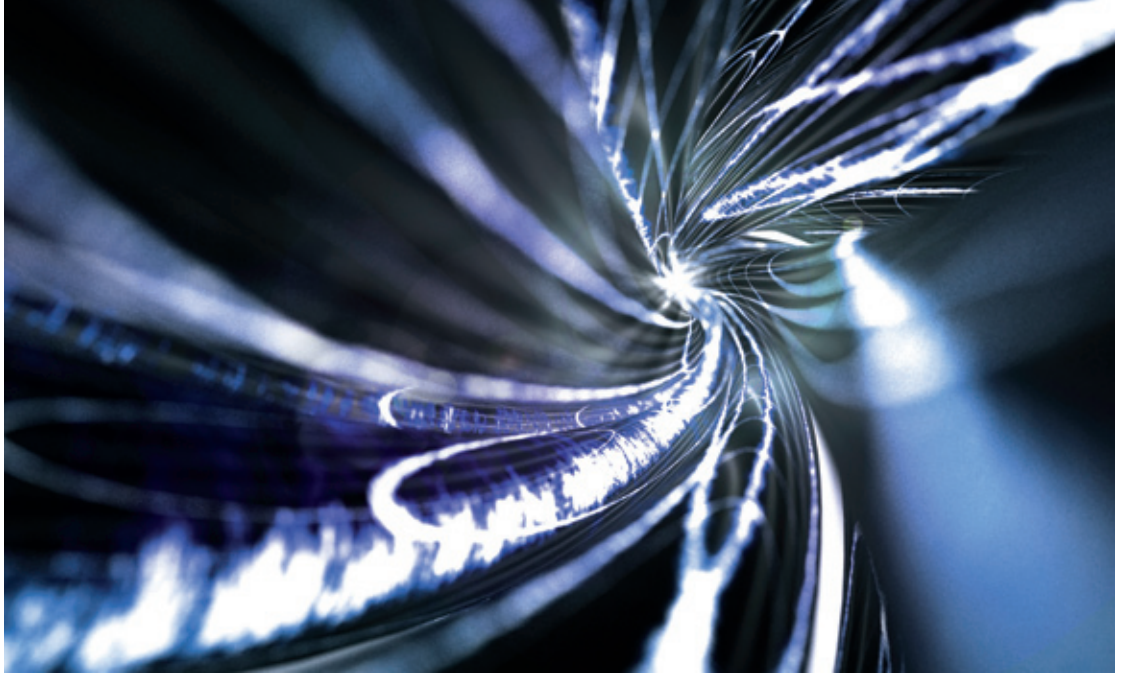


# Süperiletkenlik

1911 yılının Nisan ayında Heike Kammerlingh Onnes ve ekibi sıvı helyum kullanarak soğuttukları cıvada şaşırtıcı ve bir o kadar heyecan verici bir olguya karşılaştı. Elektrik akımı cıva telde hiçbir engelle karşılaşmadan ilerliyordu. Cıvanın iletkenliği sanki sonsuz olmuş, elektrik direnci aniden sıfıra inmişti. Sıfır direnç demek, elektriğin hiçbir enerji kaybına uğramadan uzağa taşınabilmesi ve elektrik enerjisinin sonsuza dek saklanabilmesi demektir. Bilim insanları şaşırmakta ve heyecanlanmakta haklıydı, çünkü bu keşfin teknolojide devrim niteliğinde uygulamaları olabilirdi. Görünen o ki, süperiletkenlik ile ilgili ilginç gözlemler, ortaya çıkan yeni yeni süperiletken malzemeler, süperiletkenlik olgusunu anlamak için kafa yoran kuramcılar hep şaşırtmış. Süperiletkenliğin ilk defa gözlemlenmesinin üzerinden 100 yıl geçti 100. yıl dolayısıyla dünyada ve ülkemizde araştırmacılar, düzenlenen konferanslar ve seminerlerle süperiletkenliğin son bir asrını tekrar gözden geçiriyor. Biz de 1911 yılında başlayan bu serüveni Bilim ve Teknik okurları için kısaca özetlemeye çalıştık.



**B**iri İngiltere’de diğeri Hollanda’da iki laboratuvar, 1900’lü yılların başlarında gazları yüksek basınç altında aşırı düşük derecelere kadar soğutarak sıvılaştırma yarışı içindeydi. İngiliz fizikçi Dewar ve ekibi, hidrojeni yaklaşık -253 santigrat derecede (°C ) sıvılaştırmayı başaran ilk ekip olsa da bu konudaki liderlikleri uzun sürmedi. Hollandalı fizikçi Heike K. Onnes’in ekibi önce helyumu -268°C’de sıvılaştırmayı başardı, sonra sıvı helyum içine batırılan metallerin nasıl davrandığını incele-

di. Mutlak sıfır Kelvin’e (-273°C) hiç bu kadar yaklaşılmamıştı. Onnes’in ekibi yıllardır cıvalı termometrelerde kullanılmak üzere cıva dirençler imal ediyordu. 1911 yılının Nisan ayında ise elektrik akımının sıvı helyum kullanarak soğuttukları cıva telden hiçbir engelle karşılaşmadan ilerlediğini gördüler. Cıvanın iletkenliği sonsuz olmuş, elektrik direnci aniden sıfıra inmişti. Sıvı helyumun eldesi ve Onnes’in süperiletkenlik olarak adlandırdığı bu gözlem ona 1913 Nobel Fizik Ödülü’nü getirecekti.

## Bilim camiasındaki şaşkınlık ve beklentiler

Bilim camiasının bütün dikkatini üzerinde top-  
layan deney inanılmazdı. Zira kuramcılar bir me-  
talde elektronların hiçbir dirence maruz kalma-  
dan nasıl ilerlediği konusunda bir fikre sahip de-  
ğildi. Elektronların metalin kristal yapısından do-  
ğan enerji bantlarına (yani seviyelerine) yerleşti-  
ği biliniyordu. En dış enerji seviyesindeki elekt-  
ronların serbest kalarak ilerleyişi elektrik akımı-  
nı meydana getiriyor, ilerlerken yolları üzerinde-  
ki atomlarla çarpışmaları ise metalin direnci ola-  
rak nitelendiriliyordu. Peki metal soğutulduğunda  
ne olması beklenirdi? Metal atomlarının oluştur-  
duğu atom örgüsü daha az titreşeceğinden diren-  
cin azalacağını söyleyenler vardı. Ama sıfır dirence  
düşüşün Onnes'in gözleminde olduğu gibi ani de-  
ğil yavaş yavaş olacağı öngörülüyordu. İçinde Lord  
Kelvin'in de yer aldığı bir grup ise tam tersini söy-  
lüyor, elektronların metal soğutuldukça atom ör-  
güsünden saçılırken yakalanacağını ve nihayetinde  
sonsuz dirence ulaşılacağını, daha yalın bir ifadeyle  
elektron iletiminin donup kalacağını savunuyor-  
du; asıl yaygın olan görüş de buydu.

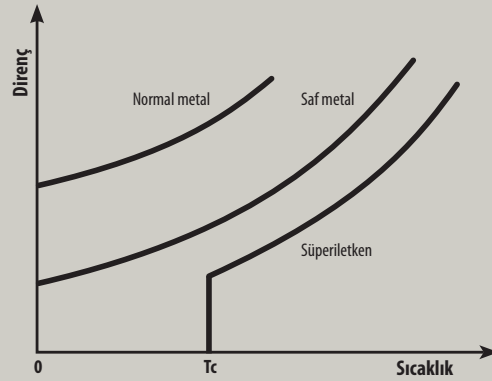
Kurşun, cıva ve alüminyum gibi metallerin  
elektriksel dirençlerinin, her metalin kendine özgü  
bir kritik sıcaklığın altında tamamen ortadan kalk-  
tığının keşfedilmesi başta elektrik şebekeleri olmak  
üzere elektronikte devrim yaşanacağı anlamına ge-  
liyordu. Çünkü sıfır direnç demek elektriğin hiç-  
bir enerji kaybına uğramadan uzağa taşınabilmesi  
ve elektrik enerjisinin sonsuza dek saklanabilme-  
si demektir. Bu keşfin üzerinden 100 yıl geçmesine  
rağmen henüz bu çapta devrimler yaşanmadı. Bu-  
nun en temel sebepleri olarak oda sıcaklığında sü-  
periletken olabilen bir malzemenin henüz bulun-  
mamış olması ve soğutma sistemlerinin pahalılı-  
ğı gösteriliyor. Yine de süperiletkenlik hatırı sayılır  
gelişmelere yol açtı. Süperiletkenliğin kullanıldığı  
ve kullanılması ümit edilen uygulama alanlarına  
geçmeden önce 1930'larda, 1950'lerde ve 1980'ler-  
de yaşanan diğer gelişmelere göz atalım.

## Süperiletkenlik ve manyetizma

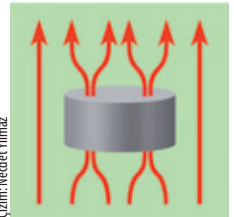
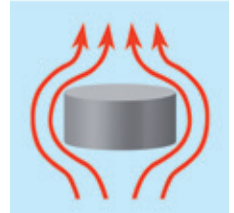
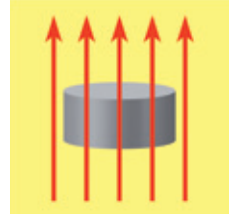
Süperiletkenlik konusundaki ikinci büyük geli-  
şme 1933 yılında yaşandı. W. Meissner ve R. Ochsen-  
feld, süperiletkenlerin mükemmel iletken olmaları-  
nın yanında mükemmel diyamanyetik özellik gös-  
terdiğini keşfetti: Bir süperiletken cisim manyetik  
alan içine yerleştirildiğinde manyetik alan çizgile-

### Hangi elementler süperiletken olabiliyor?

Periyodik Tablo'daki süperiletken olabilen 30  
metal için kritik sıcaklık değeri, elementin atom  
kütlesiyle ters orantılı. Yani bir elementin atom küt-  
lesi ne kadar yüksekse süperiletken hale gelmesi  
için gerekli sıcaklık değeri o kadar düşük. Normal-  
de çok iyi bir iletken olan bakır ise süperiletken  
metal sınıfında değil. Periyodik Tablo'nun en so-  
lunda yer alan soy gazlar da süperiletken element-  
ler sınıfına dahil değil. Ama bu hiç süperiletken  
olamazlar anlamına gelmiyor. Süperiletken olabil-  
meleri için diğerlerine göre çok daha yüksek bas-  
sınç, çok daha düşük sıcaklık gerekiyor. Yine birçok  
malzemenin süperiletken faza geçebilmesi için ya-  
abancı atomlardan arındırılarak saflık derecelerinin  
artırılması gerekiyor. Manyetik özellikleriyle bildi-  
ğimiz demir, gümüş, altın, krom, nikel, kobalt gibi  
birçok element de son zamanlara kadar süperilet-  
ken sınıfına dahil edilmiyordu. 2006 yılında ise de-  
mir bir malzemede süperiletkenlik gözlemlendi.

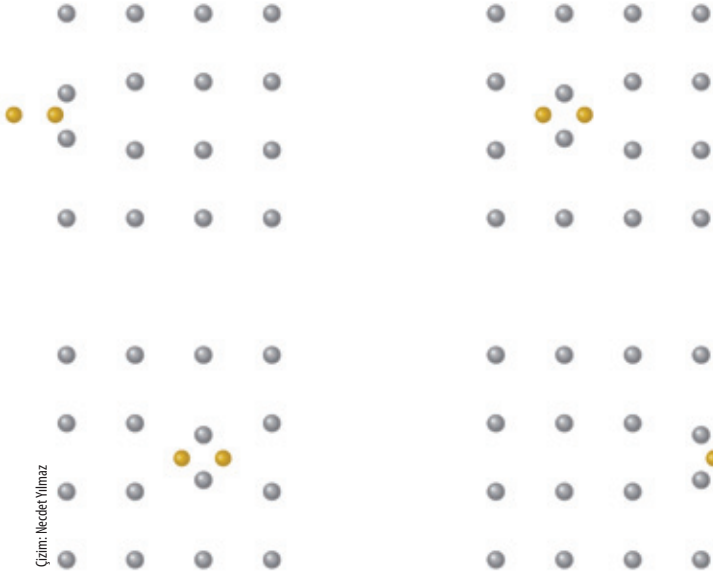


ri maddenin içine nüfuz etmiyordu. Manyetik alan  
dışlanıyor, süperiletken maddenin yüzeyinde mey-  
dana gelen elektrik akımı, uygulanan manyetik ala-  
na karşı koyuyordu. Kuramsal açıklama Fritz ve He-  
inz London kardeşlerden geldi. Süperiletkenlik o za-  
mana kadar elektrik akımı ve elektrik alanlar üye-  
rinden anlatılıyor ve mükemmel iletkenlik olarak  
tanımlanıyordu. Ancak London kardeşler süperi-  
letkenliğin belirleyici özelliğinin manyetik alan dış-  
laması olduğunu, mükemmel iletkenliğin mükem-  
mel diyamanyetizmanın bir yan ürünü olarak orta-  
ya çıktığı fikrini savundu. Süperiletkenliğin makro  
ölçekte bir kuantum sistemi olduğunu ilk fark eden  
bilim insanları olmalarıyla da bilinen London kar-  
deşler, bir süperiletkendeki elektrik akım yoğunlu-  
ğunu dışlanan manyetik alan ile ilişkilendiren denk-  
lemleri geliştirdi.



Çizim: Neadet Yılmaz

Kritik sıcaklığın üstünde olan bir  
süperiletken manyetik alan  
içine yerleştirildiğinde manyetik alan  
çizgileri cismin içine  
nüfuz edebilirken (üstte)  
kritik sıcaklığın altına soğutulmuş  
1. Tip bir süperiletken (ortada)  
manyetik alanı dışlıyor.  
2. Tip bir süperiletkende (altta)  
manyetik alan çizgilerinin  
nüfuz ettiği ve edemediği bölgeler  
bulunuyor.



Çizim: Necdet Yılmaz

Negatif elektrik yüklü elektronun atom örgüsü içinde geçerken pozitif yüklü iyonlarla elektromanyetik etkileşimi sonucu atom örgüsündeki şekil değişimi ve oluşan Cooper elektron çiftleri (Sarı küreler)

## Süperiletkenlik sahnesinde yeni malzemeler: 2. Tip süperiletkenler

1930'ların ortalarına kadar kurşun, cıva gibi bir tek metal elementten meydana gelen süperiletken maddeler biliniyordu. 1. Tip süperiletkenler denen saf metallerde, mükemmel iletkenlik madde yüzeyinin birkaç mikronluk kısmında yer alıyordu. Meissner etkisini gösterecek de, uygulanan manyetik alanın şiddeti artırıldığında manyetik alan çizgileri süperiletken içine nüfuz ediyor ve süperiletken özellikleri ortadan kalkıyordu. Kritik manyetik alan denen bu değer, birkaç metal elementin karışımından meydana gelen alaşımlar için çok daha yüksek olabiliyor ve haliyle bu alaşımlar 1. Tip süperiletkenlere göre çok daha yüksek akımları taşıyabiliyordu. Böylesi bir alaşım ilk defa Rus fizikçi Lev Shubnikov tarafından keşfedildi. Süperiletkenliğe geçiş fazı daha karmaşık olan ve 2. Tip süperiletkenler denen alaşımlar kısa sürede en popüler konu hali-

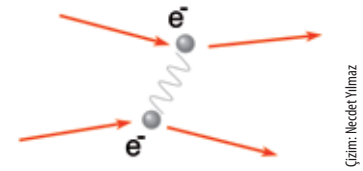
ne geldi. Deneysel araştırmacılar, yıllar içinde değişik uygulama alanlarında kendini gösterecek olan 2. Tip süperiletkenleri ve özelliklerini araştırırken, Lev Landau gibi kuramcılar da 2. Tip süperiletkenlerde faz geçişlerinin nasıl gerçekleştiğinin kuramını geliştiriyordu.

## Süperiletkenliğin kavramsal açıklaması: BCS kuramı

Süperiletkenlik kuramında hatırı sayılır bir diğer gelişme 1950'lerde yaşandı. ABD Ulusal Standartlar Bürosu'nda çalışan Emanuel Maxwell, cıvanın süperiletken faza geçiş sıcaklığının (kritik sıcaklık) kullanılan cıva izotopuna göre değiştiğini fark etti. İzotoplar atom çekirdeğinde aynı sayıda protonu olan ancak farklı sayıda nötronu olduğu için kütleleri farklı olan atomlardı.

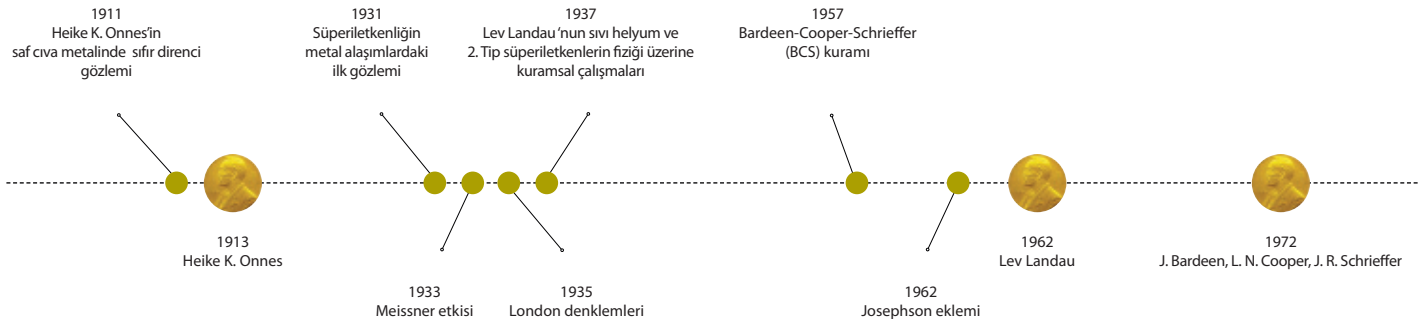
Bir metalde, atom örgüsünü oluşturan atomların birlikte hareket ettiği biliniyordu. Bu yapı belli enerjilerde ve frekanslarda titreşiyordu. Titreşimin artması ya da azalması, kuantum mekaniğine özgü olan bu sistemin fonon adı verilen mekanik titreşim enerji paketlerini soğurması ya da salması şeklinde oluyordu ve tabii ki titreşimin frekansı atomların kütlesine bağlıydı. Cıva için kritik sıcaklığın, kullanılan cıva izotopuna bağlı olması süperiletkenliğin fononlarla ilgili olduğunu ortaya koydu.

Bu konuda çalışan Leon N. Cooper, John Bardeen ve öğrencisi John R. Schrieffer, kritik sıcaklığın altına soğutulmuş bir metal içinde hareket halindeki elektronların atom örgüsüyle etkileşirken, örgünün elektronları birlikte hareket etmeye zorladığını savundu. Bu birliktelik elektronların örgü içinde daha rahat ilerlemesini yani dirençsizliği sağlıyordu. Araştırmacıların soyadlarının baş harfleriyle anılan BCS kuramına göre, iki elektron aynı kuantum enerjisinde bulunuyor, birlikte ve eşvreli hareket ediyordu. İki elektronun bu birlikteliği aradaki fonon alışverişiyle sağlanıyordu.



Fonon aracılığıyla bir arada tutulan elektron çifti (Cooper çifti)

Çizim: Necdet Yılmaz



Bu açıklama Bardeen, Cooper ve Schrieffer'a 1972 Nobel Fizik Ödülü'nü getirdi. Bu ödül Onnes ve Lev Landau'dan sonra düşük sıcaklık fiziği alanında verilen üçüncü Nobel'di. BCS kuramı, hangi malzemelerin süperiletken olabileceği ya da hangilerinin geliştirilmesi gerektiği konusunda hesaba dayalı öngörülerde bulunamadığı için eleştiriliyor. Zira başarılı bir kuramdan, açıklanamayan bir olguyu açıklamasının yanı sıra öngörülerde bulunması da beklenir. BCS kuramı, Newton'un hareket ya da Maxwell'in elektromanyetizma denklemleri kadar sarsılmaz olmasa da süperiletkenliğe başarılı bir kavramsal açıklama getiriyor.

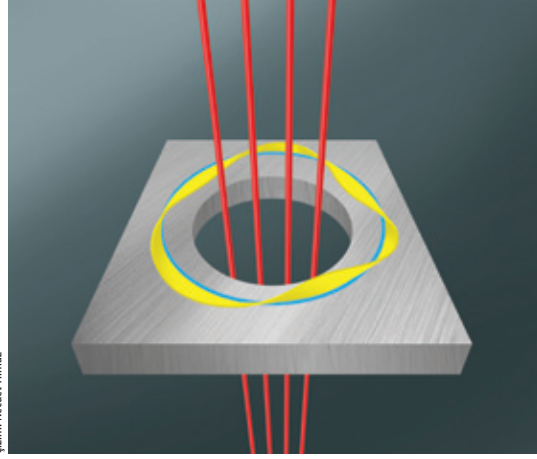
## Mikro ölçekte gözlemler: Josephson eklemi

Şimdiye kadar bahsettiğimiz mükemmel iletkenlik ve Meissner etkisi, süperiletkenliğin makro ölçekte görebildiğimiz özellikleri. 1962'de süperiletkenlerin ilginç, ancak bu sefer mikroskopik olarak gözlenebilen başka bir yönü vurgulandı. Brian Josephson'un öngörüsü şöyleydi: Süperiletken iki levha arasına ince yalıtkan bir tabaka konulursa, levhalar arasına voltaj uygulanmasa bile Cooper elektron çiftleri bir süperiletkenden diğerine kuantum tünelleme yaparak geçebilir ve doğru akım meydana getirebilirdi. Normal bir iletkende akımın oluşması için iki uç arasına voltaj uygulanması gerekliliğinin Josephson eklemi denen böylesi bir süperiletken için geçerli olmadığı öngörüsü ertesi yıl deneysel olarak kanıtlandı. Josephson eklemeleri içeren süperiletken halkalardan oluşan kuantum girişim cihazı (*superconducting quantum interference device* - SQUID) geliştirildi. Çok küçük manyetik alanların ölçümünde kullanılan SQUID'ler zaman içerisinde tıpta, jeolojide, metrolojide ve elektronikte uygulama alanı buldu. SQUID'lerin çok zayıf manyetik alanları ölçmesi-

ne olanak sağlayan, bir süperiletken halkanın içinden geçen manyetik akımın kuantize olması, yani akımın birim kuantası olan  $h/2e$  (Plank sabiti/Cooper çiftinin elektrik yükü) değerinin her zaman tam katı olmasıdır.

## Süperiletkenlik için yeni bir devir: Yüksek-sıcaklık süperiletkenleri

1980'ler süperiletkenlik için yeni bir dönemin başlangıcı oldu. Alex Müller yıllardır perovskit denen, belli bir kristal yapıya sahip ferroelektrik özellik gösteren malzemeler üzerinde çalışıyordu. Müller'in özellikle bakır oksit seramiklere olan ilgisi bu konuda çalışan bilim insanlarının önceki gözlemlerine dayanıyordu. Bir perovskitte elektron yoğunluğu düşük olsa da kritik sıcaklığın -Ginzburg-Landau'nun kuramında öngörülenin aksine- yüksek olduğu görülmüştü. Kurama göre negatif elektrik yüklü elektron atom örgüsü içinden geçerken, elektronlar ile pozitif yüklü iyonlar arasında elektromanyetik çekim meydana geliyordu. Elektron etrafında artan pozitif iyon yoğunluğu nedeniyle elektronun negatif yükü perdeleniyordu. Böylece birbirini itmesi gereken iki elektron bir araya gelerek Co-



İçerideki bir süperiletken içinden geçen manyetik akı (kırmızı çizgiler). Her bir manyetik akı çizgisinin  $h/2e$ 'lik akı kuantasına denk geldiğini düşünürsek burada 4 tane çizginin varlığı süperiletkende oluşan mükemmel elektrik akımı (mavi çizgi) hakkında da fikri veriyor. Manyetik akımın  $h/2e$ 'nin 4 katı olması dalga fonksiyonun (sarı halka) akım halkasını 4 defa dolandığını gösteriyor.

1986  
G. Bednotz ve A. Müller'in  
32 Kelvin'deki bir seramikte (LaBaCuO4)  
süperiletkenliği gözlemi

2001  
J. Akimitsu'nun 38 Kelvin'deki basit bir  
bileşikte (MgB2) çok daha önce fark  
edilmesi gereken süperiletkenliği gözlemi

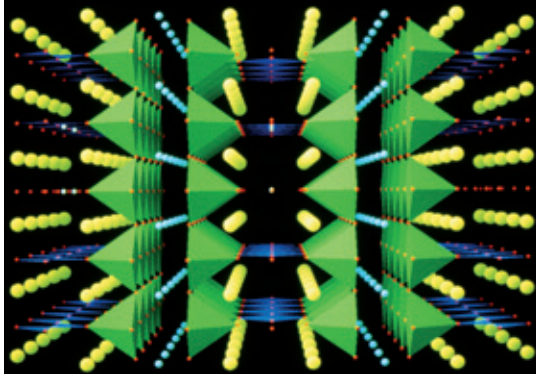
1987  
G. Bednotz ve A. Müller

2003  
A. Abrikosov, V. L. Ginzburg, A. J. Leggett

1987  
P. Chu'nun 93 Kelvin'deki  
bir seramikte (YBCO)  
süperiletkenliği gözlemi

2006  
Hideo Hosono ve meslektaşlarının  
demir bir malzemede 55K'de  
süperiletkenliği gözlemi

per çiftleri meydana getirebiliyordu. Müller son zamandaki gözlemleri şöyle yorumladı: Demek ki düşük elektron yoğunluğu perdeleme etkisini azaltıyor ve bu bir şekilde Cooper çiftlerinin oluşumunu sağlayan etkileşimi kuvvetlendiriyordu. Alex Müller ve meslektaşısı George Bednorz bu etkiyi görebilmeyi ümit ederek yüzlerce perovskiti inceledi. Sonunda 1986 yılında lantan, baryum, bakır ve oksijenden oluşan (LaBaCuO) bir seramiğin 35 K'de süperiletken olabildiğini gözlemlerler.



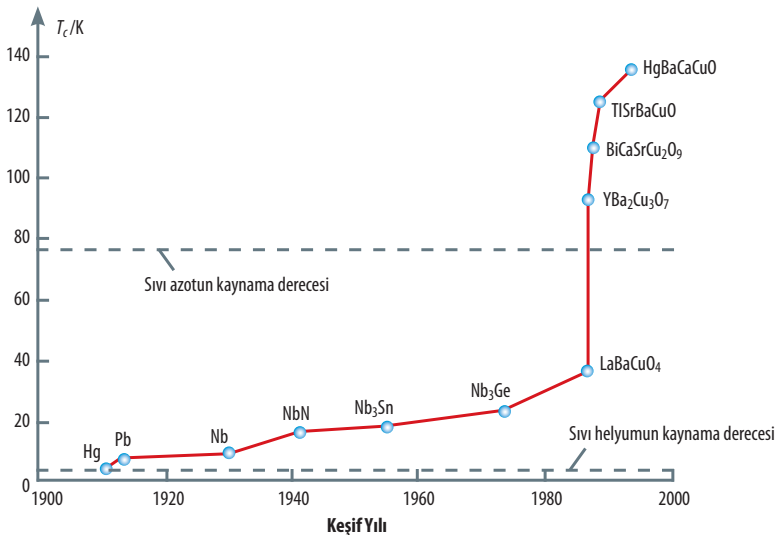
Bu sıcaklık değeri o zamana kadar bilinen süperiletkenler için ulaşılması gereken sıcaklıktan 12 K daha yüksek idi. BCS kuramına göre ise 20 K'in üzerinde süperiletkenlik mümkün değildi. Bu başarı üzerine, genelde verilmeden önce yıllarca beklenen Nobel Ödülü Bednorz ve Müller'e hemen ertesi yıl verildi. Aynı yıl Paul Chu 92 K'de süperiletken olan, bu sefer lantan yerine yitriumun (Y) yer aldığı farklı bir seramik (YBCO) yapı keşfetti. Bu keşifler hem bir gün oda sıcaklığında süperiletken olabilen malzemelere ulaşabileceği ümitlerini canlandırdı hem de dünyanın dört bir yanında bu konuda çalışan araştırmacılara hangi tip malzemeler üzerinde yoğunlaşmaları gerektiği konusun-

da yol gösterici oldu. Süperiletken olabilen metaller ve alaşımlar sıvı helyum kullanılarak soğutuluyordu. Kritik sıcaklığı sıvı azotun sıcaklığı olan 77 K'den daha yüksek olan süperiletkenler, elde etmesi çok daha kolay ve maliyeti daha düşük olan sıvı azot kullanılarak soğutulabilecekti.

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri 2. Tip süperiletkenlerdi. 1930'lardan beri kuramsal olarak anlaşılmaya çalışılan 2. Tip süperiletkenler üzerinde yıllardır kafa yoranlardan biri, Lev Landau'nun öğrencisi Alexei Abrikosov'du. 1950'lerdeki makalelerinin uzun süre Rusça'dan İngilizceye tercüme edilememesi sonucu camiada geç fark edilen Abrikosov, 2001 yılında Vitaly L. Ginzburg ve Anthony J. Leggett ile birlikte Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldü. Abrikosov, manyetik alan içine yerleştirilen 2. Tip bir süperiletkende manyetik alanın niye bazı bölgelere nüfuz edip bazı bölgelere nüfuz edemediğini kuramsal olarak açıkladı. Nobel söyleşisinde kendisine yöneltilen sorulardan biri "Dünyada süperiletkenlik üzerine çalışan bir sürü deneysel araştırmacı var, ancak sadece bir kaç keşifte bulunabiliyor. Bunu neye bağlıyorsunuz?" idi. Abrikosov şansın önemli olduğunu, ancak asıl önemli olanın araştırmacının bilgi birikimi olduğunu vurguluyor ve Alex Müller'i örnek olarak gösteriyor. Özellikle süperiletkenlik konusunda çok miktarda malzeme olduğunu, Müller'in hangi malzemenin ne özellik gösterebileceğini önceden sezdiği için başarılı olduğunu belirtiyor.

Bir gün oda sıcaklığında süperiletken olabilen bir malzeme bulunacak mı sorusuna Abrikosov'un cevabı şöyle: "Bakır oksit perovskitlerle bu sıcaklığa ulaşılacağını sanmıyorum. Ama kuramsal çalışmaların bir gün bir şekilde deneysel araştırmacıları doğru yönlendirecek seviyeye gelebileceğinden ve oda sıcaklığında süperiletkenliğin bulunabileceğinden ümitliyim."

Süperiletkenliğin tarihsel gelişimini, bu konuda çalışan Türk araştırmacılarla noktalayalım. Bu araştırmacılardan biri Massachusetts Institute of Technology'de (MIT) öğretim üyesi olarak bulunan Nuh Gedik. Kendisine ABD Ulusal Araştırma Kuruluşu (NSF-National Science Foundation) tarafından bakır oksit seramiklerde süperiletkenliğin mekanizması üzerine yaptığı kuramsal çalışmalarından ötürü 2009 yılı kariyer ödülü verilmiş. Türkiye'deki üniversitelerde çalışmalarını sürdüren Prof. Dr. Nihat Berker, Prof. Dr. Bilal Tanatar ve Prof. Dr. Tuğrul Hakioglu ise süperiletkenlik kuramı denilince akla gelen başarılı araştırmacılarımızdan sadece birkaçı.



## Süperiletkenliğin tarihini değiştiren bir olay

2001 yılında Japonya'daki Aoyama-Gakuin Üniversitesi'nden Jun Akimitsu 50 yıldır bilinen magnezyum diborür ( $MgB_2$ ) alaşımının katlı ve düzgün bir kristal yapıya sahip olduğunu ve 39 K'de süperiletken hale geldiğini açıkladı.  $MgB_2$ 'un ferromanyetik özelliğini incelerken beklenmedik bir şekilde karşılaştıkları bu olgu, yaklaşık 50 yıl önce gözden kaçan bir hatayı düzeltti. New York'taki Syracuse Üniversitesi'nden araştırmacılar, 1950'lerde  $MgB_2$ 'un ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimini incelemiş ve düzgün katlı kristal yapıya sahip yapılar gibi davranmadığı sonucuna ulaşmışlardı. Bu sonuç üzerine  $MgB_2$ 'un üzerine gidilmemiş, düşük sıcaklıklarda manyetik özellikleri, süperiletken olup olmayacağı incelenmemişti. Geçtiğimiz Nisan ayında *Physics World* dergisindeki yazısında Akimitsu'nun 2001 yılındaki gözlemine değinen Paul Michael Grant'e göre, bu gerçek yıllar önce bilinseydi CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda kullanılmak üzere niyobiyum titanyum geliştirilmeyecek, niyobiyum alaşım yerine  $MgB_2$  kullanılacaktı. Belki şimdilerde  $MgB_2$ 'dan yapılmış süperiletken kablo ve rotorları kullanıyor olacaktık. Grant "bu deneyimden çıkan ders belli, garip davranışlar gösteren bir malzeme bulursanız hemen soğutun" diyor. Bu noktada, ülkemiz üniversitelerinde ve Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü bünyesinde  $MgB_2$  üzerine çalışan araştırmacılarımız olduğunu da belirtelim.

## Süperiletkenliğin Uygulamaları

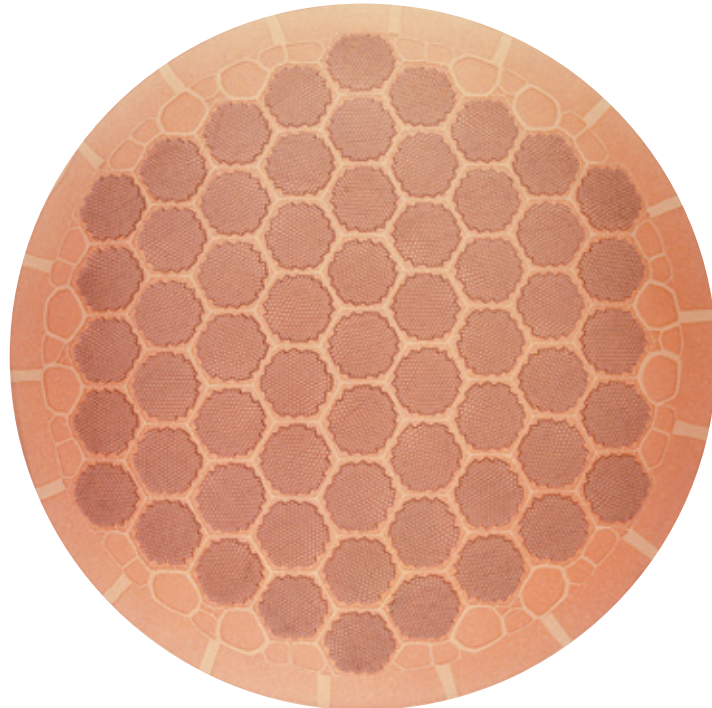
### İletim hatları

Elektrik akımını iletmek için normal tel kullanıldığında kilometre başına yaklaşık 50 KiloWatt'lık güç kaybı oluyor. Bakır tel yerine süperiletken tel kullanıldığında ise güç kaybı 30 KiloWatt'a kadar düşebiliyor. Süperiletken telden geçen doğru akımda ise hiç güç kaybı yok. Üstelik süperiletken kablolar geleneksel kabloların onda biri ağırlığında olduğundan daha kolay taşınabiliyor.

Taşıyabildiği akım miktarı daha çok olduğu için elektrik iletiminde kullanılmak üzere niyobiyum alaşımları, YBCO gibi 2. tip süperiletkenler seçiliyor. Örneğin saç telinden ince niyobiyum titanyum teller demet haline getirilerek bakır bir tüp içerisine yerleştiriliyor ve dışı yalıtkan bir madde ile kaplanıyor. Soğutucu olarak kullanılan sıvı azot tüpün etrafından akıyor. Soğutma sistemi bozulup süperiletkenlik ortadan kalksa bile iletim bakır tüp aracılığıyla devam ediyor.

YBCO sert olmasına rağmen kırılğan olduğu için, YBCO teller önce özel olarak hazırlanmış film şeritler üzerine yerleştiriliyor. Soğutmak için yine sıvı azot kullanılıyor. Atatürk Üniversitesi'nden Prof. Dr. Mehmet Ertuğrul ve grubu YBCO kablo prototipi geliştiren araştırmacılar. Prof. Ertuğrul üniversite laboratuvarlarında ancak birkaç santimetre süperiletken kablo üretilbildiğini, metrelerce süperiletken kablo üretimi için üniversite-sanayi işbirliğinin gerekli olduğunu vurguluyor.

Geleneksel iletim hatlarından süperiletken iletim hattına geçiş bir hamlede gerçekleştirmiş ve ülke çapında süperiletken iletim hattına sahip ülke henüz yok. Bu geçişin mega projeler ile yavaş yavaş gerçekleşeceği öngörülüyor.





## Süperiletken Mıknatıslar

İçinden akım geçen iletken tel etrafında manyetik alan oluşur. Süperiletkenler normal bir iletkene göre çok daha yüksek akım taşıyabildikleri için güçlü elektromıknatıs olarak kullanılmaya hayli elverişliler. Örneğin YBCO 4,2 K'de 200 Tesla'lık manyetik alanda bile süperiletkenliğini kaybetmiyor.

**Jeneratörler:** Elektromıknatıs kullanan bir jeneratörden elde edilen elektrik enerjisinin yaklaşık % 2'si üretim sırasında kullanılan tellerdeki direnç sebebiyle ısı enerjisine dönüşür. Süperiletken elektromıknatıs kullanımı, kullanılan soğutma sistemine harcanan enerji göz önünde bulundurulduğunda bile bu enerji kaybını % 1'lere düşürebiliyor.

**Parçacık Hızlandırıcılar ve Dedektörler:** Elektrik alan kullanılarak hızlandırılan atomaltı parçacıklar ışık hızına yakın hızlara ulaşır. Bu kadar yüksek

hızdaki parçacıkları hızlandırıcının yörüngesinde tutmak için kuvvetli manyetik alanlar gerekir. Bu iş için, parçacık hızlandırıcılarda süperiletken mıknatıslar kullanılıyor. Örneğin CERN'deki 27 km uzunluğundaki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı için gerekli olan, Dünya'nın manyetik alanının 100.000 katı büyüklüğündeki manyetik alanı üretmek için niyobiyum titanyum kablolardan yapılmış manyetik bobin kullanılıyor. Süperiletkenliği sağlamak için süperiletken mıknatıslar 1,9 K'e kadar soğutuluyor.

Ayrıca hızlandırıcı tünelinin belli noktalarına yerleştirilen dedektörlerde de süperiletken mıknatıslar kullanılıyor. Dedektör merkezlerinde ışık hızına yakın hızlara kadar hızlandırılmış parçacıklar çarpıştırılıyor. Ortaya çıkan yeni atomaltı parçacıklar dedektör içinde yüksek hızda ilerliyor. Bu parçacıklar süperiletken mıknatısların meydana getirdiği kuvvetli manyetik alana maruz kaldıklarında sapıyor. Sapma miktarı ve sapma yönünden parçacığın kütlesi ve elektrik yükü bulunabiliyor

**Rotorlar:** Elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürmekte kullanılan motorlardaki dönen elektromıknatıslar (rotorlar) % 90-95 arası bir verimle çalışabiliyor. Süperiletken elektromıknatıslar kullanmak suretiyle verim % 2 daha artırılabilir.

Rotorlarında süperiletken mıknatıs kullanılan uçaklar, rüzgâr türbinleri hem daha verimli hem de demir bobin ortadan kalktığı için daha hafif ve daha sessiz. Üstelik bu yöntem atmosfere karbon salımını ortadan kaldırdığı için çevre dostu bir yöntem olarak tavsiye ediliyor.

**Maglev trenler:** Maglev, manyetizma sonucu havada asılı kalma anlamına gelen *magnetic levitation*'ın kısaltması. Maglev trenlerin çalışma prensibi süperiletkenlerin manyetik alanı dışlamasına dayanıyor. Rayları süperiletken malzemeden yapıp raylar boyunca soğutma sistemi kullanmak akıllıca olmadığından, süperiletkenler trenin altına yerleştiriliyor. Havada asılı kalan tren sürtünme olmadığı için rahatça yol alıyor.

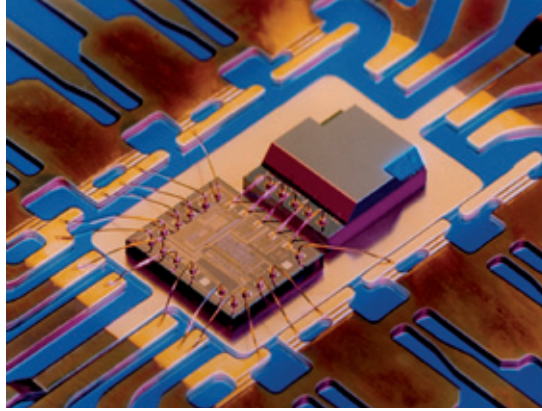
Bilim kurgu filmlerinde kullanılması maglev trenleri süperiletkenliğin en popüler uygulaması getirdi, ama dünyadaki tek uygulama Japonya'daki Yamanishi maglev treni. Saatte 581 km hızla yol alan bu tren, Fransa'daki dünyanın en hızlı raylı tren sistemi olan TGV treninden sadece 6 km daha hızlı. Yani hızlı taşımacılık söz konusu olduğunda, maglev trenler yakın gelecekte pek rağbet göreceği gibi değil. Ülkemiz araştırmacılarından Prof. Dr. Ekrem Yılmaz ve ekibinin gerçekleştirdiği çalışmalar arasında maglev tren prototipi de var.

**MRI:** Süperiletkenliğin ilk defa gözlemlenmesiyle birlikte konuşulmaya başlanan iletim hatları, maglev trenler gibi büyük uygulamaların beklenen ölçekte ve hızda gerçekleşmediğini söyleyebiliriz. Ancak süperiletkenliğin tıpta çok önemli bir uygulaması var. İnsan vücudunu görüntüleyen manyetik görüntüleme cihazı MRI için şiddeti -taranan bölge boyunca ve zaman içinde değişmeyen- kuvvetli manyetik alan gerekiyor. Bu ise ancak süperiletken elektromıknatıslarla sağlanıyor.

## Josephson Eklemleri

**Tıp:** Süperiletken kuantum girişim cihazları SQUID'ler bir pusula iğnesini hareket ettirebilen manyetik alandan yüz milyar kez daha zayıf olan manyetik alanları ölçebiliyor. Dolayısıyla

SQUID'ler insan vücudunun elektromanyetik alanındaki ufak değişimleri tespit etmek için kullanılabilir. Kas ve sinir aktivitesi sırasında ortaya çıkan 1 Tesla'nın bin milyarda biri büyüklükteki manyetik alan, SQUID'lerin kullanıldığı manyetosemlograf ile ölçülebilir. Yine normal elektrokardiyografi ile tespit edilemeyen kalp rahatsızlıkları manyeto-kardiyografi ile ortaya çıkarılabilir.



**Bilgisayar:** Çiplerde kullanılan kapasitörleri birbirine bağlayan metal filmlerin direnç sebebiyle ısınması, daha hızlı ve daha küçük bilgisayarların yapımını sınırlayan etmenlerden biri. Çiplerde metal film yerine süperiletken ince filmler kullanıldığında CPU hızının arttığı deneysel olarak kanıtlanmış durumda. Elektrik sinyallerinin bilgisayar mantık devrelerini hızlı bir şekilde açıp kapaması bilgisayarın hızı açısından önemli. SQUID'ler yarı iletkenlere kıyasla 10 kat daha hızlı bir şekilde anahtar işlevi görebiliyor. Daha küçük ve süper hızlı bilgisayarlara ulaşmak için ideal olduğu düşünülen süperiletkenlerin ünü, sonradan ortaya çıkan metal oksit silikon alan transistörleri (MOS-FET) ile gölgelense de, birçok bilim insanı halen SQUID'lerin bilgisayar devrelerinde anahtar olarak kullanılması üzerine çalışıyor.

Kritik sıcaklıkları şimdiye kadar bilinenlerden daha yüksek süperiletken malzemeler bulunduğu süperiletkenlik yeni uygulama alanları ile karşımıza çıkabilir. Oda sıcaklığında süperiletken olabilen malzemelerin bulunmasının ise teknolojik bir devrime yol açacağı ve bu tip malzemelerin günlük hayatımızda kullandığımız teknolojinin her noktasında yer alacağı öngörülüyor.

### Kaynaklar

*Physics World*, Superconductivity Sayısı, Nisan 2011.  
Aydın, F., Kırıkkaya E. B., Özcan, H., Timur, S., Timur, B., *Bilim ve Teknoloji -1, Fizikte Özel Konular*, Pegem Akademi Yayıncılık, 2010.