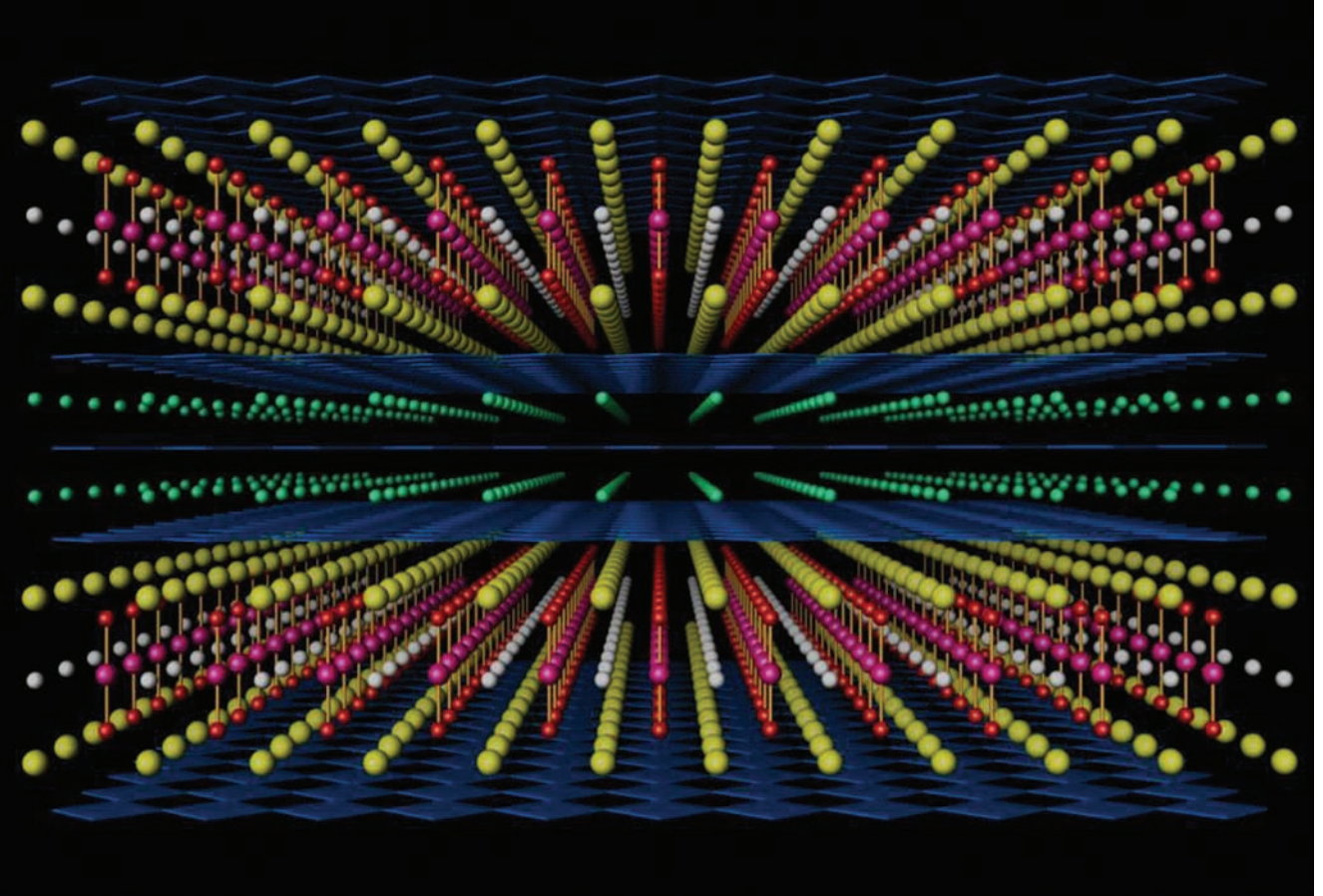


SÜPERTEKNOLOJİLER  
SIFIR DİRENÇTE SAKLI...

# SÜPERİLETKENLER



Mutlak sıfırın yakınında, bazı metallerin elektriksel dirençleri yoktur. Süperiletkenlik adı verilen bu olgu için artık bu kadar soğuk ortamlara gerekisim yok. 1980'li yılların ortalarında keşfedilen ve yüksek sıcaklık süperiletkenleri adı verilen ve daha kolay elde edilebilen sıcaklıklarda elektriksel dirençlerini kaybeden seramikler, minik anahtarlama sistemlerinden büyük ölçekli endüstriyel alanlara değin geniş bir uygulama alanına sahip. Adı üstünde, elektriği hiçbir dirençle karşılaşmaksızın ve hiçbir enerji kaybına uğramaksızın iletebilen bu malzemeler sayesinde, 19. yüzyılda Michael Faraday'ın keşifleriyle başlayan, elektrik akımının kullanımı ve üretimi için büyük endüstrilerin gelişimine sahne olan elektrik teknolojisi yepyeni bir devrime hazırlanmak istiyor; tabii peşinden gelecek bir sürü devrimsel teknolojiyle beraber... Ancak oda sıcaklığında süperiletken hale gelen malzemelerin daha az masraflı ve kolay elde edilebilir hale gelmesinin önündeki kimi engeller bilim adamlarını yıldırmaştı. Son yıllardaki ilginç gelişmelerse, araştırmacıların kolları yeniden sıvamalarına neden oldu...

Gaz halinde bulunan elementlerin sıvılaştırılması, 19. Yüzyıl bilim adamları için oldukça büyüleyici ve ilgi çekici bir uğraş alanıydı. Çok düşük sıcaklıklara gereksinim duyulan bu işlemi ilk kez 1823 yılında Michael Faraday kloru sıvılaştırarak gerçekleştirdi. Faraday, kloru 77 Kelvin'e (K) kadar soğutmuştu. Sıcaklık birimi olarak kullanılan Kelvin, aslında, bildiğimiz Celsius (°C) ile aynı; ancak başlangıç noktası olan 0 K, -273 °C'ye karşılık geliyor ve bu değer "mutlak sıfır" olarak adlandırılıyor. Mutlak sıfır, evrendeki en düşük sıcaklık değeri. Bu sıcaklıkta bir maddenin enerjisi de olabilecek en düşük değerde bulunuyor. 77 K'yi gündelik sıcaklık ölçeğimizle karşılaştırırsanız, -196 °C'ye karşılık geldiğini görürsünüz; yani dondurucu soğuk.

Faraday, sonradan değişik sıcaklıklarda başka gazları da sıvılaştırmayı başardı. Ancak, oksijen, azot, hidrojen ve metan gibi bazı gazları sıvılaştıramamış ve bu tür gazların sıvılaştırmayacağını öngörmüştü.

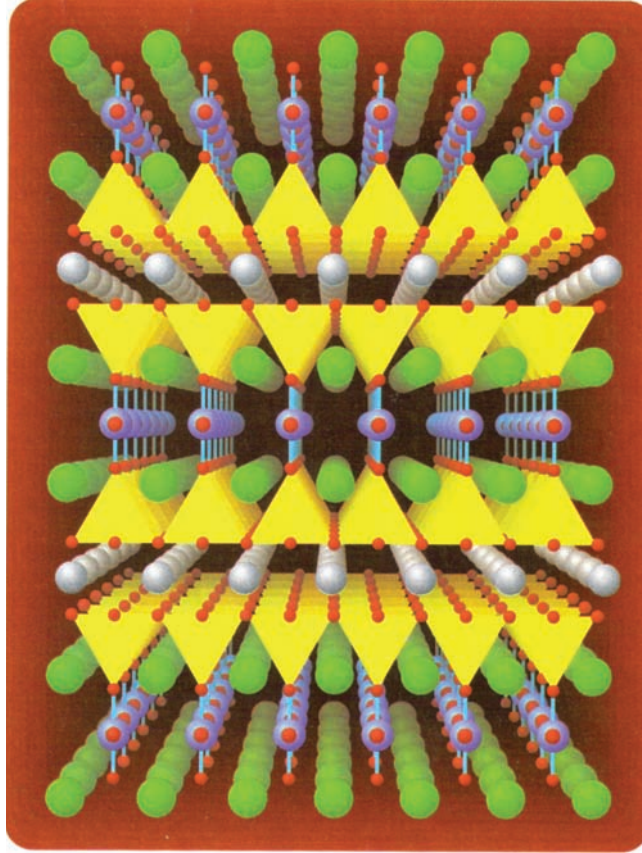
1877 yılına gelindiğinde, Louis Cailletet ve Raoul Pictet oksijen ve azotu sıvılaştırmayı başardılar ve böylece Faraday'ın öngörüsü de çürütülmüş oldu. Ardından da James Dewar, 1898 yılında hidrojeni 20 K'de sıvılaştırarak mutlak sifıra en yakın değeri elde etti.

Bugün bile kullanılan ve sıvı azot taşımaya ya da depolamaya yarayan kaplara onun adı verilmektedir.

20. yüzyıla girildiğinde de, bilim adamları birbirleriyle yarışmasına mutlak sıfır yakınlarında malzemelerin davranışlarını araştırmaya başlamışlardı. Bu çalışmaların bir sonucu 1900 yılında hidrojenin sıvılaştırılması için gerekli sıcaklığın 6 K'ye kadar düşebileceğinin gösterilmesiydi. Böylece mutlak sifıra adım adım yaklaşıyordu. Artık bilim adamları için, gazları sıvılaştırmaktan çok, bu sıcaklıktaki sıvılaştırılmış gazları kullanarak diğer malzemelerin davranışlarını araştırmak ön plana çıkıyordu.

Sonunda Hollandalı fizikçi Kamerlingh Onnes, 4,2 K'lik değere ulaşmayı başardı ve bu sıcaklıkta elde ettiği sıvı

helyumu kullanarak değişik malzemeleri soğuttu. Amacı, bu sıcaklıktaki malzemelerin davranışlarını gözlemlemektir. Deneyleri sırasında Onnes, bu sıcaklık değerinde cıvanın ilginç bir davranışını keşfetti. Cıva, belli bir sıcaklık değerinin altında elektrik akımına karşı neredeyse tüm direncini kaybediyordu. "kritik sıcaklık (Tc)" adını verdiği bu eşik değerinin altında cıva, yalnızca çok iyi bir iletken değil, elek-



Yüksek sıcaklık süperiletkenleri karmaşık kristal yapıya sahiptirler; bu yapı sayesinde elektronlar belirli düzlemler boyunca kolayca hareket ederler. Bu tür malzemelerdeki süperiletkenlik mekanizması henüz tam olarak çözülmüş değil.

triğe karşı hiçbir direnç göstermeyen bir "süperiletken"e dönüşüyordu.

Onnes, 1911 yılında bu sonuçlarını sunduğunda yepyeni ve çarpıcı bir buluşa imza atıyordu: Süperiletkenlik.

## Sıfır Direnç

Michael Faraday'ın 19. yüzyılda yaptığı en önemli keşiflerin başında hiç kuşkusuz elektrik akımının üretimi ve kullanımını olanaklı kılan çalışmalar gelir. Yepyeni bir teknolojik devrimi simgeleyen bu elektrik teknolojisi, bugünkü teknolojimizin de temelini

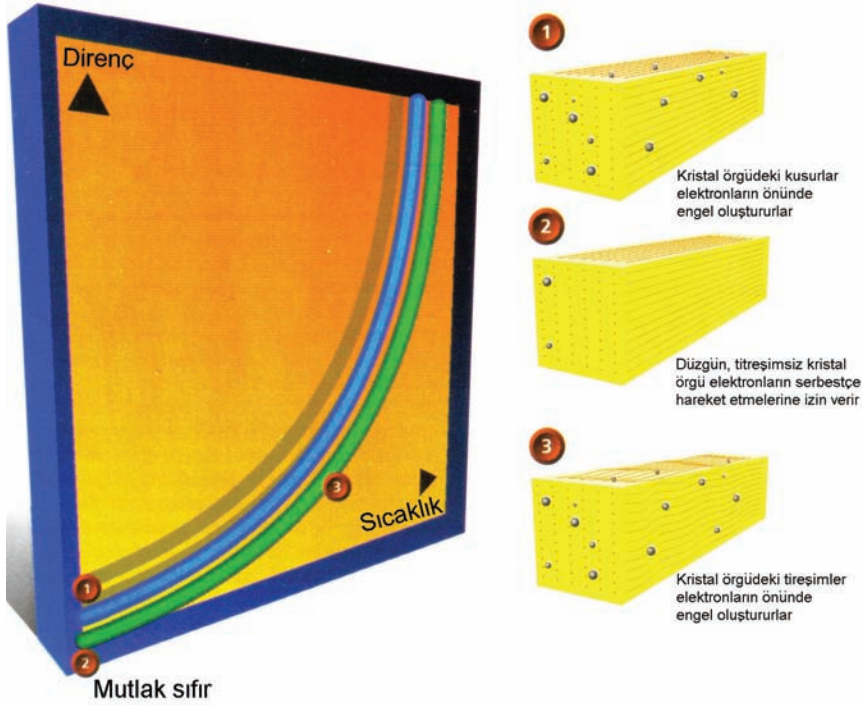
oluşturuyor. Elektriği kullanmamızın en önemli nedenlerinden birisi de, istediğimiz zaman ve istediğimiz yerde enerji elde edebilmenin en kolay yolu olması. Elektrik sayesinde motorları çalıştırır, ışık üretir, ısınır ve bilgisayarlarımızı kullanabiliriz. Ancak, evlerimizin her yerini donatan prizlere elektriğin taşınması için kablolarla gereksinim var. İşte bu noktada bazı sorunlar çıkıyor. Elektriği taşıyan teller

genellikle metaldirler ve bu metaller elektrik akımına karşı bir direnç gösterirler. Bu direnç de, tel boyunca akan akımı, yani kullanılacak enerjinin bir kısmını atık ısıya dönüştürür. Aslında bunu kendi lehimize çevirmiş durumdayız; bir ampul ya da elektrikli ısıtıcı bu ilkeyle çalışır. Ancak sözkonusu olan ısı ya da ışık elde etmek değil, elektriği iletmek olunca, ortaya çıkan ısı aslında atık enerji anlamına geliyor. Elektrik santrallerinde üretilen elektriğin yaklaşık %8'i iletim kablolarındaki direnç nedeniyle atık ısıya dönüşerek evlerimize ulaşmıyor. Fakat sıradan bir iletken yerine bir süperiletken kullanırsanız elektrik akımı, hiçbir enerji kaybına uğramadan akabilir. Çünkü süperiletkenlerin elektriksel dirençleri yok-

tur.

Süperiletkenliğin ne olduğunu anlamadan önce, elektrik iletimi anlamına gelen akım ve bu akımı ileten malzemeler hakkında biraz bilgiye gereksinimimiz olacak. Akım, bir metal boyunca akan elektronlar tarafından taşınır. Metaller genellikle, düzenli kristaller dizisine yani, atomlar "örgüsü"ne sahiptir ve bu örgü içindeki kimi elektronlar, ait oldukları atomlardan kurtularak serbest hale gelirler. İşte elektrik akımının taşınması için en uygun elektronlar bunlardır. Adları da bu nedenle "iletim elektronları"dır. Elektronlarını kaybeden atomlarsa iyon adı verilen artı yüklü atom haline geçerler.

Elektronlar aslında, düzenli kristal örgü boyunca serbestçe hareket edebilirler. Ancak bazen, örgünün düzenli



Saf bir metal, eğer kristal örgünün titreşimleri hesaba katılmazsa, mutlak sıcaklıkta (0 K) sıfır dirence sahip olabilir. Saf olmayan bir metalinse, özellikle kristal örgüsündeki kusura neden olan atomlar nedeniyle, direnci vardır.

yapısını bozan herhangi bir kusur oluştuğunda, elektronların bu serbest hareketini engeller ve bu da akıma karşı bir dirence yol açar. Tellerdeki bu elektriksel direncin temel olarak iki kaynağı vardır. Bunlardan ilki örgüdeki kayıp atomların oluşturduğu boşluklar nedeniyle kristal örgüde oluşan kusurlar. Elektronlar bu tür düzensizliklerle karşılaştıkları her seferinde enerjilerini aybederler. İkincisi de ör-

gü titreşimleri. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda örgü içindeki atomlar iyonlaştığını söylemiştik. Bu iyonlaşma bir titreşime yol açar ve ortaya çıkan titreşim kristal örgü boyunca yayılır. Aynı ışığı oluşturan fotonlar gibi, dalga ya da parçacık gibi davranan ve bir katının titreşimini tarif eden niceliklere fonon adı verilir.

Oda sıcaklığında, bakır tel ya da normal bir iletkende hızla hareket

eden çok sayıda fonon vardır. İşte, bu tür iletkenlerdeki direncin nedenlerinden birisi, akımın yani elektronların metal boyunca hareket ederken bu fononlarla karşılaşması, yani elektronlarla fononların çarpışması.

Bir süperiletken içerisindeki elektronların davranışysa bundan tümüyle farklı. Kristal örgüdeki kusurlar yine olmakla birlikte, elektronların bu engeller boyunca hareketi oldukça değişik. Elektronlar engel oluşmayan bölgeleri seçiyorlar. Dolayısıyla, herhangi bir engelleme ya da sürtünme olmadığından, hiçbir enerji kaybı olmaksızın elektriği iletebiliyorlar.

Peki, direnci neden olduğu bu enerji kaybı nasıl yok edilir? Aslında fizikçiler, metal bir telin soğutulduğunda ya da sıcaklığı oda sıcaklığının altına düşürüldüğünde, direncinin azaldığını çok eskiden beri biliyorlardı. Çünkü bu sayede örgü titreşimleri azalır ve böylece elektron akışı kolaylaşır. Ancak, mutlak sıfır gibi muazzam soğuk değerlerde metalin direncinin ne kadar azalacağı pek bilinmiyordu. Hatta William Kelvin gibi bazı bilim adamları, bu sıcaklıkta elektronların hareketinin, dolayısıyla akımın tümüyle duracağını düşünüyorlardı. Buna karşın, Onnes'in de içinde bulunduğu bir başka grup, direncin tümüyle azalacağını iddia ediyorlardı.

Direnci azaltmanın bir diğer yöntemi ise metali saflaştırmak. Sıcaklığın mutlak sıfıra (0 K) yaklaşması gibi, me-

## Süperiletkenliğin Kilometretaşları

1823: Klor gazı sıvılaştırıldı (Michael Faraday)  
 1877: Oksijen ve Azot sıvılaştırıldı (Louis Caillietet)  
 1898: Hidrojen 20 K'de sıvılaştırıldı (James Dewar)  
 1908: Helyum sıvılaştırıldı (Kamerlingh Onnes)  
 1911: Süperiletkenliğin keşfi. Onnes, cıvanın 4,2 K'lik kritik sıcaklıkta (T<sub>c</sub>) süperiletken hale geçtiğini buldu.  
 1913: Kamerlingh Onnes, düşük sıcaklıklarda maddenin özellikleri üzerine yaptığı araştırmalar nedeniyle Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.  
 1933: W. Meissner ve R. Ochsenfeld, Meissner etkisini keşfetti. (T<sub>c</sub>=10 K)  
 1941: T<sub>c</sub>=15 K  
 1954: T<sub>c</sub>=17 K  
 1960: T<sub>c</sub>=18 K

1962: Josephson Kavşağı'nın keşfi. Westinghouse araştırmacıları Niobiyum-tritanyum'dan ilk ticari süperiletken kabloyu üretti.  
 1972: J. Bardeen, Cooper ve J. Schrieffer, BCS kuramı nedeniyle Nobel Fizik Ödülü'nü aldılar.  
 1973: T<sub>c</sub>=23 K  
 1986 (Ocak): Alex Müller ve Georg Bednorz, 35 K'de süperiletken hale geçen seramik lantan, baryum, bakır ve oksijen bileşiklerini ürettiler.  
 1986 (Aralık): T<sub>c</sub>= 39 K  
 1987 (Ocak): Houston Üniversitesi ve Alabama Üniversitesi'nden araştırmacılar, Yttriyum ve lantandan yaptıkları seramik malzemenin 92 K'de süperiletken hale geçtiğini buldular. Bu, buluş soğutucu olarak sıvı azot kullanımını olanaklı kıldı.

1987 (Ekim): Müller ve Bednorz, Yüksek sıcaklık süperiletkenliğini keşifleri nedeniyle Nobel Fizik Ödülü'nü aldılar.  
 1988: Arkansas Üniversitesi'nden Allen Herman, 120 K'de süperiletken hale gelen, kalsiyum ve talyum içeren bir seramik üretti. Hemen ardından IBM ve IT&T Bell Laboratuvarları'ndaki araştırmacılar 125 K'lik kritik sıcaklığa sahip seramik malzeme ürettiler.  
 1993: A. Svilling, M. Cantoni, J. D. Gue ve H. R. Ott, 133 K'lik kritik sıcaklığa sahip cıva, baryum ve bakırdan oluşan bir süperiletken malzeme ürettiler.  
 2001: Aoyama Gakuin Üniversitesi'nden Jun Akimitsu ve ekibi yeni kuşak Süperiletken magnezyum Diborür'ü buldular.  
 2007: T<sub>c</sub>= 175 K  
 2008: T<sub>c</sub>= 185 K  
 ... Oda sıcaklığına doğru...

tal de saflaştıkça direncini kaybeder. Dolayısıyla, saf bir metalin 0 K'deki direncinin sıfır olmasını beklemek yanlış olmaz. Ancak, pratikte, mutlak sıfıra yaklaşmak mümkünken, sıfıra ulaşmak neredeyse olanaksız; üstelik elektriksel aygıtları ve telleri bu sıcaklığa kadar soğutmak da pek kolay değil.

Yüzyılın başında mutlak sıcaklığa ulaşmak için girişilen çabaların en başarılı sonucu, 1908 yılında Danimarka'lı fizikçi Kamerlingh Onnes'in helyumu sıvılaştırmasıydı. Onnes, ilk iş olarak da bu sıcaklıkta metallerin elektriksel dirençlerinin ne olacağını gözlemeye girişmişti. Birçok metalle yaptığı deneylerinde, bu metallerin mutlak sıfıra yakın sıcaklıklara soğutulduklarında elektriksel dirençlerinin kararlı bir şekilde azaldığını gördü. Kullandığı metal ne kadar safsa direnci de sıfıra o kadar yakın oluyordu. Cıvanın kolayca saflaştırılabileceğini bilen Onnes, çok saf, ince bir cıva teli üzerinde ölçümler yaptı. Bu kez sonuç ilginçti: 4,2 K'nin hemen üzerindeki bir sıcaklıkta telin direnci birden neredeyse sıfıra (yaklaşık 0,11 ohm) düşüyordu. Aslında, Onnes 10-5 ohmdan daha fazla bir direnç ölçemedi, çünkü bu değer o zamanlar ki aletlerin hassasiyet sınırıydı. Daha sonraları tekniğini geliştirip tekrar yinelediği deneylerinin sonuçlarını 1911'de yayımladığında, cıvanın direncinin süperiletkenliğe geçiş aşamasında 1011'in katlarıyla orantılı olarak azaldığını söylüyordu. Yani cıva 4,15 K'nin altındaki sıcaklıklarda süperiletken hale geçiyordu. Aynı deney, kalayın direncinin de 3,72 K'de sıfıra düşüğünü gösterdi. Bazı malzemeler, belli sıcaklık değerlerini altında açıkça başka bir duruma geçiyorlardı. Onnes bu yeni keşfettiği duruma süperiletkenlik adını vermişti.

Böylece, cıva ve benzeri bazı metallerin dirençlerinin, "kritik sıcaklık"

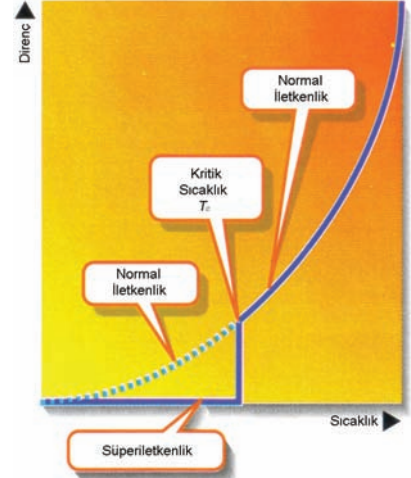


Kamerlingh Onnes

( $T_c$ ) adı verilen belirli bir sıcaklıkta sıfıra düştüğü anlaşıldı. Bunun anlamı şu; eğer süperiletken bir tel ilmekten bir akım geçirirseniz bu akım sonsuza dek akar. Onnes, böyle bir ilmeğin ürettiği manyetik alanı gözlemek için, ilmeğe bir pusula yaklaştırdı ve pusulanın iğnesinin 24 saatten fazla sapmış olarak kaldığını gözledi.

Bugün artık, çoğu metalin süperiletken hale getirilebildiğini biliyoruz. İçlerinde niobyum-kalay ve niobyum alüminyum gibi alaşımların da bulunduğu en iyi süperiletkenlerin kritik sıcaklıkları en yüksek 20 K kadar.

1913 yılında Onnes'e Nobel fizik ödülünü getiren, malzemelerin bu ilginç davranışlarını keşfi bilim adamlarını hemen harekete geçirdi. Her yeni bilimsel keşifte olduğu gibi, süperiletkenliğin de kuramsal bir çerçeveye oturtulması gerekiyordu. Aslında mutlak sıfıra yakın sıcaklıklardaki malzemelerin davranışlarına ilişkin kuram geliştirme çabaları biraz daha eskiye dayanıyor. Bu konuyla ilgili ilk kuram James Dewar'ınki. Dewar, sıcaklığın mutlak sıfıra yaklaştığı durumlarda iletkenliğin de sıfıra yaklaşacağını söylüyordu. Ancak Dewar'a göre sıfır direnç mümkün değildi. Çünkü mutlak sıfıra ne kadar yaklaşırsa yaklaşılsın, asla ulaşamayacağını düşünüyordu. Bir başka kuramın yaratıcısı Kelvin'e göre de, sıcaklık azaldıkça direnç artmalıydı. Kelvin'e göre, malzeme soğudukça elektronlar duracak ve hareket edemeyecek, böylece de akım iletimi mümkün olmayacaktı. 1900 yılına gelindiğindeyse Paul Drude ve Hendrik Lorentz, sıcaklık ve direnç ilişkisine bir başka kuram önerdiler. Kurama göre, direncin iki temel kaynağı vardı; birisi sıcaklık diğeri de kristal yapıdaki kusurlar. Sıcaklık ne kadar yükselse kristaldeki atomlar o kadar çok titreşecek ve elektronların hareketi engellenerek daha fazla direnç oluşacaktı. Drude ve Lorentz, direncin azalmasının nedenini sıcaklığın çok soğuk olduğu değerlere bağlıyorlardı. Sıcaklık azaldığında, sıcaklığın ve benzer şekilde kristaldeki kusurların neden olduğu direnç de azalacaktı. Bu sıcaklık-direnç üzerine sürdürülen tartışmalar, Onnes'in keşfiyle son buldu. Artık süperiletkenliğin kaynağı anlaşılmıştı ve bu da güçlü bir kurama gereksinim duyuyordu.



İletim kablolarının sıcaklığı düşürüldükçe, dirençleri de kritik sıcaklığa yaklaşıncaya kadar kararlı bir şekilde azalır, kritik sıcaklıktaysa, direnç aniden sıfıra düşer. Her metal için kritik sıcaklık değeri farklıdır.

Fizikçiler, Onnes'in keşfini ilk başlarda açıklamakta epey zorlandılar. Hatta Einstein bile bu yeni gelişmeye yetişmeye çalıştı ama başarısız oldu. Süperiletkenliği açıklayan başarılı bir kuramın gelmesi için neredeyse 40 yıl geçmesi gerekti.

## Çekici Elektronlar

Süperiletkenliğe ilişkin güçlü ve geçerli bir kuram geliştirme çabaları sürerken, 1933 yılında Walter Meissner ve R. Ochensfeld, süperiletkenlerin ilginç manyetik özelliklerinin olduklarını keşfettiler. Süperiletkenler, manyetik alanın içlerinden geçmesine izin vermiyor, manyetik alanı dışlıyorlardı. Bu da süperiletken içerisinde bir akıma, bu akım da dış manyetik alanı engleyecek bir manyetik alana neden oluyordu. Meissner etkisi olarak adlandırılan bu ilginç olgu hâlâ süperiletkenlerin ilginç birer özelliği olarak kullanılıyor.

Süperiletkenliğin başarılı bir kuramının geliştirilmesindeki en önemli adım, keşfinden yarım yüzyıl sonra, 1956'da Amerikalı fizikçi Leon Cooper'dan geldi. Bildiğimiz Coulomb yasası gereği, elektronlar sahip oldukları eksi elektrik yükleri nedeniyle, birbirlerini iterler. Ancak Cooper, elektron çiftlerinin Coulomb itmesinden daha güçlü bir kuvvet yardımıyla birbirlerini çekebileceği bir mekanizmadan söz ediyordu. Elektronların birbirlerini çekmesi fikri ilk bakışta çok ilginç görü-

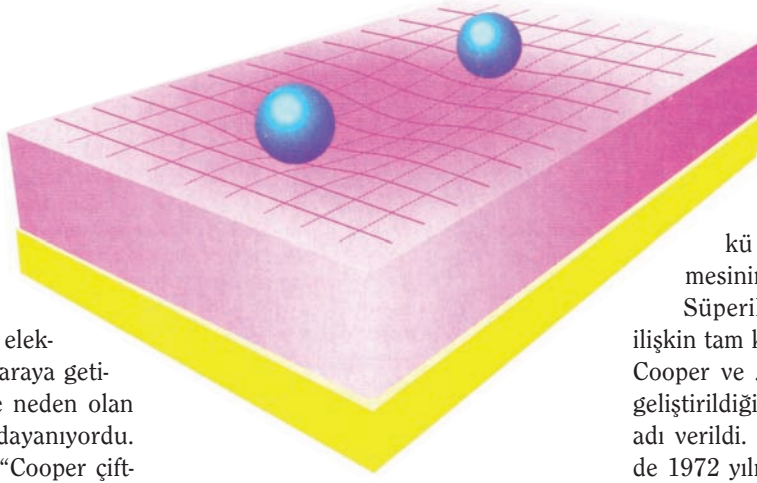
nüyordu. Bunun nasıl olduğu sorusunun yanı sıra kristal örgüdeki iyonlarla elektronlar arasındaki etkileşimde gizliydi.

Cooper'ın düşüncesi, elektronları çiftler halinde biraraya getirip, örgü içindeki dirence neden olan engelleri geçemelerine dayanıyordu. Bu elektron çiftlerine de "Cooper çiftleri" adı veriliyordu. Cooper ve arkadaşlarına göre, elektriksel yükleri nedeniyle birbirlerini iten elektronlar, süperiletken içerisinde büyük bir çekim hissetmeliydiler. Bu gizemli çekiciliğin sırrı da fononlarda gizliydi.

Kurama göre, eksi yüklü bir elektron örgü içerisinde ilerlerken, artı yüklü iyonları kendine doğru saptırır. Örgüde oluşan bu hareketlilik de bir fonon yayımına neden olacak, bu da elektronun etrafında bir artı yük katmanı oluşturacaktır. İyonları saptıran elektron örgüyü terketmeden, yani örgü eski haline geri dönmeyen, ikinci bir elektron daha gönderilirse, normalde birbirlerini itmeleri gereken elektronlar birleşecekler ve uyumlu bir çift oluşturacaklardır.

Bunu görmek için, ağır iki topu bir yatak boyunca yuvarlamayı düşünmek en iyi yol. Bir top, yatağın yaylarını bastırır. İkinci top ilkinin baskısı yok olmadan önce yuvarlanırsa ilki tarafından oluşturulan çukur yere doğru sapar. Diğer bir deyişle, iki top arasında bir çekim kuvveti varmış gibi görünür.

Çok benzer bir örnek de, elektronu otoyolda hızla giden bir araç gibi düşünmek. Otomobil, hızlandıkça, önündeki havayı yarak geçecektir. Bu sırada otomobilin arka tarafında bir boşluk oluşacak, bu boşluk da hızla havayla dolacaktır. Arkadan başka bir otomobil gelirse bu boşluğa dolan ha-



"Yatak etkisi". İki ağır top yatak boyunca yuvarlanır. bir top, yatağın yaylarını bastırır; ikinci top ilkinin ilki tarafından oluşturulan çukur yere doğru "çekilir". Benzer şekilde, iki elektron da kristal örgünün yapısı sayesinde birbirlerini çekiyormuş gibi görünebilir. Buna, metallerde süperiletkenlikten sorumlu olan "Cooper çiftleri" adı verilir.

va tarafından çekilecektir. Dolayısıyla arkadaki araç öndeki tarafından çeliyormuş gibi görünecektir. Benzer biçimde elektron da, malzeme içindeki kristal örgüden geçerken bir pozitif iyon tabakası oluşturur. Bu saptırılmış iyonlar normal durumlarına geri dönerlerken, o sırada oradan geçen ikinci elektronla bu artı yüklü iyonlar arasında bir çekim yaratır; aynı öndeki arabanın arkadaki aracı çekmesinde olduğu gibi.

Süperiletken içerisindeki elektronlar, arka arakaya dizilmiş, hızla hareket eden araçlar gibidir. Öndeki araçların arkalarında oluşturdukları boşluklar araçları birbirlerine bağlanmışçasına kilittir. Bu sırada yola dik ani bir sert rüzgâr bu bağı kırabilir. Buna benzer bir olay, ısıl olarak uyarılmış fononların elektron çiftlerini kırmasıyla olur.

BCS kuramı, elektronların kristal örgüyle etkileşerek birbirlerini çekebileceklerini başarılı bir biçimde açıklayan en önemli kuram. Bunun nedeni, tabii ki, elektronların aynı elektrik yüküne sahip olmaları.

Cooper çifti oluşturma, örgü titreşimleriyle bağlantılı olarak, elektronlar ve fononlar arasındaki etkileşim nedeniyle meydana gelir. Süperiletken durumda, örgü boyunca bir elektronun geçmesiyle oluşan hareketlilik bir fonon üretimiyle sonuçlanır. Bu fonon, ilk elektronla bir Cooper çifti oluşturma için ikinci bir elektronla etkileşir. Fononların örgüde çok uzaklara gitmesini önlemek için de iki elektronun birbirlerine çok yakın olmaları gerek-

mez. Pratikte bu uzaklık birkaç yüz atom boyu mertebesindedir. Çünkü bu uzaklıkta Coulomb etkisinin etkisi yeterince zayıftır.

Süperiletkenlikte bu sonuçlara ilişkin tam kuram John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer tarafından geliştirildiği için, kurama BCS kuramı adı verildi. BCS kuramı bu fizikçilere de 1972 yılı Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı. Kurama göre, bir süperiletkendeki süperakımlar milyonlarca Cooper çifti tarafından taşınıyor. Bu bir tür eşli dansa benziyor. Her çift birbirinin yanbaşımda olmak zorunda değil, ancak diğer çiftler aralarından geçerken birbirleriyle uyumlu hareket etmelidirler.

Eğer bir Cooper çifti bir fononla çarpışır, süperiletken özellik de kaybolabilir, ancak bunu için fononun enerjisinin elektronların karşılıklı etkileşimlerini aşabilecek derecede yeterli enerjiye sahip olması gerekir. Mutlak sıcaklığın yakınlarında, Cooper çiftlerini kırmaya yetecek enerjiye sahip fonon bulunmaz. Ancak sıcaklık kritik sıcaklığa doğru yükseldikçe, fononların kristal örgü içindeki titreşimleri artar. Kritik sıcaklığa ulaşıldığında da Cooper çiftleri kırılır ve malzeme süperiletken özelliğini kaybeder.

## Yüksek Sıcaklık

Süperiletken malzemelerin yeni bir sınıfı 1980'lerin ortalarında ortaya çıktı. Bunlar klasik süperiletkenler gibi, metaller ve alaşımları değil, oksitler ve seramik malzemelerdi. En önemlisi de, bu malzemelerin süperiletken hale gelmeleri için çok soğutmak gerekmiyordu. İsviçre'deki IBM laboratuvarlarından Georg Bednorz ve Alex Müller, alışılmadık elektriksel ve manyetik özelliklere sahip seramik oksitlerle çalışarak 30 K'e kadar yüksek kritik sıcaklığa sahip süperiletkenler elde ettiler. Bednorz ve Müller yüzlerce oksit bileşiği denemişler; lantan, baryum, baki ve oksijen içeren seramiklerle çalışmaları sırasında 35 K'lik bir kritik sıcaklık değerine ulaşmışlardı. O zamana kadar süperiletkenlik için ulaşılan en yüksek sıcaklık 12 K idi. Bunun ardından, daha yüksek sıcaklıkta süperiletken hale geçen malzeme bulma çabaları 1987 yılının şubatında 90 K'lik



BCS Kuramının yaratıcıları: John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer

## Sıcaklık Ölçümleri

Sıradan bir laboratuvar termometresiyle -10 ya da +150 °C lik sıcaklıklar kolayca ölçülebilir. Sıvı azotun sıcaklığını bu termometreyle ölçmek çok zordur. Böyle sıcaklıkları ölçmekte THERMOCOUPLE termometreler kullanılır. Thermocouple, iki farklı metal arasında bir elektriksel kavşak kurularak oluşturulur. Bu kavşak, farklı sıcaklıklarda küçük bir gerilim üretir. Gerilimi, bilinen sıcaklıklara ayarlayarak hassas termometreler yapılır.

Çok düşük sıcaklıkları Celcius (°C) ya da Fahrenheit (°F) ölçekleriyle ölçmek oldukça zahmetlidir. Bu tür muazzam soğuk değerleri ölçmekte Kelvin (K) ölçegi kullanılır. Bu ölçekte, 0 K'de, diğer bir deyişle mutlak sıfırda, bulunan malzemenin ısı enerjisi sıfırdır. Bu ölçek kullanarak, örneğin sıvı azotun sı-

cağını ölçerseniz 77 K bulursunuz. Bu da bir ölçek için mantıklı bir değerdir.

Bilimsel araştırmaların çoğunda sıcaklık ölçegi olarak Kelvin kullanılır, çünkü bu ölçek, bir maddedeki kinetik enerjiyle orantılıdır.

Bu ölçeklerin birbirleri arasındaki formüller şöyle:

$$\text{Fahrenheit} = [(5/9) \times \text{Celcius}] + 32$$

$$\text{Celcius} = 5/9 \times (\text{Fahrenheit} - 32)$$

$$\text{Kelvin} = \text{Celcius} + 273$$

Değişik Sıcaklık Ölçekleriyle Bazı Önemli Sıcaklıklar:

	Fahrenheit (°F)	Celcius (°C)	Kelvin (K)
Mutlak Sıfır	-460	-273	0
Sıvı Helyum	-452,1	-268,8	4,2
Sıvı Azot	-321	-196	77
Su (Donmuş)	32	0	273
Su (Kaynayan)	212	100	373
Vücut Sıcaklığı	98,6	37	310
Oda Sıcaklığı	68	20	293

kritik sıcaklıkta süperiletken hale gelen seramik malzemenin bulunmasıyla sonuçlandı. Bunu da 100 K'nin üzerinde kritik sıcaklığa sahip benzer malzemelerin bulunması izledi. Bu malzemeler, görece yüksek sıcaklıklarda süperiletken hale geçtiklerinden bu olguya "yüksek sıcaklık süperiletkenliği" adı verildi. Bu keşfin diğer bir önemli yanı da, soğutucu malzeme olarak sıvı helyum yerine sıvı azotun kullanılabilmesini olanaklı hale getirmesiydi. 1988'de bizmutun 110 K'de, talyumunsa 125 K'de süperiletken hale geçtiği bulundu. 1993 yılında da cıva metali bir bileşiğin 133 K'de süperiletkenliğe geçtiği bulundu.

2007 yılı sonunda en yüksek sıcaklık süperiletkeni talyum, cıva, bakır, kalsiyum ve oksijen içeren bir seramik malzemeydi. Bu malzeme de 138 K'de süperiletken hale geçiyor.

Bu yüksek sıcaklık süperiletkenleri, 77 K'de kaynama noktası olan sıvı azot yerine kullanılabilen uygulamaların kapılarını açtı. Bednorz ve Müller de, yüksek sıcaklık süperiletkenliğini keşiflerinden kısa süre sonra Nobel Fizik Ödülü'nü aldılar. Bu süperiletkenliğe verilen üçüncü Nobel ödülüydü.

Bilinen çoğu yüksek sıcaklık süperiletkenleri bakır içerir. Bunların kristal yapıları karmaşıktır. Bu tür kristallerin tipik özelliği, elektronların akabileceği atom düzlemlerinin olması. Böylece, kristal içinde farklı doğrultularda ölçüldüğünde elektriksel iletkenlikleri farklı oluyor. Bunların iletkenlikleri ise hangi maddeye sahip olduklarına bağlı.

Ancak, bu malzemelerin sert ve kırılğan olmaları kullanımlarında hâlâ büyük sorunlar olduğunu ortaya çıkarıyor. Fakat, bir gümüş alaşımıyla kaplanmış ince süperiletken seramiklerden oluşan süperiletken teller üretmek mümkün. Üstelik bu teller, aynı kalınlıktaki bakır bir telden 100 kez daha fazla akım iletebiliyor.

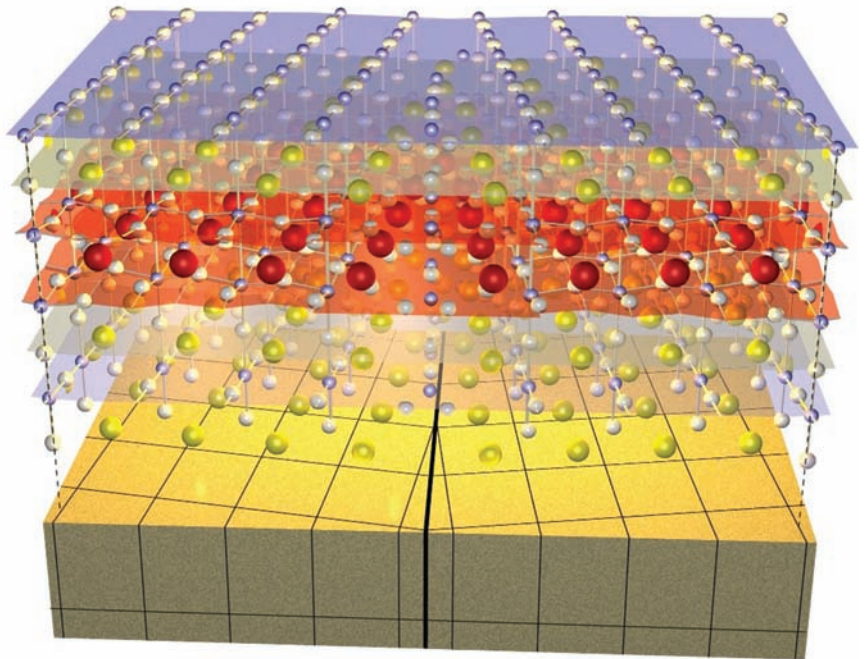
Elektrik üretimi endüstrisi, birgün bu yeni süperiletkenleri kullanabileceklerini umuyorlar. Eğer pompaları ve vantilatörleri çalıştırmakta süperiletken motorlar kullanılırsa, üretilen gücün %5'i kurtarılabilir. Süperiletken trafolarla da bir %1 daha tasarruf edilebilecek. Araştırmalara göre, önü-

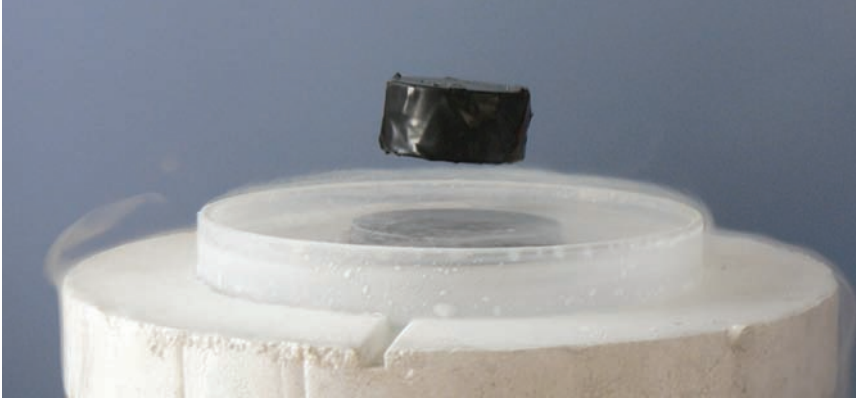
müzdeki 10 yıl içerisinde, süperiletkenlerin 60 ile 90 milyar dolar arasında bir pazar payına sahip olacağını öngörüyor.

Teknik sorunlar olmakla birlikte, yüksek sıcaklık süperiletkenliği kavramı kuramsal olarak bir devrimi temsil ediyor. Peki bu malzemelerdeki süperiletkenlik mekanizması nedir? BCS kuramını bunu açıklamak amacıyla kullanılabilir mi yoksa yeni bir mekanizma mı keşfedilmek zorunda?

İşte bu soruların asıl yanıtı, yeni keşfedilecek süperiletkenlerde saklı gibi görünüyor. Bu yılın şubat ayında başka bir yüksek sıcaklık süperiletkenleri ailesi keşfedildi. Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nden bir grup araştırmacı, bir demir ve arsenik bileşiği karışımı olan katmanlı bir malzemenin 26 K'de süperiletken hale geldiğini gözlemlediler. Aslında bu buluşun en önemli özelliği, bu zamana kadar tüm yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin hep bakır-oksijen bileşiklerinden olmasıydı. Hemen ardından kolları sıvayan diğer araştırmacılar aynı malzemelerin 55 K'de süperiletken hale geldiklerini gösterdiler. Bu da aslında bir süredir devrime hazırlanan süperiletkenler için yeni bir umut ışığı anlamına geliyor. Tabii en önemlisi, araştırmacılar, bu yeni malzemeler sayesinde süperiletkenlik olgusunu daha net anlayabileceklerini düşünüyorlar.

Şu ana değin en yüksek sıcaklık 138 K, yani -135 °C olunca, araştırma-





Meissner Etkisiyle havalanmış bir süperiletken

cılar biraz umutsuzluğa kapılmışlardı doğrusu. Şimdi Yüksek sıcaklık süperiletkenleri yapılacak işler listesinin başına geçmiş durumda.

Başarılı bir kuram, daha yüksek sıcaklıkta süperiletken hale gelen malzemelere işaret edebilir. Hatta oda sıcaklığında süperiletken hale gelen malzemelere.

2001 yılında, Aoyama Gakuin Üniversitesi'nden Japon bilim adamı Jun Akimitsu önderliğindeki bir grup, titanyum, magnezyum ve bor karışımı ile oynarlarken, bu karışımdan elde ettikleri bir süperiletkeni keşfettiler, sı-

caklık 40 K idi. Aslında diğer yüksek sıcaklık süperiletkenleriyle karşılaştırıldığında hiç de etkileyici sayılmaz, ancak herhangi bir metal süperiletkenin kritik sıcaklığından iki kat daha fazla olması, bu malzemenin önemini ortaya koyuyor. Daha da önemlisi çok daha yüksek sıcaklıklara, hatta oda sıcaklığına çıkabilmenin ilk sinyallerini veriyor, ki süperiletkenlerle çalışan araştırmacıların tam da aradıkları şey. Akimitsu'nun karışımı aslında magnezyum diborür adı verilen bir malzeme. Bilim dünyasına bomba gibi düşen bu haberin peşinden ümitsiz katihal fizik-

çilerinin de yüzü güldü ve peşi sıra makaleler yayınlanmaya başlandı; her biri bu malzemenin yepyeni özelliklerini içeren ve daha yüksek sıcaklıklara çıkabilecek süperiletkenlere atıfta bulunan makalelerdi bunlar. Hatta kimi hesaplamalar 400 K'lere kadar çıkılabileceğini öngörüyor, ki bu gerçek anlamda "yüksek sıcaklık" demekti. Oysa bu keşfe kadar kimse yaz sıcaklığında süperiletken hale gelen malzemeleri beklemiyordu, ama oda sıcaklığı bir hayal gibi duruyordu.

Bu tür malzemeler yardımıyla da, yüksek verimli elektrikli otomobiller, trenler, daha güçlü elektrik santralleri ve dağıtım şebekeleri ve hatta her doktorun ameliyatında kullanılabileceği beyin ve vücut tarayıcıları olabilir.

Süperiletkenlerin yeni uygulamaları kritik sıcaklığın artırılmasıyla daha da artacak. Örneğin, sıvı azot temelli süperiletkenler endüstride, sıvı helyumla soğutulmuş süperiletkenlere oranla çok daha esnek kullanım alanları sağlıyor. Eğer oda sıcaklığında süperiletken hale gelen malzemeler bulunursa, bunlar da, hiç kuşku yok ki, gündelik yaşamımızın en önemli parçaları haline gelecek.

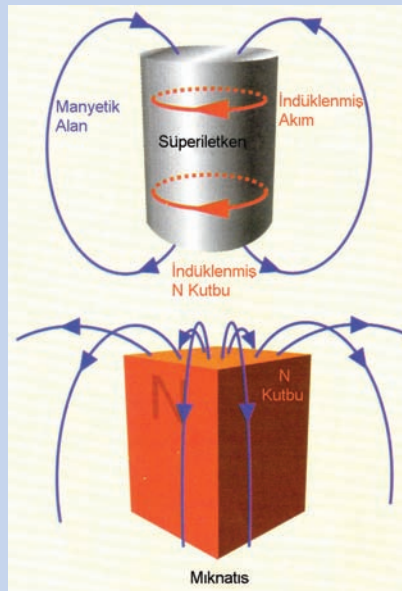
## Meissner Etkisi

Süperiletkenlerin hiçbir enerji kaybına uğramadan elektriği iletmeleri oldukça etkileyici, ancak her güzel şeyin olduğu gibi bunun da bazı koşulları var. İlk olarak, kritik akım yoğunluğu; akım bu sınırı aşarsa, malzeme süperiletkenliğini kaybederek normal bir dirençli malzemeye dönüşüyor ve akımın geçmesi güçleşiyor.

İkincisi, bir malzemenin süperiletkenliği dış bir manyetik alandan etkileniyor ve tümüyle yokolabiliyor. Bunun için gerekli manyetik alansa sıcaklığa bağlı. Sıcaklık kritik sıcaklığa yaklaştığında, malzemenin dirençli hâle geçmesi için zayıf bir manyetik alan bile yeterli oluyor.

Bu iki etki de birbirleriyle bağlantılı. Çünkü yüksek akım şiddetli manyetik alan üretiyor. Akım yoğunluğu kritik değeri aştığında, ortaya çıkan manyetik alanın ürettiği akı yoğunluğu da kritik değeri aşıyor.

1933 yılında, iki Alman fizikçi, Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld, süperiletkenlerin manyetik özelliklerine ilişkin çarpıcı bir şey gözlediler. Kullandıkları deney setiyle, süperiletkenlerin, özellikle normal halden süperiletkenliğe geçişleri sırasında, manyetik özelliklerini incelediler. Amaçlarıysa, süperiletkenliğin altında yatan olgu hakkında daha geniş bir fik-



Meissner etkisinde, bir parça süperiletken malzeme bir mıknatısın üzerinde durur, yani havada süzülür. Mıknatısın indüklediği süperakımlar, süperiletken boyunca akarken manyetik alan üretir, bu da mıknatısın manyetik alanıyla aynı şiddettedir. Böylece mıknatısın ürettiği manyetik alan süperiletkenininkiyle yok edilir.

re sahip olabilmektir. Ancak, bir manyetik alan içerisine süperiletken bir malzemeden yapılmış

bir silindir yerleştirdiklerinde, manyetik alanın süperiletkenden geçmediğini gördüler: Silindir manyetik alanı dışlıyordu.

Bir manyetik alana karşıt bir manyetik alanla karşılık veren malzemeler diamagnetik olarak tanımlanır. Çoğu malzeme, çok az da olsa diamagnetik özellik gösterir. Ancak süperiletkenlerde bu özellik en şiddetli biçimde gözlenir. Çünkü süperiletkenler, dış manyetik alanı yok edecek kadar şiddetli manyetik alan üretirler. Bu özelliğe de mükemmel diamagnetizma adı verilir.

Peki bu etki nereden geliyor? Bir mıknatısın üzerine bir süperiletken malzeme yerleştirilmezseniz süperiletken havalanır. Manyetik alan süperiletkende bir akım indükler ve akan bu akımın yarattığı manyetik alan dış manyetik alanı yokeder. Aynı şekilde, bir süperiletken üzerine bir mıknatıs yerleştirilirse, indüklenmiş akım nedeniyle itilecektir. Süperiletken, aynı bir manyetik ayna gibi davranır ve mıknatıs kendi ürettiği manyetik görüntüsü nedeniyle itilir.

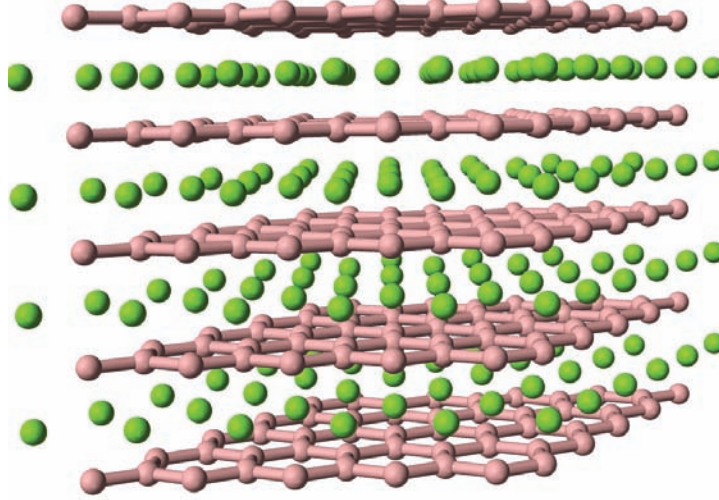
Meissner etkisi olarak adlandırılan bu olgu da aslında Onnes'in keşfi kadar ilgi çekici olmasına karşın hiçbir zaman aynı derecede ilgi görmedi. Bu olguya ilişkin kuramsal açıklamaya yardımcı olacak deneysel ölçümler için de 1950'lere kadar beklemek zorunda kalındı; yani, Meissner ve Ochsenfeld'in deneylerinde 20 hatta daha fazla yıl geçtikten sonra.

Örneğin Amerikan donanmasındaki mühendisler, gemileri için süperiletken motorlar tasarlamaya başladılar bile. Süperiletken kablolardan oluşan bobinler devasa akımları hiç ısınmaksızın taşıyabiliyorlar, böylelikle yaratılan güçlü manyetik alanların yardımıyla kompakt ve güçlü motorlar yapılabiliyor. Süperhızlı bilgisayarlar da kapıda. Süperiletken kablolar yardımıyla, bilgisayar yogalarını daha da küçültmek ve aşırı ısınma korkusu olmadan birbirlerine yakın halde biraraya getirmek mümkün.

## Süperteknolojiler

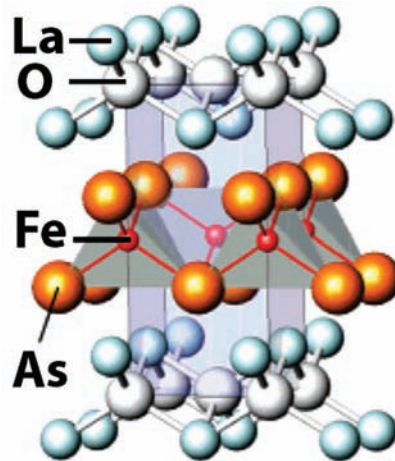
Süperiletkenliğin keşfi aslında çok sayıda kullanım alanının da işaretiydi. Kamerlingh Onnes'in süperiletkenliği keşfinin hemen ardından, bilim adamları, bu yeni ve ilginç olgunun pratik uygulama alanlarını tasarlamaya giriştiler. Güçlü, yeni süperiletken mıknatıslar normal dirençli mıknatıslardan çok daha küçük olabilirlerdi. Süperiletkenlerle donatılmış üreteçler, daha küçük ekipman ve daha az enerjiyle aynı miktarda elektrik enerjisi üretebilirlerdi. Üretilen elektrik de süperiletken kablolarla dağıtılabildi ve en önemlisi, elektrik, uzun zaman periyotlarında, herhangi bir kayba uğramaksızın süperiletken sarımlarda depolanabilirdi.

Bilim adamlarının bu düşlerine yaklaşmalarındaki en büyük adım, daha yakınlarda keşfedilen yüksek sıcaklık süperiletkenliği oldu. Akım teknolojisinde düşük sıcaklık süperiletkenliğinin kullanımına ilişkin araştırmalar hâlâ sürdürülüyor. Yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin kullanıldığı akım teknolojisinde epey ilerleme kaydedildi; manyetik kalkanlı aygıtlar, tıbbi görüntüleme sistemleri, SQUID'ler, kızılötesi algılayıcılar ve mikrodalga aygıtları bunlardan bazıları. Süperiletkenlerin özellikleri hakkındaki bilgi arttıkça, güç iletimi, üreteçlerde kullanılacak süperiletken mıknatıslar, enerji depolama aygıtları, parçacık hızlandırıcıları gibi uygulamalar çok daha kolaylaşacak.



Bunlar arasında hiç kuşkusuz en önemli olanı elektriğin bir yerden diğerine taşınması. Elektrik, büyük santrallarda üretilip yüzlerce kilometre uzaklıktaki tüketicilere iletiliyor. Bu iletim sırasında, iletim hatlarındaki direnç nedeniyle oluşan atık ısıyla %8 kayba uğruyor. Bu kaybı giderecek herhangi bir yeni teknoloji kuşkusuz büyük bir yatırım olurdu. Süperiletkenler elektrik iletirlerken hiçbir enerji kaybı olmayacağından, süperiletken malzemelerden yapılmış tellerle büyük akımlar iletilebileceği düşünülebilir. Ancak, ne yazık ki, süperiletken teller bu amaç için pek uygun değil. Süperiletken bir tel kesitinde her an oluşabilecek olan bir sorun nedeniyle tel süperiletkenliğini kaybedebilir. Bu da telin direncini normal bir bakır telinkinden çok daha fazla olmasına neden olur ve böylece iletim sistemi çökebilir.

Bir süperiletkenden çok fazla miktarda akım geçirirseniz, kritik sıcaklığın altında bile olsa, süperiletkenliğini kaybedip normal iletken hâle geçecektir.



Yani, akım için de belli bir kritik değer var. "Kritik akım yoğunluğu" adı verilen bu değer de sıcaklıkla orantılı. Yani süperiletkeni ne kadar soğutursanız o kadar çok akım geçmesini sağlarsınız. Pratik uygulamalarda kullanılan değer, milimetrekare başına 1000 Amper'lik akım. Kritik akım yoğunluğunun yanı sıra bir diğer sorun daha var; bu da akım taşıyan telin etrafında bir manyetik alan yaratması. Akım ne

kadar fazlaysa, oluşturduğu manyetik alan şiddeti de o kadar azla olacaktır.

Kısacası, süperiletkenleri büyük iletim hatlarında kullanmak şimdilik pek pratik görünmüyor. Üstelik bu telleri kritik sıcaklığın altına soğutmak için çok pahalı bir teknoloji ve epey karmaşık bir süreç gerektiriyor. Bunun için normalde, 4,2 K'lık sıvı helyumu etrafı 7,7 K de tutulan sıvı azotla çevrili vakumlu bir şişede depolamak gerekiyor. Ancak sıvı azotun da başka bir vakumlu şişede durması gerekiyor ki bu hem oldukça zor hem de çok pahalı bir iş.

Tüm bu sorunlara karşın, süperiletkenlerin yeterince pratik kullanım alanı var. Üstelik bazı uygulama alanlarındaki düşük maliyeti de cabası. Bunlar arasında en bilineni süperiletken mıknatıslar.

Süperiletkenler, hiçbir enerji kaybı olmaksızın, büyük miktarlarda akım taşıyabildiklerinden, elektromıknatıs olarak kullanmak için çok uygun malzemelerdir. Akım gibi, manyetik alanın da belli bir kritik değeri var ve bu değer aşıldığında süperiletken özellik yine kayboluyor. Bu kritik değer de "kritik manyetik alan" olarak adlandırılıyor. Süperiletken mıknatıslarada, bir süperiletken tel yardımıyla oluşturulmuş bir sarım vardır. Yüksek akımlarda bu sarımın etrafında 20 Tesla'ya kadar akı yoğunluğuna ulaşabilen manyetik alan oluşturulabiliyor. Bu da yaklaşık olarak Dünya'nın manyetik alanının 500.000 katına karşılık geliyor. Bu kadar büyük bir manyetik alan yaratmayı normal iletkenlerde denemeye kalksanız elektromıknatısın direncinden dolayı aşırı derecede ısınır.



Süperiletken mıknatıslar, herhangi bir cerrahi müdahale, ya da x-ışınları, gama-ışınları gibi zararlı ışınlarla gerek duymadan, insan vücudunu ayrıntılı bir şekilde görüntülemeye yarayan Manyetik Rezonans görüntüleme (MRI) aygıtlarında kullanılıyor. MRI'da bir yatağa yatan hastanın vücut ve dokularının ayrıntılı haritası çıkarılır. Süperiletken mıknatıs bu aygıtın en önemli parçası. Bu mıknatıslar, çok kararlı ve yüksek manyetik alan şiddetleri üretebildiklerinden, yüksek çözünürlüklü ve kaliteli görüntüler elde edilebiliyor.

Süperiletken mıknatısların diğer önemli bir uygulama alanı da Dünya'nın en hızlı trenlerinde, termin havaya yükseltilmesinde kullanılıyor. Örneğin "Maglev" (Manyetik Levitasyon) trenleri, raylara yerleştirilmiş süperiletken sarımlar ve süperiletken olmayan sarımların karşıt kutupları arasında oluşan bir itmeyi kullanarak havalanıyorlar. Tren havaya kalktığı anda raylarla olan sürtünmesi de yok oluyor ve böylece daha hızlı hareket ediyor. Karmaşık bir elektronik devre sistemiyle akımın düzenli bir şekilde akması ve trenin havadaki yüksekliğinin sabit kalması sağlanıyor. Böyle bir trenin hızı da saate 500 km'ye ulaşabiliyor.

Süperiletken mıknatıslar ayrıca, Dünyanın en büyük parçacık hızlandırıcılarında kullanılıyorlar. Örneğin, Chicago yakınlarında bulunan Fermilab'daki süperiletken mıknatıslar yardımıyla protonların 2 km'den daha



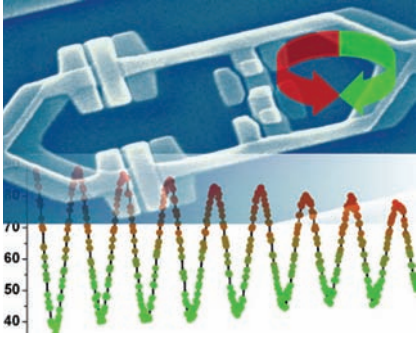
büyük çaplı bir yörüngede dolanması sağlanıyor. Ne kadar fazla enerjili parçacıkla çalışılırsa parçacıklar da o denli hızlı hareket edecek bu da o parçacıkları yörünge üzerinde hareket ettirmek için o kadar şiddetli manyetik alana gereksinim duyacak. Böyle bir manyetik alan yalnızca süperiletken mıknatıslar yardımıyla elde edilebiliyor. CERN'in meşhur LHC'sinde de (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı - Large Hadron Collider) yine süperiletken mıknatıslar en önemli rolü oynuyor. Bilim adamları gelecekte, süperiletken mıknatısların nükleer füzyona yol açabilecek manyetik alan üretme kapasitelerine ulaşabileceklerini düşünüyorlar.

Süperiletkenlerin daha küçük öl-

çekte kullanım alanları da var. Bunlara en ilginç örnek, 1962 yılında henüz yüksek lisans öğrencisi iken iki süperiletken teli ince bir yalıtım malzemesiyle birbirine bağlamayı başaran Brian Josephson'un keşfi.

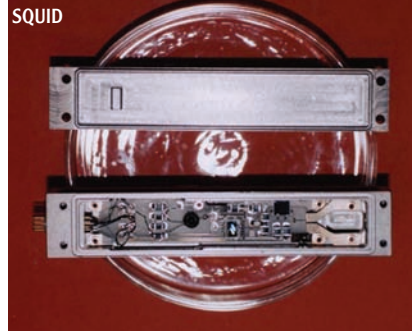
Bu olgu aslında süperiletkenlerin makroskopik özelliklerinden değil, mikroskopik ya da kuantum mekaniksel özelliklerine dayanıyor. Temelinde de, süperiletkelerdeki elektron tünelleme olgusu yatıyor. Tünelleme asıl olarak elektronların dalga özelliklerinden kaynaklanır ve elektronların önlerine çıkan potansiyel engellerinden geçebilmelerine dayanır. Makroskopik ölçekte, herhangi bir parçacık bir engelle karşılaştığında çarparak geri yansır. Oysa, kuantum mekaniğinde, bir parçacık örneğin bir potansiyel engeliyle karşılaşırsa, bir kısmı yansır bir kısmı da yansımadan engeli geçer. Buna da tünelleme adı verilir. Bir yalıtıcı engel tarafından birbirinden ayrılmış süperiletkenler arasındaki bir çift elektronun tünellemeyi ilk başaran Brian Josephson'du. Josephson, ince bir yalıtıcı engelle birbirinden ayrılmış iki süperiletken metalde, elektron çiftlerinin herhangi bir dirençle karşılaşmaksızın bu engeli geçebileceklerini gösterdi. Josephson etkisi olarak bilinen bu olgu normal malzemelerde görünmez. Bu düzeneğe de Josephson kavşağı deniyor. Kavşağın malzemesine ve geometrisine göre, Josephson kavşağından geçen akımın bir kritik akım yoğunluğu bulunur. Josephson kavşağı birbirle-





rinden ince bir yalıtıcı engelle ayrılmış iki süperiletkenden oluşur. Süperiletkendeki elektron çiftleri engeli tünelleme yoluyla geçerler. Eğer kavşaktan geçen akım, kritik akımın altındaysa hiçbir direnç olmayacaktır. Eğer içinden akım geçen bir tel bu kavşağa yaklaştırılırsa, telin ürettiği manyetik alan kavşağın kritik akımını düşürecektir. Kavşaktan geçen asıl akım miktarı değişmeyecek, ancak manyetik alanla düşürülmüş kritik akımdan daha fazla olacaktır.

Josephson'un kullandığı yalıtım malzemesi yalnızca bir kaç atom kalınlığındaydı, dolayısıyla küçük miktardaki akımların geçişine izin veriyordu. Ancak, akım kritik değeri aşarsa Josephson kavşağı adını verdiği bağlantı yüksek dirençli duruma geçiyor ve hiçbir akımın geçmesine izin vermiyordu. Bu da Josephson kavşağının çok hızlı işleyen (10-12sn) bir elektronik anahtarlama sistemi gibi çalışmasını sağlıyordu. Bu tür anahtarlar, bugünün en hızlı bilgisayarlardan çok daha hızlı çalışabilen süperbilgisayarların yapımında transistörlerin yerini almayı bekliyor.



Süperiletkenler, elektronik alanında da büyük uygulama alanlarına gelse. Bilgisayarların küçültülmesi ve işlemcilerin hızlarının artırılmasındaki en önemli engel bağlantıyı oluşturan metal filmlerin direnci nedeniyle ortaya çıkan ısı üretimi ve kapasitörlerin yüklenme süresi. Süperiletken filmlerin işe karışmasıyla işlemciler daha küçülebilecek ve bilgi çok daha hızlı iletililecek. Süperiletkenliğin elektronik uygulamalarındaki en önemli başarı, dijital elektronik alanında yaşanıyor. Josephson kavşağı yardımıyla, çok duyarlı mikrodalga algılayıcılar, manyetometreler, SQUID'ler ve çok kararlı voltaj kaynakları yapılabiliyor.

Josephson kavşağının bir elektronik uygulaması olan SQUID'de (Superconducting Quantum Interference Device), bir ya da daha fazla kavşak ilmek haline getirilip bir manyetik alandan geçirilerek ilmeklerin akım indüklemesi sağlanıyor. Manyetik alandaki en küçük değişimler akımda ölçülebilir değişikliklere neden oluyor, bu da SQUID'lerin, manyetik alanların çok duyarlı ölçülmesinin gerektiği aygıtlarda

kullanılabilir yararlı bir aygıt olmalarını sağlıyor. Çünkü SQUID'ler Dünyanın manyetik alan şiddetinin milyarda birinden daha küçük değişimleri fark edebiliyorlar. Bu sayede ortaya birçok uygulama alanı çıkıyor. Örneğin, jeologlar SQUID'leri mineral için maden aramada, biyofizikçiler de vücut içindeki elektrik akımlarında meydana gelen manyetik alanları ölçerek, insan beyni ve kalbindeki aktiviteyi görüntülemek için kullanıyorlar.

Süperiletkenlerin, şimdinin ve geleceğin teknolojilerine katkıları azımsanacak gibi değil. Yüksek sıcaklık süperiletken trafolar endüstride çok daha verimli, hafif ve çevre dostu bir tablo çizerken, süperiletken kullanılarak üretilen 200 beygir gücündeki bir motor çok daha küçük, hafif ve verimli araçların mimarlığına soyunuyor. Çok daha az elektrik tüketen bu motorların gücü de şu sıralar 400 beygir gücünde bir model üzerinde yapılan çalışmalarla artırılıyor.

Jeneratörler gelecekte, bir demir miktasına yeleştirilmiş süperiletken tel kullanılarak daha küçük ve hafif olacaklar. Yeni jeneratörler daha az yakıtla daha fazla güç elde edilmesini sağlayacaklar. Bunun ilk çalışmaları da 100 Megavolt Amperlik jeneratör geliştirmek üzerine.

İletişim teknolojisi de bu gelişmeden nasibini almayı hedefliyor. Örneğin, cep telefonlarının baz istasyonlarında süperiletken filtreler kullanılması sözkonusu.

Bunlar, süperiletkenliğin kullanılabileceği olası uygulama alanlarından yalnızca birkaçı. Yüksek sıcaklık süperiletkenliği üzerine yapılan araştırmalar yepyeni uygulama alanlarına gebe. Günümüzün yeni teknolojileri piyasaya çıktığında, elektrik üretimi, dağıtım ve kullanımı geleceğin tıp ve iletim teknolojilerinin de önünü açacak. Eğer oda sıcaklığında süperiletken malzemeler üretilirse de, bugünden düş gibi görünen uygulamalar belki de gerçeğe dönüşecek.

İlhami Buğdaycı



CERN'de eski ve yeni teknoloji birarada: LEP'te (Large Electron-Proton Collider - Büyük Elektron-Proton Çarpıştırıcısı) kullanılan geleneksel kablo ve hemen önünde LHC'de (Large Hadron Collider - Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) kullanılan süperiletken kablo.

Kaynaklar:  
Adams, S., The Big Chill, New Scientist, 25 November 1995  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>  
<http://www.newscientist.com/article/mg16922840.100>  
<http://www.sciam.com/article.cfm?id=iron-exposed-as-high-temp-superconductor>  
Sang, D., Superconductivity, Inside Science, New Scientist, 1997  
Swarup, A., Superconductivity - the path of no resistance, New Scientist, 21 August 2006