

Schrödinger'in En Büyük Kedisi

İlginç bilimsel çalışma ve buluşlarla dolu 2010 yılını geride bırakırken, Nobel ödüllü grafen maddesi haliyle son zamanların en çok konuşulan fizik konuları arasına girdi. Ancak 2010 yılına ait bir çalışma daha var ki *Science* dergisi tarafından 2010 yılının en büyük buluşu olarak ilan edilince birden bilimsel haber siteleri ve bloglara konu oldu. Haberlerin kaynağı olan makale ilk olarak 2010'un Mart ayında *Nature* dergisinde yayımlanmıştı. Aynı çalışma *Physics World* dergisi tarafından 2010'un en iyi on çalışmasından biri olarak sunuldu. *Nature* dergisinde ise 2010'un en çok okunan fizik haberleri arasına girdi.



Çalışma Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara'dan Andrew Cleland, John Martinis ve çalışma arkadaşlarına ait. Santa Barbara ekibi, trilyonlarca atomdan oluşmuş bir sistemde kuantum yasalarının işleyişine şahit olmuş. Kuantum yasalarının işleyişi atomaltı parçacıklar ve atom düzeyinde birçok defa gözlenmiş. Hatta, üzerindeki beşgen ve altıgenlerin köşelerine karbon atomlarının yerleştiği, bir futbol topuna benzeyen, 60 karbon atomundan oluşan fulleren molekülünde de kuantum etkileri tespit edilmiş. Ancak Santa Barbara ekibinin deneyiyle kuantum etkileri ilk defa olarak gözle görülebilecek kadar büyük ölçekte gözlenmiş oluyor.

Ekibin bunu nasıl başardığına geçmeden önce, hangi kuantum etkilerini kastediyoruz kısaca bundan bahsedelim. Bir elektron ya da fotonun (ışık taneceği) aynı anda birden çok yerde bulunabileceğini duymuşsunuzdur. Bu tür gariplikler kuantum dün-

yasında her şeyin dalga ve olasılıklar üzerinden tanımlanmasından kaynaklanıyor. Klasik fiziğin geçerli olduğu daha büyük ölçekte ise bu tür olgulara şahit olmuyoruz. Bir arabayı hem ileri hem geri giderken, bir insanı hem sağımızda hem solumuzda görmüyoruz. Bir arabanın şu andaki koordinatlarını ve hızını biliyorsak bundan 10 dakika sonra nerede olacağını tam olarak hesaplayabiliyoruz. Kuantum fiziğiyle ise tek bir sonuç elde edilmiyor. Bir sürü sonuç ve bu sonuçlardan her birinin gerçekleşme olasılığı hesaplanıyor. Günlük deneyimlerimizin aksine olan bu gibi durumlar nedeniyle Einstein, Dirac ve Schrödinger gelişimine katkıda buldukları kuantum mekaniğine şüphe ile yaklaşmışlar. Hatta Schrödinger kendi denkleminin doğruluğunu "Schrödinger'in kedisi" paradoksuyla sorgulayarak kendi geliştirdiği denkleme çok da güvenmediği sinyalini vermiş.



Çizim: Ahmet Beşir Sançar

Schrödinger'in Kedisi - Kuantum Fiziği Fiziksel mi?

Schrödinger'in kedisi zehirli sıvı içeren bir şişe ile birlikte kapalı bir kutudadır. Kutuda ayrıca ne zaman bozunacağı belli olmayan radyoaktif bir madde, örneğin uranyum vardır. Uranyum çekirdeği alfa parçacıkları yayarak bozduğunda şişe kırılır ve kedi ölür. Kutunun dışında bulunan bizler için kedi % 50 ihtimalle ölü, % 50 ihtimalle canlıdır. Kedinin akıbeti hakkında tam bir hükme varmak için kutunun açılması (gözlem yapmak) şarttır. Yani kedinin hem ölü olabilme, hem canlı olabilme olasılığı vardır, ancak bu olasılıkların gerçeklik kazanması gözlemlenmelidir. Bu durumun "gözlem yapana kadar hiçbir şeyin gerçekliği, varlığı yoktur" gibi felsefi boyutları olsa da, bizim asıl üzerinde durmak istediğimiz konu başka: Eşyanın fiziksel gerçekliğini değil, kuantum yasalarının fiziksel gerçekliğini sorgulayalım. Buradan yola çıkarak 2010 yılının en iyi çalışmaları arasına giren deneyin yönteminden ve bu tartışmalara kattıklarından bahsedelim.

Kuantum yasaları her yerde, her zaman ve her ölçekte geçerli ise -ki evrensel bir yasadandır- beklenen budur- sadece kuantum ölçeğindeki kedi değil bildiğimiz kedi de aynı anda hem canlı hem ölü olabilme özelliğine sahip olmalı. Kuantum yasalarının paradoks gibi görünen bu duruma nasıl olanak sağladığını anlamak için her şeyden önce kuantum fiziğinin olasılıklarla ilgili bir kuram olduğunu anlamamız gerekiyor.

Kuantum fiziği aslında negatif ve karmaşık sayıların yer aldığı bir olasılık kuramı. Hem gerçel hem sanal kısımları olduğu için karmaşık sayılar denen bu sayılar, $a+ib$ şeklinde gösteriliyor. a gerçel kısmı, b sanal kısmı oluşturuyor. Sanal kısım gibi dünyamızda karşılığı olmayan $\sqrt{-1}$ ise "i" ile ifade ediliyor. Kuantum denklemlerine bu tür sayılar hâkim olduğu için, kuantum fiziği olasılıkların sadece gerçel sayılarla ifade edildiği klasik fizikten

farklı sonuçlar doğuruyor. Klasik fizikte bir sisteme ait olasılıklar doğrudan toplanıyor. Örneğin bir para atıldığında yazı ya da tura olmak üzere iki durum gerçekleşebilir ve her bir durumun gerçekleşme olasılığı $\frac{1}{2}$ 'dir. Olasılıklar toplamı da tam istendiği şekilde $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ olur.

Bir kuantum sisteminde ise karelerinin toplamı 1 olan olasılıklar var. İki durumun gerçekleşme olasılığının olduğu Schrödinger'in kedisi örneğine dönelim. Kedinin canlı olma olasılığı α ile, ölü olma olasılığı β ile belirtilsin. Kuantum denklemlerinin yapısı gereği bu sefer α ve β 'nin toplamı değil, α ve β 'nin karelerinin toplamı 1 oluyor ($\alpha^2 + \beta^2 = 1$). Ölülük ve canlılığın eşit olasılıkla gerçekleşebildiği durum α 'nın β 'ya eşit olduğu ve her ikisinin de $1/\sqrt{2}$ değerini aldığı duruma karşılık geliyor. Bahsi geçen kedinin matematiksel dalga fonksiyonu ise şöyle yazılıyor:

$$| \text{Kedi} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \left| \text{Kedi} \right\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \times \left| \text{Kedi} \right\rangle$$

Kuantum mekaniğine göre her nesneye bir dalga eşlik ediyor. Bu eşitlikte resimli ifadeler kedinin canlı ve ölü olduğu durumlara karşılık gelen madde dalgalarını temsil ederken $1/\sqrt{2}$ 'ler bu dalgaların büyüklüğünü veriyor. Bu büyüklüklerin karesi olasılık olarak tanımlanıyor. Yukarıdaki ifade bir kuantum sisteminin, sistemin alabileceği tüm durumlarda aynı anda bulunabileceğinin bir göstergesi. Buna göre, Schrödinger'in kedisinin kutu kapalı iken canlı ve ölü durumların üst üste bindiği bir durumda olduğunu söyleyebiliriz. Schrödinger'in kedisi kübit (kuantum bit) denen iki durumlu bir kuantum sisteminde örnek teşkil ediyor; kuantum durumlarının süperpozisyonu (üst üste binmesi) sadece kübitlerde değil tüm kuantum sistemlerinde geçerli. Bunun yanı sıra karmaşık sayı olabilen α ve β , dalgaların birbirine göre konumuna (fazına) bağlı olarak negatif değer de alabiliyor.

Kuantum mekaniği bu yönüyle Newton mekaniğinin, genel göreliliğin yasalarından ayrılıyor. Sanal ve karmaşık sayıların fazlaca yer aldığı denklem sistemi nasıl oluyor da maddeyi anlatıyor ve evrende karşılığını buluyor? Buluyor ki, kuantum mekaniği yıldızlara enerjisini veren tepkimelerden elektronların atom çekirdeği etrafında nasıl istikrarla dönebildiklerine kadar, önceden açıklanamayan birçok olguyu izah edebiliyor. Bir olasılık kuramı olan kuantum ku-

ramında olasılık büyüklükleriyle işlem yaparken neden büyüklükleri, küplerini ya da dördüncü kuvvetlerini alıp toplamıyoruz da karelerini alıp topluyoruz? Bu sorunun tek cevabı foton, elektron gibi madde dalgalarıyla yapılan deneylerin sonuçlarını açıklayabilmek için denklemleri böyle kurmamız gerektiği. Temelinde matematik olsa da deneyler ışığında gelişmiş bir yasanın fiziksel gerçekliğinin olmadığını söylememiz pek mümkün değil. Yine de bazı bilim insanları kuantum fiziğinin fiziksel bir yasa olarak alınamayıp diğer yasaların üzerine kurulduğu bir sistem, bir iskelet olarak kabul edilmesi gerektiği görüşünde. Kuantum fiziğini, üzerinde değişik bilgisayar yazılımlarının çalıştırılabildiği bir işletim sistemine benzetenler de var. Karmaşık sayılar ve garip olasılık hesapları içermesi, süperpozisyonun makro ölçekte gözlenememesi gibi etkenler, kuantum fiziğinin fiziksel olduğundan şüphe duyulmasına neden oluyor. Kuantuma inanmak daha büyük ölçeklerde süperpozisyonu gözlemleme beklentisini de beraberinde getiriyor.

Makro Ölçekte Gözlemler ve İzlenen Yöntem

Süperpozisyon başta foton ve elektronlarda, sonrasında lazer, süperiletkenler, nanomıknatıslar ve karbon moleküllerinde gözlenebilmiş. Bir elektron ya da bir fonda kuantum süperpozisyonu gözleyebilmek zor değil. Çünkü bir elektron manyetik alan içine girince içsel açısal momentumu (spini) iki farklı yön alabiliyor. Bir ışık dalgasının titreşimi ise ilerleme doğrultusuna dik ve yatay olmak üzere iki farklı düzlemle sınırlanabiliyor. Yani her iki sistem de, iki durumlu (iki serbestlik dereceli) kuantum sistemine örnek ve yukarıda bahsettiğimiz süperpozisyonu sergileyebiliyor. Bir atomda da eşfazlı kuantum durumlarının üst üste binmesi gösterilebiliyor. Örneğin bir atom üst üste binmiş iki ışık dalgası içine yerleştiriliyor, sonra dalgalardan biri sağa, diğeri sola hareket ettiriliyor ve atom her iki hareketi de takip etmeye zorlanıyor. Bu yöntemle adım adım sağa sola kaydırılan atomun yaptığı hareket birkaç adım sonra rastgelelik kazanıyor. Kuantum yürüyüşü denen bu adımlar sırasında, madde dalgaları (atoma eşlik eden dalga fonksiyonu) üst üste biniyor, bazı noktalarda birbirini kuvvetlendiriyor, bazı noktalarda ise birbirinin etkisini yok ediyor. Yüksek çözünürlüklü bir mikroskopla atoma baktığında atomun ilk başta bulunduğu yerde değil de biri daha sağda biri daha solda iki farklı noktada konumlandığı görülebilir. Yani atom aynı anda iki farklı noktada gözleniyor.

Kuantum süperpozisyonunun gözlemlenmesini engelleyen en büyük etkenlerden biri ısıl titreşimler. Bu titreşimler farklı kuantum durumları arasındaki faz ilişkisini bozarak süperpozisyonun gözlemlenmesini engelliyor. Dolayısıyla bir sistemde kuantum etkilerini gözlemek için izlenen yöntem, genellikle sistemi olabildiğince soğutarak ısıl titreşimleri olabildiğince azaltmakla başlıyor. Sistem soğutulduktan çok az enerjiye sahip olması isteniyor. Bu arada kuantum mekaniğine göre enerji sürekli değil, paketçikler halinde taşınıyor ve her bir kuantum durumu farklı enerjiye sahip. Bir enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine geçiş için, seviyeler arasındaki enerji farkına sahip bir enerji paketçığının sistemden atılması gerekiyor. Sistem soğutuldukça dışarıya enerji paketleri sala sala düşük enerji seviyesine iniyor. En düşük enerji seviyesine incek kadar soğutulduğunda ise üzerinde bir iki küçük kuantum enerji paketi dışında enerji kalmıyor. Sonuçta sistemin en düşük enerji seviyesi ve ondan bir yukarıdaki enerji seviyesi arasında gidip gelerek kübit gibi davranması sağlanabiliyor. Tabii araştırmacılar için bir atomdan ya da molekülden kübit elde etmek kolayken büyük sistemlerden kübit elde etmek zor. Sistem büyüdükçe sistemi çevresinden ve ısdan yalıtımak güçleşiyor.



Kuantumdaki kesikli enerji seviyelerini atom ölçeğinde gözleyebilirken insan ölçeğinde gözleyemiyoruz. Örneğin yere attığımız bir top yere çarptıktan sonra belli yüksekliklere sıçraya sıçraya çıkmıyor ya da vücudumuz hareket ederken hareketler kesikli kesikli görünmüyor. Yüksek hızlı fotoğraf makinesiyle çekilen fotoğraflarda olduğu gibi bir cismi sadece belli konumlarda görmüyoruz. Kuantum yasalarının evrenselliğinden ve insan ölçeğine uygulanabilirliğinden yola çıkarak bir topun hareketinin kuantum denklemlerini yazarsak, değişik enerji seviyeleri arasındaki uzaklığın gözümüzle fark edemeyeceğimiz kadar küçük olduğunu, bir diğer deyişle olası enerji seviyelerinin birbirine çok ama çok yakın olduğunu buluyoruz.

Bırakın bir top ya da bir insan gibi devasa sistemleri, bilim insanları için süperpozisyon gözlemlerini bir atomun ötesine taşımak bile büyük bir başarı. En basitinden iki atomlu bir molekül düşünelim. İki ucuna kütle takılmış ve salınımına bırakılmış bir yay sistemiyle temsil edilen böyle bir molekül, değişik şekillerde titreşebiliyor. Yukarıda bahsettiğimiz gibi süperpozisyonun gözlemlenebilmesi için, bu titreşimleri en aza indirmek yani sistemdeki enerjiyi mümkün mertebe boşaltmak gerekiyor. Yıllar boyunca bir sürü araştırmacı değişik soğutma teknikleri kullanarak, titreşen çok atomlu sistemlerin sıcaklığını mutlak sıfır derece olarak adlandırılan 0 Kelvin'e (K), yani -273 santigrat dereceye yakın sıcaklıklara düşürmeye çalışmış.

Yeni Bir Yöntem

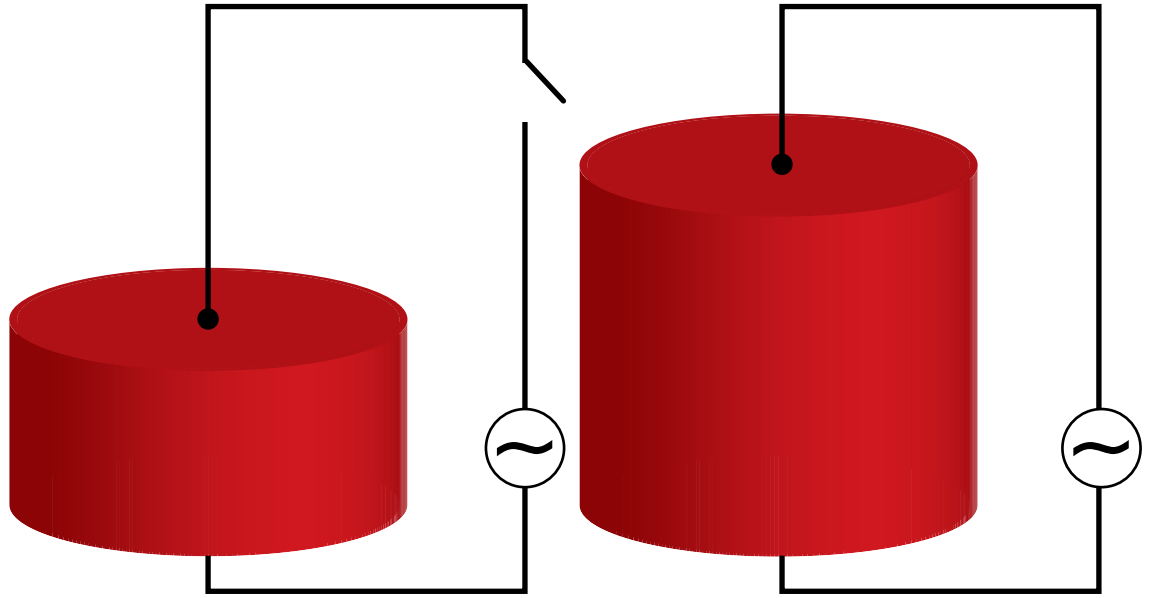
Yazımızın başında bahsettiğimiz Santa Barbara ekibi, kuantum etkilerini makroskobik bir sistemde gözlemek için gerekli soğutma problemine akıllıca bir çözüm buluyor. Titreşen bir sistemin frekansı (saniyedeki titreşim sayısı) ne kadar yüksekse en düşük enerjili kuantum seviyesine (temel duruma) inmesi için soğutulması gereken sıcaklık o kadar yüksek. Ekibin frekans ile sıcaklık arasındaki bu ilişkiden hareketle, deneyde saniyede 6 milyar kez titreşen bir akort çatalı (diyapazon) kullanıyor. 6 GHz (GigaHertz) frekanslı akort çatalı, iki alüminyum elektrot arasına yerleştirilmiş bir alüminyum nitrat tabakasından oluşuyor. Alüminyum nitrat kristalinin yüksek ısı iletkenliği, ısının etkili bir şekilde boşaltılmasına olanak sağlıyor. Ancak ekibin başkanlarından Andrew Cleland asıl sırrın yüksek frekansta olduğunu vurguluyor. Cleland saniyede 1000 defa titreşen bir akort çatalını en temel duruma indirmek için sıcaklığının mutlak sıfırdan 1 K'in 50 milyarda biri kadar yüksek olabileceğini, bu dereceye kadar soğutmanın ise eldeki teknolojilerle yapılamayacağını söylüyor. Ancak akort çatalı çok yüksek frekansta, saniyede milyar kez titreşiyorsa, titreşen cismin temel duruma geçişi için inilmesi gereken sıcaklık mutlak sıfırın biraz daha yukarısında. En azından 1 K'in 50 milyonda biri kadar bir dereceye soğutmak yeterli oluyor. Cleland'ın ekibi ticari soğutma sistemlerini kullanarak bunu yapmayı başarmış.

Ekibin deneyde kullandığı 1 mikron (10^{-6} metre) kalınlığındaki ve 40 mikron uzunluğundaki, gözle ancak görülebilen diyapazon trilyonlarca atomdan meydana geliyor. Diyapazonun yapıldığı



Denyede kullanılan 40 mikron uzunluğundaki diyapazonun taramalı elektron mikroskobu altında görünüşü

Piezoelektrik materyale elektrik alan uygulandığında materyalde meydana gelen şekil değişimi.

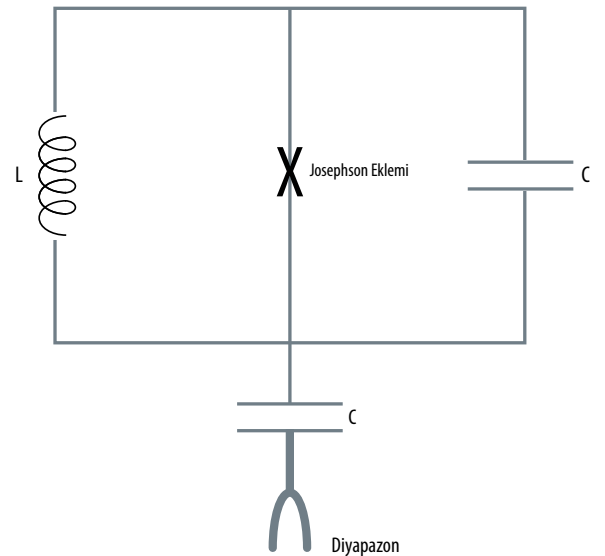


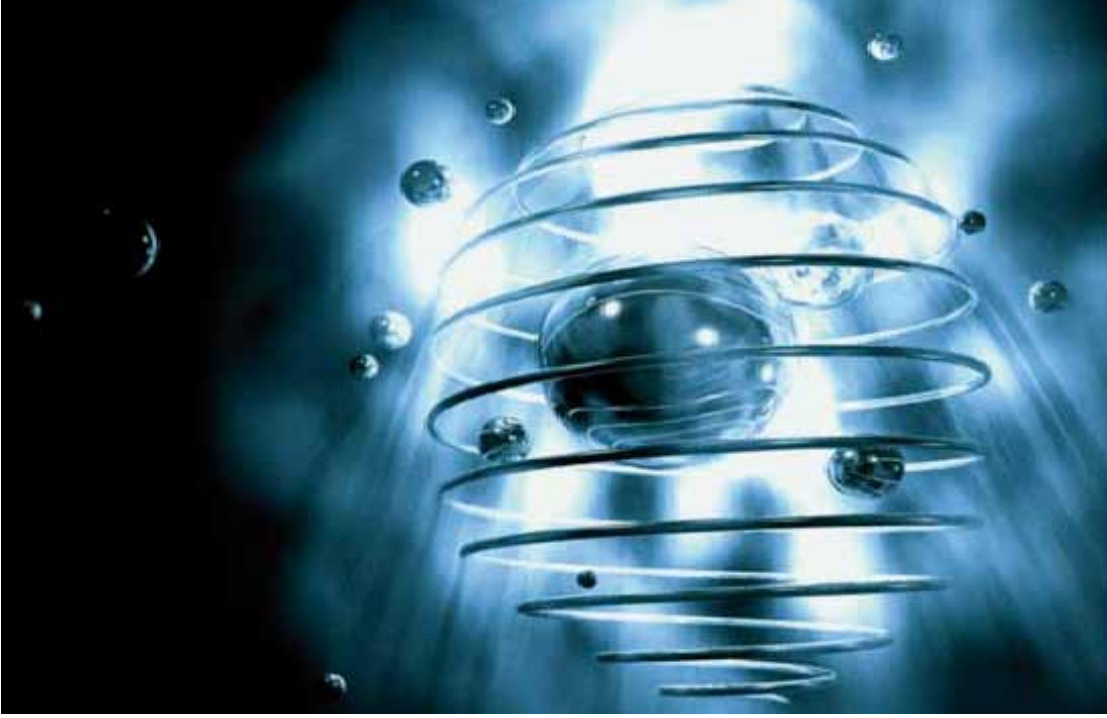
alüminyum nitrat kristali mekanik basınç altında sıkışıp geniştikçe içinde elektrik alan oluşuyor ve elektrik sinyali üretebiliyor. Piezoelektrik adı verilen böylesi materyaller için tersi durum da geçerli. Yani elektrik alana maruz kaldıklarında, örneğin iki noktası arasında voltaj uygulandığında, materyal harekete geçiyor. Uygulanan voltaj hızla değiştikçe materyal bir büzülüp bir genişerek bir çeşit titreşim hareketi yapıyor. Diyapazonun sahip olduğu bu elektriksel özellik, bir elektrik devresiyle eşleşmesine olanak sağlıyor. Birbirine bağlanan diyapazon ve elektrik devresi 25 miliKelvin sıcaklığa kadar soğutulduğunda her ikisi de en düşük enerjili kuantum seviyesine iniyor. Ama araştırmanın tek başarısı bu değil.

Asıl başarı trilyonlarca atomdan meydana gelen bu sistemin kuantum durumlarının kontrol edilebilmesi. Araştırmacılar bu kontrolü diyapazonun elektrotlarına bağladıkları süperiletken elektrik devresindeki kübitlerle sağlıyor. Zaten deneyin getirdiği yenilikçi fikir de bu tasarıda saklı. Deneyde kullanılan elektrik devresi bir indüktör (L), bir kapasitör (C) ve bir Josephson ekleminden oluşuyor. Enerji depolayabilen devre elemanları olan indüktör ve kapasitörden oluşan bir elektrik devresinde, elektrik enerjisinin belli frekanslarda devreyi dolaşması sağlanabiliyor. LC devreleri belli frekansta elektrik sinyali üretebiliyor. Bir yalıtkan tabakayla ayrılmış iki iletken levhadan oluşan kapasitör, yalıtkan bölgede oluşan elektrik alanda ener-

jiyi depoluyor. Kapasitör bir indüktöre bağlandığında kapasitörde biriken elektrik yükü indüktöre akmaya başlıyor. Üzerinden geçen akım değiştikçe manyetik alan oluşturan indüktör, enerjiyi manyetik alanda depolamaya başlıyor. Kapasitör boşalıp tüm enerji indüktörde depolandıktan sonra iş tersine dönüyor. Böylece enerji yani elektrik yükleri iki devre elemanı arasında gidip geliyor. Gidiş gelişin frekansı değişik özellikte indüktör ve kapasitör kullanılarak değiştirilebiliyor.

Kapasitör (C) aracılığıyla kübit devresine eşlenen diyapazon





Bu noktada, bahsettiğimiz devrede süperiletken teller ve materyal kullanıldığına dikkat çekelim. Süperiletken devrede elektronlar tek tek değil çiftler halinde (Cooper çiftleri), dirence maruz kalmadan dolanırlar. Kullanılan devredeki kilit elemanlardan biri de Josephson eklemi. Bu eklem, arasında yalıtkan bir bölge bulunan iki süperiletkenden meydana geliyor. Kendi içinde bir çeşit kapasitör barındıran bu eklem yalıtkan bölgesi o kadar dar ki, Cooper çiftleri kuantum tünelleme yaparak karşı tarafa geçebiliyor. Cooper çiftlerine eşlik eden madde dalgalarının fazı, devredeki akım ve manyetik alan kullanılarak ayarlanabiliyor. Cooper çiftlerinin dalga boylarının uzun olması, sistemin çok düşük sıcaklıklara kadar soğutulmuş olması gibi faktörler, Cooper çiftlerinin eşvreliliği uzun süre koruyabilmesine olanak sağlıyor. Dahası Cooper çiftlerinin Josephson ekleminden aynı anda iki farklı yönde geçmesi sağlanarak üst üste binmesi ve bir kübit gibi davranması da sağlanabiliyor.

Peki kübit gibi davranan bir elektrik devresi kullanılarak bu devreye bağlı mekanik sistemin de (diyapazonun da) kübit gibi davranması nasıl sağlanıyor? Nasıl bir atomun ışık taneciklerini soğurup yayması için ışığın belli frekansta olması gerekiyor, bir kristalin de fonon adı verilen mekanik titreşiminin enerji paketlerini soğurması için fononların belli frekansta olması gerekiyor. Bunun nedeni kristal yapıdaki atomların birbirine bağlı olmaları ve birlikte titreşmeleri. Bu titreşim gelişigüzel değil, belli kiplerde

gerçekleşiyor. Her bir kiplin belli bir enerjisi yani belli bir frekansı var. Santa Barbara ekibi, diyapazona bağlı elektrik devresinden belli frekansta bir enerji paketi yollayarak, diyapazonun bu enerjiyi soğurup bir üst kuantum enerji seviyesine çıkmasını sağlayabilmiş. Tersini gözlemi de yapmışlar, yani diyapazondan elektrik devresine enerji paketi geçişini de gözlemişler. Süperiletken elektrik devresi kübit gibi davranınca, devreye bir kapasitör aracılığıyla bağlanan diyapazonun da aynı anda iki kuantum durumunda bulunduğu gözlemlenebiliyor.

Geçen yılın en başarılı araştırmalarından biri olarak ilan edilen bu çalışmadaki deney düzeneği, popüler bilim dergilerinde “kuantum makinesi” olarak yer aldı. Enerji paketçığının, mekanik titreşim yapan minicik bir diyapazondan kuantum bilgisayarlar için geliştirilen bir elektrik devresine aktarılabilmesinden yola çıkılarak, bu düzeneğe “kuantum mikrofon” da dendi. Sonuçta bildiğimiz mikrofonlarda da sesin titreşim enerjisi elektrığe dönüştürülüyor. Deneyin teknik başarısı yadsınmaz. Ancak deneyin bu kadar ses getirmesinin nedeni gözle görülen bir sistemin kübit gibi davranabildiğini göstermesinde aranmalı. Sonuçta bu deneyle “Schrödinger’in kedisi” paradoksunun pek de paradoks olmadığı ispatlanmış oldu.

Kaynaklar

Breakthrough of the Year: The first Quantum Machine
<http://www.sciencemag.org/content/330/6011/1604.full>
 Cleland, A. N. ve diğ., “Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator”,

Nature, Sayı 464, s. 697-703, 1 Nisan 2010.
 Martinis, J. M., “Superconducting Phase Qubits”,
Quantum Information Processing,
 Cilt 8, Sayı 81, 2009.