

# OSNOVNE KARAKTERISTIKE I PRIMJENA SUPRAVODLJIVOSTI

---

**Mrkonja, Laura**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:497347>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Laura Mrkonja

# **OSNOVNE KARAKTERISTIKE I PRIMJENA SUPRAVODLJIVOSTI**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Laura Mrkonja

# **PROPERTIES AND APPLICATION OF SUPERCONDUCTIVITY**

MASTER'S THESIS

Karlovac, 2020.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Laura Mrkonja

# **OSNOVNE KARAKTERISTIKE I PRIMJENA SUPRAVODLJIVOSTI**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: mag. ing. inf. et comm. techn. Anamarija Kirin

Karlovac, 2020.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički studij: Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu Karlovac, 20.01.2020.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Laura Mrkonja Matični broj: 0422417023

Naslov: Osnovne karakteristike i primjena supravodljivosti

Opis zadatka:

U Završnom radu opisati principe supravodljivosti i supravodljive materijale. Objasniti primjenu u raznim područjima znanosti i tehnologije.

Koristiti se stručnom literaturom, radnim materijalima, Zakonima i Pravilnicima, ostalom stručnom literaturom i konzultirati se s mentorom. Završni rad izraditi sukladno Pravilniku VUKA.

Zadatak zadan: 02/2020 Rok predaje rada: 08/2020 Predviđeni datum obrane: 16.09.2020.

Mentor:  
mag.ing.inf.et comm.techn.  
Anamarija Kirin

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:  
dipl.ing. Marko Ožura

## PREDGOVOR

„Premda me stajalo nešto truda dok sam napisao ovu knjigu, ipak sam se najviše namučio pišući predgovor što ga evo čitaš. Mnogo sam se puta laćao pera da ga napišem, i opet ostavljao pero, jer nisam znao što bih napisao.“

Mojoj majci, s ljubavlju, ponosom i poštovanjem što sam te imala. Hvala ti za tvoj veliki i nesebični doprinos što sam postala osoba kakva jesam.

## Sažetak:

Supravodljivost se većinom manifestira kao odsutnost otpora iznad neke kritične temperature. 1911. otkrio ju je nizozemski fizičar Kamerlingh Onnes u Leidenu, 3 godine nakon što je prvi put ukapljivao helij. Mjerio je električni otpor žive pri vrlo niskim temperaturama. Počeo je istraživati električna svojstva u metalima na ekstremno hladnim temperaturama. Dugi niz godina znalo se da padom temperature pada i otpor materijala, no nije bilo poznato što se događa pri ovako niskim temperaturama. Električni otpor žive potpuno je nestao ispod temperature od 4.2K. Poput feromagnetizma i spektralnih linija atoma, supravodljivost je kvantno mehanički fenomen. Najvažnija karakteristika supravodljivosti je Meissnerov efekt - metali ohlađeni do supravodljivoga stanja ponašaju kao savršeni dijamagnetici, to jest u tankom površinskom sloju induciraju se struje koje stvaraju takvo magnetno polje koje poništava vanjsko polje, te je u unutrašnjosti supravodiča magnetno polje jednako nuli. Supravodljivost ovisi o temperaturi  $T_c$ , Magnetskom polju  $H_c$  i gustoći struje  $J_c$ . Ako su svi parametri ispod kritičnih vrijednosti, materijal će biti u supravodljivom stanju, u protivnom, ponašat će se kao običan metal. Kad supravodičem jednom potekne struja, ona će teći vječno, bez potrebe za strujnim izvorom, jer zbog nepostojanja otpora nema gubitka energije. Za praktičnu primjenu supravodiča važna je temperatura na kojoj oni postaju supravodljivi, Problem je što se supravodljivost pojavljuje samo na vrlo niskim temperaturama što predstavlja problem u masovnoj primjeni supravodiča. Stoga, pronalazak i razumijevanje materijala koji bi vodili struju bez otpora na sobnim temperaturama predstavlja svojevrsan problem istraživanja u području fizike čvrstog stanja.

## ABSTRACT

Superconductivity is mostly manifested as the absence of resistance above some critical temperature. It was discovered in 1911. by the Dutch physicist Kamerlingh Onnes in Leiden, 3 years after he first liquefied helium. He measured the resistance of mercury at extremely low temperatures. He began to investigate the electrical properties in metals at extremely cold temperatures. For many years, it was known that as the temperature dropped, so did the resistance of the material, but it was not known what happened at such low temperatures. The electrical resistance of the mercury completely disappeared below the temperature of 4.2K. Like ferromagnetism and spectral lines of atoms, superconductivity is a quantum mechanical phenomenon. The most important characteristic of superconductivity is the Meissner effect - metals cooled to the superconducting state behave like perfect diamagnetics, that is, currents are induced in a thin surface layer that create such a magnetic field that abolish the external field, and the magnetic field inside the superconductor is zero. The superconductivity depends on the temperature  $T_c$ , the magnetic field  $H_c$  and the current density  $J_c$ . If all parameters are below the critical values, the material will be in a superconducting state, otherwise, it will behave like a common metal. Once a superconducting current flows, it will flow forever, without the need for a current source, because due to the lack of resistance there is no loss of energy. For the practical application of superconductors, the temperature at which they become superconductors is important. The problem is that superconductivity occurs only at exceptionally low temperatures, which is a problem in the mass application of superconductors. Therefore, the invention and understanding of materials that would conduct current without resistance at room temperatures is a kind of research problem in the field of solid-state physics.



# Sadržaj

1. UVOD .....	1
1.1 Povijest supravodljivosti .....	3
2. SUPRAVODIČI.....	7
2.1 Supravodiči tipa I – Meissnerov efekt.....	9
2.2 Supravodiči tipa II.....	12
2.3 Ginzburg – Landau teorija.....	14
3. SUPRAVODLJIVI MATERIJALI .....	17
3.1 Kuprati.....	18
3.2 Supravodiči temeljeni na željezu .....	19
4. BCS TEORIJA.....	20
4.1 Cooperovi parovi .....	21
5. JOSEPHSONOV EFEKT.....	27
5.1 DC Josephsonov efekt .....	27
5.2 AC Josephsonov efekt .....	29
5.3 Primjena .....	30
6. TRENDVI PRIMJENE SUPRAVODLJIVOSTI .....	31
6.1 Transport.....	31
6.2 Magneti za medicinsku dijagnostiku .....	33
6.3 Prijenos snage .....	35
6.4 Supravodljiva računala.....	36
6.5 Akceleratori za visokoenergetsku fiziku .....	37
6.6 Supravodljivi senzori .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	39
8. LITERATURA .....	VII
9. PRILOZI .....	IX
9.1 Popis slika.....	IX

## 1. UVOD

Istraživanja materijala na vrlo niskim temperaturama dovela su do otkrića supravodljivosti, tj. svojstva (nekih) materijala da im otpor padne sasvim na nulu ispod neke tzv. kritične temperature  $T_c$ . U takvim materijalima, na temperaturi ispod kritične, struje mogu teći godinama bez ikakvih gubitaka.

Supravodljivost je kompleksna pojava, i ne može se lako razumjeti ako se ne poznaju dobro osnove kvantne fizike mnogočestičnih sustava. Zbog toga ćemo svojstva supravodiča opisati jednostavni modelom nazvanim model pijanaca. Prvo ćemo pogledati što se opaža u pokusima sa supravodičima ili slijedi iz njih:

1. Supravodič pokazuje električni otpor  $R$  iznad kritične temperature  $T_c$  poput svakog običnog vodiča, dok na temperaturama  $T$  manjima od  $T_c$  otpor  $R$  je jednak nuli.

2. Postoji maksimalna odnosno kritična struja  $I_c$  koja se može propustiti kroz supravodič, a da se ne uništi supravodljivost. Supravodljivost nestaje kada je  $I > I_c$ .

3. Postoji maksimalno odnosno kritično magnetsko polje  $H_c$  pri kojem se supravodljivost može održati. Supravodljivost nestaje kada je  $H > H_c$ .

4. Kada je magnetsko polje manje od  $H_c$  supravodič izbacuje to nametnuto magnetsko polje (Meissnerov efekt) tako da se magnetsko polje smanjuje od ruba uzorka prema unutrašnjosti, te nestaje na udaljenosti  $\lambda$  (dubina prodiranja magnetskog polja) od ruba.

5. Supravodljivost je posljedica međusobno usklađenog i dosljednog gibanja između dva elektrona koji čine par. Par ostaje zajedno na putu duljine  $\xi$  (duljina koherencije), a zatim svaki član para nađe novog "partnera", s kojim je opet zajedno na putu duljine  $\xi$ , itd.

## Model pijanaca

Pretjerana konzumacija alkohola može dovesti čovjeka u pijano stanje te samim time čovjek ima lošu koordinaciju pokreta. Zbog loše koordinacije čovjek ne može najbolje kontrolirati svoj hod zbog čega dolazi do sudaranja u razne stvari poput automobila, zida, drveća, i sl. što rezultira da se svaki put čovjek malo povrijedi. To sudaranje i skupljanje modrica možemo gledati kao neki ekvivalent otporu idealnog gibanja odnosno onome bez sudaranja. Slično je i s električnim otporom – koji se može shvatiti kao otpor idealnom gibanju elektrona. Ali ako se nađu dva pijanca zajedno, oni mogu izbjeći sudaranje tako što će se zagrliti i pomoći jedan drugome u izbjegavanju sudara te će na taj način izbjeći ozljede tj. otpor. Njihovo hodanje u zagrljaju i izbjegavanje prepreka analogno je izbjegavanju prepreka dvaju elektrona koji međudjeluju privlačno i gibaju se zajedno. Međutim, pitanje je kako se elektroni mogu privlačiti, kad znamo da se inače odbijaju električnom silom? Postaviti ćemo situaciju da se dva pijanca ne vole. U tom slučaju potrebna je treća osoba koja će nagovoriti pijance da hodaju skupa i međusobno si pomažu u izbjegavanju sudara te da je to bolje nego da se sudaraju sa svime. Ta treća osoba je u dobrim odnosima s oba pijanca i predstavlja posrednika. Pri zajedničkom gibanju elektrona posrednik je pozitivno nabijen ion (privlači elektrone) u pozadini. Pokušajmo sad vidjeti može li pretpostavljeno ponašanje pijanaca i analogija s elektronima objasniti prije navedena svojstva supravodiča 1-5.

1. Visoke temperature pridonose pijanstvu zbog čega pijanci pojedinačno još jače teturaju. Koliko god se posrednik trudio ne može istovremeno dovesti pijance jednog blizu drugog pa se oni ne mogu ni zagrliti. Kada zahladi posrednik uspijeva uhvatiti oba pijanca za ruku i nagovoriti ih da se zagrle. Da bi se pijanci zagrlili tj. gibali skupa bez otpora treba biti dovoljno hladno. Ista stvar je s elektronima.

2. Struja parova elektrona proporcionalna je brzini kojom se gibaju. Mislite li da će pijanci moći trčati vrlo brzo ako su zagrljeni? Očito ne – pri nekoj brzini će se zagrljaj razvrgnuti, i pijanci će nastaviti sakupljati modrice.

3. Magnetsko polje, kako je navedeno, smeta supravodljivosti. Pretpostavimo da se je na cesti skupilo dosta pijanaca i da se svi hodaju zagrljeni u parovima. Odjednom mlazovi vode počnu zalijevati pijance te ako su mlazovi dovoljno jaki razdvojiti će parove. Sad zamislite da su mlazovi vode silnice magnetskog polja.

4. Ponovno zalijevamo zagrljene pijance mlazovima vode. Ako su mlazovi dovoljno slabi par će se samo smočiti i uspjeti ostati zagrljen te će na taj način svojim tijelima zakloniti pijance iz drugog reda, trećeg itd., dok pijanci koji su dovoljno duboko u sredini neće ni osjetiti vodu. U ovoj analogiji mlaznice su i dalje silnice magnetskog polja.

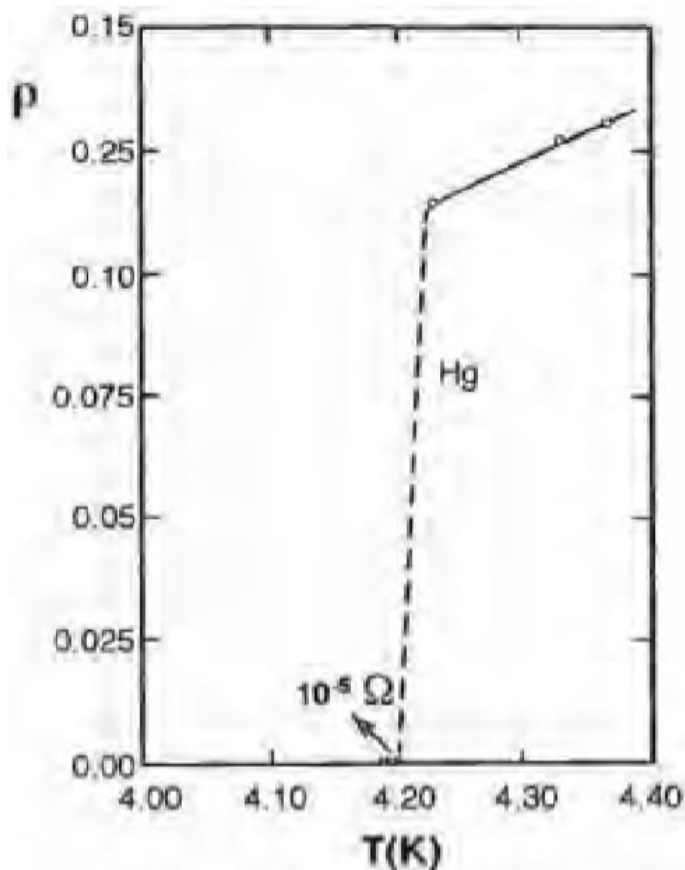
5. Ne zaboravimo na činjenicu da se pijanci i dalje ne podnose. Stoga posrednik, da bi spriječio mogući sukob, dozvoljava pijancima da budu zagrljeni odnosno čine par samo na jednom dijelu puta, potom slaže nove parove te prije eskalacije sukoba između pijanaca opet slaže nove parove itd.

Ono što je važno upamtiti jest da je supravodljivost posljedica gibanja elektrona u parovima, što im omogućuje da izbjegnu sudare u kojima se gubi energija. Općenito, ti su sudari raspršenja na nesavršenostima kristalne strukture te na termički pobuđenim valovima pozadinskih atoma (fononima) [1].

## 1.1 Povijest supravodljivosti

Polje supravodljivosti započelo je otkrićem nultog otpora Karmerlingh Onnesa 1911. godine. Međutim, otkriće supravodljivosti izgrađeno je na događajima koji sežu u kasno 19. stoljeće. U tim vremenima jedan od velikih izazova fizike bio je postići likvefakciju (ukapljivanje) svih rijetkih plinova i tako postići što niže temperature. Onnes je pobijedio u ovoj utrci stvorivši 1908. tekući helij. Njegova nagrada bilo je otkriće supravodljivosti 3 godine kasnije. Prvi poznati supravodljivi materijal bio je živa.

Prvo promatranje žive, ilustrirano na slici 1., rezultat je općeg napretka u fizici niskih temperatura (ukapljivanje He). Proučavajući ovisnost električnog otpora žive o temperaturi, došao je do spoznaje da na temperaturama nižim od 4,2K (-269°C) električni otpor opada na nemjerljivo malu vrijednost. Za svoje otkriće Onnes je 1913. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku [2].



Sl. 1 1 Ilustracija Kamerlingh Onnesova otkrića supravodljivosti i nestajanje električnog otpora 1911. Godine [1]

Do 1980. godine supravodljivost je opažena u mnogim metalima i legurama. Zanimljivo je da klasični feromagnetni poput Ni, Fe, itd. nisu pokazali supravodljivost. Samo za nemagnetsko stanje i pod (jakim) tlakom zabilježena je supravodljivost (na primjer u željezu,  $T_c = 2$ K).

**POZNATI SUPRAVODLJIVI ELEMENTI**

1A																			0			
1	H																	He				
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112										

*SUPERCONDUCTORS.ORG*

★ LANTANIDI	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
+ AKTINIDI	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Sl. 2 Pregled supravodljivih metala (plavi) u periodnom sustavu elemenata. Napomena o nepostojanju supravodljivosti u feromagnetskim prijelaznim metalima i rijetko zemaljskim i aktinidnim metalima. Ostali supravodiči (pod tlakom) označeni su zelenom bojom. [3]

1933. godine njemački znanstvenici Walther Meissner i Robert Ochsenfeld napravili su sljedeći veliki korak u razumijevanju ponašanja tvari pri ekstremno niskim temperaturama. Otkrili su da se metali ohlađeni do supravodljivog stanja ponašaju kao savršeni dijamagneti, tj. da se u tankom površinskom sloju induciraju struje koje stvaraju takvo magnetsko polje koje poništava vanjsko polje, te je u unutrašnjosti supravodiča magnetsko polje jednako nuli. Ako se na primjer na materijal, koji može biti supravodljiv na temperaturama višima od 100 K, postavi lagani magnet i ako se materijal polije ukapljenim dušikom, magnet će se podići iznad njega i lebdjeti [3].

Od početka je bila snažna motivacija pronaći supravodiče s visokom prijelaznom temperaturom  $T_c$ . Međutim, do oko 1980. godine A-15 spoj Nb<sub>3</sub>Ge ostao je supravodič s najvišim  $T_c$  na oko 30 K. Da bi se postigle veće vrijednosti  $T_c$  proučavane su mnoge legure i učinak tlaka (vidi sl.2)

Ubrzo nakon 1980. godine otkriveni su novi supravodiči koji pripadaju prilično različitim skupinama materijala. Georg Bednorz i Alex Müller otkrili su novu vrstu materijala, kuprate (bakrov oksid). Obojica su specijalizirani za perovskite, okside s posebnim strukturnim i feroelektričnim svojstvima te su proučavali njihova svojstva na niskim temperaturama. 1985. započeli su s proučavanjem materijala izrađenih od barija, bakra i lantana. Bednorz i Müller su ih sintetizirali i sustavno promijenili broj elektrona mijenjajući udjele barija i lantana. Početkom 1986. otkrili su da je jedan od tih spojeva supravodljiv na rekordnoj temperaturi. Stvorili su krhki keramički spoj koji pokazuje svojstva supravodljivosti na do tada najviše poznatoj temperaturi, 30K. Ono što je učinilo ovo otkriće još izvanrednijim je činjenica što keramiku obično koristimo kao izolator. Dakle, istraživači nisu smatrali keramiku dobrim materijalom za visokotemperaturne supravodiče. Spoj lantana, bakra, barija i kisika koji su sintetizirali Müller i Bednorz, ponašao se na još do sada nerazumljiv način. Otkriće supravodljivosti bakrovog oksida (kuprati) omogućio je Mülleru i Bednorzu osvajanje Nobelove nagrade naredne godine. Kasnije je otkriveno da male količine tog materijala pokazuju supravodljivost na temperaturama od 58K uz dodatak olova kao kalibracijskog standarda, što ovo otkriće čini još važnijim. Općenito, proučavanje supravodljivosti bilo je pokretač novih eksperimentalnih tehnika kao i metoda teorijske fizike i teorije kvantnog polja te je bilo odgovorno za nove pojmove prilično općeg značaja u fizici [4].

## 2. SUPRAVODIČI

### Osnovna svojstva supravodiča:

- idealna vodljivost
- idealni dij magnetizam (Meissner-Ochsenfel 1933.)
- energijski procijep u (jednočestičnom) elektronskom spektru
- neka ograničenja:
  - supravodljivost za  $T < T_c$
  - postoji kritična struja  $I_c$  iznad koje je otpor konačan
  - postoji kritično magnetsko polje iznad kojeg nema dij magnetizma.

### Razlikujemo dvije vrste supravodiča:

- supravodiči 1. vrste:
  - za  $H < H_c$  idealni dij magnet
  - za  $H > H_c$  nema supravodljivosti
- supravodiči 2. vrste:
  - za  $H < H_{c1}$  idealni dij magnet
  - za  $H_{c1} < H < H_{c2}$  miješano stanje
  - za  $H > H_{c2}$  nema supravodljivosti

Za praktičnu primjenu supravodiča važno je na kojoj temperaturi postigne supravodljivost. Za postizanje temperature niže od 77 K, tvar se mora hladiti ukapljenim helijem, dok se na temperaturu višu od 77 K tvar može ohladiti ukapljenim dušikom, što je jednostavnije i jeftinije od hlađenja helijem. Niskotemperaturni supravodiči postižu supravodljivost na temperaturi nižoj od 30 K. Kroz žice promjera oko 0,1 mm načinjene od supravodiča mogu teći električne struje jakosti stotinjak ampera pa se od njih izrađuju snažni elektromagneti koji se koriste npr. u akceleratorima čestica i levitirajućim vlakovima. Visokotemperaturni supravodiči se intenzivno istražuju, ali još uvijek nemaju značajniju primjenu, ponajprije zato što su slabo kovni, tj. teško ih je oblikovati u žice [5].



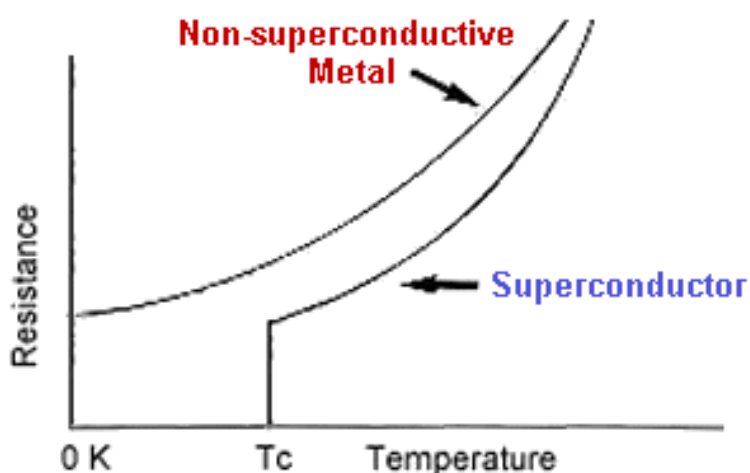
Supravodiči se primjenjuju u sferi visoke tehnologije, npr. od njih se rade vrhunski elektromagneti. Elektromagnet koji ima zavojnicu od nekog uobičajenog materijala, npr. bakra, grije se ako se kroz njega propušta struja, pa su gubici energije veliki. S druge strane, postoje supravodiči koji su prilično neosjetljivi na jake struje. Kroz njih se može propustiti oko 10-20 puta veća struja, i to bez grijanja, pa stoga daju i 10-20 puta jača magnetska polja. Naravno, supravodič se ne grije, jer mu je električni otpor nula. Danas su supravodljivi magneti standardni u svim primjenama gdje su potrebna jaka magnetska polja. Postignut je i određeni uspjeh u proizvodnji elektromagneta sa žicama visokotemperaturnih supravodiča.

Kad supravodičem jednom potekne struja, ona će teći "zauvijek", bez da je potreban strujni izvor - jer nema nikakvog gubitka energije. Ako materijal nije supravodljiv, električni otpor uzrokuje stalne gubitke energije, pa da bi se održala struja stalne vrijednosti energija mora biti dobavljena iz strujnog izvora. Znanstvenici su mjerili struju kroz jednu supravodljivu petlju bez strujnog izvora, i otkrili da se struja nije promijenila petnaest godina. Eksperiment je prekinut, jer se očito nije ništa mijenjalo, uz zaključak da je protok struje kroz supravodič zaista savršen [6].

Važno svojstvo supravodiča je da se ponašaju kao savršeni dijamagneti tj. da oni odbijaju magnetsko polje. Pokus koji to pokazuje nije teško načiniti. Potrebno je u neku zdjelicu staviti mali magnet, naliti tekućeg dušika, i iznad magneta staviti tableticu načinjenu od nekog od visokotemperaturnih supravodiča. Pare tekućeg dušika ohladit će tableticu na  $-196^{\circ}\text{C}$ , što je dovoljno da se u njoj pojavi supravodljivost. Kako supravodič odbija magnetsko polje, tabletica će lebdjeti iznad magneta [5].

## 2.1 Supravodiči tipa I – Meissnerov efekt

Supravodiči prve vrste uglavnom su čisti kemijski elementi koji pri hlađenju naglo prelaze u supravodljivo stanje i magnetsko polje ne prodire u njihovu unutrašnjost. Karakterizirani su kao lagani supravodiči jer na niskim temperaturama postaju supravodljivi. Puno manje su osjetljivi na nečistoće i imaju niže točke tališta. Pokazuju vrlo oštar prijelaz u supravodljivo stanje (sl.3) i savršen dijamagnetizam. Također ih karakterizira Meissnerov učinak. Za supravodiče prve vrste karakteristično je i to da ako okolno magnetsko polje postane prejako, odnosno veće od  $H_c$ , supravodljivost prestaje. Vrijednosti kritičnih magnetskih polja su  $B_c < 0.1 T$ .

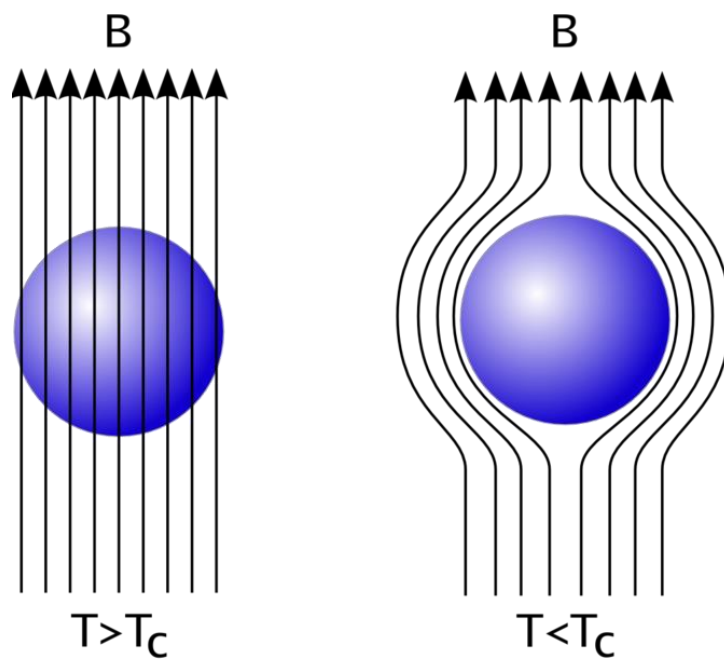


Sl. 3 Vrlo skokovit, oštar, prijelaz iz normalnog u supravodljivo stanje [5]

1933. godine Meissner i Ochsenfeld ispitivali su ponašanje supravodljivog materijala u vanjskom magnetnom polju. Otkrili su da se metali ohlađeni do supravodljivog stanja ponašaju kao savršeni dijamagneti, tj. u tankom površinskom sloju induciraju se struje koje stvaraju takvo magnetsko polje koje poništava vanjsko polje te je u unutrašnjosti supravodiča magnetsko polje jednako nuli,  $\vec{B}=0$  Ako se na primjer na materijal, koji može biti supravodljiv na temperaturama višima od 100 K, postavi lagani magnet i ako se materijal polije ukapljenim dušikom, magnet će se podići iznad njega i lebdjeti (sl.4) [7].



Sl. 4 Magnetska levitacija visokotemperaturnog supravodiča [8]



Sl. 5 Ako je temperatura iznad kritične, magnetske silnice prolaze kroz supravodljivi uzorak kao kroz normalne metale. Ako je temperatura ispod kritične, magnetske su silnice istisnute iz uzorka. To znači da je magnetska indukcija u supravodiču jednaka nuli. [5]

Općenito je magnetska indukcija  $B$  određena vanjskim poljem  $H$  i magnetizacijom  $M$ .

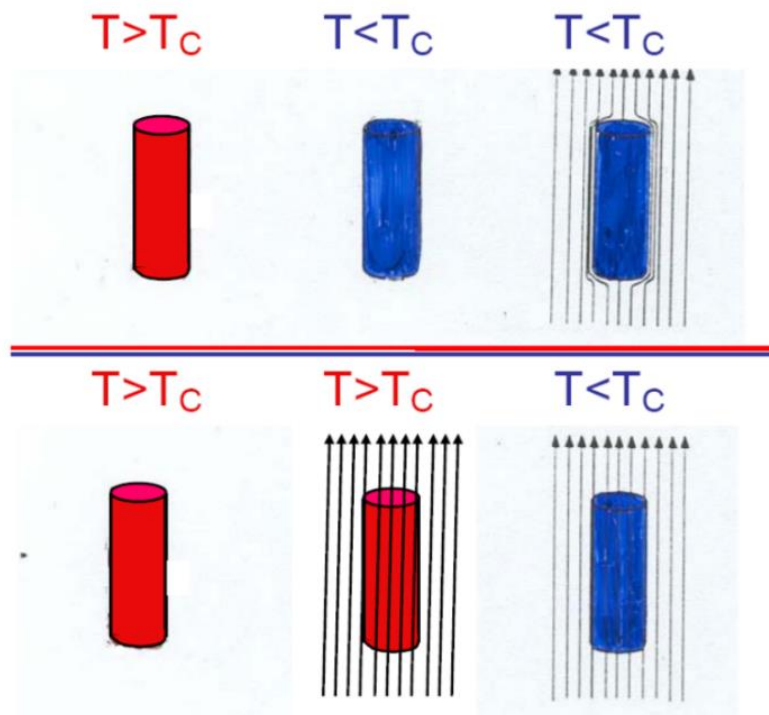
$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

Kada je temperatura veća od kritične temperature onda postoji magnetsko polje u supravodiču. Kada temperatura supravodiča padne ispod kritične temperature, uz uvjet da je magnetska indukcija  $B$  manja od kritične magnetske indukcije  $B_c$ , u supravodiču nema magnetskog polja, odnosno supravodič izbacuje magnetsko polje van. Supravodič je idealni dijamagnet. Javljaju se površinske struje koje proizvode magnetsko polje upravo takvo da poništava vanjsko polje unutar vodiča, a ta pojava se naziva Meissnerov efekt (sl.5).

Pojava da idealni vodič (otpor jednak nuli) izbacuje magnetsko polje može se objasniti Lenzovim pravilom. Kad se idealan vodič stavi u magnetsko polje, u njemu poteku struje koje stvaraju magnetsko polje koje se protivi promjenama koje ih stvaraju, a to je u ovom slučaju povećanje polja u vodiču. Kako je vodič idealan potekle bi struje koje bi stvorile magnetsko polje koje bi se u potpunosti poništilo s vanjskim poljem [5].

Supravodič se u magnetskom polju ponaša drugačije od vodiča. To možemo vidjeti na primjeru materijala koji se nalazi u magnetskom polju indukcije  $B$  i hladi dok ne postane supravodljiv. Pokusi pokazuju da da magnetsko polje pada na nulu unutar supravodiča unatoč Maxwellovim jednadžbama i Lenzovom pravilu da nema nikakve promjene magnetskog toka i magnetskog polja te da bi u njegovoj unutrašnjosti polje moralo ostati isto. Dakle, iako smo u početku imali materijal u kojem je postojalo magnetsko polje, supravodič izbacuje silnice magnetskog polja, a nakon prelaska u supravodljivo stanje u vodiču više nema polja,  $B=0$ .

Savršena vodljivost i supravodljivost, prikazano na sl. 6, nisu jednake s obzirom na ponašanje u magnetskom polju. Kod savršenog vodiča guši se vremenska promjena magnetske indukcije dok se kod supravodiča guši sama magnetska indukcija.



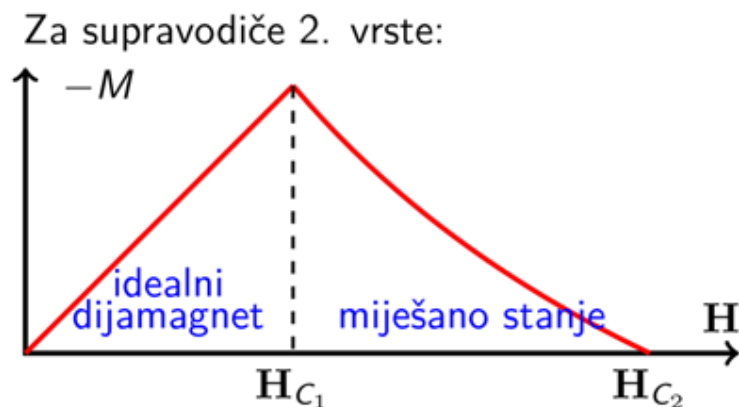
Sl. 6 Razlika između supravodiča i savršenog vodiča [5]

## 2.2 Supravodiči tipa II

Supravodiči mogu biti u 3 stanja:

- supravodljivom
- miješanom
- normalnom.

Supravodiči druge vrste otkriveni su nakon supravodiča prve vrste. Radi se uglavnom o kemijskim spojevima i slitinama. Oni za, razliku od supravodiča prve vrste, postupno prelaze u supravodljivo stanje, a u djelomično supravodljivom stanju u njima se oblikuju magnetni vrtlozi. To se događa iznad određene kritične jakosti polja  $H_{c1}$ . Gustoća vrtloga raste s povećanjem jačine polja. Pri jačem kritičnom polju  $H_{c2}$ , supravodljivost isčezava. Supravodiči tipa II ne pokazuju potpuni Meissnerov učinak [9].



Sl. 7 Prikaz kad supravodič, supravodljiv i idealan dijamagnet, prelazi u miješano stanje ("vortex state") [5]

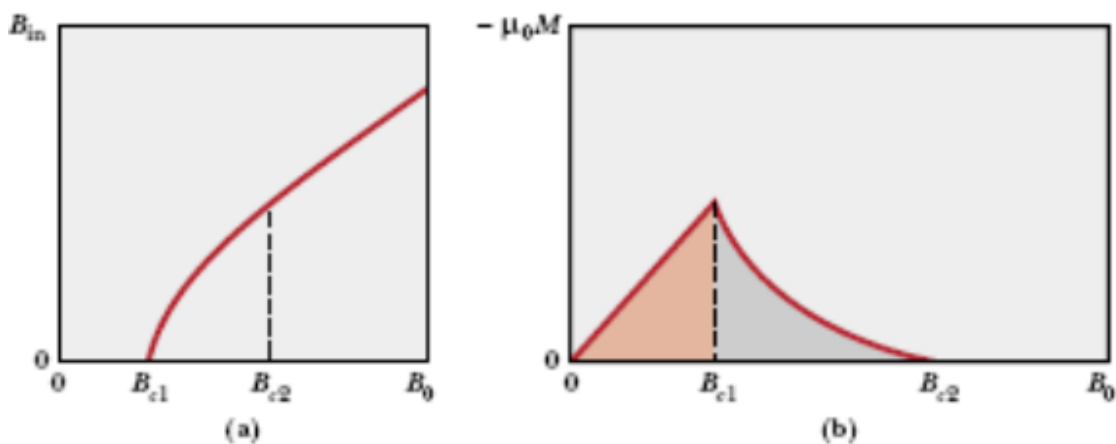
Izraz 'supravodiči tipa II' prvi je uveo fizičar Abrikosov u svome radu u kojem je predložio detaljnu fenomenološku teoriju o tim materijalima temeljenu na Ginzburg - Landau teoriji. Daljnjim razvojem fizike supravodiča, teorija je dobila obilnu eksperimentalnu provjeru. Izvorno je Abrikosova teorija dočekana s određenim skepticizmom. Međutim, prihvaćena je samo nekoliko godina kasnije, kad se pokazalo da može objasniti kompleksno ponašanje supravodljivih legura i spojeva na dosljedan način. Konkretno, ona je objasnila kritična polja nekih materijala.

1957. godine Abrikosov je predvidio drugačije ponašanje supravodiča u magnetskom polju, a zatim su i otkriveni supravodiči koji imaju dva kritična magnetska polja  $B_c$ . Kad je  $B < B_{c1}$  uzorak je supravodljiv i savršen dijamagnet kao i supravodiči tipa I. Kad je  $B_{c1} < B < B_{c2}$  uzorak materijala je u jednom miješanom stanju, tzv. vrtložnom stanju (*vortex state*) (sl.7) [6]. U tom stanju magnetsko polje ga ne provodi u normalno stanje, već ograničeno prodire u materijal ("cijev"). Postoji ograničeno magnetsko polje u materijalu koje je kvantizirano, a kvant tog polja zovemo flukson. Supravodiči prve vrste su gotovo svi čisti metali, a supravodiči druge vrste su različite legure.

Na mjestu gdje “cijev” magnetskog polja prolazi kroz uzorak vlada normalno stanje. Promjer tog područja je reda veličine dubine prodiranja, a izvan tog područja uzorak je u supravodljivom stanju.

Kako je prikzano na sl. 8, vanjsko polje  $B$  raste, raste i gustoća cijevi magnetskog toka dok konačno pri  $B > B_{c2}$  uzorak prelazi u normalno stanje.

Lokalizirana područja supravodljivosti postoje pri jako velikim poljima te se od takvih materijala mogu izraditi supravodljivi elektromagneti za iznimno jaka polja: LHC magnetski dipoli čije je magnetsko polje 9 T, magneti za NMR [10].



Sl. 8 Ovisnost magnetskog polja i magnetizacije u supravodiču tipa II u ovisnosti o vanjskom magnetskom polju [5]

### 2. 3 Ginzburg – Landau teorija

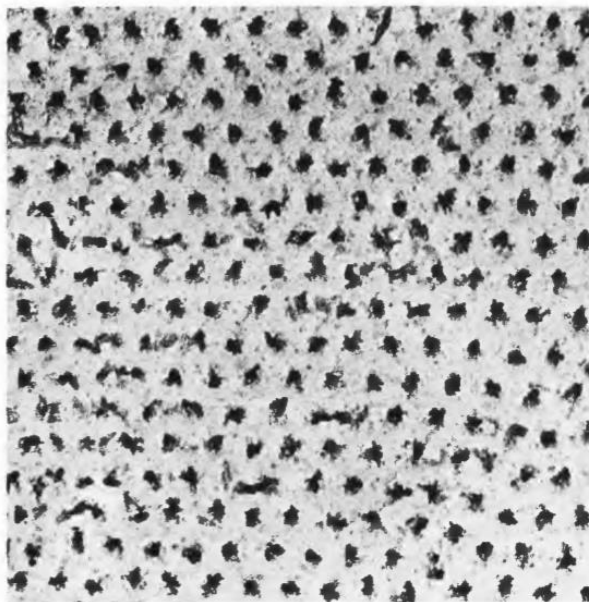
U originalnom su radu Ginzburg i Landau uočili postojanje dvije vrste supravodiča. Primjenom prevelikog magnetskog polja dolazi do sloma Meissnerovog stanja. Prema načinu na koji dolazi do tog sloma, supravodiči se mogu podijeliti u dvije klase.

U supravodičima tipa I, supravodljivost naglo isčezava kada se jakost primijenjenog polja poveća iznad kritične vrijednosti  $H_c$ .

U supravodičima tipa II, povećavanje primijenjenog polja izvan kritične vrijednosti  $H_{c1}$  dovodi do miješanog stanja (poznatog i kao vrtložno stanje) u kojem sve veća količina magnetskog toka prodire kroz materijal, ali ne postoji otpor protoku električne struje sve dok struja nije prevelika.

Pri drugom kritičnom polju  $H_{c2}$ , supravodljivost isčezava. Većina čistih supravodiča, osim niobija i ugljikovih nanocjevčica, su tipa I, dok su gotovo svi nečisti i složeni supravodiči tipa II.

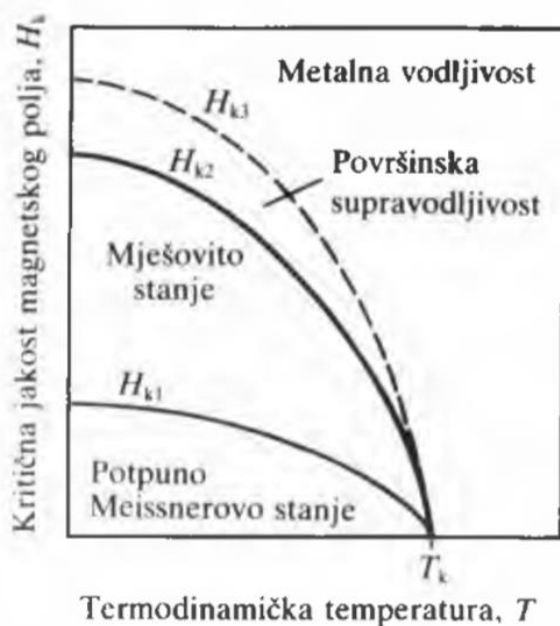
Najvažnije otkriće proizašlo iz teorije Ginzburg-Landau bilo je otkriće Alekseja Abrikosov 1957. On je koristio teoriju Ginzburg-Landau da objasni eksperimente na supravodljivim legurama i tankim filmovima. Otkrio je da u supravodičima tipa II u jakom magnetskom polju, polje prodire u trokutastu rešetku kvantiziranih cijevi fluorskih vrtloga. U središtu vrtloga nema supravodljivih elektrona, nego su tu elektroni u normalnom stanju. Kad jakost polja poraste iznad kritične jakosti magnetskog polja površinska se gustoća vrtloga množi i oni tvore pravilnu rešetku (sl. 9) [11].



Sl. 9 Magnetski vrtlozi na površini supravodiča opaženi feromagnetskom prašinom (povećanje 8300 puta) [7]



Kada polja dosegnu kritičnu vrijednost tj. vrijednost koja odgovara početku međusobnog prekrivanja vrtloga, supravodljivost nestaje u čitavoj unutrašnjosti supravodiča. sve do kritične vrijednosti polja  $H_{k3} > H_{k2}$ . Supravodič II. vrste pokazuje, dakle, potpuni Meissnerov efekt za  $H < H_{k1}$ , djelomični Meissnerov efekt za  $H_{k1} < H < H_{k2}$ , a u normalno stanje prelazi za  $H > H_{k2}$ , odnosno  $H > H_{k3}$  (sl. 10).



Sl. 10 Ovisnost kritične jakosti magnetskog polja o termodinamičkoj temperaturi,  $H_{k1}$  je kritična jakost magnetskog polja za pojavu Meissnerova stanja,  $H_{k2}$  za pojavu mješovitog stanja supravodljivosti te  $H_{k3}$  za pojavu površinske supravodljivosti [6]

### 3. SUPRAVODLJIVI MATERIJALI

Postoji više kriterija za klasificiranje supravodiča:

- prema fizičkim svojstvima: tip I i tip II
- prema teoriji koja ih objašnjava: konvencionalni (ukoliko za njih vrijedi BCS teorija ili njena preinaka) i nekonvencionalni
- prema kritičnoj temperaturi: visokotemperaturni ( $T_c > 77K$ ) i niskotemperaturni
- prema materijalu: kemijski elementi, slitine, keramike i organski supravodiči

Do sada je najvažnija primjena supravodljivih materijala bila u izgradnji magneta. Glavna prednost korištenja supravodljivosti je uklanjanje omskih gubitaka što smanjuje ukupnu potrebnu energiju, čak i uz dodatnu energiju potrebnu za rashlađivanje.

Važna daljnja korist je smanjenje veličine i težine magneta što je posljedica velike gustoće struje u supravodljivom materijalu i uklanjanja ionskih navoja (koji su obično potrebni u konvencionalnim magnetskim sustavima).

Kapitalni trošak sustava supravodljivosti često može biti niži od uobičajenog ekvivalenta, dijelom zbog smanjenja veličine, a dijelom i zbog toga što više nema potrebe za napajanjem strujom ili za sustavom za hlađenje vodom.

Kao posljedica ovih važnih prednosti, supravodljivi magnetski sustavi danas se koriste u mnogim područjima. U nekoliko grana eksperimentalne fizike i kemije, mala supravodljiva zavojnica postala je standardan alat za pretraživanje, a njena mogućnost trajnog načina rada posebna je vrijednost tamo gdje su potrebna stalna polja, na primjer u radu na nuklearnoj magnetskoj rezonanci [12].

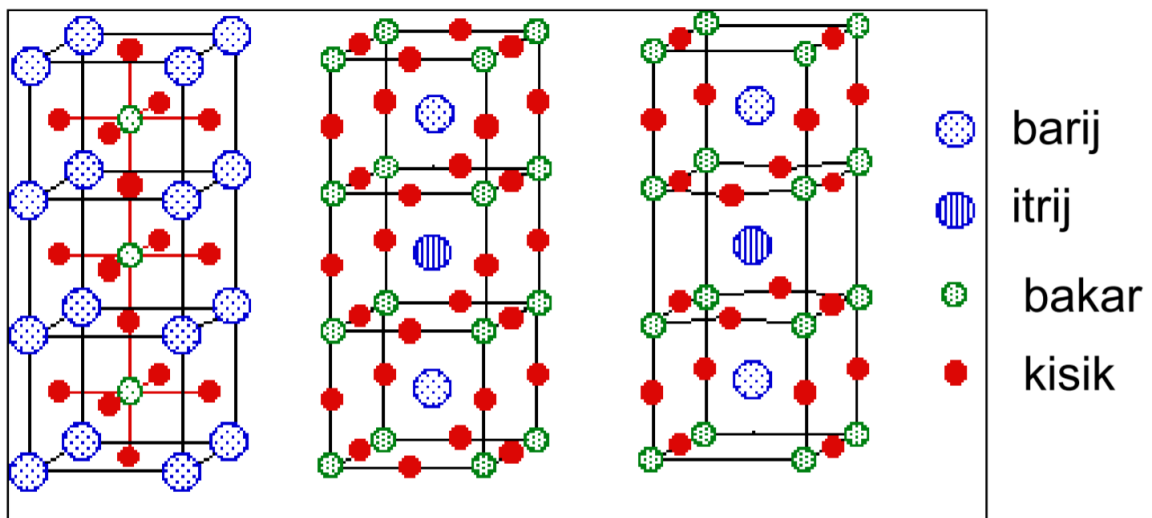
### 3.1 Kuprati

Kuprati imaju jakost kritičnog polja oko 100 T. Međutim, kuprati su krhke keramike čija je proizvodnja skupa i teško je od njih napraviti žice ili neki drugi korisni oblik. Unatoč tome, koriste se u proizvodnji jakih magneta raznih veličina. Fizičari su proučavanjem ponašanja ovih materijala na visokim temperaturama, nastojeći shvatiti uzrok supravodljivosti, otkrili novo svojstvo kuprata. Kretanje njihovih elektrona u sloju bakra i kisika potpuno se razlikuje od kretanja elektrona u komadu metalnog bakra. Umjesto slobodnog kretanja, elektroni se teško kreću i izbjegavaju jedni druge jer se električki odbijaju pa su ograničen na rubove kvadrata koji tvore slojeve: kažemo da su elektroni snažno povezani.

Svi kuprati imaju iste strukturne građevne blokove - slojevite ravnine bakrovog peroksida ( $\text{CuO}_2$ ) s kisikovim ionom koji se nalazi izvan slojevite ravnine, poznatim kao apikalni kisik. Taj kisikov ion nalazi se iznad svakog atoma bakra u ravnini  $\text{CuO}_2$ , poput plutače na površini vode. Ključna razlika između spojeva s kupratom je u tome što je drugi element povezan sa kisikom.

Između slojeva bakar oksida najčešće se nalaze itrij, barij, stroncij, bizmut, lantan, neodimij ili drugi elementi koji stabiliziraju spoj i imaju ulogu donora. Ravnine ne moraju biti kristalografski ekvivalentne, pa osnovna ćelija može imati jednu, dvije ili više ravnina. Tako se mogu tvoriti obitelji spojeva gdje su građevne jedinice iste, samo se mijenjaju njihovi stehiometrijski omjeri.

Struktura kuprata je perovskitna. Prikazano na sl.11, ravnine bakar oksida tvore pravokutne ćelije s  $\text{O}^{2-}$  ionima u vrhovima i s  $\text{Cu}^{2+}$  ionom u središtu. Dopiranje se postiže ubacivanjem pojedinog elementa na novu kristalografsku poziciju ili zamjenom elementa na već postojećoj, koja može biti i unutar i van bakar oksid ravnine [5].



Sl. 11 Perovskitna struktura, kubična rešetka na čijim vrhovima i u središtu nalaze se pozitivni metalni ioni [12]

### 3.2 Supravodiči temeljeni na željezu

Supravodiči temeljeni na željezu posjeduju slojeve željeza i kemijskih elemenata dušikove skupine kao što su arsen, fosfor ili nekog halogenog elementa. Zauzimaju mjesto iza kuprata prema kritičnoj temperaturi.

Supravodiči na bazi željeza (FeSC) su kemijski spojevi koji sadrže željezo čija su supravodljiva svojstva otkrivena 2006. Ranije su se supravodiči na visokim temperaturama bazirali i temeljili na bakru te slojevima bakra i kisika koji su zaostali između drugih tvari (La, Ba, Hg).

Postoji nekoliko vrsta supravodiča koji se temelje na željezu:

- $\text{LnFeAs}$  (O, F) ili  $\text{LnFeAsO}_{1-x}$  koji se označavaju kao 1111 materijali
- (Ba, K)  $\text{Fe}_2\text{As}_2$  i srodni materijali sa željezom – arsenskim slojevima koje označavamo kao 122 tvarima. Zamjenom željeza sa kobaltom u ovakvim materijalima ne narušava se supravodljivo svojstvo.
- $\text{LiFeAs}$  i  $\text{NaFeAs}$
- $\text{FeSe}$  sa malim van stohastičkim ili telurijским dopiranjem [9]

## 4. BCS TEORIJA

BCS teorija je dobila naziv prema početnim slovima američkih fizičara koji su je razradili – Bardeen, Cooper i Schrieffer.

Cooper je pokazao da će se vezivanje elektrona u parove dogoditi u prisutnosti privlačnog potencijala, čak i vrlo slabog. U konvencionalnim supravodičima privlačnost se obično pripisuje interakciji elektron-rešetka. BCS teorija, međutim, zahtijeva samo da potencijal bude privlačan, bez obzira na njegovo podrijetlo. U BCS teoriji, supravodljivost je makroskopski učinak koji nastaje kondenzacijom Cooperovih parova. Cooperovi parovi imaju neka bozonska svojstva, a bozoni pri dovoljno niskoj temperaturi mogu formirati veliki Bose-Einsteinov kondenzat. U mnogim supravodičima interakcija elektrona (neophodna za uparivanje) uzrokovana je neizravnom interakcijom između elektrona i vibrirajuće kristalne rešetke (fononi).

Elektron koja se kreće kroz vodič privući će obližnje pozitivne naboje u rešetki. Ova deformacija rešetke uzrokuje da se drugi elektron, sa suprotnim spinom, kreće u područje veće gustoće pozitivnog naboja. Dva elektrona tada postaju korelirani. Iz Paulijeva principa slijedi da će međudjelovati samo elektroni čije su energije približno jednake Fermijevoj energiji  $E_f$ . Najveća vjerojatnost sparivanja elektrona je kada su im valni vektori i spinovi suprotni. Takva dva elektrona nazivamo Cooperovim parom. Cooperove parove karakteriziraju kvantna stanja  $\vec{k} \uparrow$  i  $-\vec{k} \downarrow$ , rezultatni valni vektor je nula kao i rezultatni spin. Posljedica toga je da za njih vrijedi Bose–Einsteinova raspodjela, odnosno, za takve čestice ne vrijedi Paulijev princip pa se svi mogu nalaziti u istom kvantnom stanju [13].

Na dinamičku interakciju dvaju elektrona koji se gibaju vodičem utječe kulonsko odbijanje i prisutnost pozitivnih iona. Budući da postoji puno takvih elektronskih parova u supravodiču, ti se parovi vrlo snažno preklapaju i tvore visoko kolektivni kondenzat.

U ovom "kondenziranom" stanju, raspad jednog para promijenit će energiju cijelog kondenzata, a ne samo jednog elektrona ili jednog para. Dakle, energija potrebna za prekid bilo kojeg pojedinačnog para povezana je s energijom potrebnom za prekid svih parova (ili više od samo dva elektrona). Budući da uparivanje povećava ovu energetska barijeru, udarci oscilirajućih atoma u vodiču (koji su mali pri dovoljno niskim temperaturama) nisu dovoljni da utječu na kondenzat kao cjelinu ili bilo koji pojedinačni "član-par" unutar kondenzata. Na taj način elektroni ostaju upareni zajedno i odupiru se svim udarcima, a protok elektrona u cjelini (struja kroz supravodič) neće osjetiti otpor. Stoga je kolektivno ponašanje kondenzata ključni sastojak potreban za supravodljivost [14].

Samo godinu prije nego što je predložio teoriju BCS (1957.), John Bardeen dobio je Nobelovu nagradu iz fizike za izum tranzistora; imao je dugu i uglednu karijeru u teorijskoj fizici te je radio na problematici supravodljivosti više od dvadeset godina. BCS teorija bila je široko prihvaćena ubrzo nakon objave, ali postavljena su i neka pitanja primjenjuje li se elektronsko-fononski mehanizam na supravodiče prijelaznog metala. Do 1969. godine, kada je objavljen Parkov traktat o supravodljivosti, općeprihvaćeno je da BCS-teorija elektrona i fonona opisuje sve poznate supravodiče. Međutim, danas postoji najmanje deset različitih klasa materijala koje se ne mogu točno objasniti elektron-fonon mehanizmom i od kojih svaka zahtijeva svoj mehanizam ako pretpostavimo da je teorija BCS točna [15].

#### 4.1 Cooperovi parovi

U fizici kondenzirane materije Cooper je 1956. godine prvi put opisao par elektrona (ili drugih fermiona) povezanih na niskim temperaturama na određeni način. Cooper je pokazao da proizvoljno mala privlačnost između elektrona u metalu može uzrokovati da upareno stanje elektrona ima nižu energiju od Fermijeve energije, što implicira da je par vezan. U konvencionalnim supravodičima ta je privlačnost posljedica interakcija elektron-fonon [16].

Stanje Cooperovih parova je odgovorno za supravodljivost, kako je opisano u BCS teoriji koju su razvili John Bardeen, Leon Cooper i John Schrieffer za kojeg su dijelili Nobelovu nagradu 1972. godine.

Iako je Cooperovo uparivanje kvantni efekt, razlog za uparivanje može se vidjeti iz pojednostavljenog klasičnog objašnjenja. Elektron u metalu ponaša se kao slobodna čestica. Elektroni se odbijaju od drugih elektrona zbog svog negativnog naboja, ali privlače i pozitivne ione koji čine čvrstu rešetku metala. Ova privlačnost iskrivljava ionsku rešetku, lagano je skrećući prema elektronima, povećavajući gustoću pozitivnog naboja rešetke u blizini. Ovaj pozitivni naboj može privući druge elektrone. Na velikim udaljenostima, ovo privlačenje elektrona zbog izmještenih iona može nadvladati odbijanje elektrona zbog njihovog negativnog naboja i uzrokovati da se upare. Strogo kvantno mehaničko objašnjenje pokazuje da je učinak posljedica interakcije elektrona i fonona, pri čemu je fonon kolektivno gibanje pozitivno nabijene rešetke [17].

Fröhlich i Bardeen su nezavisno pokazali da međudjelovanje elektrona s fononima može inducirati dodatno elektron-elektron međudjelovanje zbog kojeg se elektroni privlače.

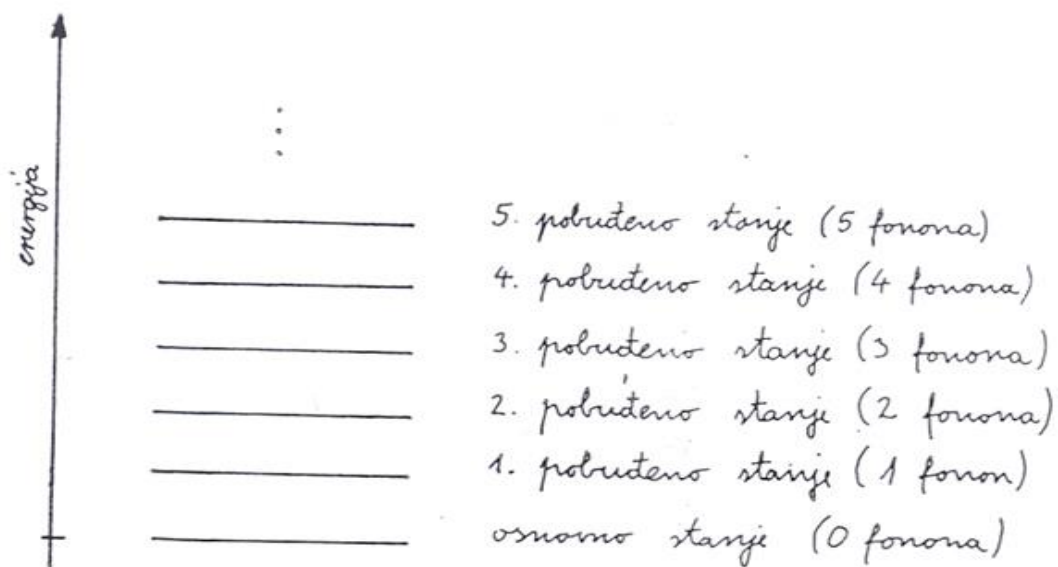
Budući da je frekvencija titranja kristalne rešetke

$$\omega \sim \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (2)$$

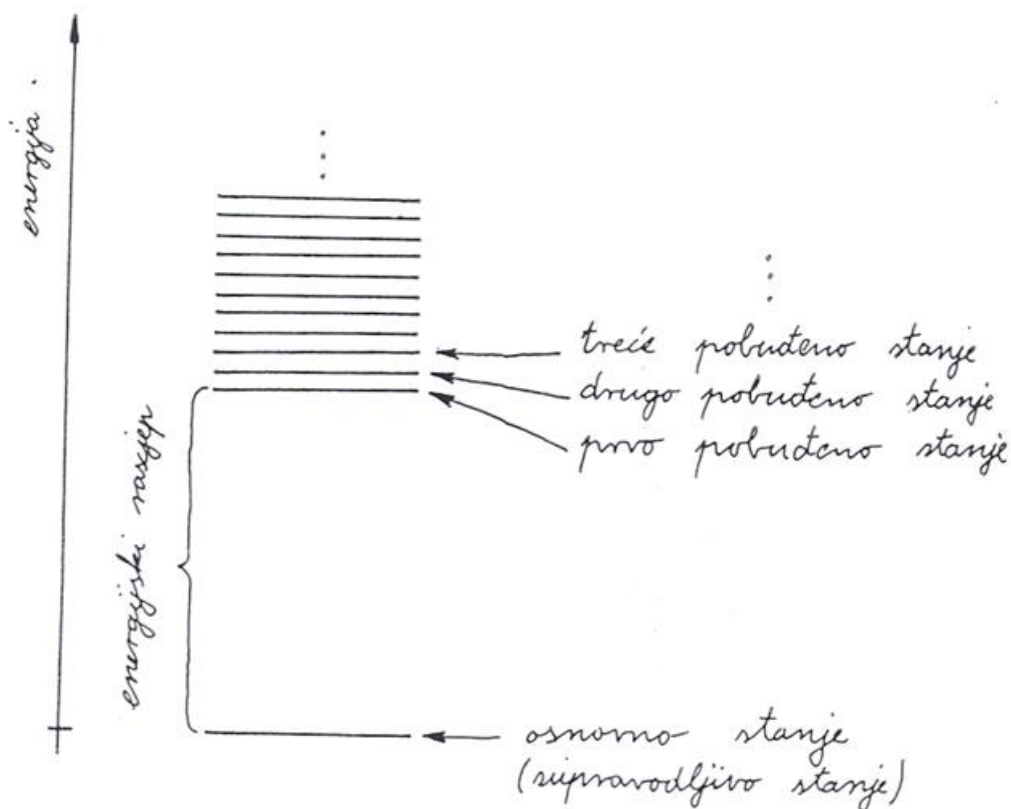
a prema izotopnom efektu

$$T_c \sim \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (3)$$

dolazimo do zaključka da je kritična temperatura supravodljivog prijelaza proporcionalna s frekvencijom titranja. Izotopni efekt pokazuje da titranje kristalne rešetke utječe na stvaranje supravodljivog stanja. Svojstva elektrona u supravodiču ovise o njihovu vezanju na fonone.



Sl. 12 Energijski spekter titranja rešetke [17]



Sl. 13 Energijski spekter supravodiča [17]

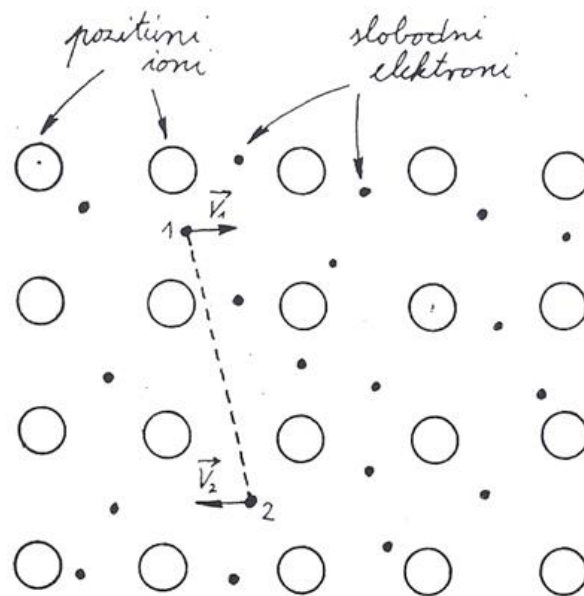


Stupanj pobuđenja kristalne rešetke mijenja se duž staze elektrona. Harmonički oscilatori, koji opisuju titranje kristalne rešetke, prelaze pod djelovanjem elektrona na nova kvantna stanja. Svaki takav prijelaz znači promjenu broja fonona (sl.12), a elektroni u vodiču mogu stvarati i poništavati fonone. Izmjenom fonona dolazi do privlačenja elektrona u vodiču. Prvi elektron emitira fonon, a drugi ga apsorbira. Apsorbiranje upadnog fotona od strane elektrona će se dogoditi tek onda kada elektron s dodatkom njegove energije može prijeći preko energijskog procijepa (sl. 13). Elektroni se učinkovito privlače kada privlačenje elektrona bude fononski inducirano i postane toliko snažno da prevlada kulonsko odbijanje. Zato je potrebno da veza između elektrona i fonona bude jaka i ako je taj uvjet ispunjen, stvorit će se supravodljivo stanje. Time postaje razumljivo zašto metali koji su u normalnom stanju dobri vodiči električne struje (plemeniti, alkalijski metali,...) nisu supravodiči. U normalnom stanju otpor metala to je manji što su elektroni slabije vezani na fonone. No, slaba elektron-fonon interakcija ne može inducirati dovoljno snažno elektronsko privlačenje koje bi omogućilo pojavu supravodljivosti [18].

Ako temperatura supravodiča nije previsoka, postojat će učinkovito privlačenje elektrona. Pri visokim temperaturama termičko pobuđenje će prevladati vezu između elektrona i time prevesti uzorak u normalno stanje.

Interakcijom s fononima energije elektrona mijenjaju se za male iznose, jer je tipična energija elektrona mnogo veća od energije fonona. Zbog Paulijeva principa to znači da međudjeluju samo elektroni kojima je energija približno jednaka Fermijevoj energiji  $E_F$ . Točnija analiza pokazuje da je vjerojatnost sparivanja elektrona maksimalna ako su im valni vektori i spinovi suprotni. Dva elektrona u supravodiču sa suprotnim valnim vektorima i suprotnim spinovima nazivamo Cooperovim parom (sl. 14).

Udruživanje elektrona u Cooperove parove valja shvatiti statistički. Elektroni prelaze iz jednih kvantnih stanja u druga. Zbog toga se mijenjaju i konstituenti Cooperova para. U nekom trenutku promatrani elektron vezan je s jednim elektronom, u sljedećem s drugim, pa s trećim, itd.

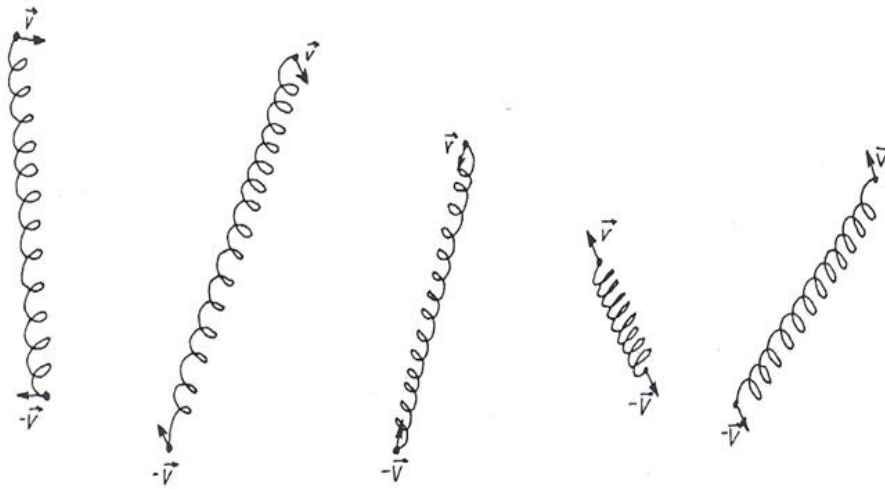


Sl. 14 Elektroni 1 i 2 se privlače i čine Cooperov par [17]

U supravodljivom stanju elektronski sustav sastavljen je od mnoštva Cooperovih parova, pri čemu se sastav svakog para neprestano mijenja. Teorija pokazuje da je tipična linearna dimenzija Cooperova para približno  $\delta \approx 10^{-6}$  m.

Udaljenost  $\delta$  nazivamo duljinom koherencije. Ona je desetak tisuća puta veća od prosječne udaljenosti između susjednih elektrona, koja približno iznosi  $10^{-10}$  m. Iz toga proizlazi da se u volumenu koherencije nalazi mnoštvo elektrona koji su također udruženi u Cooperove parove (sl. 15). Prekrivanje Cooperovih parova ističe kolektivni karakter fenomena supravodljivosti.

Kao čestice polucjelobrojnog spina, elektroni zadovoljavaju Paulijev princip. Za njih vrijedi Fermi-Diracova raspodjela. Vezanjem elektrona u Cooperove parove njihove statističke osobine bitno se mijenjaju. Rezultantni spin Cooperova para jest nula, a za čestice cjelobrojnog spina vrijedi Bose-Einsteinova raspodjela. Cooperovi parovi ne zadovoljavaju Paulijev princip. Zbog toga se svi Cooperovi parovi mogu nalaziti u istom kvantnom stanju [16].



Sl. 15 Mehanička usporedba s Cooperovim parom u uzastopnim trenucima [17]

Da bi se Cooperov par razdvojio na dva individualna elektrona, potrebno je energiju povisiti za određen iznos. Ta je energija jednaka energijskom procijepu. Dok se pri temperaturama iznad kritične temperature  $T_c$  pobuđena stanja kontinuirano nadovezuju na osnovno stanje, ispod kritične temperature pobuđena stanja odvojena su od osnovnog stanja energijskim procijepom. On je smješten oko Fermijeve energije. Što je manji omjer  $T/T_c$  to su elektroni u Cooperovu paru jače vezani, pa će energijski procijep biti širi. Širina energijskog procijepa najveća je pri temperaturi apsolutne nule. Povišenjem temperature energijski procijep postaje uži i u limesu  $T \rightarrow T_c$  teži prema nuli [17].

## 5. JOSEPHSONOV EFEKT

Josephsonov efekt je fenomen super struje, struje koja teče neograničeno dugo bez ikakvog napona koji se primjenjuje, preko uređaja poznatog kao Josephsonov spoj. To je uređaj koji se sastoji od dva ili više supravodiča povezanih tankom izolacijskom barijerom (poznato kao spojnica supravodič-izolator-supravodič) (sl.16), kratkim presjekom metala koji nije supravodljiv, ili fizičkim stezanjem koje oslabljuje supravodljivost u točki dodira.

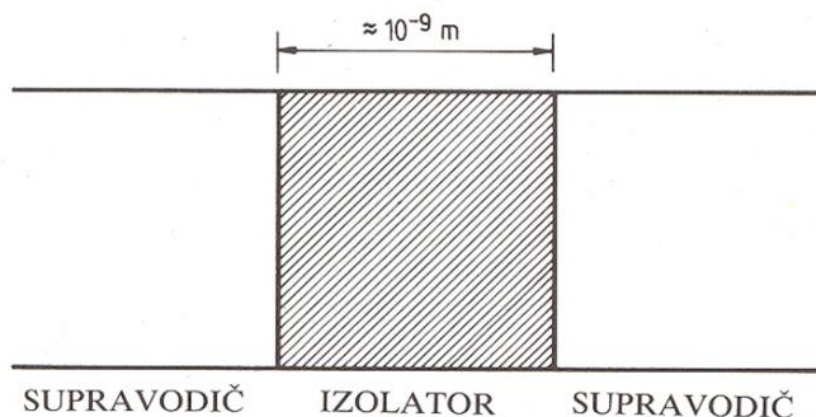
Josephsonovi efekti potvrđuju da su elektroni u supravodičima vezani u parove na način kako je to pretpostavila BCS teorija. Josephson je 1962. godine teorijski izveo dokaz da Cooperovi parovi mogu tunelirati kroz usku barijeru koja separira dva supravodiča. Tuneliranje je neposredna posljedica valne prirode Cooperovih parova.

Prije Josephsonovog predviđanja, bilo je samo poznato da normalni (tj. oni koji nisu supravodljivi) elektroni mogu prolaziti kroz izolacijsku barijeru pomoću kvantnog tuneliranja. Josephson je prvi predvidio tuneliranje Cooperovih parova. Za ovo djelo, Josephson je 1973. dobio Nobelovu nagradu za fiziku. Josephsonovi čvorovi imaju važnu primjenu u kvantno-mehaničkim krugovima, kao što su SQUID, supravodljivi kubit i RSFQ digitalna elektronika. [17].

### 5.1 DC Josephsonov efekt

Josephsonovi efekti potvrđuju da su elektroni u supravodičima vezani u parove na način kako je to pretpostavila BCS teorija. DC Josephsonov efekt je istosmjerna struja koja prelazi preko izolatora u nedostatku bilo kojeg vanjskog elektromagnetskog polja, uslijed tuneliranja. Ova DC Josephsonova struja proporcionalna je sinusu Josephsonove faze (fazna razlika u izolatoru, koja ostaje konstantna tijekom vremena), a može uzimati vrijednosti između  $-I_c$  i  $I_c$ .

U supravodiču Cooperovi parovi popunjavaju isto kvantno stanje. Oni su opisani istom valnom funkcijom precizno određene faze. Josephson je promatrao što se događa kada dva supravodiča razdvojimo uskim slojem izolatora. Debljina sloja je približno  $10^{-9}$  m, tj. ona je jednaka nekoliko međuatomskih razmaka.



Sl. 16 Skica supravodiča razdvojenih slojem izolatora [18]

Označimo fazu Cooperovih parova u prvom supravodiču s  $\phi_1$  a u drugom s  $\phi_2$ . Zbog uske barijere elektroni mogu prelaziti od jednog supravodiča do drugoga, a da se pritom Cooperovi parovi ne razdvoje na individualne elektrone. Iako su supravodiči odvojeni, Cooperovi parovi u oba supravodiča nastoje kolerirati svoje faze. Težeći uspostavljanju jedinstvenog sustava, faze Cooperovih parova u izolatoru kontinuirano se izjednačuju [17].

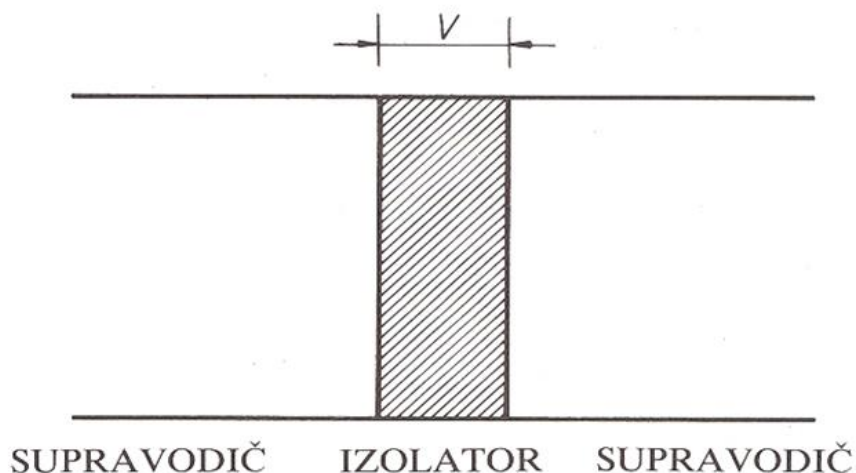
Pokazuje se da je struja u Josephsonovu spoju sinusna funkcija razlike faza u supravodičima:

$$I = I_{maks} \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (4)$$

pri čemu amplituda struje  $I_{maks}$  ovisi o parametrima barijere.

U Josephsonovom spoju tanki sloj izolatora dobiva svojstva supravodiča. Kroz njega teče električna struja bez djelovanja polja. Tuneliranje Cooperovih parova kroz potencijalnu barijeru izolatora određeno je razlikom faza valnih funkcija u supravodičima.

## 5.2 AC Josephsonov efekt



Sl. 17 Skica supravodiča u kojem postoji razlika potencijala [18]

AC (ili nestacionarni) Josephsonov efekt nastaje ako postoji konstantna razlika potencijala u spoju između supravodiča (sl. 17). Promjena energije Cooperova para koji je prošao kroz kontakt jednaka je produktu naboja para  $2e$  s razlikom potencijala  $V$ :

$$\Delta E = 2eV \quad (5)$$

Za razliku od normalnog metala, u kojemu se pri protjecanju struje energija vanjskog polja pretvara u toplinu, u supravodiču nema električnog otpora, pa se dobivena energija manifestira kao energija elektromagnetskog zračenja.

Energija  $\Delta E$  jednaka je energiji emitiranog fotona

$$\Delta E = \hbar\omega \quad (6)$$

iz čega slijedi da je

$$\omega = \frac{2eV}{\hbar} \quad (7)$$

Elektromagnetsko zračenje posljedica je protjecanja izmjenične supravodljive struje iste frekvencije. U Josephsonovu spoju konstantno električno polje proizvodi izmjeničnu struju. Mjerenjem izmjenične struje u AC Josephsonovu efektu možemo vrlo precizno izmjeriti napon ili omjer elementarnog naboja s Planckovom konstantom [19].

### 5.3 Primjena

Josephsonov efekt našao je široku primjenu, na primjer, u sljedećim područjima:

- SQUID (supravodljivi uređaj za kvantne smetnje) je vrlo osjetljiv magnetometar koji se koristi za mjerenje izuzetno suptilnih magnetskih polja, a temelji se na supravodljivim petljama koje sadrže Josephsonove spojnice. Primjenjuju se u znanosti i inženjerstvu.
- Supravodljivo kvantno računanje – implementacija kvantnog računala u supravodljivim elektroničkim krugovima
- RSFQ (*rapid single flux quantum*) - brz kvant jednostrukog toka digitalni je elektronički uređaj koji koristi Josephsonove spojeve za obradu digitalnih signala. U logici RSFQ informacije se pohranjuju u obliku kvantnog magnetskog toka i prenose se u obliku naponskih impulsa
- Jednoelektronski tranzistori često su izrađeni od supravodljivih materijala, što omogućava korištenje Josephsonovog efekta za postizanje novih učinaka. Rezultirajući uređaj naziva se "supravodljivim jednoelektronskim tranzistorom" [20].

## 6. TRENDOWI PRIMJENE SUPRAVODLJIVOSTI

Supravodljivost omogućuje prolaz struje kroz materijal bez otpora na temperaturi blizu apsolutnoj nuli. Također pokazuje Meissnerov učinak zbog kojeg supravodljivi materijal odbija magnetska polja. Primjena ove tehnologije izrazito je ograničena zbog visokih troškova korištenja helija za hlađenje materijala na kritičnoj temperaturi. Međutim, u posljednje vrijeme izumi visokotemperaturnih supravodiča doveli su do izvanrednih otkrića. Zahvaljujući jedinstvenom svojstvu nulte otpornosti, supravodljivost je dobila široku primjenu u raznim područjima znanosti i tehnologije. Danas se koristi u telekomunikacijama, medicini, transportu, obrani, prijenosu snage, itd.

### 6.1 Transport

Meissnerov efekt mogao bi se koristiti za levitaciju vlakova preko kolosijeka omogućujući im da dosegnu brzinu od oko 300 km / h. U 21. stoljeću ovaj se princip mogao primijeniti i na automobile za one koji često putuju. Teški predmeti bi se mogli brže pomicati niz montažne linije u tvornicama koristeći supravodljivu levitaciju.

Također je moguće koristiti supravodljive magnete za proizvodnju levitacijskog vlaka. Ideja je staviti jako snažne svjetlosne supravodljive magnete na vlak, a zatim koristiti bakrene zavojnice u pruzi koje koriste odbojnost da vlak podignu da bi levitirao. Ako se magnet pokreće iznad masivne metalne ploče, relativno gibanje magneta spram toga vodiča inducira u njemu napon, a ovaj pokreće struju usmjerenu tako da nastoji poništiti magnetsko polje. Magnetsko polje koje nastaje u vodiču približna je zrcalna slika magnetskog polja iznad njega. Ta zrcalna slika djeluje kao magnet suprotnog pola, pa se oni odbijaju. Tako se proizvodi potisna sila koja podiže magnet. U stvarnoj se izvedbi masivna ploča zamjenjuje trakom ili nizom zavojnica u kojima se kao i u metalnoj ploči inducira struja kad iznad njih prolazi magnet.



Magnetsko lebdenje nužno ne ovisi o upotrebi supravodljivih magneta, ali se njihovom upotrebom postiže veći razmak između vlaka i tračnica, pa i veća sigurnost, odnosno manji zahtjevi za izvedbu tračnica. Također je moguće koristiti magnetne kolosijeke za guranje vlaka. Kad se takav vlak giba, ne dolazi do trenja, koje se uvijek javlja kad su dva materijala (kotač i tračnica) u kontaktu. Trenje je izvor grijanja. Ono rezultira gubitkom energije, ali i ograničava brzinu vlakova zbog opasnosti za materijal od kojeg su načinjeni kotači. U slučaju levitirajućih vlakova trenja nema, pa se vlakovi gibaju brže i s manje gubitaka. Neizgodno je jedino što se pritom koriste supravodiči hlađeni tekućim helijem, pa su takvi vlakovi jako skupi te ih zbog toga malo ima.

Razlog sporog napredovanja tehnologije je to što iako je sam pogon maglev vlakova vrlo jeftin i isplativ, cijena izgradnje je vrlo visoka. Tako velika investicija je preveliki rizik. Cijena izgradnje same trase (linearni motor) je najveća stavka. Trenutno se radi na novim i jeftinijim načinima izgradnje trasa. Transrapid je njemački vlak velikih brzina koji koristi tehnologiju magnetske levitacije uz uporabu linearnog motora (sl.18). Jedina komercijalna uporaba je u Kini, povezujući šangajsku zračnu luku s gradom [20].



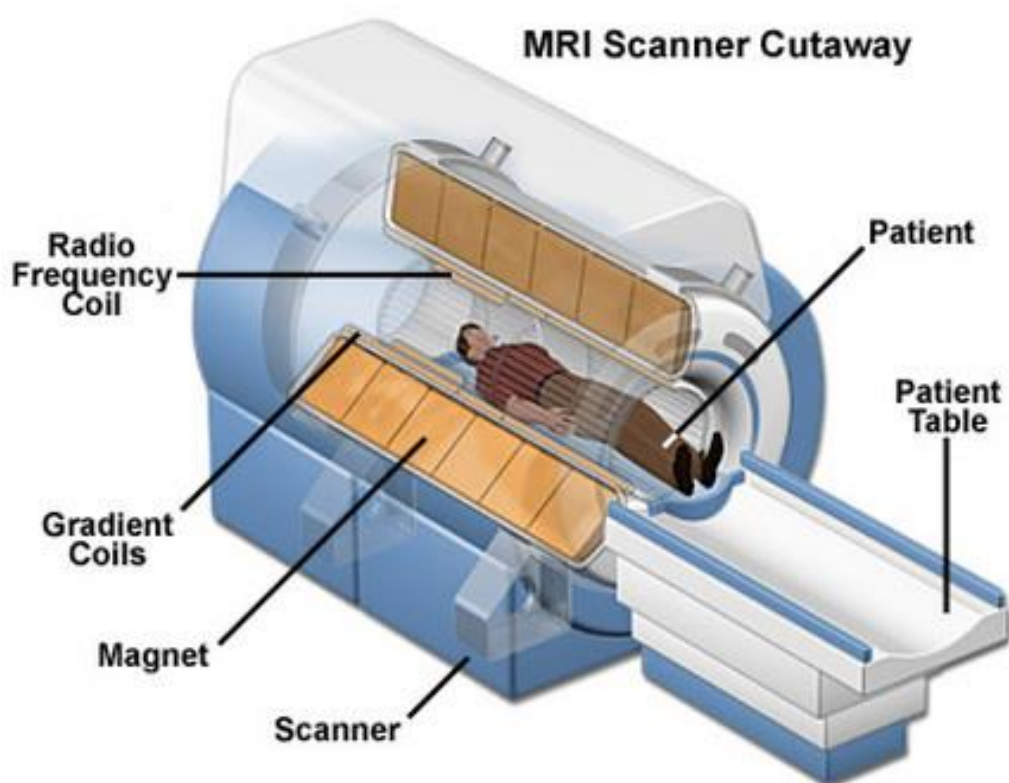
Sl. 18 Transrapid, njemačka verzija magnetno-levitacijskog vlaka [21]

## 6.2 Magneti za medicinsku dijagnostiku

Ključna značajka supravodiča je da on može bez problema voditi električnu struju zauvijek. Milijuni ljudi širom svijeta okruženi su supravodljivim magnetima, dok su tisuće MR uređaja (sl. 19) u svakodnevnoj upotrebi, a svaki sadrži desetine kilometara supravodljivih žica namotanih u postojani strujni elektricitet. Magnet se hladi tekućim helijem ili kriohlađenjem. Jednom kada je struja pohranjena u supravodljivoj zavojnici, magnetsko polje je vrlo stabilno. Konvencionalni MR oslanja se na činjenicu da protoni posjeduju spin i time magnetski moment. U MR stroju, radiofrekvencijski impuls magnetskog polja potiče protone kod pacijenta da obrađuju smjer statičkog magnetskog polja koji isporučuje supravodljivi magnet. Za stroj s poljem od 1,5 T, procesna frekvencija, koja je točno proporcionalna polju, iznosi oko 64 MHz. Ti magnetski momenti induciraju radiofrekvencijski napon u zavojnici prijemnika koja se pojačava i pohranjuje za naknadnu analizu. Kad bi magnetsko polje bilo jednoliko, svi bi protoni imali istu frekvenciju. U MRI sustavima, homogenost polja i stabilnost koju pružaju supravodljivi magneti neophodni su za postizanje razlučivosti, preciznosti i brzine potrebne za kliničko snimanje. Komercijalni MR sustavi djeluju na magnetskom polju između 0,5 i 7 T, ali ultrazvučni uređaji, do 11,7 T, razvijaju se za povećanje prostorne i vremenske razlučivosti s ambicioznim ciljem dekodiranja funkcioniranja našeg mozga. MR je postala klinički alat od velike važnosti i koristi se za pronalaženje nekih mjesta u mozgu koja su uključena u tjelesne funkcije ili misao [22].

Doktori izvode preglede pomoću magnetne rezonancije na pacijentima da bi ispitali meka tkiva kao što je hrskavica, membrane i moždano tkivo, bez potrebe za istraživačkom kirurgijom. Tijekom MR skeniranja pacijent je smješten unutar kružne komore. Elekromagneti napravljeni od supravodiča okružuju komoru proizvodeći veliko magnetsko polje koje uzrokuje da se jezgre vodika, u pacijentovom tkivu, poredaju u smjeru magnetskog polja.

Vodikova jezgra titra oko tog magnetskog polja kao zvrk koji je okreće oko svoje osi. Frekvencija tog kretanja ovisi o snazi magnetskog polja. Elektromagneti koji se sastoje od žičanih zavojnica, koji moraju izdržati vrlo velike struje bez topljenja, proizvode jako inducirano magnetsko polje. Supravodiči su upotrebljavani za izradu žičanih zavojnica zbog toga što supravodiči mogu provesti električnu struju bez otpora i bez zagrijavanja.



Sl. 19 Presjek uređaja za magnetsku rezonanciju [23]

### 6.3 Prijenos snage

Obzirom na svojstvo nultog otpora u supravodljivim žicama, svi bi se električni motori mogli poboljšati u učinkovitosti što je jedna od najznačajnijih primjena supravodljivosti. Ova značajka supravodiča iskorištena je između ostalog i kod izrade supravodljivih kabela. Do sada raspoložive supravodiče trebalo bi hladiti ukapljenim helijem proizvedenim u rashladnim stanicama raspoređenim uzduž kabela. Iako bi se izvedbom kabela ostvarila dobra toplinska izolacija kabela, ona nije potpuna, pa bi se toplina iz okoliša ipak prenosila na ukapljeni helij. Tu toplinu treba vratiti u okoliš da bi se održala potrebna niska temperatura supravodiča. Osim toga, kad protječe izmjenična struja kroz supravodič, pojavljuju se gubici energije u samom supravodiču.

Električni generatori, napravljeni učinkovitim korištenjem žica za supravodljivost, mogli bi tijekom noći pohraniti energiju u supravodljive zavojnice koje će se koristiti maksimalno tijekom dana. Ove zavojnice imale bi strujni tok bez ikakvog otpora ili izvora naponske energije koji se može pohraniti u bilo koje vrijeme, zauvijek.

Duboke promjene koje utječu na sektor električne energije, poput obnovljivih izvora energije i distribuirane proizvodnje, nude neviđenu priliku za transformaciju elektroenergetske infrastrukture. Visokotemperaturni supravodiči su potencijalno ključni u paketu tehnologija koje mogu pomoći modernizaciji mreže i povećati energetske sigurnost. Snažni novi supravodljivi generatori, kablovi velikog kapaciteta i ograničenja struje kvara su među rješenjima koja će poboljšati učinkovitost i pouzdanost proizvodnje, transporta i distribucije električne energije. U primjeni generatora, supravodiči pružaju tehnička rješenja za povećanje snage proizvodnje i smanjenje težine vjetrenjača, što će ujedno smanjiti proizvodnu cijenu električne energije iz obnovljivih izvora. Partneri europskog projekta ECOSWING testirali su prvu supravodljivu vjetrenjaču spoenu na električnu mrežu u Thyborønu u Danskoj [22].

Među svim primjenama visokotemperaturnih supravodiča, kablovi su vjerojatno najupotrebljiviji. Jedna od glavnih prednosti koja proizlazi iz upotrebe visokotemperaturnih supravodljivih kabela je njihova visoka gustoća snage.

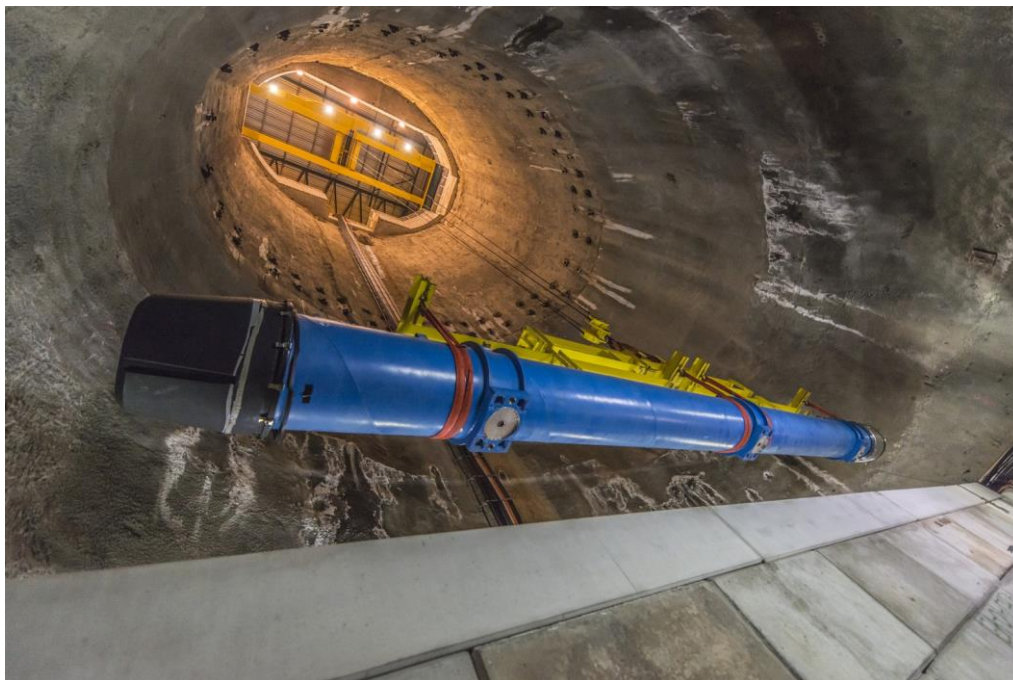
U zagušenim urbanim područjima, proširenje kapaciteta podzemnih stanica i dalekovoda može uključivati iskopavanje ulica i može biti skupo i razorno. Budući da supravodiči mogu provoditi veću količinu struje od konvencionalnih vodiča istog presjeka, pogodna upotreba za visokotemperaturne supravodljive kabele je njihova naknadna instalacija uz postojeće konvencionalni bakrene kablove. Projekt AMPACITY predstavlja izvanredan primjer: u gradu Essenu, u Njemačkoj, supravodljivi kabel od 10 kV-2,3kA ugrađen je u električnu mrežu grada od 2014. Kabel je pružio korisno rješenje u obliku optimizacije distribucijske mreže u središtu grada. To je ujedno i najduži supravodljivi kabel na svijetu dužine 1 km koji štedi prostor i distribuira 5 puta više električne energije od uobičajenih kabela. Tehnologija supravodiča nudi žice i kabele s manje gubitaka, poboljšava pouzdanost i učinkovitost električne mreže. [21].

#### 6.4 Supravodljiva računala

Razvijen je niz prototipnih računala temeljenih na brzim jednokružnim kvantnim (RSFQ) logičkim elementima. Elementi logičkih elemenata temeljenih na RSFQ-u već se koriste u digitalnim-analognim i analogno-digitalnim pretvaračima, visokotrpnim magnetometrima i memorijskim ćelijama. RSFQ elemente logike u tim računalima uglavnom upravljaju električnim impulsima. Optički kontrolirana logika je trend u nastajanju supravodljivih sustava. Supravodljiva računala bi temeljila svoj rad na supravodljivim mikroelektroničkim elementima, Josephsonovim spojevima kao sklopkama. Takva računala bila bi manja, brža i efikasnija u usporedbi sa današnjim računalima.

## 6.5 Akceleratori za visokoenergetsku fiziku

Supravodljivost je osnovna tehnologija koja je potaknula napredak u visokoenergetskim fizičkim akceleratorima i u termonuklearnim fuzijskim reaktorima. Veliki hadronski sudarač (LHC) u CERN-u koristi više od tisuću supravodljivih dipola (sl. 20) i četveropola, što odgovara oko 1200 tona Nb-Ti žica hlađenih na 1,9 K. LHC je izgrađen u 26,7 km dugom tunelu koji se prethodno koristio za LEP eksperiment. Protoni će se ubrzavati u nekoliko koraka korištenjem CERN-ovog kompleksa ubrzivača. Kako bi se moglo ubrzavati čestice u sinkrotronskom akceleratoru do vrlo visokih energija, poput onih na LHC-u, potrebni su vrlo jaki magneti i složeni sustav ubrzavanja. LHC koristi najnaprednije supravodljive magnete i ubrzivačke tehnike. Otkrivanjem Higgsovog bozona LHC je omogućio daljnju potvrdu standardnog modela fizike čestica. Ideja je ubrzati protone i antiprotone do gotovo brzine svjetlosti, a zatim ih sudariti. Da bi čestice bile u sudarivaču, potrebna su ogromna magnetska polja koja mogu stvoriti samo supravodiči [24].



Sl. 20 Zamjena jednog od LHC-ovih dipolnih magneta [23]

## 6.6 Supravodljivi senzori

Zbog suptilnosti kvantne mehanike djelovanja supravodiča s magnetskim poljem, moguće je napraviti najosjetljivije magnetometre nazvane SQUID (supravodljivi kvantni interferencijski uređaji). Pomoću njih mogu se otkriti podmornice, izmjeriti magnetsko polje koje proizvodi naš mozak, pronaći rudne naslage duboko pod zemljom, osjetiti minutne signale zvijezda itd [22].

Izuzetna osjetljivost SQUID-a čini ih idealnim za biološke studije. Na primjer, magnetoencefalografija (MEG) koristi mjerenja iz niza SQUID-ova da bi zaključila o neurološkoj aktivnosti unutar mozga. Budući da SQUID-ovi mogu raditi sa stopama akvizicije mnogo višim od najveće vremenske frekvencije od interesa za signale koje emitira mozak (kHz), MEG postiže dobru vremensku razlučivost. Drugo područje gdje se koriste SQUID-ovi je magnetska gastrografija koji se bavi snimanjem slabih magnetskih polja u želucu. Nova primjena SQUID-ova je metoda praćenja magnetskim markerima, koja se koristi za praćenje puta oralno primijenjenih lijekova. U kliničkom okruženju SQUID se koriste u kardiologiji za snimanje magnetskim poljem, koje otkriva magnetsko polje srca za dijagnozu i stratifikaciju rizika [20].

## 7. ZAKLJUČAK

Puno je toga što ne znamo o supravodljivim materijalima, a svakodnevno razvijamo nove primjene za supravodiče. Supravodiči su već iskorišteni u brojne svrhe i imaju ogroman potencijalni utjecaj na svakodnevni život. Ipak, objašnjenje supravodljivosti pokazalo se teškim. Sveobuhvatno teorijsko objašnjenje nije ponuđeno do 1957., gotovo pedeset godina nakon Onnesovog otkrića. I dok industrija razvija sve vrste praktičnih primjena za najnovije supravodiče, teorija koja stoji iza njih ostaje misterija.

Nada je da ćemo jednog dana upotrebljavati supravodljivost za prijenos snage, što bi dramatično smanjilo troškove energije u cijelom svijetu. Maglev vlakovi, koji koriste supravodljivost kako bi vlak lebdio iznad šine i tako eliminirao trenje koje ga može usporiti, mogu biti budućnost prijevoza.

Danas se najčešće koriste niskotemperaturni supravodiči kojima je potreban tekući helij za postizanje temperature prijelaza u supravodljivo stanje. Posljednjih godina proizvedeni su novi supravodljivi materijali, uključujući „visokotemperaturne supravodiče“, kojima je potreban samo tekući dušik ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) da bi se izazvala supravodljivost, a ne tekući helij ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tekući dušik je puno jeftiniji od tekućeg helija. Također, neki od glavnih problema s visokotemperaturnim supravodljivim materijalima koji su danas dostupni su taj da su oni krhka keramika, ne mogu se lako pretvoriti u žice, kablove ili druge korisne oblike. Problem koji sprečava širu primjenu supravodljivih kablova leži u teškom održavanju, nemogućnosti izvlačenja supravodljive keramike u kablove i visokoj cijeni srebra koje se koristi kao izolacija za takve kablove. Nove primjene supravodiča će se povećati s povećanjem supravodljive temperature. Mogućnost pronalaska supravodljivog materijala na sobnoj temperaturi omogućila bi njihovu upotrebu i u svakodnevnom životu.



## 8. LITERATURA

- [1] D. Babić, Supravodiči u nanoznanosti, Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu (2003.), str. 2 i 3
- [2] H. Kamerlingh Onnes, Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 120b, 122b, 124 c, Leiden (1911.)
- [3] Supravodljivost,  
[https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/Supravodljivost.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/Supravodljivost.pdf),  
pristupljeno 05.05.2020.
- [4] J.G. Bednorz and K.A. Muller, Z Phys. B 64, 189 (1986)
- [5] Dr. sc. Nikola Godinović, FESB, Moderna fizika, Predavanje 11, Supravodljivost, <https://www.scribd.com/presentation/329733709/MF-Supravodljivost>, pristupljeno 09.05.2020.
- [6] PMF Zagreb, Supravodljivost-način kompatibilnosti, pristupljeno 10.05.2020.
- [7] P. Kulišić, Sunčeva energija–Supravodljivost,  
<https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/supravodljivost.pdf>,  
pristupljeno 10.05.2020.
- [8] CERN,  
<https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/image/featured/2015/08/superconducting-magnets.jpg>, pristupljeno 05.05.2020,
- [9] S. Foner, B. Schwartz, Superconductor Materials Science: Metallurgy, Fabrication, and Applications, (1981.), ISBN 978-1-4757-0037-4
- [10] R.P. Huber, Magnetic Flux Structures in Superconductors, Springer Series in Solid-State Sciences vol. 6, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin (1979.), ISBN 978-3-662-02307-5
- [11] M. Cyrot, Ginzburg-Landau Theory for superconductors, Reports on Progress in Physics, Volume 36, Number 2 (1973)

- [12] Ivo Batistić, Fizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, Supravodljivost, fizika čvrstog stanja, predavanja 2013./2014.,  
[https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/FCS/24\\_pred.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/FCS/24_pred.pdf) ,  
pristupljeno 10.05.2020.
- [13] The Structure of Scientific Revolutions, 3rd Edition, TS Kuhn, The University of Chicago Press, (1996.), 13-15.
- [14] Bardeen J., Cooper LN, Schrieffer JR, Theory of superconductivity, Phys.Rev., 108, 1175-1204.
- [15] Allen P., Mitrović B., Theory of superconductivity  $T_c$ , Solid State Physics, 37, (1982.), 1-92.
- [16] Carlotte JC, Properties of boson-exchange superconductors, Rev. Mod. Phys., 62, (1990.), 1027-1157.
- [17] Supravodljivost, Odjel za fiziku, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, <https://slideplayer.gr/slide/15072689/>, pristupljeno 14.05.2020.
- [18] Lightman A., Gingerich O., When Do Anomalies Begin? Science 255, (1992.), 690-695.
- [19] R.Velavan, P. Myvizhi, Superconductors and its applications, <https://acadpubl.eu/hub/2018-119-12/articles/3/632.pdf>, pristupljeno 18.08.2020.
- [20] Transrapidunfall von Lathen, [https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapidunfall\\_von\\_Lathen](https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapidunfall_von_Lathen), pristupljeno 19.08.2020.
- [21] Prof. Carmine Senatore, UNIGE, Prof. Leonid Rivkin, <https://www.manep.ch/present-and-future-applications-of-superconductivity-particle-accelerators-medical-applications-and-beyond/>, pristupljeno 20.02.2020.
- [22] MRI Cutaway, [https://www.researchgate.net/figure/MRI-Scanner-Cutaway-5\\_fig3\\_275330507](https://www.researchgate.net/figure/MRI-Scanner-Cutaway-5_fig3_275330507), pristupljeno 19.08.2020.
- [23] I.F., Veliki hadronski sudarač, <https://blog.wor-con.com/svjetska-inzenjerska-cuda-veliki-hadronski-sudarac-lhc/>, pristupljeno 20.08.2020.

## 9. PRILOZI

### 9.1 Popis slika

Sl. 1 1 Ilustracija Kamerlingh Onnesova otkrića supravodljivosti i nestajanje električnog otpora 1911.godine .....	4
Sl. 2 Pregled supravodljivih metala u periodnom sustavu elemenata.....	5
Sl. 3 Vrlo skokovit, oštar, prijelaz iz normalnog u supravodljivo stanje.....	9
Sl. 4 Magnetska levitacija visokotemperaturnog supravodiča .....	10
Sl. 5 Magnetske silnice prolaze kroz supravodljivi uzorak.....	10
Sl. 6 Razlika između supravodiča i savršenog vodiča .....	12
Sl. 7 Prikaz kad supravodič, supravodljiv i idealan dijamagnet, prelazi u miješano stanje .....	13
Sl. 8 Ovisnost magnetskog polja i magnetizacije u supravodiču tipa II u ovisnosti o vanjskom magnetskom polju .....	14
Sl. 9 Magnetski vrtlozi na površini supravodiča opaženi feromagnetskom prašinom.....	15
Sl. 10 Ovisnost kritične jakosti magnetskog polja o termodinamičkoj temperaturi .....	16
Sl. 11 Perovskitna struktura, kubična rešetka na čijim vrhovima i u središtu nalaze se pozitivni metalni ioni .....	19
Sl. 12 Energijski spektar titranja rešetke .....	23
Sl. 13 Energijski spektar supravodiča.....	23
Sl. 14 Elektroni 1 i 2 se privlače i čine Cooperov par .....	25
Sl. 15 Mehanička usporedba s Cooperovim parom u uzastopnim trenucima ...	26
Sl. 16 Skica supravodiča razdvojenih slojem izolatora .....	28
Sl. 17 Skica supravodiča u kojem postoji razlika potencijala .....	29
Sl. 18 Transrapid, njemačka verzija magnetno-levitacijskog vlaka.....	32
Sl. 19 Presjek uređaja za magnetsku rezonanciju.....	34
Sl. 20 Zamjena jednog od LHC-ovih dipolnih magneta .....	37