

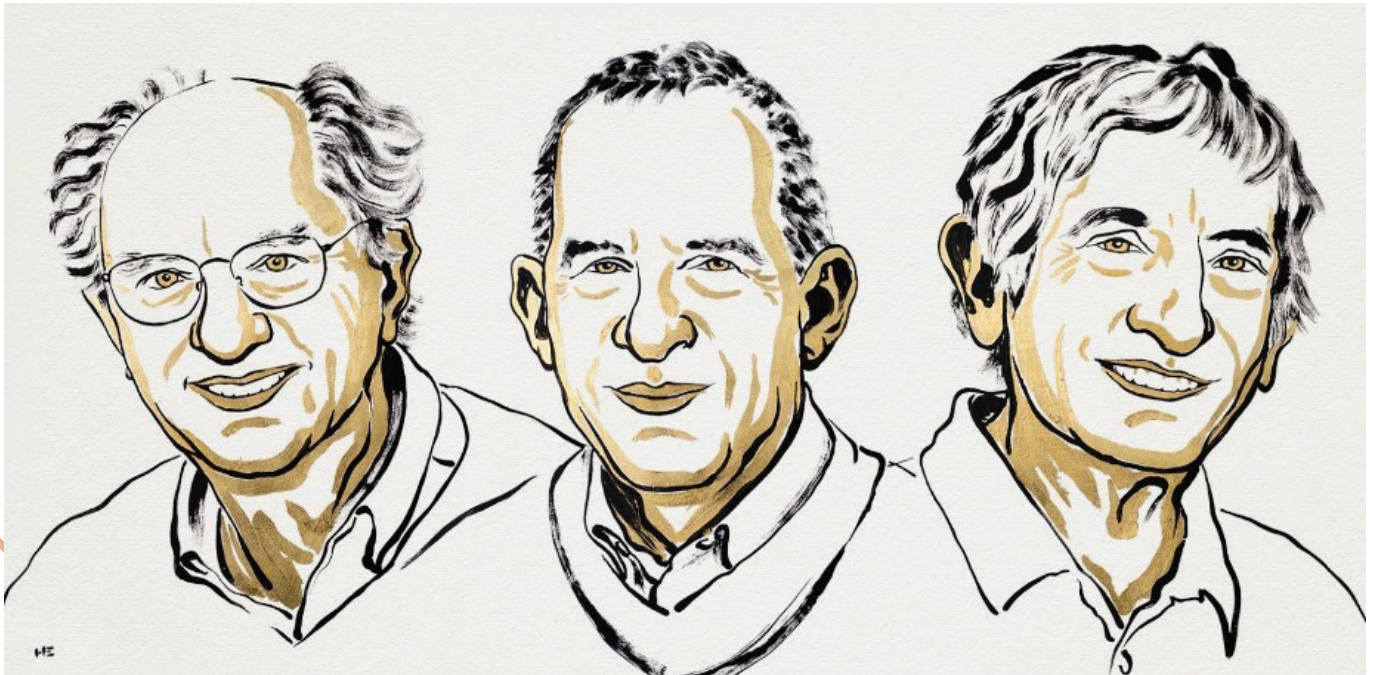


**2025 NOBEL FİZİK ÖDÜLÜ:
BİR ELEKTRİK DEVRESİNDE
MAKROSKOPİK KUANTUM
MEKANİK TÜNELLEME VE
ENERJİ KUANTİZASYONUNUN
KEŞFİ**

Özge Altıntaş ve Dr. Adil Denizli

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Bölümü, Beytepe, Ankara

**İSVEÇ KRALİYET BİLİMLER AKADEMİSİ,
“BİR ELEKTRİK DEVRESİNDE MAKROSKOPİK
KUANTUM MEKANİK TÜNELLEME VE ENERJİ
KUANTIZASYONUNUN KEŞFİ” İÇİN 2025
NOBEL FİZİK ÖDÜLÜ’NÜ ŞU KİŞİLERE VERME
KARARI ALDI:**



John Clarke

Michel H. Devoret

John M. Martinis

1942 yılında Cambridge, Birleşik Krallık'ta doğdu. 1968 yılında Cambridge Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de profesör olarak görev yapmaktadır. Krallık'ta doğdu. 1968 yılında Cambridge Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de profesör olarak görev yapmaktadır.

1953 yılında Paris, Fransa'da doğdu. 1982 yılında Paris-Sud Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Yale Üniversitesi, ABD'de ve Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara'da profesör olarak görev yapmaktadır.

1958 yılında Los Angeles, ABD'de doğdu. 1987 yılında Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de doktora derecesini aldı. Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara'da profesör olarak görev yapmakta ve Los Angeles, Kaliforniya'daki Qolab şirketinde Teknoloji Direktörü olarak çalışmaktadır.

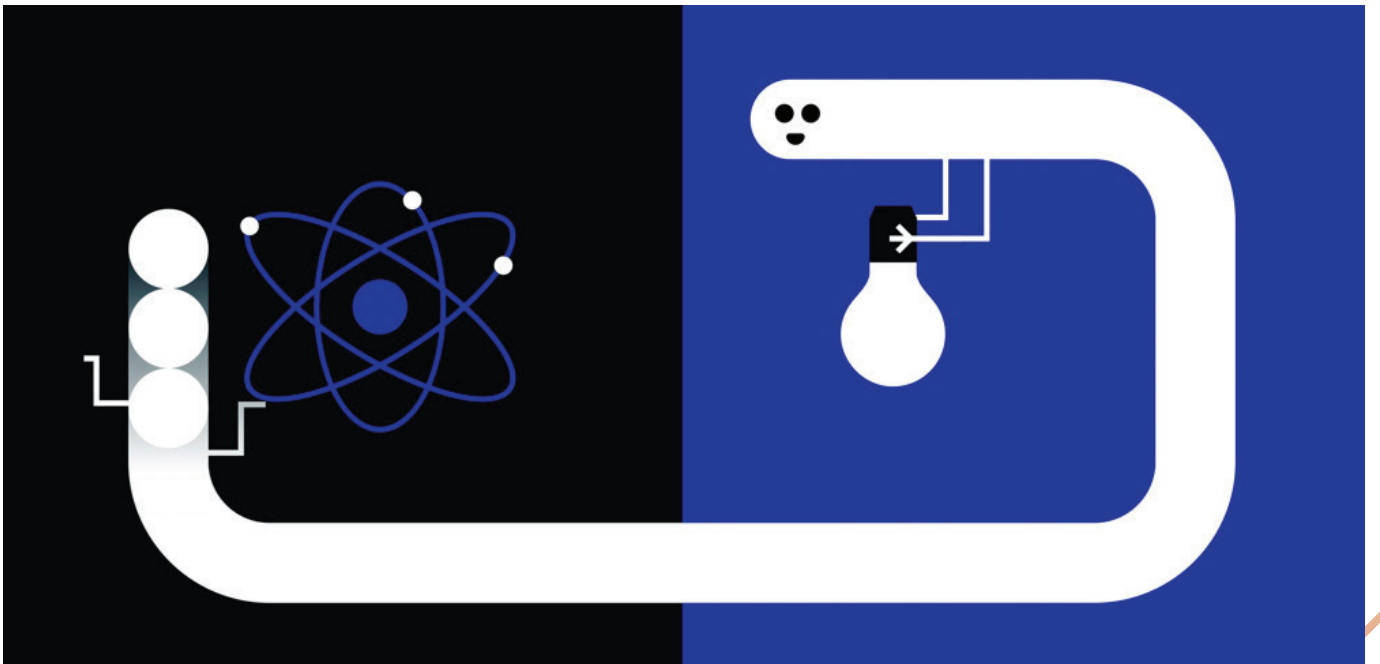
İNSAN ÖLÇEĞİNDE KÜANTUM ÖZELLİKLERİ

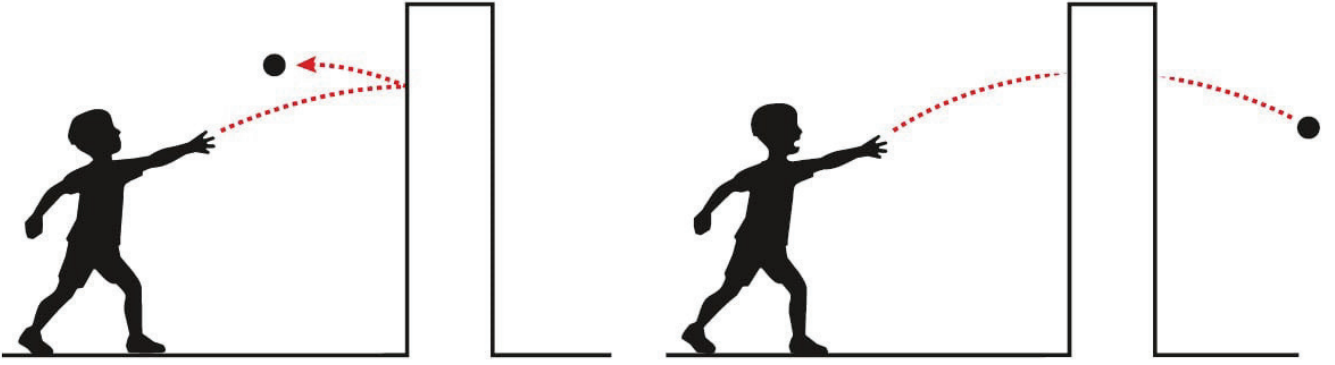
2025 yılı Nobel Fizik Ödülü sahipleri John Clarke, Michel H. Devoret ve John M. Martinis, yaptıkları bir dizi deneyle kuantum dünyasının sıra dışı özelliklerinin, elde tutulabilecek kadar büyük bir sistemde somut hâle getirilebileceğini gösterdiler. Onların süperiletken elektrik sistemi, sanki bir duvarın içinden doğrudan geçiyormuş gibi, bir durumdan diğerine tünelleme yapabiliyordu. Ayrıca sistemin enerjisi, kuantum mekaniğinin öngördüğü şekilde belirli büyüklükteki enerji paketleri (kuantlar) hâlinde soğurduğunu ve yaydığını da ortaya koydular.

BİR DİZİ ÇIĞIR AÇAN DENEY

Kuantum mekaniği, tekil parçacıkların ölçeğinde önemli olan özellikleri tanımlar. Kuantum fiziğinde bu tür olgular, optik bir mikroskopla görülemeyecek kadar küçük olsalar bile mikroskobik olarak adlandırılır. Bu durum, çok sayıda parçacıktan oluşan makroskobik olgularla zıtlık içindedir. Örneğin, günlük hayatta kullandığımız bir top, astronomik sayıda molekülden oluşur ve kuantum mekaniğin etkileri göstermez. Topun bir duvara her atıldığında geri sekeceğini biliriz. Ancak tek bir parçacık, kendi mikroskobik dünyasında benzer bir engeli bazen doğrudan geçebilir ve diğer tarafta

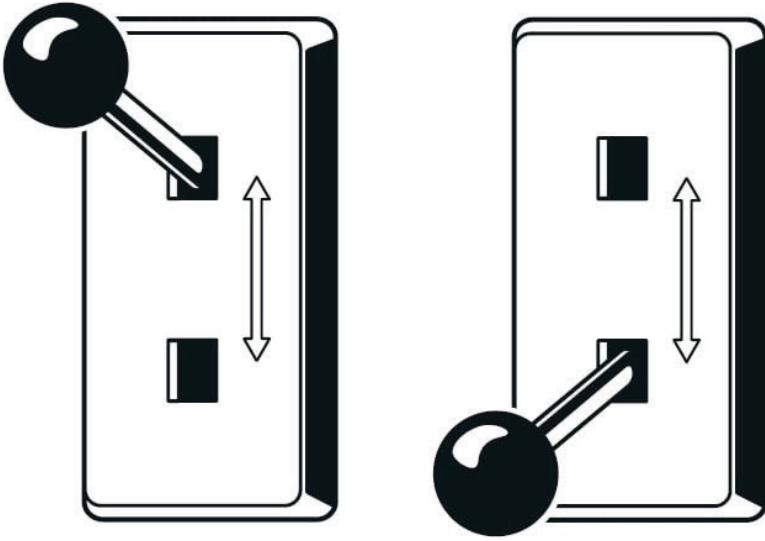
yeniden ortaya çıkabilir. Bu kuantum mekaniğin tünelleme adı verilir. Bu yılki Nobel Fizik Ödülü, kuantum tünellemenin çok sayıda parçacığın yer aldığı makroskobik ölçekte gözlenebileceğini gösteren deneyleri onurlandırmaktadır. 1984 ve 1985 yıllarında, John Clarke, Michel Devoret ve John Martinis, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de bir dizi deney gerçekleştirdiler. Elektriksel dirence uğramadan akım iletebilen bileşenler olan iki süper iletken kullanarak bir elektrik devresi kurdular. Bu süper iletkenleri, hiçbir şekilde akım iletmeyen ince bir malzeme tabakasıyla birbirinden ayırdılar. Bu deneyde, süper iletkendeki tüm yüklü parçacıkların, tüm devreyi dolduran tek bir parçacık gibi birlikte davrandıkları bir olguyu kontrol edip inceleyebildiklerini gösterdiler.





Duvara bir top attığınızda, topun size geri sıçrayacağından emin olabilirsiniz.

Top aniden duvarın diğer tarafında belirirse çok şaşırırsınız. Kuantum mekaniğinde bu tür olaylara tünelleme denir ve bu olaylar, kuantum mekaniğinin tuhaf ve sezgisel olmayan bir bilim dalı olarak bilinmesine neden olmuştur.



Başlangıçta, deneyde hiç voltaj yoktur. Sanki bir kol kapalı konumda ve bir şey onun açık konuma geçmesini engelliyormuş gibidir. Kuantum mekaniğinin etkileri olmasaydı, bu durum değişmeden kalırdı.

Aniden bir voltaj ortaya çıkar. Bu, iki konum arasındaki engele rağmen kolun kapalı konumdan açık konuma geçmiş gibi bir durumdur. Deneyde olanlara makroskopik kuantum tünelleme denir.

Bu parçacık benzeri sistem, akımın herhangi bir voltaj olmadan aktığı bir durumda hapsolmaktadır. Yani sistemin bu durumdan kaçmak için yeterli enerjisi yoktur.

Deneyde, sistem kuantum karakterini, sıfır voltajlı durumdan tünelleme yoluyla kaçarak ve bu sırada bir elektrik voltajı üreterek göstermektedir. Ayrıca ödül sahipleri,

sistemin kuantize olduğunu, yani enerjii yalnızca belirli, ayrık miktarlarda soğurduğunu veya yaydığını da gösterdiler.

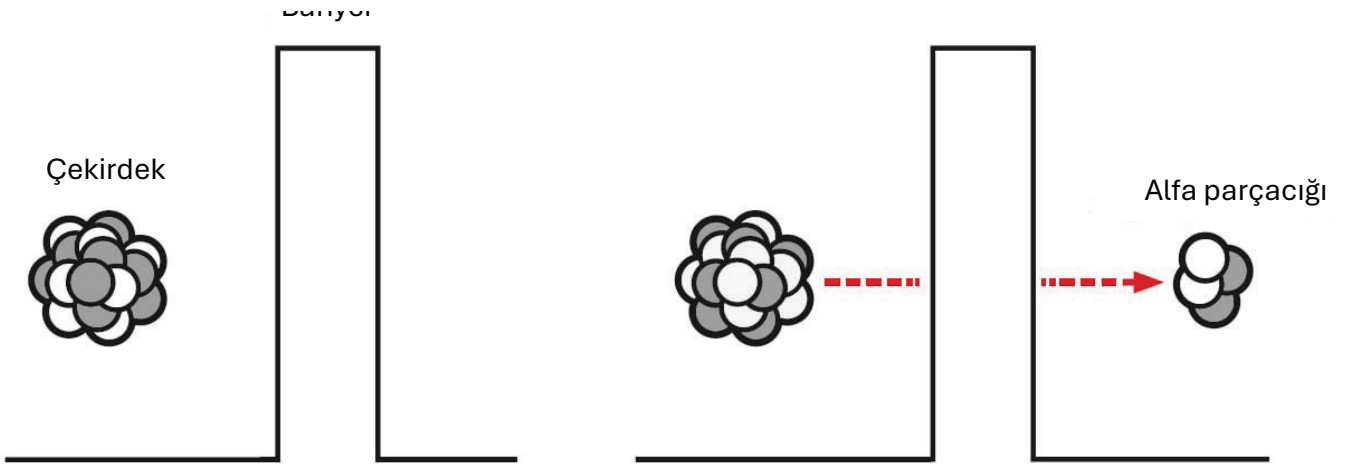
TÜNELLER VE GEÇİTLER

Ödül sahiplerine yardımcı olan şey, onlarca yıl boyunca geliştirilmiş kavramlar ve deneysel araçlardır. Görelilik teorisiyle birlikte kuantum fiziği, modern fiziğin temelini oluşturmaktadır. Araştırmacılar son yüzyılı bunun ne anlama geldiğini keşfetmekle geçirdiler. Tekil parçacıkların tünelleme yeteneği uzun zamandır bilinmektedir. 1928 yılında fizikçi George Gamow, bazı ağır atom çekirdeklerinin belirli bir biçimde bozunmasının nedeninin tünelleme olduğunu fark etti. Çekirdekdeki kuvvetlerin etkileşimi, içerdiği parçacıkları içinde tutan bir engel (potansiyel bariyer) oluşturur. Ancak buna rağmen, atom çekirdeğinin küçük bir parçası bazen bu engelden ayrılmış ve dışarı çıkabilir ve geride ise başka bir elemente dönüşmüş bir çekirdek bırakır. Tünelleme olmadan bu tür bir nükleer bozunma gerçekleşemez. Tünelleme kuantum mekaniksel bir süreçtir. Bazı atom

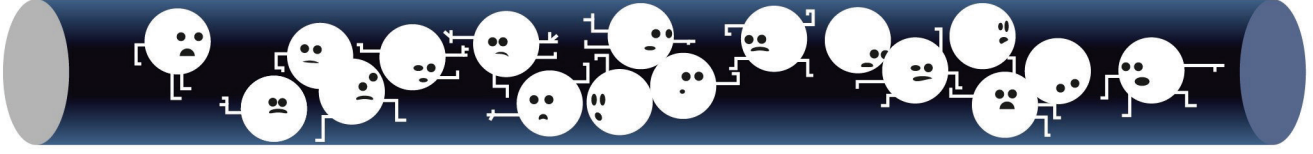
çekirdeklerinin yüksek ve geniş bir bariyeri vardır. Bu nedenle çekirdekten bir parçacığın dışarı çıkması uzun sürebilir; diğer türler ise çok daha kolay bozunabilir. Yalnızca tek bir atomu incelersek, bunun ne zaman gerçekleşeceğini öngöremeyiz. Ancak aynı türden çok sayıda çekirdeğin bozunmasını gözleyerek, tünellemenin gerçekleşmesi için gereken ortalama zamanı ölçebiliriz. Bu durumu açıklamanın en yaygın yolu, bir örnekteki çekirdeklerin yarısının bozunması için geçen süreyi ifade eden yarı ömür kavramıdır.

Fizikçiler, bir seferde birden fazla parçacığın dahil olduğu bir tünelleme türünü merak ettiler. Normal bir iletken malzemede akım, malzeme boyunca serbestçe hareket edebilen elektronlar sayesinde akar. Ancak bazı özel malzemelerde, iletken içinden yol alan bu elektronlar düzenli bir yapı oluşturabilir ve direnç göstermeden birlikte hareket eden senkronize bir dansa dönüşebilir. Bu durumda malzeme süper iletken hale gelir ve elektronlar çiftler oluşturur. Bu çiftlere, teoriyi açıklayan Leon Cooper'ın

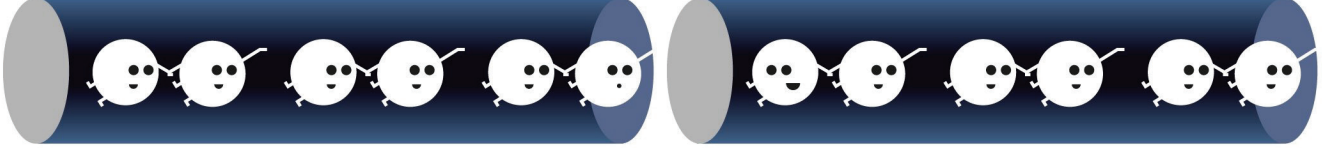
ardından Cooper çiftleri adı verilir. Cooper, John Bardeen ve Robert Schrieffer süper iletkenliğin nasıl işlediğine dair ayrıntılı bir açıklama yaptılar (1972 Nobel Fizik Ödülü). Cooper çiftleri, sıradan elektronlardan tamamen farklı davranır. Elektronlar, kendi kimliklerine sıkı sıkıya bağlıdır ve birbirlerine çok yaklaşmayı tercih etmez ve aynı özelliklere sahip iki elektron aynı yerde bulunamaz. Bunu bir atomda da görebiliriz; elektronlar kendilerini farklı enerji seviyelerine, yani kabuklara, dağıtırlar. Ancak süper iletkende elektronlar çiftler halinde birleştiğinde, bireyselliklerinin bir kısmını kaybederler. Aynı iki elektron her zaman birbirinden farklıyken, iki Cooper çifti tamamen aynı olabilir. Bu da süper iletken içindeki tüm Cooper çiftlerinin tek bir bütün, yani bir kuantum mekaniksel sistem olarak tanımlanabileceği anlamına gelir. Kuantum mekaniği dilinde bu sistem, tek bir dalga fonksiyonu ile tanımlanır. Bu dalga fonksiyonu, sistemin belirli bir durumda ve belirli özelliklerle gözlenme olasılığını açıklar.



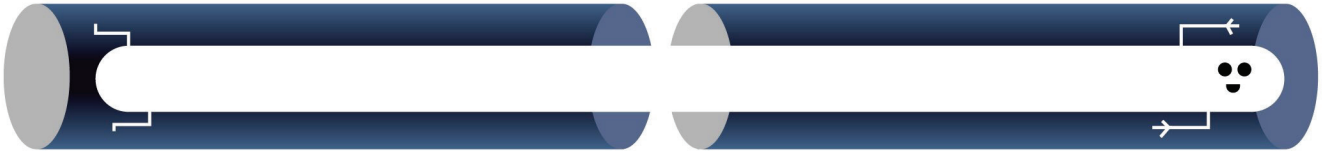
Fizikçiler neredeyse bir asırdır, belirli bir tür nükleer bozunma (alfa bozunması) için tünellemenin gerekli olduğunu bilmektedir. Atom çekirdeğinin küçük bir parçası koparak çekirdeğin dışına çıkar.



1 Normal bir iletkende, elektronlar birbirleriyle ve malzemeye çarpışır.



2 Bir malzeme süperiletken hale geldiğinde, elektronlar çiftler halinde birleşir, Cooper çiftleri oluşturur ve direnç olmayan bir akım oluşturur. Şekildeki boşluk Josephson bağlantısını gösterir.



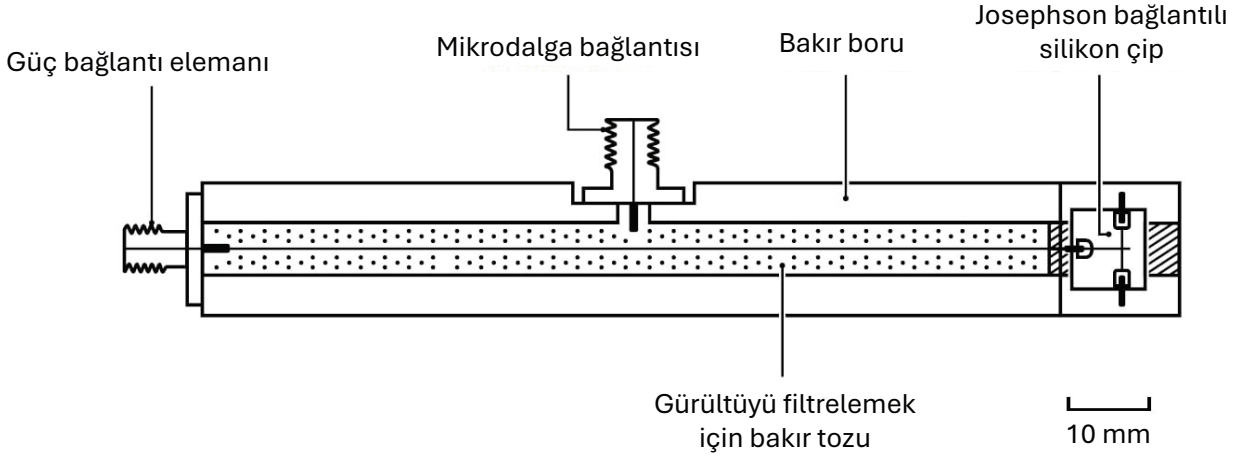
3 Cooper çiftleri, tüm elektrik devresini dolduran tek bir parçacıkmiş gibi davranabilir. Kuantum mekaniği, bu kolektif durumu paylaşılan bir dalga fonksiyonu kullanarak açıklar. Bu dalga fonksiyonunun özellikleri, ödül sahiplerinin deneyinde başrolü oynamaktadır.

İki süperiletken, aralarında ince bir yalıtkan tabaka olacak şekilde birleştirilirse, bu bir Josephson eklemi oluşturur. Bu bileşen, eklem için kuantum mekaniği hesaplamalarını yapan Brian Josephson'ın adını taşır. Josephson, eklemin her iki tarafındaki dalga fonksiyonları dikkate alındığında ilginç olguların ortaya çıktığını keşfetti (1973 Nobel Fizik Ödülü). Josephson eklemi kısa sürede temel fiziksel sabitlerin ve manyetik alanların hassas ölçümlerinde uygulama alanı buldu. Bu yapı aynı zamanda kuantum fiziğinin temellerini yeni bir şekilde incelemek için araçlar sağladı. Bunu yapan kişilerden biri, Josephson ekleminde makroskopik kuantum tünellemesi üzerine yaptığı kuramsal çalışmalarını yeni tür deneylerle ilham veren Anthony Leggett'ti (2003 Nobel Fizik Ödülü).

ARAŞTIRMA GRUBUNUN ÇALIŞMALARI BAŞLIYOR

Bu konular, John Clarke'ın araştırma ilgi alanlarıyla mükemmel bir şekilde örtüşüyordu. Clarke, doktora derecesini 1968'de İngiltere'deki Cambridge Üniversitesi'nde tamamladıktan sonra ABD'deki Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de profesör olarak görev yapmaya başladı. UC Berkeley'de kendi araştırma grubunu kurdu ve süperiletkenler ile Josephson eklemi kullanarak çeşitli olguları incelemeye odaklandı. 1980'lerin ortalarına gelindiğinde, Paris'te doktorasını tamamlamış olan Michel Devoret, doktora sonrası araştırmacı olarak John

Clarke'ın grubuna katıldı. Grupta ayrıca doktora öğrencisi John Martinis de bulunuyordu. Birlikte, makroskopik kuantum tünellemesini deneysel olarak göstermek gibi zorlu bir hedefi benimsediler. Deney düzeneğini etkileyebilecek her türlü paraziti engellemek için son derece dikkatli ve hassas çalışmaları gerekiyordu. Elektrik devrelerinin tüm özelliklerini ayrıntılı biçimde anlayabilmek için sistemlerini geliştirmeyi başardılar. Kuantum olgularını ölçmek için Josephson eklemine zayıf bir akım verdiler ve devredeki elektrik direnciyle ilişkili olan gerilimi ölçtüler. Başlangıçta Josephson eklemi üzerindeki gerilim sıfırdı, bu da beklenen bir durumdu; çünkü sistemin dalga fonksiyonu, gerilimin ortaya çıkmasına izin vermeyen bir durumda hapsolmüştü. Daha sonra sistemin bu du-



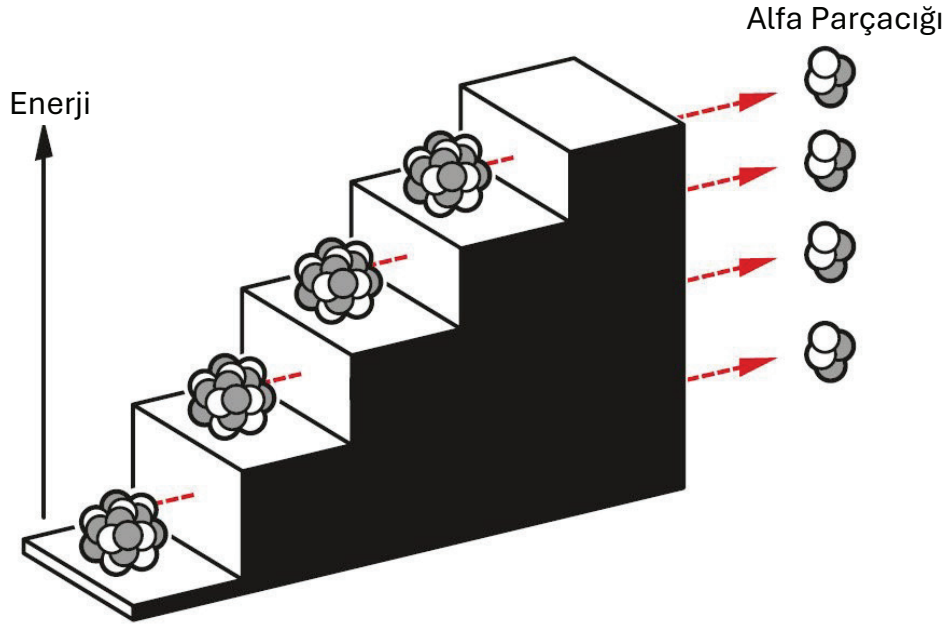
John Clarke, Michel Devoret ve John Martinis süperiletken elektrik devresi kullanarak bir deney tasarladılar. Bu devreyi barındıran çip yaklaşık bir santimetre büyüklüğündeydi. Daha önce tünelleme ve enerji kuantizasyonu sadece bir kaç parçacık içeren sistemlerde incelenmişti. Burada ise bu fenomenler çip üzerindeki süperiletkeni tamamen dolduran milyarlarca Cooper çifti içeren bir kuantum mekanik sisteminde ortaya çıktı. Bu şekilde deney kuantum mekanik etkilerini mikroskobik ölçekten makroskobik ölçüğe taşıdı.

rumdan tünelleyerek çıkıp bir gerilim oluşmasının ne kadar sürdüğünü incelediler. Kuantum mekaniği rastlantısal (olasılıksal) bir doğaya sahip olduğundan, pek çok ölçüm yaparak sonuçları grafiklere döktüler ve bu grafiklerden sıfır-gerilim durumunun ne kadar sürdüğünü okuyabildiler. Bu yöntem, atom çekirdeklerinin yarı ömürlerinin çok sayıda bozunma olayının istatistiklerine dayanarak ölçülmesine benzerdi.

Tünelleme olgusu, deney düzeneğindeki Cooper çiftlerinin senkronize hareketleri içinde tek bir dev parçacık gibi davrandıklarını gösterir. Araştırmacılar, sistemin kuantalanmış enerji düzeylerine sahip olduğunu gördüklerinde bu durumu daha da güçlü biçimde doğruladılar. Kuantum mekaniği, mikroskobik süreçlerde enerjinin ayrı paketlere bölündüğü gözleminde sonra bu adı aldı. Ödül sahipleri, sıfır-gerilim durumuna farklı dalga boylarında mik-

rodalgalar uyguladılar. Bu mikrodalgalar bazıları sistem tarafından soğuruldu ve sistem daha yüksek bir enerji düzeyine geçti. Bu durum, sistem daha fazla enerji içerdiğinde sıfır-gerilim durumunun daha kısa sürdüğünü gösterdi. Bir engelin arkasına hapsolmuş mikroskobik bir parçacık da aynı şekilde davranmaktadır.





Bir bariyerin arkasındaki kuantum mekanik sistemi değişen miktarlarda enerjiye sahip olabilir, ancak bu enerjinin yalnızca belirli miktarlarını emebilir veya yayabilir. Sistem kuantize edilmiştir. Tünelleme, daha düşük enerji seviyesine göre daha yüksek enerji seviyesinde daha kolay gerçekleşir, bu nedenle istatistiksel olarak, daha fazla enerjiye sahip bir sistem, daha az enerjiye sahip bir sisteme göre daha kısa süre tutsak kalır.

UYGULAMALI VE KURAMSAL YARAR

Bu deney, kuantum mekaniğinin anlaşılması açısından önemli sonuçlar doğurmuştur. Makroskopik ölçekte gösterilen diğer kuantum mekaniksel etkiler, birçok küçük parçacığın ve onların ayrı ayrı kuantum özelliklerinin birleşiminden oluşur. Bu mikroskopik bileşenler bir araya gelerek lazerler, süperiletkenler ve süperakışkan sıvılar gibi makroskopik olgulara yol açar. Ancak bu deney, çok sayıda parçacığın ortak bir dalga fonksiyonuyla tanımlandığı makroskopik bir durumda ölçülebilir bir voltaj gibi makroskopik bir etki yaratmıştır. Anthony Leggett gibi kuramcılar, ödül sahiplerinin bu makroskopik kuantum sistemini, Erwin Schrödinger (1933 Nobel Fizik Ödülü sahibi)‘in ünlü düşünce deneyi olan “kutudaki kedi” ile karşılaştırmıştır. Bu düşünce deneyinde, kutuya bakmadığımız sürece kedinin hem canlı hem de ölü olduğu varsayılmaktadır. Schrödinger’in bu düşünce deneyindeki amacı, böyle bir durumun saçmalığını

göstermekti; çünkü kuantum mekaniğinin özel özellikleri genellikle makroskopik ölçekte ortadan kaybolmaktadır. Bütün bir kedinin kuantum özelliklerini laboratuvar ortamında göstermek mümkün değildir. Ancak Leggett, John Clarke, Michel Devoret ve John Martinis’in gerçekleştirdiği deneyler dizisinin, çok sayıda parçacığın birlikte kuantum mekaniğinin öngördüğü şekilde davranabildiğini ortaya koyduğunu savunmuştur. Birçok Cooper çiftinden oluşan bu makroskopik sistem, bir yavru kedenin kat kat küçük olsa da sistemin bir bütün olarak kuantum özelliklerinin ölçülmesi nedeniyle, bir kuantum fizikçisinin gözünde Schrödinger’in hayali kedisine oldukça benzerdir. Bu tür makroskopik kuantum durumları, parçacıkların mikroskopik dünyasını yöneten olgularla deneyler yapma açısından yeni olanaklar sunmaktadır. Bu sistem, büyük ölçekli bir yapay atom olarak düşünülebilir. Buradaki yapay atom kabloları ve bağlantı noktaları olan, yeni deney düzeneklerine entegre edilebilir ya da yeni kuantum teknolojilerinde kullanılabilen, diğer kuantum sistemleri tak-

lit edebilen ve onları daha iyi anlamamıza yardımcı olmak için kullanılan türdedir. Buna başka bir örnek de John Martinis’in daha sonra gerçekleştirdiği kuantum bilgisayar deneyidir. Martinis, kendisinin ve diğer iki ödül sahibinin gösterdiği enerji kuantalanmasını burada kullanmıştır. Kuantalanmış durumlara sahip bir devreyi bilgi taşıyan birim olarak yani kuantum biti (qubit) olarak kullanmıştır. En düşük enerji durumu “0”, bir üst enerji basamağı ise “1” işlevi görmüştür. Süperiletken devreler, geleceğin kuantum bilgisayarını inşa etmeye yönelik araştırmalarda incelenen başlıca teknolojilerden biridir. Dolayısıyla bu yılın Nobel Fizik Ödülü sahipleri, hem fizik laboratuvarlarında uygulamalı faydalar sağlamış hem de fiziksel dünyamızın kuramsal olarak anlaşılmasına yeni katkılar sunmuştur.

1901-2025 NOBEL FİZİK ÖDÜLÜ İSTATİSTİKLERİ



Nobel Fizik Ödülü

1901-2025

Bir ödül sahibi daha önce iki kez bu ödüle layık görüldü

Fizik ödülünün bir/iki/üç kişiye paylaştırıldığı sayı

En yaşlı

96

39



En genç

25

33

47

Fizik Ödülleri

119

Fizik Ödülü Sahipleri

229

NOBEL ÖDÜLÜ

