

Oda Sıcaklığında Süperiletkenlik için Yeni Bir Umut

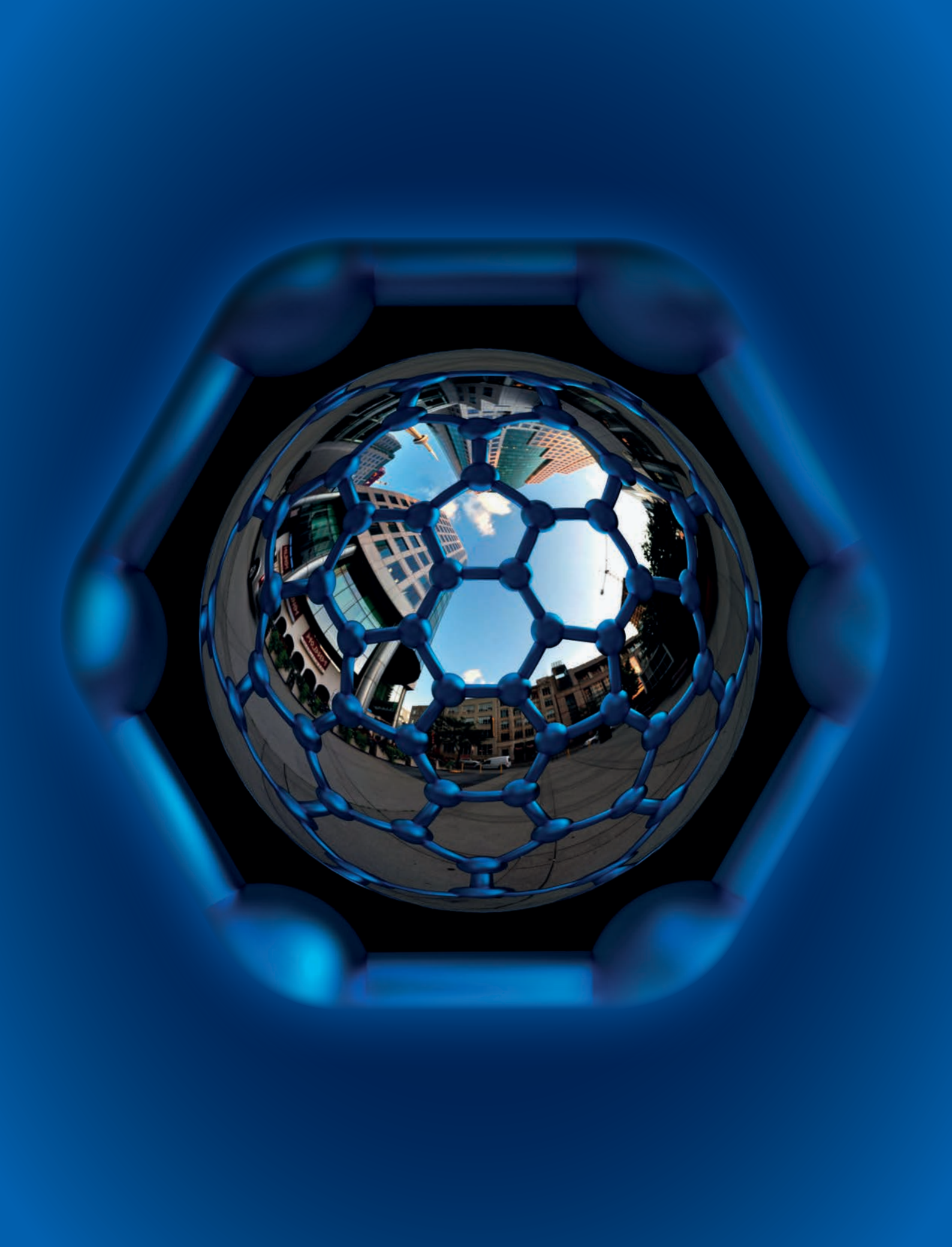
Nanobezelyeler

Doç. Dr. Doğan Erbahar [*Doğuş Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü*]

Dünyanın karşı karşıya olduğu enerji probleminin çözümünde süperiletken malzemelerin çok önemli bir role sahip olacağı düşünülüyor.

Özellikle oda sıcaklığında süperiletkenlik özelliği gösteren bir malzeme arayışı bu açıdan kritik ve stratejik bir öneme sahip.

Geçtiğimiz yılın nisan ayında bu konuda yayımlanan bir araştırma hayatımızın her alanına girmeye başlayan nanoteknolojinin bu soruna da bir cevabı olabileceğine işaret ediyor.



Bir teorik fizikçinin en büyük hayali daha önce hiçbir deneyde gözlemlenmemiş bir olguyu öngörebilmek ve hatta yapılmamış bir deney önerebilmektir. Einstein'ın yıldızların ışığının kütleçekimi altında sapmasını (veya bükülmesini) öngörmesi, Dirac'ın pozitron diye bir parçacık olması gerektiğini kestirmesi, Maxwell'in ışığın hızını teorik olarak hesaplayıp onun bir elektromanyetik dalga olduğunu anlaması teorik fiziğin en önemli zaferlerine örnekler olarak sayılabilir.

Öte yandan bir deneysel fizikçinin en büyük rüyası da daha önce hiçbir teoride öngörülmemiş, kimsenin aklına gelmemiş bir tabiat olayını gözlemlemektir. Bilim tarihinde deneysel fiziğin bu tip başarıları her zaman çok daha çığır açıcı olmuştur. Bu anlamda Rutherford'un meşhur altın levha deneyi, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu keşfi, Röntgen'in X ışınlarını gözlemlemesi en önemli köşe taşlarından sayılmakla birlikte Onnes'in süperiletkenliği keşfi, hem teorik hem deneysel çalışmalara getirdiği soluk ile deneysel fizik tarihinde çok özel bir yere sahiptir.

Hollandalı bilim insanı Heike K. Onnes 1911 yılında saf metallerin çok düşük sıcaklıklarda elektriksel iletkenliklerini incelerken çok ilginç bir tabiat olayı keşfetti. Cıva metali 4,2 Kelvin (-269,0 °C) sıcaklığına kadar soğutulduğunda elektriksel direncini tamamıyla kaybediyordu. Onnes, deney düzeneğinde olası bir kısa devre olmadığına emin olduktan sonra keşfettiği bu fenomenin önemini hemen anladı ve not defterine cıvanın yeni, sıra dışı, "süperiletken" bir hale geçtiğini not düşerek yaptığı keşfe de gayet yerinde bir isim koymuş oldu.

Süperiletkenliğin keşfi deneysel ve teorik çalışmalar açısından çok büyük bir çığır açtı ve konu, aradan geçen yüz yıl boyunca sıcaklığından hiçbir şey kaybetmedi. Öyle ki Onnes'ten bugüne kadar geçen sürede süperiletkenlik ile doğrudan ilişkili konularda gerek deneysel gerek teorik araştırmalar tam sekiz defa Nobel Ödülü'ne layık görüldü. Amerikan Fizik Derneği'nin her yıl mart ayında düzenlediği ve dünyanın en büyük fizik toplantısı olan meşhur "Mart Buluşması" 2011 yılında süperiletkenliğin keşfinin 100. yılı şerefine özel bir oturum yaptı ve bu oturumda Nobel ödüllü beş bilim insanı peşpeşe konuştu!

Süperiletkenlikle İlgili Nobel Ödülleri

1913 : Heike K. Onnes

Düşük sıcaklıkta maddelerin özellikleri ile ilgili çalışmalarından dolayı

1962 : Lev D. Landau

Başta sıvı helyum olmak üzere yoğun madde hakkındaki teorilerinden dolayı

1972 : John Bardeen, Leon N. Cooper, J. Robert Schrieffer

Bugün BCS teorisi olarak da bilinen süperiletkenliğin teorisini geliştirmelerinden dolayı

1973 : Ivar Giaever

Süperiletkenlerde tünelleme olgusu hakkındaki çalışmalarından dolayı

1978 : Pyotr Leonidovich Kapitsa

Düşük sıcaklık fiziği dalındaki çalışmalarından dolayı

1987 : J. Georg Bednorz ve K. Alexander Müller

Seramik malzemelerde süperiletkenlik özelliği keşfetmelerinden dolayı

1996 : David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson

Helyum-3'te keşfettikleri süperakışkanlıktan dolayı

2003 : Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginsburg, Anthony J. Leggett

Süperiletkenliğin teorisine yaptığı katkılardan dolayı

Peki, konunun öneminden hiçbir şey kaybetmemesinin sebebi nedir?

Süperiletkenlik konusundaki araştırmaların tarihsel detaylarına inmeden bu soruyu doğrudan günümüz perspektifinden değerlendirelim. Günümüzde insanlığın yeni bin yılda soyunu sürdürülebilir şekilde devam ettirebilmesi için çözmesi gereken en büyük sorun enerji problemi olarak gözükmektedir. Dünya nüfusunun hızla artması, rekabetçi şekilde büyüyen ekonomilerin enerji talebi, hızla tükenen enerji kaynakları, küresel iklim değişikliği gibi konular ise bu problemi çok boyutlu ve içinden çıkılmaz bir hâle getirmekte.

Süperiletken malzemelerin ekonomik olarak erişilebilir olmasının her şeyden önce enerji probleminin çözümüne önemli bir katkı sunacağı düşünülüyor. Elde ettiğimiz elektriğin %10 gibi önemli bir yüzdesini iletim hatlarında ısı olarak kaybediyoruz, cihazlarımızı çalıştırdığımızda dirençten dolayı ısınıyorlar ve enerjinin bir kısmını da burada kaybediyoruz. Bu da yetmezmiş gibi onları soğutabilmek için ayrıca enerji harcamamız gerekiyor.

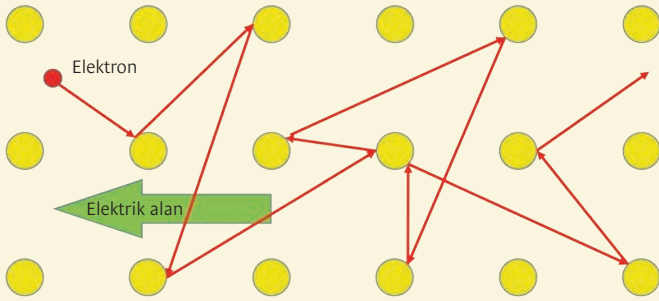
Özellikle günümüz dünyası için vazgeçilmez olan dev veri ve sunucu merkezlerinde soğutmaya harcanan enerji, tesisin tükettiği toplam enerjinin %40'ını bulabiliyor! Bunun yanında enerjiyi depoladığımız bataryalar mükemmel değil, "sızdırıyorlar" ve zaman içinde enerji kaybuna yol açıyorlar.

Her şeyden önce bütün bu kayıp problemlerinin sona erdiğini hayal edelim! Kayıpsız iletim hatları, ısınmayan bilgisayarlar, cihazlar, kayıpsız piller vs. Hepsi bu kadar mı? Hayır! Süperiletkenlik bilimin, teknolojinin ve gündelik hayatın birçok dalında kendini gösterebilme potansiyeline sahip. Çok hassas manyetik sensörler, devasa manyetik alanlar oluşturabilme imkânı, uçan trenler, bunların ulaşım sektörüne etkisi, çok daha hızlı ve verimli bilgisayarlar, kuantum bilgisayarlar, bunların bilişim sektörüne etkisi... Biraz düşününce bu listeyi uzatabilme yetimizin hayal gücümüz ile sınırlı olduğunu hissedebilirsiniz. Arthur C. Clark'ın dediği gibi "yeteri kadar gelişmiş bir teknolojiyi sihirden ayırt etmek imkânsızdır"!

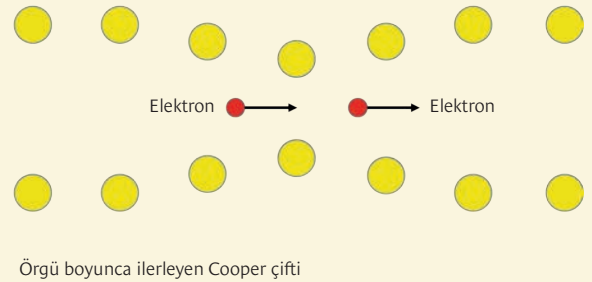
Hayal etmek güzel ama gerçek hayata dönersek bütün bunları gerçekleştirmenin önündeki engel ne? Sıcaklık!

İletkenlik ve Süperiletkenlik

Pozitif yüklü iyonlar



Pozitif yüklü iyonlar



İletkenlik ve süperiletkenlik bambaşka iki mekanizma ile açıklanır.

Şekilde çok basitleştirilerek ifade edilen iki model gösterilmiştir ancak matematiksel olarak doğru sonuçlar elde etmek için iki model de kuantum mekaniği açısından incelenmelidir.

Süperiletkenlik olgusu maalesef ancak düşük sıcaklıkta gözlemlenebiliyor. Daha önce belirtildiği gibi cıva elementinin süperiletken hâle geçmesi için muazzam derecede soğutulması gerekiyor. Daha teknik olarak konuşursak maddenin (o da her madde değil!) süperiletken hâle gelmesi için bir “kritik sıcaklık” var. İşte, süperiletkenlikle ilgili hayallerimizin gerçeğe dönüşebilmesi, bu kritik sıcaklığın konvansiyonel olarak oda sıcaklığının üzerine çekilebilmesine bağlı. “Oda sıcaklığı süperiletkenliği” derken bilim insanlarının kastettiği bu. Eğer bir gün birisi oda sıcaklığında süperiletken keşfederse bu kesinlikle en önceden kestirilebilir Nobel ödülllerinden biri olacaktır.

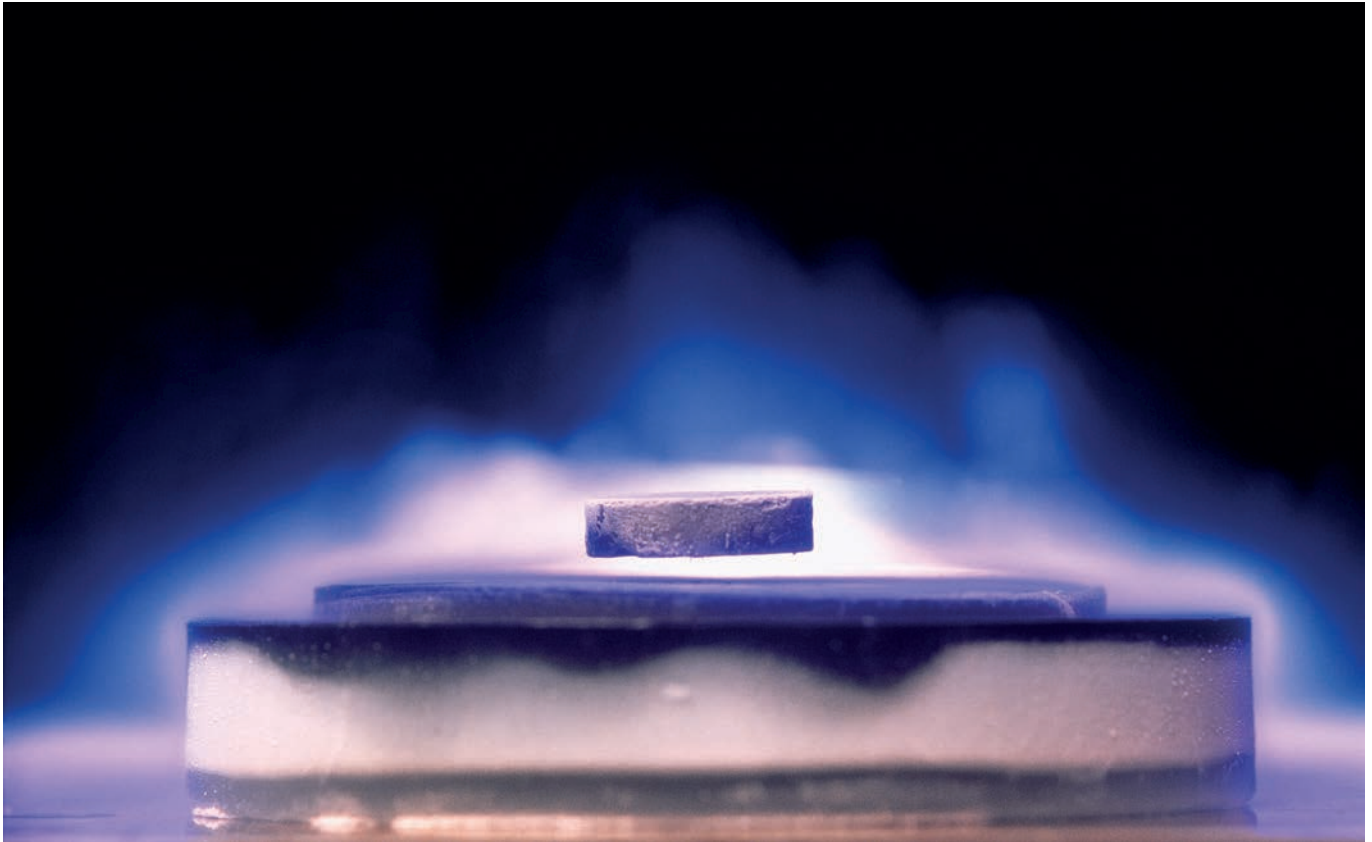
Günümüzde bu arayışın hangi aşamasında olduğumuzu anlayabilmek için süperiletkenlik olgusunun nasıl ortaya çıktığına bakmakta fayda var.

Meissner etkisi

Bir süperiletken, bir mıknatısa yaklaştırıldığında içine manyetik alan sızmasına izin vermeyecek şekilde girdap akımları oluşturur. Bu girdap akımları süperiletkenin bir elektromıknatıs gibi davranıp mıknatısı itmesine yol açar ve şekilde görüldüğü gibi havada askıda kalan bir sistem yaratmak mümkün hâle gelir. Bu teknolojinin raya temas etmeyen uçan trenlerde kullanılabileceği düşünülüyor.

Bir maddenin elektriği iletebilme özelliği içindeki yük taşıyıcılarının hareketliliğine bağlıdır. İletken deyince aklımıza ilk gelen şey metaller olduğu için onlar üzerinden konuşalım. Metallerin en karakteristik özelliği serbestçe gezebilen elektronlara (yani yük taşıyıcılara) sahip olmalarıdır. Bu sayede metalin iki ucuna bir potansiyel farkı uygulandığı zaman oluşan elektrik alan elektronları hareket ettirir ve elektrik akımı oluşur. Ancak ilerlemeye çalışan elektronların hayatı hiç de kolay değildir. Bu yolculukları boyunca başlarına gelmedik kalmaz. Metalin atomlarıyla ve birbirleriyle çarpışa çarpışa yol almaya çalışırlar. Bütün bu çarpışmalar sonucunda da elektrik alandan kazandıkları enerjiyi metal atomlarına kaybederler. Zaten akım taşıyan iletkenlerin ısınmalarının ve genel olarak direncin de sebebi budur.

Bu basit ama güçlü model bize iletkenliğin niye sıcaklık ile ilişkili olduğunu da açıklar. Şöyle ki: metalin sıcaklığı ne kadar yüksekse atomları o kadar hareketli olur ve ilerlemeye çalışan elektronların yolunu kesme ihtimalleri de o kadar artar. Dolayısı ile sıcaklık arttıkça direnç artar, iletkenlik düşer.



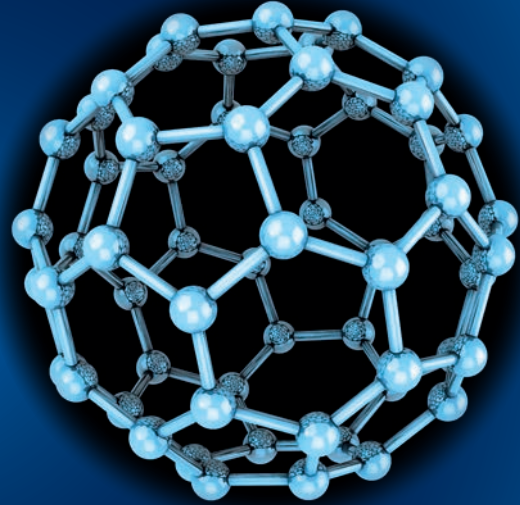
Bu mantığı tersine çevirdiğimiz zaman maddelerin niye soğukken elektriği daha iyi iletceğini de anlayabiliriz. Peki, ancak düşük sıcaklıklarda kendini gösterdiği söylenen süperiletkenliği de bu şekilde açıklamak mümkün mü? Maalesef hayır! Bu güzel model ne kadar düşük sıcaklığa inerseniz inin maddenin bir miktar direnci kalacağını öngörüyor, hele ki kritik bir sıcaklıkta direncin bir anda yok olması hadisesini açıklamakta tamamen aciz kalıyor.

Başta dediğimiz gibi süperiletkenlik öyle önemli bir deneysel fizik başarısıydı ki teorisyenler bunu açıklamak için yaklaşık 40-50 yıl kadar uğraştılar. İlk olgusal açıklama efsanevi Rus teorik fizikçisi Lev Davidovich Landau'dan gelse de olgunun mikroskopik olarak tatmin edici bir tasviri Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından yapıldı. Bu üç bilim insanının teorisi bugün isimlerinin baş harfleri kullanılarak (BCS) anılmaktadır.

BCS teorisi süperiletkenliğin tasvirini şu şekilde yapmaktadır: Maddeyi elektronlar ve pozitif yüklü iyonlardan oluşmuş olarak düşünürsek bir iyon bir elektronu çektiğinde etkiye tepkiden dolayı iyonun kendisi de

elektrona doğru bir miktar hareket eder ve pozitif yük merkezindeki bu kayma civardaki diğer elektronların da o tarafa doğru meyiletmesi ile sonuçlanır. Bu elbette ki zayıf bir etkidir ve ancak termal hareketlerin iyice durduğu düşük sıcaklıklarda kendisini gösterme şansı bulur. Böyle bir durumda bir elektron diğer elektronla “iyon vasıtası ile” dolaylı olarak etkileşmiş olur ve bundan bir tür “kolektif” hareket doğar.

Elektronların bu kolektif hareketinin en basit tasviri çiftler hâlinde ele alınmasıdır ki buna Cooper çiftleri ismi verilir ve bu elektron çiftleri birtakım tuhaf kuantum mekaniği yasaları gereği elektronlardan çok farklı davranır. Yani, fermiyon gibi değil bozon gibi davranırlar. Bu etkiyi ortaya çıkaran şey iyonların hareketi olduğundan dolayı da akımın önünde normal iletkenlerde ortaya çıkan engellerden hiçbiri kalmaz. Tek cümle ile toparlamak gerekirse: Süperiletkenlik elektronların pozitif yüklü iyon titreşimleri ile etkileşip birbirleri ile çiftlenime geçmesi sonucu ortaya çıkan bir olgudur. (Teknik olarak bu etkileşime elektron-fonon etkileşimi ismi verilir, bu noktaya yine döneceğiz.)



Sıradan bir futbol topu ve ondan 200 milyon kat küçük C_{60} fulleren molekülü aynı geometriye sahiptir. İkisinin de 60 köşesi, (12'si beşgen, 20'si altıgen olmak üzere) 32 yüzü ve 90 kenarı vardır.

Bu şekil geometride “budanmış yirmiyüzlü” ismi ile de bilinir.

C₆₀ Fullerenler ve Süperiletkenlik

Süperiletkenliğin tabiatını biraz anladıktan sonra kritik sıcaklığın nelere bağlı olduğunu ve nasıl yükseltilebileceğini konuşmamız gerekiyor. Bu noktada dikkatimizi artık hemen hemen her platformda hayatımıza girmeye başlayan nanomalzemelere ve nanoteknolojiye çevirelim.

Bir futbol topunun 200 milyon kat küçültülmüş bir modelini hayal edelim. Yapısı bu modelle tıpatıp aynı olan ve 60 tane karbon atomundan oluşmuş bir molekül var. Bu molekül meşhur fütürist mimar Buckminster Fuller'in onuruna "buckminsterfullerene" veya "buckyball" ismi ile biliniyor. Bu "nano toplar" beşgen ve altıgenlerden oluşmuş karbon kafes yapıları olan ve fullerenler diye isimlendirilen ailenin en kararlı ve nitelikli üyesidir. Modern tıptan malzeme bilimine, kimyadan elektronik mühendisliğine kadar o kadar çok uygulama alanı var ki onları keşfeden üç bilim adamı 1996 yılında kimya dalında Nobel Ödülü'ne layık görüldü.

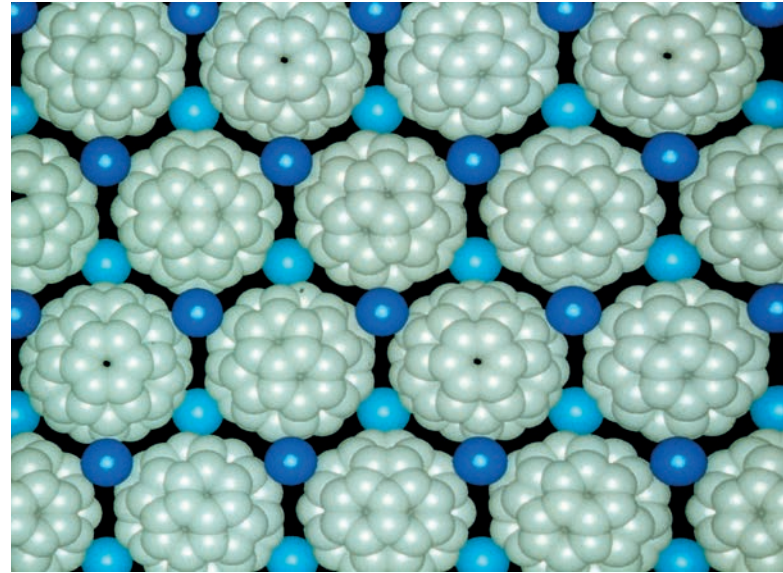
C₆₀ fullerenler de aynı süperiletkenlik olgusu gibi keşfedildikleri günden bu yana önemlerinden hiçbir şey kaybetmediler. Hatta 2015 yılında bu moleküllerden uzayda bol miktarda bulunduğu laboratuvarında kesin olarak ispatlandığında yakın zamanda kaybettiğimiz Nobel ödüllü Harold Kroto bunun 2015 yılının en önemli bilimsel keşfi olduğunu iddia etti. Geçen sene yayımlanan başka bir makale ise uzaydaki C₆₀'ların ilk organik moleküllerin sentezlenmesinde rol oynama ihtimalini tartışıyordu.

Süperiletkenlikle bu moleküllerin ne ilgisi var diye soracak olursanız; C₆₀ fullerenler diğer harika özellikleri yetmezmiş gibi aynı zamanda süperiletken! Bu özellikleri ilk defa 1991 yılında keşfedilmiş. Mükemmel küresel simetrijlerinden dolayı C₆₀'ları sıkı paketlenmiş yapıda bir kristal olarak büyütme mümkün ve bu kristallerin potasyum, rubidyum ve sezyum gibi alkali metaller ile katkıladıklarında süperiletken hâle geçtikleri gözlemlenmiş.

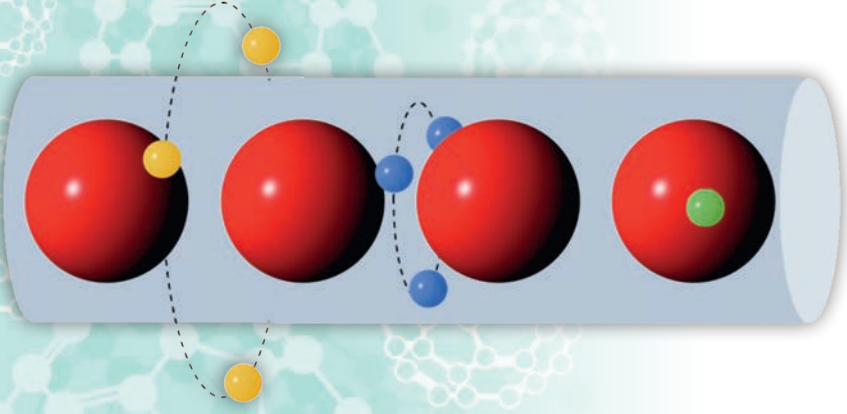
İşin daha da ilginç tarafı farklı alkali atomları ile katkılınca farklı kritik sıcaklıklara sahip süperiletkenlerin ortaya çıkması. Konu üzerinde çalışan teorisyenler bunun sebebinin BCS teorisi ile anlamanın mümkün olduğunu gösterdiler. Teoride kritik sıcaklık için verilen formülde periyodik yapının örgü parametresini ve yük durumunu değiştirerek sıcaklığın 18 K ve 33 K (-255°C ve -240°C) arasında nasıl değişebildiği açıklanmıştı.

Ama hâlâ oda sıcaklığına çok uzağız diye düşünüyorsanız içinde ülkemizden araştırmacıların da bulunduğu bir ekibin 2018 Nisan ayında yoğun madde fiziğinin prestijli dergisi *Physical Review B*'nin aciliyet ve önem arz eden araştırmalara yer verdiği *Rapid Communications* kısmında yayımlanan çalışması bu problemin nasıl çözülebileceğine ilişkin teorik bir öngörü sunuyor. Öngördükleri sistemde bu küçük nanotoplar bir karbon nanotüpün içerisine dolduruluyor. Bezelyeye benzediklerinden dolayı bu sistemlere nanobezelye ismi de veriliyor.

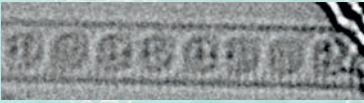
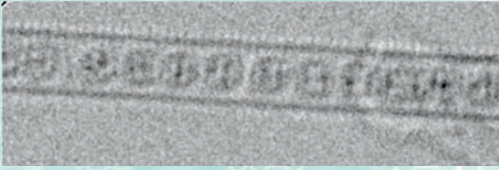
Nanobezelyeler yukarıda anlattığımız kristalde olduğu gibi çeşitli alkali atomları ile katkılanıyor. Elektron-fonon etkileşmesi olarak kristalden farkı olmayan bu sistemde C₆₀ moleküllerinin komşu sayısı 12'den 2'ye düştüğü için elektronik yapıları çok daha "keskin", belirgin ve modifiye edilmeye uygun hâle geliyor. Örgü parametresinin ince ayarı ise katkılanan atomların büyüklüğü ve sayısı ile düzenlenebiliyor. Daha önce kristaldeki kritik sıcaklığı doğru tahmin eden formülde bezelye sisteminde hesaplanan parametreler yerine koyulduğu zaman oda sıcaklığına yakın bir değer çıkıyor!



Süperiletkenlik özelliği gösteren katkılanmış C₆₀ kristalinin yapısı. Büyük gri küreler C₆₀'ları temsil ederken aradaki boşluklara yerleşen ve mavi renkle temsil edilen potasyum, rubidyum ve sezyum gibi katkı atomları hem kristalin yük durumunu hem de örgü parametresini modifiye etmeye yardımcı olur. (Örgü parametresi periyodik bir yapının belli yönlerde kendini tekrar ettiği en küçük mesafeye verilen isimdir. Duvar kağıdınızın üzerinde kendini tekrar eden desenler arası mesafe veya banyo zemininize döşenmiş fayanslar arası mesafe bu yapıların örgü parametresi olarak düşünülebilir.)



Nanobezelyeleri nanotübün dışından, içinden (fullerenlerin arasından) veya doğrudan fullerenlerin içinden katkılayıp yük durumlarını ve örgü parametrelerini değiştirmek mümkün. Yapılan teorik çalışma bu tip bir modifikasyonla süperiletkenlik kritik sıcaklığını oda sıcaklığına kadar yükseltme potansiyelini ortaya çıkardı.



— 1nm

Karbon nanotüplerin içine yerleştirilmiş fulleren molekülerinin elektron mikroskopundan alınmış görüntüleri.

Çalışma 2011 yılında Maria del Carmen Gimenez-Lopez ve arkadaşları tarafından yayımlandı. Bu yapılar nanobezelyeler olarak da biliniyor.

Nanotüpleri fullerenlerle nasıl dolduracağız sorusu akıllara gelebilir ama deneysel araştırmacılar bunu zaten çoktan başardı! 2010 yılının başlarından beri gelişen tekniklerle daha verimli hâle gelen doldurma işlemi enjeksiyon, difüzyon gibi farklı metotlarla gerçekleştirilip kararlı yapılar elde edilebiliyor.

Eğer oda sıcaklığında süperiletkenlik bu teorik ön-görü ışığında yapılacak deneysel çalışmalarla da doğrulanırsa önümüzdeki on yıl içerisinde kademeli olarak süperiletkenlerin hayatımıza girmesini beklemek çok da uzak bir ihtimal gibi gözüküyor. Eğer bu gerçekleşirse iletkenliğin bir sınır oluşturduğu sayısız uygulama alanında yeni bir çığır açılacağı benziyor. ■

Kaynaklar

- Erbahar, D., Liu, D., Berber, S., Tomanek, D. "Towards room-temperature superconductivity in low-dimensional C_{60} nanoarrays: An ab initio study", *Physical Review B*, Sayı: 97, 140505(R), 2018.
- Erbahar, D., Susi, T., Rocquefelte, X., Bittencourt, C., Scardamaglia, M., Blaha, P., Guttman, P., Rotas, G., Tagmatarchis, N., Zhu, X., Hitchcock, A.P., Ewels, C.P. "Spectromicroscopy of C_{60} and azafullerene C59N: Identifying surface adsorbed water", *Scientific Reports*, Sayı: 6, 35605, 2016.
- Campbell, E.K., Holz, M., Gerlich, D., Maier, J.P., "Laboratory confirmation of C_{60}^+ as the carrier of two diffuse interstellar bands.", *Nature*, Sayı: 523, 7560:322-3, 2015.
- Gimenez-Lopez, M. C., Chuvilin, A., Kaiser, U., Khlobystov, A. N. "Functionalised endohedral fullerenes in single-walled carbon nanotubes", *Chemical Communications*, Sayı: 47, 7:2116–2118, 2011.
- Hebard, A. F., Rosseinsky, M. J., Haddon, R. C., Murphy, D. W., Glarum, S. H., Palstra, T. T. M., Ramirez, A. P., Kortan, A. R. "Superconductivity at 18 K in potassium-doped C_{60} ", *Nature*, Sayı: 350, 600-601, 1991.
- Schluter, M., Lannoo, M., Needels, M., Baraff, G.A., Tomanek, D. "Electron-Phonon Coupling and Superconductivity in Alkali Intercalated C_{60} Solid", *Physical Review Letters*, Sayı: 68, 526, 1992.
- Tanigaki, K., Ebbesen, T. W., Saito, S., Mizuki, J., Tsai, J. S., Kubo, Y., Kuroshima, S. "Superconductivity at 33 K in $Cs_xRb_{1-x}C_{60}$ ", *Nature*, Sayı: 352, 222–223, 1991.
- <http://www.hurriyet.com.tr/dunya/dunyadaki-yasamin-tohumlari-uzaydan-gelmis-olabilir-40320245>
- <http://ieeesc.org/pages/nobel-laureates-superconductivity>
- <https://singularityhub.com/2018/05/13/the-search-for-high-temperature-superconductors/#sm.0001nfnsk11ggp7u61kkjen8s1u>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217306331>