

DÜŞÜK SICAKLIKTA BİR PATLAMA DAHA

MgB₂ UMUT VERİYOR

Sadi Turgut

Fizik dünyası bugünlerde büyük bir heyecan içinde. Bu yılın Ocak ayında Japonya'da düzenlenen bilimsel bir toplantıda Jun Akimitsu, ekibinin yeni bir süperiletken bulunduğunu açıkladı. Uzun zamandır piyasada satılan kimyasal bir madde olan MgB₂ (magnezyum diborid) 39 kelvinin altına kadar soğutulduğunda elektrik akımına kar-

şı bütün direncin kaybolduğu süperiletken faza geçiyordu. Bu, bütün maddelerdeki ısıl hareketin en düşük seviyeye indiği mutlak sıfır noktası olan -273.15 °C'ın 39 derece üstü. İlk gelen haberlere göre, bir çok önemli bilimsel buluş gibi, ekip başka bir şey ararken bu süperiletkeni keşfetmiş.

Şüphesiz süperiletken olan binler-

ce malzeme biliniyor ve bunlardan birçoğunun kritik sıcaklığı, yani malzemenin soğutulurken süperiletken faza geçtiği sıcaklığı, 100 kelvinin üzerinde. Ama MgB₂'in bazı özellikleri o kadar şaşırtıcı ki, şimdiye kadar sessizce kabul edilen bazı öngürüleri bir anda yıkıyor. Açıklamaya ilk tepkiler oldukça fazla: son üç ay içerisinde MgB₂ üzerinde 60'ın üzerinde deneysel ve kuramsal çalışma, yayımlanmak üzere bilimsel dergilere başvurdu.

Buna benzer bir heyecan 1986 yılında Zürih'te bulunan IBM araştırma merkezinden Alex Müller ve Georg Bednorz'un bir seramiğin 30 kelvinde süperiletken olduğunu açıklamasıyla başlamıştı. Açıklama üzerine yüzlerce deney grubu laboratuvarlarına gömülüp, daha yüksek sıcaklıklarda süperiletken olabilen benzer malzemeler keşfetmeye koyulmuş, bir yıl sonra kritik sıcaklık 92 kelvine çıkarılmıştı. Olaydan 15 yıl sonra aynı yapıya sahip bir çok seramiğin 100 kelvinin üzerinde süperiletken olduğu biliniyor.

Yine benzer bir gelişme 1991 yılında, futbol topu şeklinde bir kafes mo-

Heryerde satılan bir kimyasal maddenin, bir rastlantı sonucu beklenmedik süperiletkenlik özelliği gösterdiği keşfedildi.



lekülü oluşturan fullerenlerin (C_{60} molekülleri) bazı metallerle birleştirildiğinde süperiletken olduğu ortaya çıkınca yaşandı: fullerenler potasyum metali içerisine yerleştirildiğinde oluşan K_3C_{60} 18 kelvinin altında süperiletken oluyordu. Aynı heyecan sonucu, potasyum yerine diğer metallerin denenmesiyle kısa zamanda kritik sıcaklık $RbCs_2C_{60}$ 'de 35 kelvine çıkmıştı. Gerçi fullerenler seramiklerden daha iyi dereceler yapamadılar ama kritik sıcaklıkları 1986 öncesi standartlara göre çok daha yüksekti.

Süperiletkenliğin Karamsar Tarihi

Bu heyecanı daha iyi değerlendirebilmek için süperiletkenlik tarihine bir göz atmak gerekiyor. Olağanüstü



Jun Akimitsu



Kamerlingh Onnes



özellikleri ve bir çok potansiyel uygulamalarının bulunmasına rağmen 20. yüzyılın büyük bir kısmı büyük bir karamsarlık içinde geçmişti. Kamerlingh Onnes'un cıva metalinde süperiletkenliği buluşundan 1986 yılına kadar, bilinen bütün süperiletkenler ancak 25 kelvinin altında varolabiliyordu. Bu teknolojik olarak büyük bir sorun yaratıyordu. Bu sıcaklıklara erişmek ve malzemelerinizin bu sıcaklıklarda kalmasını sağlamak için helyum kullanan bir soğutucuya ihtiyacınız var. Pahalıya mal olan bu gereksinim nedeniyle bu olağanüstü fazın pratik uygulama-

larını görmeyen mümkün olmayacağı düşünülüyordu. Kocaman bir yüzyılın elde ettiği en yüksek kritik sıcaklığa sahip malzemenin 23.2 kelvinde süperiletken olan Nb_3Ge olduğunu düşünürseniz, bu görüşe siz de hak verirsiniz.

Bu karamsarlık o dereceye ulaşmıştı ki, hiç bir cismin ışık hızını aşamayacağı öngörüsü gibi, kritik sıcaklığın 30 kelvini aşamayacağı konusunda ciddi öne sürülmüştü. Süperiletkenliğin standart kuramı olan BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) mekanizmasına göre, süperiletkenlik, malzeme içindeki fonon olarak adlandırılan atomların titreşimlerden kaynaklanıyor. 30K sınırı, fononların bilinen özellikleri dikkate alındığında çok mantıklı görülüyordu. Ayrıca bilinen bütün süperiletkenler, metaller ve bunların alaşımlarından oluşuyordu. Böyle bir ortamda yeni süperiletkenler bulmak isteyen biri olsanız, herhalde metallerden başka tip atomlara bakmazdınız. Hatta bir çok değişik süperiletken malzeme keşfetmiş ünlü bir fizikçinin, öğrencilerine oksit içeren malzemelere bakmamalarını öğütlediği söylenir.

Süperiletkenlikte Kilometre Taşları

1911- Kamerlingh Onnes cıva metalinde süperiletkenliği keşfetti. (Onnes 1913'te Nobel ödülüne layık görüldü.)

1933- Walter Meissner and Robert Ochsenfeld süperiletkenlerin manyetik alanları sevmediklerini ortaya çıkardı. Böylece süperiletkenlerin zengin manyetik uygulamaları için yol açılmış oldu. Bunlardan en önemlisi enerji harcamayan çok güçlü mıknatıslar.

1957- John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer BCS kuramı olarak adlandırılan süperiletkenlik mekanizmasını açıklayan kuramı yayımladılar. Kuram daha sonra geliştirilerek bilinen süperiletkenlerin bütün özelliklerinin açıkladığı görüldü. Bardeen, Cooper ve Schrieffer bu çalışmalarından dolayı 1972 yılında Nobel ödülüne layık görüldüler.

1962- Cambridge üniversitesinden Brian D. Josephson iki süperiletken arasına sıkıştırılmış ince bir normal metal tabakasının içinden kararlı akımların geçebileceğini öne sürdü. Kısa zamanda doğrulanan bu görüş süperiletkenlerin elektronik uygulamalarında kullanılmaları yolunu açtı.

1986- Alex Müller ve Georg Bednorz bir lantan, baryum ve bakır oksit seramiğinin 30 Kelvinde süperiletkenliğe geçtiğini gösterdiler. Bir yıl sonra, en hızlı gelen fizik Nobel ödülünü almaya hak kazandılar.

1987- İki bağımsız grup lantan yerine itriyum kullanıldığında ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$) kritik sıcaklığın 92 Kelvine çıktığını gördüler. Böylece süperiletkenlik ilk defa 77 Kelvinde olan azotun kaynama sıcaklığını aşmış oldu. Helyum yerine azotla çalışan soğutucularla süperiletkenler üzerinde çalışmak ve teknolojik uygulamalarını görmek mümkün oldu.

1991- A.F. Hebard ve grubu K_3C_{60} 'nin 18 kelvinde süperiletken olduğunu buldular.

1995- Kritik sıcaklığın 138 Kelvin olduğu $Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$ seramiği keşfedildi. Bu malzeme normal basınç altında şimdiye kadar bilinen en yüksek kritik sıcaklık rekoruna sahip.

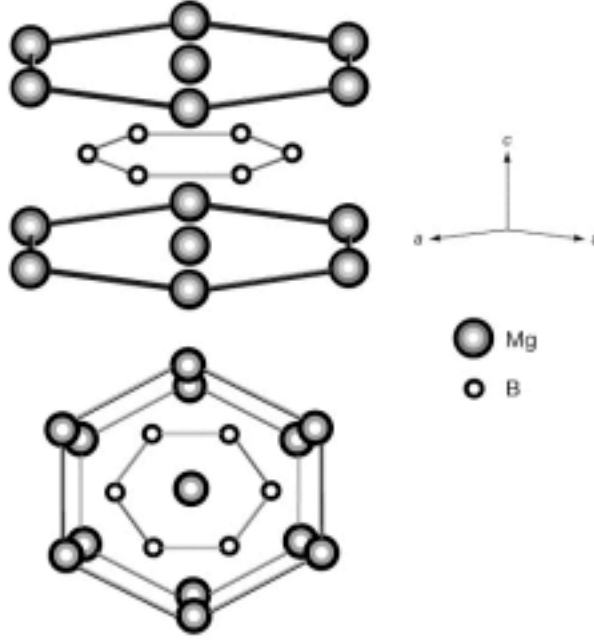
2001- Jun Akimitsu ve ekibi MgB_2 'nin 39 Kelvinde süperiletkenliğe geçtiğini gösterdiler.

Yüksek Kritik Sıcaklıklı Seramikler

Herhalde, 1986'dan önce hiç kimse normalde yalıtkan olan seramiklerin süperiletken olabileceğine inanmazdı. Bu nedenle 1986 yılında bir seramiğin, hatta oksijen içeren bir seramiğin, bir anda var olduğu söylenen kritik sı-

çaklık sınırını aşması fizik dünyasında büyük bir şok yarattı. Kuramlara dayalı bütün öngörüler bir anda altüst oldu. İkinci şok tam bir sene sonra benzer bir bakır oksit seramiğinin 92 kelvinlik kritik sıcaklığa sahip olduğu duyurulduğunda yaşandı. Artık 77 kelvin olan azotun kaynama derecesi geçilmişti. Böylece helyumla çalışan soğutucular yerine daha ucuz olan azotla çalışan soğutucular kullanarak süperiletkenliği çalışmak mümkün hale geldi. Süperiletkenlik, artık pahalı cihazlar alabilen laboratuvarların tekelinden çıkmıştı.

Kısa zamanda kritik sıcaklıklar o kadar yüksekle-



re çıktı ki artık yeni süperiletkenler, çok kırılğan seramikler olmalarına karşın, yavaş yavaş teknolojik uygulamalarda kullanılıyorlar. Şu anda bilinen en yüksek kritik sıcaklık rekoru 1995 yılında 138 kelvinle $Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$ seramiğinde elde edildi. Şüphesiz 138K bir çok fizikçi için oldukça yüksek bir sıcaklık. Ama bu sıcaklığın suyun donma noktasının 135 derece daha altında olduğunu düşünürseniz, henüz süperiletkenleri teknolojiye yaygın olarak kullanmak için çok erken olduğunu görebiliriz. Buna rağmen, bu malzemelerin o kadar cazip özellikleri var ki, bunları kullanabilmek için özel soğutucular

BCS Kuramı Ne Diyor?

John Bardeen, Leon N. Cooper ve John Robert Schrieffer 1957 yılında süperiletkenliğin nasıl oluştuğunu açıklayan bir kuram ileri sürdüler. Daha sonra bu kuramın süperiletkenlerin bir çok değişik özelliğini başarıyla açıkladığı görüldü. Bu üç bilim adamı 1972 yılında Nobel ödülüne layık görüldüler.

Yazarların soyadlarından kısaca BCS olarak adlandırılan bu kurama göre, atomların kristal ağ örgüsü içindeki konumları etrafındaki titreşimleri süperiletkenlikte anahtar rol oynuyor. Normalde ses dalgası olarak bildiğimiz bu titreşimler, elektronların mikro dünyasında paketler halinde enerji taşıdıkları için, temel parçacıklara bir benzetme yapılarak fonon olarak adlandırılıyor.

Parçacık fiziğinde yükler arasındaki Coulomb etkileşiminin, parçacıklar arasında foton alışverişi sonucu ortaya çıktığı iyi bilinir. Buna benzer bir mekanizma metallerde serbestçe dolaşan elektronların fonon alışverişinde bulunmasıyla işliyor. Elektronlar geçtikleri bölgelerdeki atomlarla etkileşip bu atomların yer değiştirmesine neden oluyor. Atomlar önce komşularını, komşular da kendi komşularını etkileyerek kristal içinde fonon denilen bir titreşim (ses) dalgası yayıyorlar. Uzun mesafelere yayılan bu dalga etkilediği yerlerde bulunan elektronların normal hareketlerini değiştirmelerine neden oluyor. Böylece elektronlar arasında dolaylı bir etkileşim doğuyor. Çok zayıf olan bu dolaylı etkileşim, normal metallerde sadece çok küçük değişikliklere neden olmasına karşın, düşük sıcaklıklarda bulunan bazı metallerde önemli niteliksel değişimler yaratıyor ve malzemenin sıfır direnç gösterdiği bir faza geçmesine neden oluyor.

Bu dolaylı etkileşim metalde dolaşan bazı elektronlar için çekici olma özelliğine sahip. Cooper bu çekici etkileşimin, tıpkı hidrojen atomundaki proton ve elektronun bağlanması gibi, metal içindeki iki elektronu birbirlerine bağlayabileceğini gösterdi.

Cooper çifti olarak adlandırılan bu bağlı elektronlar, metaldeki diğer elektronların sahip olmadığı bir takım özellikler kazanıyor. Aynen süper akışkan helyumdaki helyum atomları gibi, ya da lazerlerdeki fotonlar gibi, Cooper çiftleri de bozon özelliği gösteriyor. Bir başka deyişle, bu çiftler Bose-Einstein yoğunlaşmasına benzer bir şekilde özel bir kuantum durumuna girip aynı yönde ve aynı hızda hareket etmek için çaba gösteriyorlar. Fakat böyle bir olayın oluşabilmesi için önemli bir şart, sıcaklığın yeteri kadar düşük olması. Aksi halde çok zayıf bir şekilde bağlı bulunan çiftin elektronları birbirlerinden kolayca ayrılabilirler.



Cooper çiftlerinin bu düzenli hareket isteği, bir benzeri süper akışkan helyumda da gözlemlenen, enerji kaybetmeden akan kararlı akımlara neden oluyor. Şimdiye kadar keşfedilen bütün süperiletkenlerde, bakır oksitli seramikler, fullerenler ve MgB_2 dahil, Cooper çiftlerinin bu akımlardan sorumlu olduğu gözlemlenmiş.

Bir süperiletkende Cooper çiftlerinin oluşmasına fononların neden olduğunun en iyi kanıtı izotop etkisi olarak adlandırılan bir olay. Eğer bir malzemenin atomları, kütlece daha ağır ama kimyasal olarak özdeş izotoplarıyla değiştirilirse, malzemenin kimyasal özelliklerinin değişmemesi beklenir. Ama, tıpkı bir yayın ucuna daha ağır bir kütle bağladığınızda yayın titreşme frekansının düşmesi gibi, daha ağır izotoplar kristalin titreşim frekanslarının düşmesine neden oluyor. Bunun sonucu olarak Cooper çiftlerini bağlayan dolaylı etkileşim daha da zayıflıyor. Bu değişiklik, süperiletkenin kritik sıcaklığının düşmesi şeklinde ortaya çıkıyor.

İzotop etkisinin incelenmesi, bir çok geleneksel süperiletkenin fononlar yardımıyla oluştuğunu, ama seramik süperiletkenler için bunun geçerli olmadığını gösteriyor. Seramiklerde, başka bir mekanizma (büyük bir olasılıkla daha güçlü bir etkileşim) elektronları birbirlerine bağlıyor olmalı. Bu konuda bir çok kuram ortaya çıkmış olmasına rağmen, hala bu malzemelerin sırrı çözülebilmemiş değil.

Yeni keşfedilen MgB_2 üzerinde yapılan izotop etkisi ölçümleri, normalde ^{10}B olan bor atomlarının ^{11}B ile değiştirilmesiyle kritik sıcaklığın 39K'den 40K'e çıktığını gösteriyor. Böylece MgB_2 'nin fononlar yardımıyla süperiletken olduğu anlaşılıyor.

Süperiletkenlik nedir?

Günlük hayatımızda kullandığımız bütün iletkenlerin bir direnci vardır. Direncin bir anlamı, iletken üzerinden bir akım geçirmek için iletkene bir gerilim uygulama gerekliliğiye, bunun doğrudan sonucu olan bir diğer anlamı da geçen akımın iletkeni ısıtmasıdır. Açığa çıkan ısı enerjisini, gerilimi uygulayan (pil, santiral gibi) sağlamak zorunda olduğu için akımı devam ettirmek sürekli enerji kaybına yol açar. Direnç ne kadar büyükse, uygulanması gereken gerilim ve kaybolan enerji de o kadar büyük olur.

Fakat bazı iletkenlerde, malzeme kritik sıcaklık denilen bir sıcaklığın altına kadar soğutulduğunda, akımı taşıyan elektronlar enerjilerini ısıya çevirme yeteneklerini kaybederler ve direnç sıfıra düşer. Bu durumda herhangi bir gerilim uygulamadan ve enerji kaybetmeden bir akım yaratmak mümkün hale gelir. Süperiletken bir telin iki ucu birbirine bağlanıp üzerinden bir akım geçmesi sağlanabilirse, akım bitip tükenmeden sonsuza kadar devam eder(*). Normalde atom, molekül ve nano ölçekteki yapılarda sıkça rastlanan bu tip kararlı akımların süperiletkenler gibi makroskopik maddede gözlemlenmesi elektronların kuantum doğasının ilginç bir sonucu. Bu nedenle süperiletkenliğe, sıvı helyuma gözlemlenen süper akışkanlık gibi, bir "Makroskopik Kuantum Olgusu" adı veriliyor.

Kritik sıcaklıkta, malzemenin normal bir metalden bir süperiletkene dönüşmesi, buzun erimesi ya da suyun buharlaşması gibi bir faz

değişimi. Fakat malzemenin geçirdiği değişim sadece elektronların küçük bir kısmının farklı bir kuantum durumuna geçmesi sonucu olduğundan, malzemenin diğer özelliklerinde (mekanik özellikler, görülebilir renk vs.) bir fark gözlenmez. Üstelik, bilinen bir çok süperiletkende, direnç kritik noktada aniden sıfıra düşer.

Süperiletkenler çok yüksek akım yoğunluklarını (santimetrekare başına 1 milyon amper gibi) hiçbir enerji kaybına neden olmadan taşıyabildikleri için sonsuz sayıda teknolojik uygulamaları var. Normal bir metal bu akımı taşıyaydı, çıkan ısı nedeniyle erirdi. Yüksek akım isteyen uygulamalarda (örneğin güçlü elektriksel miktatlarda) genellikle ortaya çıkan ısıyı hızla uzaklaştırmak için telleri soğutmak gerekiyor. Süperiletkenlerin bir çok önemli uygulama alanları var. Bunlardan bazıları: Santrallerden şehirlere verimli enerji iletiminde, güçlü miktat isteyen uygulamalarda (Manyetik Resonans, Maglev trenleri vs.), büyük miktarlarda enerjinin manyetik alan olarak depolanmasında, mikroelektronikte istenmeyen ısının önlenmesinde olabilir. Ne yazık ki bilinen süperiletkenlerin çok düşük olan kritik sıcaklıkları, bu önemli uygulamaları gerçekleştirmemize engel oluyor.

(* Meraklısı için not: Gerçek süperiletkenlerde kararlı akımların çok düşük olasılıkla da olsa enerji kaybetme mekanizmaları var. Bu nedenle direnç hiç bir zaman gerçek anlamda sıfır olmaz. Ama bu direnç nitelik olarak bildiklerimizden çok farklıdır ve ölçülemeyecek kadar küçüktür. Yapılan bir deneyde böyle bir telin, akımda ölçülebilir bir azalma olmadan iki yıl boyunca iletimi sağladığı gözlemlenmiştir.

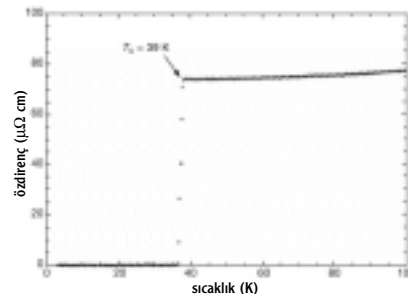
kullanmaktan kaçınılmıyor. Japonya'da süperiletkenlerden yapılan miktatlar yardımıyla havada uçarak ilerleyen Maglev treninin bir prototipi çalıştırılıyor. Bazı parçacık hızlandırıcılar, artık süperiletkenlerden yapılan miktatlar kullanıyorlar.

Genellikle bakır oksit içeren bu malzemelerde süperiletkenliğin nasıl oluştuğuyorsa henüz tam olarak anlaşılamadı. Bu seramikler standart BCS kuramının bir çok öngörüsüne uysalar da, elektronlar arasında çekici etkileşime neden olan şeyin atomların

titreşimleri olmadığı açıklık kazanmış durumda. Ciddi bir alternatif atomlardaki miktatlılığın normal doğrultularından yaptığı salınımların bir rol oynadığı; ama henüz hiç bir şey kesin değil. Benzer bir şekilde fulleren içeren süperiletkenlerin de BCS tipi olmadığı, başka bir aileye ait olduğu konusunda önemli şüpheler var. Bu nedenle BCS tipi süperiletkenlerin kritik sıcaklığının 30K'i aşım aşımıyacağı sorusu henüz cevaplanmamış sayılır. Daha doğrusu cevaplanmamıştı.



Müller ve Bednorz



MgB₂ Yeni Bir Süperiletken Ailesinin İlk Üyesi mi?

MgB₂ bu noktada özel bir önem kazanıyor. Bu malzemede yapılan izotop etkisi ölçümleri, süperiletkenliğin BCS tipi olduğunu söylüyor. Çoğunlukla ¹¹B şeklinde bulunan bor atomları, ¹⁰B ile değiştirildiğine kritik sıcaklığın 39K'den 40K'e yükseldiği gözlemlenmiş. Bu elektronlar arasındaki etkileşimi atomların titreşimlerinin oluşturduğunun en önemli göstergesi. Buna benzer deneyler mekanizmanın BCS tipi olduğunu doğruluyor. Artık hala kalıntıları süregitmekte olan, fononların 30 kelvin üzerinde süperiletkenliğe neden olamayacağı önyargısı yok olmuş sayılır.

Bu kadar yüksek bir kritik sıcaklığın bir nedeni de bor atomlarının düşük kütlesi. Bu atomlar daha yüksek titreşim frekanslarına sahip olduklarından, izotop etkisinden dolayı, kritik sıcaklığın daha yüksek olmasına neden oluyorlar. Bor atomlarının bir çok bileşikte iyi sonuçlar verdiği biliniyor. Ama, MgB₂ gibi basit bir bileşikte süperiletkenliğin gözlenmesi çok şaşırtıcı.

Eğer MgB₂'nin yüksek kritik sıcaklıklara sahip diğer aile üyeleri bulunabilirse, seramik akrabalarına karşı büyük avantaj sağlayabilirler. Seramikleri uygulamalarda kullanmanın en önemli zorluğu bunların çok kırılğan yapıya sahip olmaları. Bu problemin çözümünde büyük ilerleme sağlanmasına karşın uygulamada bir çok güçlük çıkıyor. Büyük bir olasılıkla yeni süperiletkenler metallerin çekici özelliklerini taşıyacak ve uygulamaya daha yakın olacaklar.

Bir çok grup şimdi, ya bu yeni bileşiğin henüz farkedilmemiş değişik özelliklerini keşfetmeye çalışıyor, ya da bileşikteki atomlarla oynayarak bu aileden sayılabilecek diğer süperiletkenleri bulmaya. Şimdiye kadar MgB₂ ailesinden yeni bir süperiletken bulunamadı, ama geçmiş tecrübeler dikkate alındığında bunların kısa zamanda ortaya çıkacağı yönünde güçlü bir umut var.

J. Nagamatsu et al. Nature (2001) 410, 63-64
<http://www.eren.doe.gov/superconductivity/>
<http://superconductors.org/>
<http://www.iiap.iastate.edu/htcu/htcu.html>