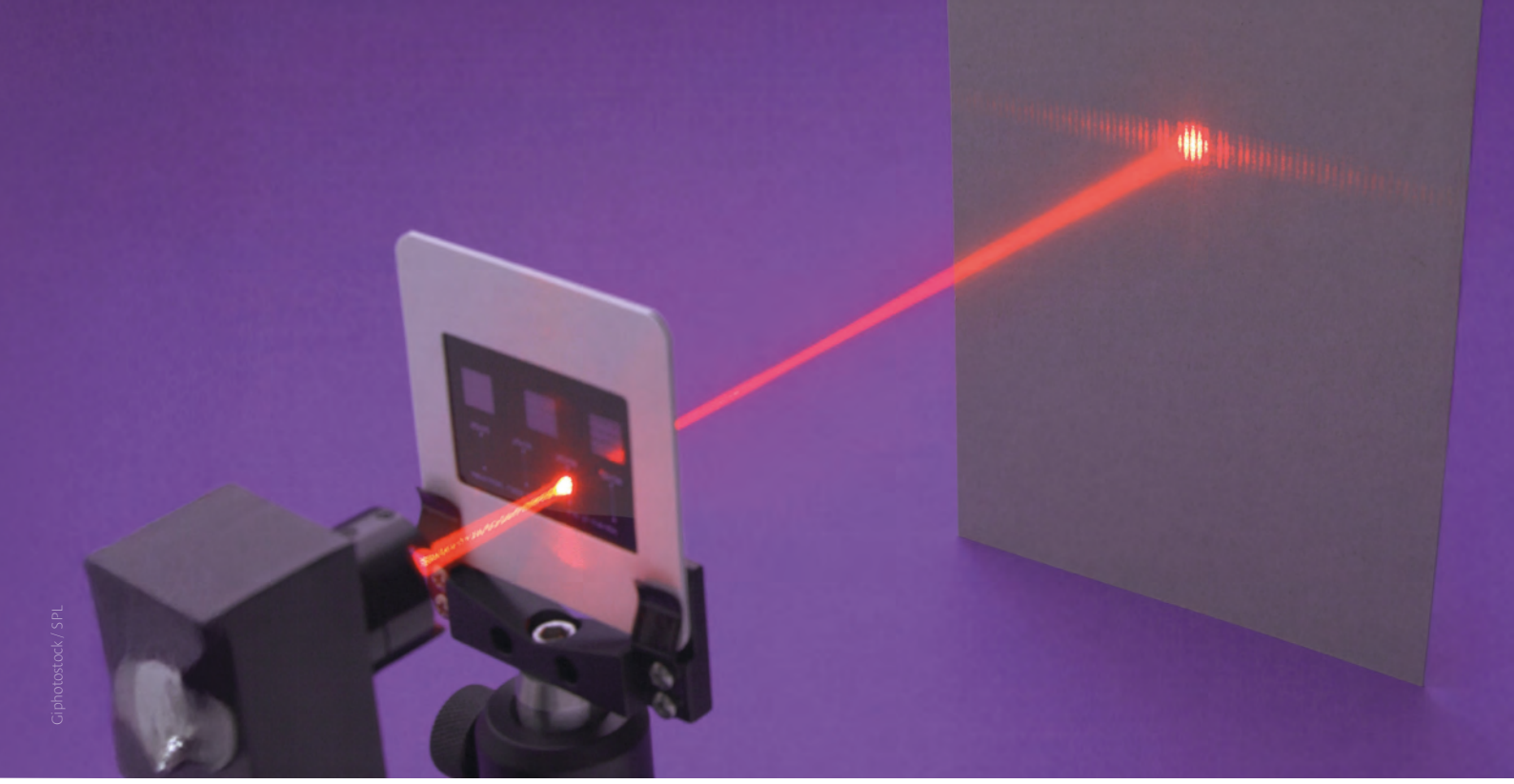
Einstein'ın Düşünce Deneyi **Yüz Yıl Sonra Gerçeğe Dönüştürüldü**

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

Albert Einstein 1927'deki 5. Solvay Konferansı'nda tamamlayıcılık ilkesinin yanlışlığını göstereceğini iddia ettiği bir düşünce deneyi ortaya atmıştı. Klasik çift yarık deneyinin düzeneğine hareketli bir yarığın eklendiği deneyin bir benzeri yaklaşık yüz yıl sonra gerçeğe dönüştürüldü.

Yirminci yüzyılın başlarında kuantum fiziğinin gelişiminin en önemli aşamalarından biri, ışığın ikili doğasının farkına varılması olmuştu. Işık bazı fiziksel süreçlerde parçacık bazı fiziksel süreçlerde ise dalga gibi davranıyordu. Örneğin ışığın metal levhalardan elektron kopardığı fotoelektrik olayla ilgili deneysel veriler ancak bir parçacık teorisiyle (ışığın foton adı verilen parçacıklardan oluştuğu düşüncesiyle) açıklanabiliyordu. Diğer taraftan kırınım gibi olguları açıklamak için hâlâ ışığın dalga teorisine ihtiyaç vardı. İlerleyen yıllarda Louis de Broglie sadece ışığın değil maddenin de ikili bir doğası olduğunu öne sürdü. Louis de Broglie'nin her madde parçacığının dalga karakteristiği gösterdiği durumlar olduğunu iddia eden hipotezinin deneylerle doğrulanması, doğayı kavrayışımızda önemli bir değişime yol açtı.

Hem maddenin hem de ışığın ikili doğasının anlaşılmasından sonra Niels Bohr tamamlayıcılık ilkesini formüle etti: "Dalga ve parçacık modelleri tamamlayıcıdır. Eğer bir ölçüm maddenin ya da ışığın dalga (parçacık) karakterini açığa çıkarıyorsa aynı ölçümde parçacık (dalga) karakteri de gözlemlenemez. Hangi modelin kullanılacağı ölçümün doğası tarafından belirlenir. Işık ve maddeyi kavrayışımız hem dalga karakterini hem de parçacık karakterini ortaya çıkaran ölçümleri dikkate almadığımızda eksik kalır. Dolayısıyla madde ve ışık



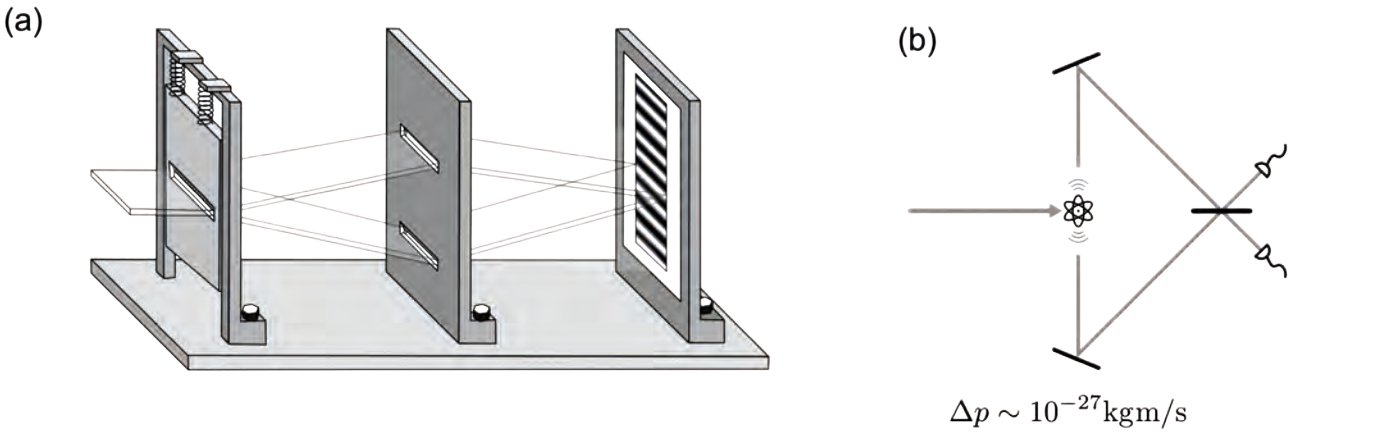
basitçe sadece dalga ya da basitçe sadece parçacık değildir. Uç koşullar altında basit bir dalga modeli ya da basit bir parçacık modeli yeterli olsa da maddenin ve ışığın davranışlarını açıklamak için daha genelgeçer, daha karmaşık bir teoriye ihtiyaç vardır."

Çift Yarık Deneyi

Işığın ikili doğasını örneklendiren deneylerden biri çift yarık deneyidir. Bu deneyde üzerinde bir çift yarık bulunan bir levhanın üzerine ışık ışınları gönderilir. Levhanın üzerindeki yarıkların her ikisinin de açık olduğu durumda levhaların arkasındaki ekranda bir girişim deseni ortaya çıkar. Bu ölçüm sonucu ışığın dalga karakterini ortaya çıkarır. Levhanın üzerindeki yarıkların sadece birinin açık olduğu durumdaysa ekranda bir girişim deseni gözlemlenmez. Bu ölçüm sonucu da ışığın parçacık karakterini ortaya çıkarır. Bohr'un tamamlayıcılık ilkesinde ifade ettiği gibi parçacık karakterinin mi yoksa dalga karakterinin mi ortaya çıkacağı, ölçümün doğası tarafından belirlenir. Aynı ölçümde hem dalga hem de parçacık karakteri ortaya çıkmaz.

Albert Einstein 1927 yılında düzenlenen 5. Solvay Konferansı'nda bir düşünce deneyi ortaya attı. Einstein'ın düşünce deneyinde klasik çift yarık deneyinin düzeneğinde ufak bir değişiklik yapılır. Düzeneğe yukarı aşağı hareket edebilen, üzerinde sadece bir yarık bulunan bir levha daha eklenir. Einstein böyle bir deney düzeneğinde hareketli yarığın, fotonlarla etkileşiminin sonucu olarak yukarı mı yoksa aşağı mı hareket ettiğinin hassas bir biçimde ölçülmesiyle fotonun takip ettiği rotanın (bir parçacık özelliğinin) belirlenebileceğini ve aynı zamanda ekranda bir girişim deseni (bir dalga özelliği) gözlemlenebileceğini iddia etmişti. Einstein'ın bu düşünce deneyini öne sürmekteki temel amacı tamamlayıcılık ilkesinin yanlışlığını göstermekti. Ancak Einstein'ın beklentisinin aksine düşünce deneyi kuantum mekaniğinin temellerini sarsmadı. Aksine kuantum mekaniksel sistemler üzerinde yapılan ölçümlerin doğasının daha iyi kavranmasını sağladı.

Tamamlayıcılık ilkesinin modern versiyonu belirsizlik ilkesini de içine alır. Werner Heisenberg tarafından ortaya konan ilke, bir



Zhang ve ark., PRL, 135, 230202

(a) Einstein-Bohr düşünce deneyinin bir şeması. Fotonlar düşey yönde hareket eden, üzerinde bir yarık bulunan bir lehvanın üzerine gönderilir. Bu levha ile ekranın arasında üzerinde bir çift yarık bulunan başka bir levha bulunur.

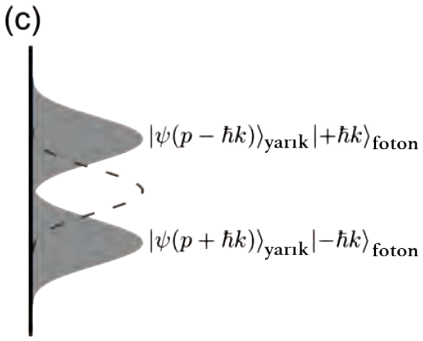
(b) Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri deneyin şeması. Deneylerde hareketli yarık görevini optik cımbızla kapana kıstırılmış bir rubidyum atomu üstlenir. Atomun momentumundaki belirsizlik optik fotonların momentumları ölçeğine kadar düşürülür. Atomdan saçılan fotonlar aynalardan yansıdıktan sonra bir ışın bölücünün üzerine yönelir.

sistem hakkında edinilebilecek bilgilerin bir sınırı olduğunu söyler. Belirli özellik çiftlerinden biri hakkındaki bilgimiz arttıkça diğeri hakkındaki bilgimiz azalır. Örneğin konum ve momentum aralarında belirsizlik ilişkisi olan özellik çiftlerinin örneklerindendir. Bir parçacığın momentumundaki belirsizlik arttıkça konumundaki belirsizlik azalır, momentumundaki belirsizlik azaldıkça konumundaki belirsizlik artar. Üstelik bu belirsizliklerin kaynağı ölçümler değildir. Belirsizlik, kuantum mekaniksel sistemlerin temel bir özelliğidir.

Modern kuantum teorisi kullanılarak yapılan hesaplar, Einstein'ın önerdiği deney düzeneğinde bir girişim deseni gözlemleneceğini, saçak görünürlüğününse (girişim desenindeki kontrastın bir ölçüsü) hareketli yarığın momentumundaki belirsizliğe bağlı olarak değişeceğini söyler. Bu kuramsal tahminleri test etmek ile ilgili temel zorluk ise ölçümlerden bir anlam çıkarabilmek için hareketli yarığın momentumundaki belirsizliğin fotonun momentumundan belirgin derecede düşük olmasının gerekmesidir. Optik bir fotonun momentumu ~10^{-27} kg·m/s civarındadır. Temel enerji seviyesindeki makroskobik bir yarığın momentumundaki belirsizlik ise ~10^{-16} kg·m/s ölçeğindedir. Aradaki bu çok büyük fark nedeniyle fotonun takip ettiği rota bilgisi yarığın kuantum salınımlarında kaybolur.

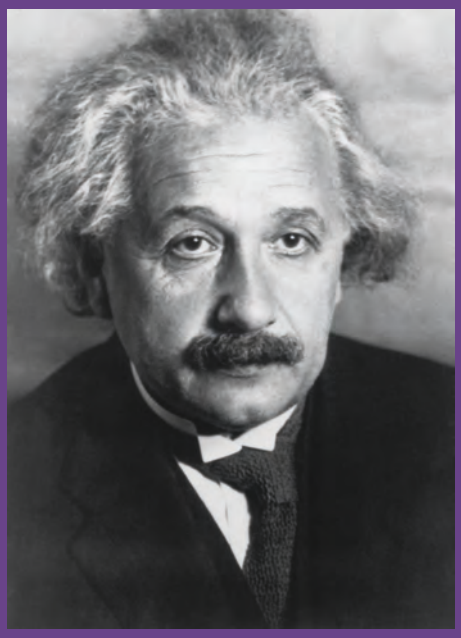
Çin Bilim ve Teknoloji Üniversitesinden bir grup araştırmacı yakın zamanlarda Einstein'ın düşünce deneyinin bir benzerini gerçeğe dönüştürmeyi başardı. Araştırmacılar deneylerinde makroskobik bir yarık yerine tek bir rubidyum atomu kullandı. Optik cımbızla kapana kıstırılan ve üç boyutlu hareketi temel enerji seviyesine indirilen atomun momentumundaki belirsizlik, tek bir fotonun momentumu ölçeğine düşürüldü. Böylece Einstein-Bohr tartışmasına konu olan gözlemleri yapmak mümkün oldu. Araştırmacılar atomun momentum belirsizliğini yavaş yavaş değiştirerek tek bir fotonun dalga benzeri davranış ile parçacık benzeri davranış arasındaki dönüşümünü gözlemlemeyi başardı.

Deney sonuçlarına göre optik



(c) Detektörlerde ortaya çıkan saçakların görünürlüğü yarığın momentum durumlarının ne ölçüde üst üste bindiğine bağlı olarak değişir.

kapanın derinliği artırılarak atomun konumundaki belirsizlik azaltıldığında ve dolayısıyla momentumundaki belirsizlik artırıldığında ekrandaki saçak görünürlüğü artıyor. Başka bir deyişle fotonun takip ettiği rota (parçacık özelliği) hakkında daha az bilgi edinildiğinde fotonun dalga karakteri daha belirgin hale geliyor. Sonuçlar klasik çift yarık deneyinde her iki yarığın da açık olduğu (fotonun takip ettiği rotanın bilinmediği) duruma yakınsıyor. Optik kapanın derinliği azaltılarak atomun konumundaki belirsizlik artırıldığında ve dolayısıyla momentumundaki belirsizlik azaltıldığındaysa ekrandaki saçak görünürlüğü azalmaya başlıyor. Başka bir deyişle fotonun takip ettiği rota hakkında daha fazla bilgi edinildiğinde fotonun parçacık karakteri daha belirgin hale geliyor. Sonuçlar klasik çift yarık deneyinde sadece bir yarığın açık olduğu (fotonun takip ettiği rotanın bilindiği) duruma yakınsamaya başlıyor. ■



Library Of Congress / SPL

Albert Einstein (1879 - 1955)

Science Museum Group / SPL

Niels Bohr (1885 - 1962)

Kaynaklar

Zhang, Y.-C., ve ark., "Tunable Einstein-Bohr Recoiling-Slit Gedankenexperiment at the Quantum Limit", *Physical Review Letters*, Cilt 135, Makale No: 230202, 2025.

Eisberg, R. ve Resnick, R., *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*, John Wiley & Sons, 2. Basım, 1985.