuantum sistemi üzerindeki gözlemlerimizi de sadece klasik fiziğin diliyle anlatabiliriz.

Ölçümün geri çevrilemezliği. Bir ölçüm yaptığımız zaman sistemi geri dönülemez şekilde değiştirmiş oluruz.

Kuantum indirgenme(çökme). Bir ölçüm, ölçümün yapıldığı nesne ya da sistem üzerinde bir eylemi içerir. Bu da dalga fonksiyonunun indirgenmesine neden olur. Bohr bunu yeni bir tür fiziksel yasa olarak kabul etmiştir. Kuantum kuramı bu indirgenmenin olasılıklarını verir fakat mekanizmasını açıklamaz.

Tamamlayıcılık (Complementarity). Bohr, tamamlayıcılığı birbirinden bağımsız (biri diğerini içermeyen) ve bütün deney ve gözlemleri tam olarak anlamak için birlikte gerekli olan kavramları bir arada düşünme olarak tanımlamıştır. Buna en iyi örnek dalga parçacık ikiliğidir. Işığın (ya da bir elektronun veya başka kuantum nesnelere) bazı durumlarda dalga, bazı durumlardaysa parçacık gibi davranması gibi. Bu tamamlayıcı özellikler aynı anda gözlenemezler. Yani, bir elektron aynı anda hem dalga hem de parçacık gibi gözlenemez. Deneyin koşullarına göre ya parçacık, ya da dalga davranışı gösterir.

Gerçeklik. Kopenhag yorumuna göre tamamlayıcılık ve gerçek birbirleriyle yakından ilgili kavramlardır. Sadece bir ölçüm sonucu bulunanlar gerçek olarak alınabilir. Bunun dışında gerçek hakkında başka hiçbir şey söylenemez. Buna şöyle bir örnek verebiliriz: Diyelim bir odamızdaki masanın üzerine bir kitap bıraktık; kapıyı kilitleyip çıktık. Şu an o kitabı görmüyoruz olduğumuz halde kitabın masanın üzerinde durmasından bir gerçek olarak bahsetmemize klasik fizik izin verir. Benzer bir şeyi bir atom için yapalım. Yani, bir deney için bir atom hazırlayalım ve bir süre sonra bu atom üzerinde deney yapalım. Atomun hazırlanmasıyla, deney arasında geçen sürede atom hakkında şu, ya da bu doğrudan demek mümkün değildir. Atom hazırladığımız ve bıraktığımız yerde mi değil mi? Bunu sadece atomu doğrudan gözleyip orada olup olmadığını öğrendiğimiz zaman söyleyebiliriz. Onun dışında atomun orada olup olmadığını söylemek imkansızdır. Heisenberg'e göre böyle bir soru anlamsızdır da...

## Çoklu Dünyalar ya da Paralel Evrenler Yorumu

Yukarıda temel prensiplerini belirttiğimiz Kopenhag yorumu birçok fizikçi tarafından yeterince tatmin edici bulunmamaktadır. Özellikle dalga fonksiyonunun indirgenmesi Schrödinger'in kedisi örneğinde olduğu gibi paradokslara neden oluyor. Benzer bir şekilde Kopenhag yorumu EPR paradoksunu açıklamakta yetersiz kalmakta. Bu nedenlerle zaman içinde başka yorumlar ortaya atıldı. Bunlardan en önemlisi Hugh Everett'in 1957

yılında Princeton Üniversitesinde yapmış olduğu "Evrensel Dalga Fonksiyonu Kuramı" adlı doktora teziyle öne sürmüştüğü "görelilik durumları" ya da daha yaygın olarak bilindiği adlarla "çoklu dünyalar" veya "paralel evrenler" yorumudur.

Mikroskopik sistemlerin örneğin atomların dalga fonksiyonları saf kuantum durumlarının üst üste binmiş durumu yani toplamı şeklinde yazılır. Dolayısıyla sistemin konum, momentum gibi fiziksel özellikleri, ölçüm yapıncaya kadar kesin bir değere sahip değildir. Kopenhag yorumuna göre ölçüm yapıldığı anda sistem bu saf durumlardan birine çökertilir ve ölçülen özelliğin değeri, bu saf durumun sahip olduğu değerdir. Bu durum bir çok soru oluşturmaktadır. Bu indirgenme nasıl olur? Ölçümü nasıl tanımlayabiliriz? Kopenhag yorumu bunları açıklayamamaktadır.

Everett'in bu sorulara verdiği yanıt, dalga fonksiyonunun indirgenmesi diye bir şeyin olmadığı yönündedir.

Çoklu dünyalar yorumunun temel fikri şu: Evren, kuantum düzeyinde ne zaman bir seçim yapmak durumunda kalırsa, kaç tane alternatif kuantum durumu varsa o kadar parçaya bölünür. Bunu daha iyi anlamak için Schrödinger'in kedisini örnek olarak alalım (Schrödinger'in kedisi için Bilim ve Teknik sayı 393e bakınız). Bu deneyde iki olasılık var. Ya radyoaktif atom bozunur ve kedi ölür ya da bozunmaz ve kedi canlıdır. Kopenhag yorumuna göre, kutu açılıp içine bakılıncaya kadar olasılıkların ikisi de gerçek değerlidir. Kutunun içindeki kedinin dalga fonksiyonu iki durumun bir üst üste binmiş halindedir. Yani, kedi ne ölüdür, ne de canlı. Kutuyu açıp baktığımız anda dalga fonksiyonu bu iki durumdan birine indirgenir. Yani kutuyu açınca kediyi ya canlı ya da ölü olarak gözleriz. Çoklu dünyalar yorumuna göreyse sistem bir seçimle karşı karşıya kaldığı anda her iki olasılık da gerçek olur, ancak evren ikiye ayrılır. Evrenlerden birinde gözlemci kutuyu açar ve kediyi ölü bulur; diğer evrendeyse gözlemci kediyi canlı olarak gözler. Burada önemli olan noktada kutunun içindeki kedinin gözlemci bakmadan önce bir evrende ölü, diğerindeyse canlı olduğudur. Dolayısıyla gözlemci kutuya baktığında dalga fonksiyonunun indirgenmesi diye bir şey söz konusu değildir. Her bir evrendeki gözlemci, eşi olmayan bir evren içinde yaşamaktadır ve diğer evrenlerle iletişim kurması mümkün değildir.

Çoklu dünyalar yorumuyla ilgili temel problem evrenin her an çok sayıda kuantum alternatifleriyle karşı karşıya olduğu dolayısıyla her an çok sayıda evrene bölündüğü, bunun sonucu olarak da aynı uzayı paylaşan neredeyse sonsuz sayıda evrenin var olduğu fikrinin oldukça itici bir fikir olmasıdır. Bu fikrin kanıtlanmasının ya da çürütülmesinin imkansızlığı da ayrıca itici bir noktadır.

Siz hangi yorumu tercih edersiniz?

Yusuf İpekoğlu

Kaynaklar  
Gribbin, J., *Schrödinger's Kittens and the Search for Reality*, Little, Brown 1995  
Omnès, R., *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press 1994  
Rae, A., *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cam. Univ. Press, 1986