

# 1. Superprovodnost

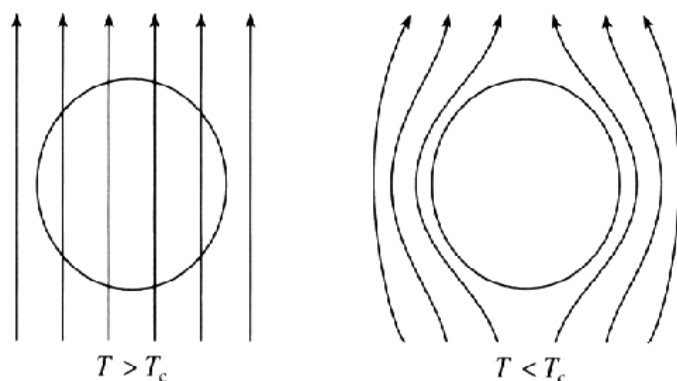
Pojavu superprovodnosti otkrio je holandski naučnik Onnes (K. Onnes) 1911. godine. Nekoliko godina ranije uspeo je da dobije tečni helijum, koji je iskoristio za svoje eksperimente sa metalima na izrazito niskim temperaturama. On je ustanovio da otpornost žive na temperaturi od 4.15 K opada čak deset miliona puta u odnosu na vrednost koja odgovara sobnoj temperaturi. Kasnije je u obrnutom procesu ustanovio da se na temperaturi od 4.2 K otpornost vraća u materijal. Da bi ukazao na moguće koristi od superprovodnosti, Onnes je u svom eksperimentu 1913. godine doveo električnu struju u superprovodni prsten. Kada je uklonio bateriju i potom izmerio struju, pokazalo se da se njen intenzitet ne smanjuje sa vremenom. Za svoj rad na niskim temperaturama Onnes je 1913. godine dobio Nobelovu nagradu.

Temperatura  $T_C$  na kojoj u određenom materijalu dolazi do pojave superprovodnosti naziva se kritična temperatura. Moglo bi se definisati da je za

$$T_C < T \Rightarrow \rho = 0$$

odnosno, za

$$T_C > T \Rightarrow \rho \neq 0.$$



Slika 1.

Osim toga, može doći i do potpunog istiskivanja magnetnog fluksa iz superprovodnika (slika 1.), pa je pri temperaturama ispod vrednosti  $T_C$

$$H < H_C \Rightarrow B = 0$$

odnosno,

$$H < H_C \Rightarrow \mu_r = 0$$

gde je  $\mu_r$  vrednost relativne magnetne permeabilnosti.

Majsnerov efekat ukazuje i da se superprovodno stanje može smatrati savršeno dijamagnetičnim.

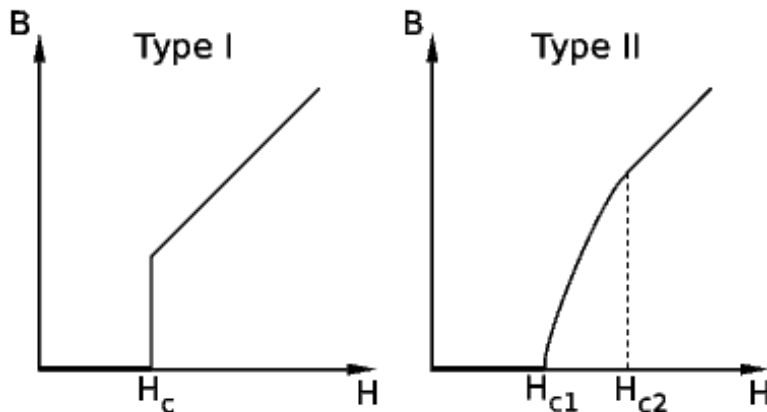
Kritično magnetno polje zavisi od temperature na sledeći način:

$$H_C = H_0 \left( 1 - 1.07 \frac{T^2}{T_C^2} \right),$$

gde su vrednosti  $H_0$  i  $T_C$  karakteristične za dati materijal.

Materijali koji iznad jedne vrednosti magnetnog polja  $H_C$  prelaze direktno u stanje uobičajenog ponašanja magnetne indukcije nazivaju se superprovodnicima I vrste (slika 2.).

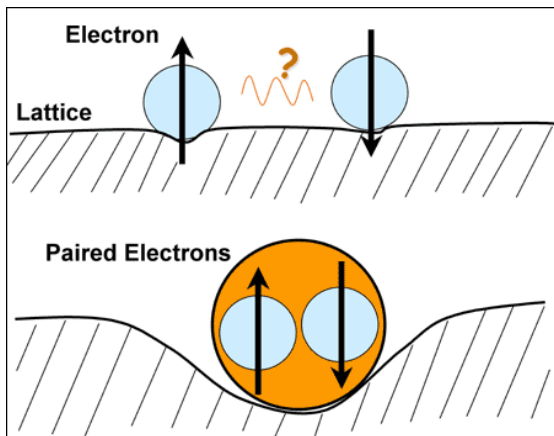
Materijali koji imaju dve karakteristične vrednosti kritičnog magnetnog polja  $H_{c1}$  i  $H_{c2}$  nazivaju se superprovodnicima druge vrste. Ispod prve kritične vrednosti indukcija je nula, a tek iznad druge kritične vrednosti dolazi do uobičajenog ponašanja. Između ove dve vrednosti magnetnog polja postoji mešano stanje koje karakteriše delimično prodiranje magnetnog polja unutar materijala, stanje koje se naziva Šubnikova faza (slika 2.).



Slika 2.

Objašnjenje fenomena superprovodljivosti najpre su dali London i London, nemački fizičari (F. London i H. London). Oni su pretpostavili egzistenciju dva nezavisna kolektiviteta normalnih i superprovodnih elektrona. Normalne i superprovodne struje bi tekle po paralelnim granama i pri dovoljno niskim temperaturama, slobodni elektroni bi se svodili na superprovodne. Međutim, ova teorija nije dovela do zadovoljavajućeg objašnjenja na elektronskom nivou.

Kompletna mikroskopska teorija superprovodnosti data je 1957. godine od strane Bardina, Kupera i Šifera (Bardeen, Cooper i Schrieffer) i naziva se BCS teorija. Po ovoj teoriji, jonska rešetka aktivno učestvuje u formiranju superprovodnog stanja. Interakcija između elektrona i vibracija rešetke (fonona) je sinhronizovana tako da dok jedan elektron uzajamno deluje sa rešetkom i izaziva deformaciju, drugi elektron to koristi da smanji svoju potencijalnu energiju. Tako preko deformacije rešetke ili fononskog polja elektroni uzajamno deluju što može da rezultira privlačnim dejstvom. Kad ono nadjača Kulonovsko odbijanje javlja se superprovodno stanje (slika 3.).



Slika 3.

## 2. Superprovodni materijali

Fenomen superprovodnosti otkriven je na uzorku jednoatomskog materijala. Pokazalo se da veliki broj elementarnih materijala poseduje ovakve osobine, ali ne i izrazito dobri provodnici kakvi su srebro, zlato i bakar, iako se eksperimentisalo sa temperaturama koje su iznosile samo stote delove stepena na skali Kelvina. To ukazuje da superprovodne osobine kod ovih materijala najverovatnije izostaju.

S druge strane, daleko se otišlo u proučavanju jedinjenja koja poseduju superprovodne osobine. Kao bitne karakteristike ne uzimaju se u obzir samo vrednosti kritične temperature i jačine kritičnog magnetnog polja, već i mnoge druge povezane sa cenom ili stabilnošću materijala. U tabeli 1. date su kritične vrednosti temperature pojedinih elemenata i jedinjenja.

Uzorak	$\alpha$ -Hg	Pb	Tc	Nb	MoN	Nb <sub>3</sub> Ge	Nb <sub>3</sub> Al	Nb <sub>3</sub> Sn
$T_c(K)$	4.15	7.19	7.77	9.26	12.0	23.2	17.5	18.1

Vremenom su vrednosti kritične temperature rasle. Krajem osamdesetih godina dvadesetog veka sintetizovano je više keramičkih materijala sa temperaturama koje značajno prelaze temperature tečnog azota. U ovakve materijale spadaju sistemi tipa:

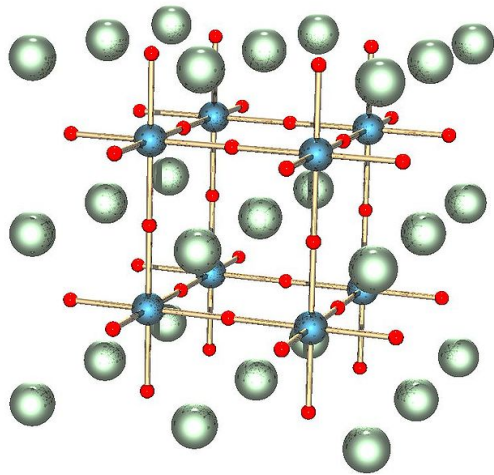
La – Sr – Cu – O

Bi – Ba – Ca – Cu – O

Tl – Ba – Ca – Cu – O

(X) – Ba – Ca – Cu – O

gde u poslednjem sistemu element označen sa X može da bude La (lantan), Nb (niobijum), Sn (kalaj), Eu (europijum), Gd (gadolinijum), Ho (holmijum) ili Er (erbijum).



Za većinu ovih materijala je karakteristično da naginju ka strukturi perovskita (slika 4.) i da u njima egzistiraju bakar – oksidne ravni.

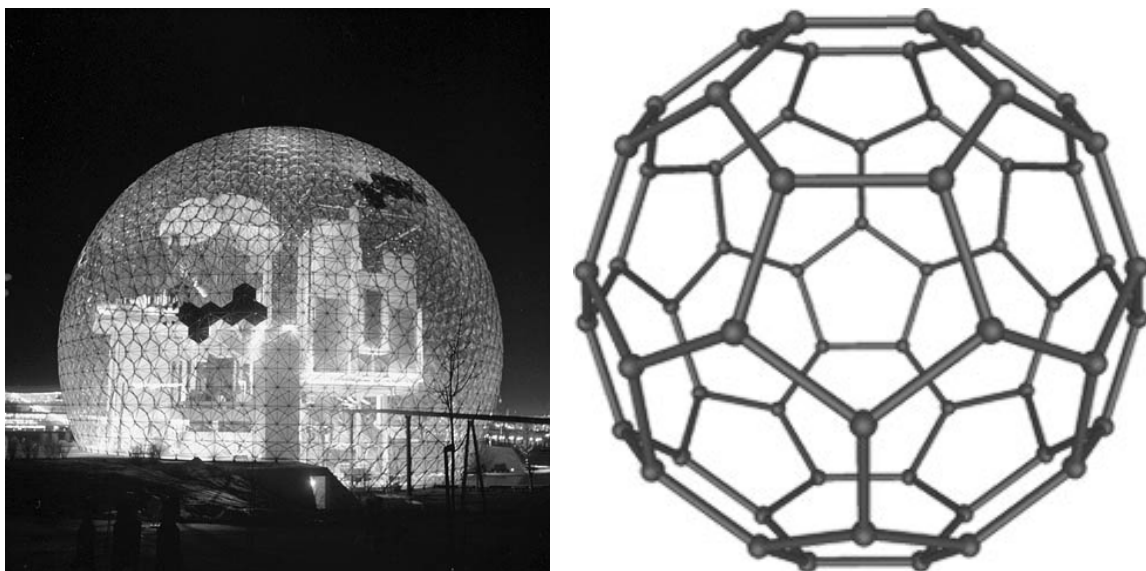
Slika 4. Jednostavnija struktura perovskita, gde su crveno označeni atomi kiseonika, a sivo i plavo atomi metala različite veličine, veći atomi najčešće atomi bakra

Postoje još neobičniji superprovodni sistemi od keramičkih. Neki od njih u vezi su sa trećom formom postojanja ugljenika u kristalnom stanju – fulleranima i o njima će biti reči u nastavku.

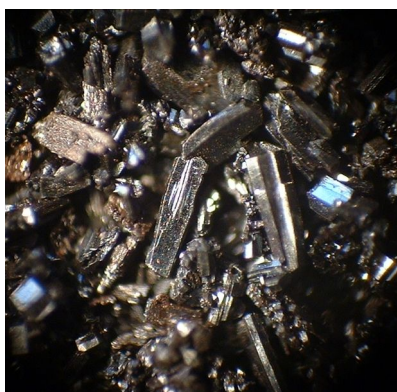
### 3. Struktura i osobine fulerena

Struktura fulerena je najsavršenija simetrijska forma koju danas kristalografija poznaje. Fulereni je opšti naziv za familiju ugljeničnih klastera koju čine dva stabilna homologa  $C_{60}$  i  $C_{70}$ , kao i viši:  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{84}$ ,  $C_{90}$ ,  $C_{94}$  i  $C_{96}$ .

Specijalnim tehnološkim postupkom, uz pomoć lasera visoke snage, 1985. godine izvršena je sinteza molekula  $C_{60}$ . Vizuelno ovaj molekul podseća na geodezijske kugle američkog arhitekta Ričarda Bakminstera Fulera (Richard Buchminster Fuller) i otuda naziv fuleren (slika 5).



Slika 5. Levo: Američki paviljon na izložbi u Montrealu 1967, rad Bakminstera Fulera  
Desno: Fuleren  $C_{60}$



Fulereni se organizuju u zatvorene sferične strukture sastavljene od različitog broja petougona i šestougona. Ojler (L. Euler), matematičar iz 18. veka, pokazao je da svaki zatvoren poliedar sastavljen od petougona i šestougona mora sadržati tačno 12 petougona. Oblik koji ima  $C_{60}$  je najmanja takva struktura u kojoj se petouganci ne dodiruju, a sadrži 20 šestougona; u svakoj manjoj petouganci se moraju dodirivati.

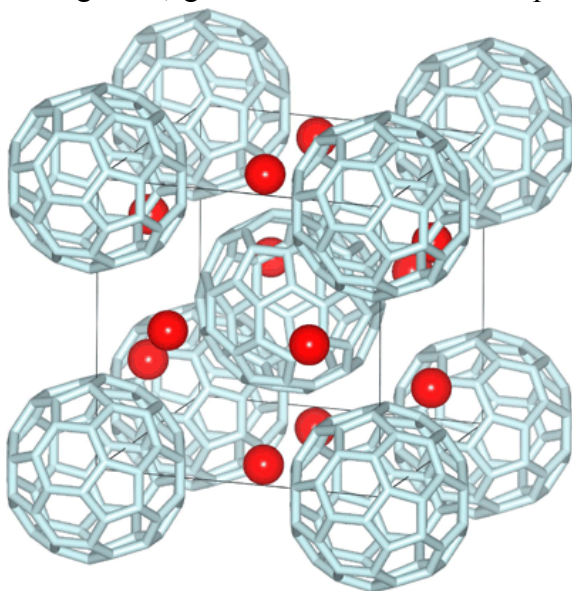
Slika 6. Fuleren  $C_{60}$  u kristalnoj formi

U vreme kada su otkriveni, fulereni su posmatrani kao prilično egzotična vrsta materijala. Zna se da ih ima i u prirodi, npr. pri sagorevanju sveća. Postupak za dobijanje većih količina fulerena razvijen je početkom devedesetih godina prošlog veka. Ovim metodom fulereni se izdvajaju iz ugljenika koji je u obliku posebno pripremljene čađi. Dobijanje većih količina materijala dovelo je do intenzivnih proučavanja njihovih osobina, u hemiji, fizici i biologiji.

Elementarna ćelija molekula  $C_{60}$  je kubna sa parametrom  $a = 1.417\text{nm}$ . Realizuje se gusto pakovanje u površinski centriranoj kubnoj rešetki (FCC). Međutim, ako se sa monokristalne pređe na formu veoma sitnih čestica kristalnog praha, gde dominiraju neki novi nanostrukturni efekti, zapaženo je pakovanje u heksagonalnoj rešetki sa parametrima  $a = 1.002\text{nm}$  i  $c = 1.636\text{nm}$  (slika 6.).

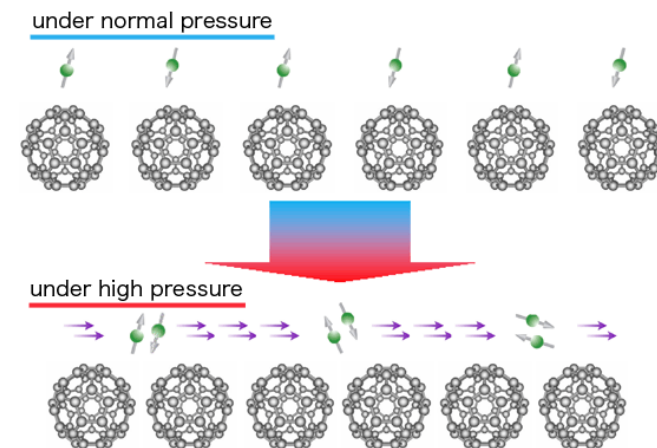
## 4. Superprovodljivi fulereni

Provodljivost i superprovodljivost fulerena kojima su pridruženi alkalni metali otkrivena je 1991. godine, gotovo istovremeno kad i postupak za dobijanje većih količina fulerena. Prvi rezultat bila je kritična temperatura od 18 K kod fulerena  $K_3C_{60}$ . Tako je fenomen superprovodnosti kod „najsavršenijeg od svih molekula“ izazvao veliko naučno interesovanje. Fulerenski superprovodnici bili su druga grupa materijala, posle bakar – oksidnih keramičkih materijala, koji su uspeli da prevaziđu prethodno ograničenje kritične temperature od  $T_C = 23.2\text{ K}$  ( $Nb_3Ge$ ) kod konvencionalnih superprovodnika. Najveća vrednost kritične temperature ( $T_C = 33\text{ K}$ ) zabeležena je kod fulerena  $RbCs_2C_{60}$ , dok je kod  $Cs_3C_{60}$  pod velikim pritiskom zabeležena još veća ( $T_C = 40\text{ K}$ ). Na slici 7. prikazana je struktura  $Cs_3C_{60}$ , gde su atomi Cs obojeni crveno.



Slika 7.

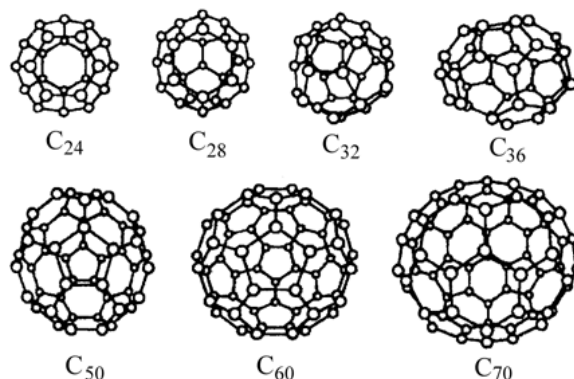
Prava priroda superprovodnosti kod fulerena još uvek nije razjašnjena. Za sada je poznato da se kritična temperatura povećava sa porastom zapremine elementarne ćelije. Kako cezijum formira najveći jon kod alkalnih metala, fullerenski materijali koji uključuju cezijum su naročito bitni. Smatra se da će kritične temperature još više porasti u materijalima kod kojih bi došlo do smanjenja rastojanja između fullerenskih kaveza, ali tako da njihova struktura ostane nenarušena.



Slika 8.

To može da objasni povoljne rezultate kod  $Cs_3C_{60}$ ; došlo je do smanjenja rastojanja usled pritiska (slika 8.).

S druge strane, eksperimentiše se i sa manje pravilnim ugljeničnim strukturama od fulerena kako su ovde definisani. Kako smo ranije naveli, fuleren  $C_{60}$  je najmanja struktura koju čine petougonaonici i šestougonaonici tako da se petougonaonici ne dodiruju. Kod manjih struktura sastavljenih od istih oblika, petougonaonici se moraju dodirivati. U širem smislu, i ovakve strukture se mogu smatrati fulerenima. Neki naučnici smatraju da superprovodnost zavisi od zakrivljenosti kod ovakvih molekula, pa se teži ka dobijanju većih količina stabilnih molekula sa što manje atoma (slika 9.).



Slika 9.

Osim nedovoljno jasnih objašnjenja fenomena superprovodljivosti kod fulerena, dodatna prepreka za njihovo proučavanje i primenu leži u činjenici da postupci za njihovo dobijanje još uvek nisu dovoljno dobri. Fulereni sa alkalnim metalima mogu se lako dobiti zagrevanjem mešavina metala i fulerena ili držanjem fulerena u atmosferi metalnih isparenja. Međutim, pojedinačne uzorke od komercijalne upotrebe deli veliki broj ispitivanja fizičkih osobina i razvijanje tehnologija za masovnu proizvodnju, a za sada su ovako dobijeni materijali nestabilni na vazduhu.

## 5. Literatura

1. S. Lukić **Ekperimentalna fizika kondenzovane materije**
2. V. Buntar, H. W. Weber **Magnetic properties of fullerene superconductors**  
([www.sprg.ssl.berkeley.edu/~cepheid/240b/u608r1.pdf](http://www.sprg.ssl.berkeley.edu/~cepheid/240b/u608r1.pdf))
3. [www.superconductors.org/atypical.htm](http://www.superconductors.org/atypical.htm)
4. [www.sciencedaily.com/releases/1998/07/980724080548.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/1998/07/980724080548.htm)
5. [www.spring8.or.jp/en/news\\_publications/press\\_release/2009/090320](http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/press_release/2009/090320)
6. [www.en.wikipedia.org/wiki/Fullerene](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Fullerene)
7. [www.en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_superconductivity](http://www.en.wikipedia.org/wiki/History_of_superconductivity)

### Slike:

- Slika 1. [www.img.search.com/thumb/b/b5/EfektMeisnera.svg/180px-EfektMeisnera.svg.png](http://www.img.search.com/thumb/b/b5/EfektMeisnera.svg/180px-EfektMeisnera.svg.png)
- Slika 2. [www.biocrawler.com/w/images/2/21/Superconductor-b-vs-h.png](http://www.biocrawler.com/w/images/2/21/Superconductor-b-vs-h.png)
- Slika 3. [www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/08/images/electronphonon.gif](http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/08/images/electronphonon.gif)
- Slika 4. [www.en.wikipedia.org/wiki/Perovskite\\_\(structure\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_(structure))
- Slika 5. Levo: [www.blockprojekt.de/wp-content/uploads/buckminster-fuller-us-pavillion.jpg](http://www.blockprojekt.de/wp-content/uploads/buckminster-fuller-us-pavillion.jpg)  
Desno: [www.nanowerk.com/images/fullerene.jpg](http://www.nanowerk.com/images/fullerene.jpg)
- Slika 6. [www.en.wikipedia.org/wiki/Fullerene](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Fullerene)
- Slika 7. [www.spring8.or.jp/en/news\\_publications/press\\_release/2009/090320](http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/press_release/2009/090320)
- Slika 8. [www.spring8.or.jp/en/news\\_publications/press\\_release/2009/090320](http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/press_release/2009/090320)
- Slika 9. [www.fulleren.com/images/img1.gif](http://www.fulleren.com/images/img1.gif)