

SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKA LEVITACIJA

Sundi, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:284144>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-23**

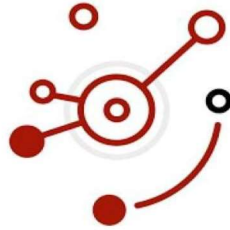


Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U
OSIJEKU ODJEL ZA FIZIKU**



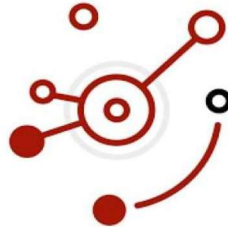
MATEJ SUNĐI

SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKA LEVITACIJA

Završni rad

Osijek, 2024.

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U
OSIJEKU ODJEL ZA FIZIKU**



MATEJ SUNĐI

SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKA LEVITACIJA

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi
stjecanja zvanja prvostupnika fizike

Osijek, 2024.

Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod mentorstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija Fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Denisu Staniću na podršci, pomoći i uputama pri izradi ovog završnog rada, kao i na pomoći i uputama prilikom izrade eksperimentalnog djela, te svojoj obitelji na podršci i pomoći tijekom cijelog prijediplomskog studija i izrade završnog rada.

Odjel za fiziku

SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKA LEVITACIJA

MATEJ SUNĐI

Sažetak

U prvom dijelu završnog rada objasnjeni su pojmovi supravodljivosti, Meissnerov efekta, BCS teorije, kao i Cooperovi parovi, Londonove jednačbe, te povijest magnetske levitacije i ona sama.

U drugom dijelu objašnjavaju se primjene supravodljivosti, kao i magnetske levitacije u stvarnom životu, susretanje sa odrađenim eksperimentima te objašnjenje Magleovog vlaka

Ključne riječi: Supravodljivost/ Meissnerov efekt/ BCS teorija / Cooperovi parovi

(26 stranica, 16 slika, 14 literaturih navoda)

Rad je pohranjen u Knjižnici Odjela za fiziku.

Mentor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Komentor:

Ocjenjivač:

Rad prihvaćen:

Department of Physics

SUPERCONDUCTIVITY AND MAGNETIC LEVITATION

MATEJ SUNĐI

Abstract

The first part of the Thesis explains the concepts of superconductivity, Meissner effects, BCS theories, as well as Cooper pairs, London equations, and the history of magnetic levitation.

The second part of the Thesis explains applications of superconductivity, as well as magnetic levitation in real life, encounters with experiments and the explanation of the Maglev train.

Key words: Superconductivity/ Meissner effect/ BCS Theory/ Cooper pairs

(26 pages, 16 pictures, 14 citations)

Thesis is deposited in the Library of the Department of Physics.

Supervisor: doc.dr.sc Denis Stanić

Comentor:

Reviewer:

Thesis accepted:

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI UVOD U SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKU LEVITACIJU	2
2.1 LONDONOVE JEDNDŽBE	5
2.2 GINZBURG-LANDAU TEORIJA	6
3. MAGNETSKA LEVITACIJA	7
3.1 POVIJEST MAGNETSKE LEVITACIJE	7
3.2 MEISSNEROV EFEKT	9
4. BCS TEORIJA	12
4.1 COOPERVI PAROVI	13
5. TIPOVI SUPRAVODIČA	14
6. PRIMJENA U STVARNOM ŽIVOTU	16
6.1 MAGNETNO LEVITACIJSKI VLAK (MAGLEV)	16
7. EKSPERIMENTALNI DIO	19
8. ZAKLJUČAK	23
9. LITERATURA	24
10. ŽIVOTOPIS	26

1. UVOD

Supravodljivost je fenomen u kojem materijali pokazuju nulti električni otpor kada se ohlade ispod određene temperature, poznate kao kritična temperatura. Supravodljivost omogućava struji da teče kroz materijal bez gubitka energije, što je u suprotnosti s ponašanjem običnih vodiča, gdje se energija gubi kao toplina zbog otpora.

Jedna od ključnih karakteristika supravodljivih materijala je Meissnerov efekt, koji se javlja kada supravodljivi materijal istisne magnetsko polje iz svoje unutrašnjosti. Ovaj efekt omogućava magnetsku levitaciju, pri čemu magnet može lebdjeti iznad supravodljivog materijala. Magnetska levitacija koristi se u različitim tehnološkim primjenama, a najpoznatija je u maglev vlakovima, koji koriste supravodljive magnete za postizanje izuzetno visokih brzina uz minimalno trenje. Magnetsku levitaciju ćemo upoznati kasnije nešto detaljnije.

Postoje dvije vrste supravodljivih materijala: konvencionalni i visokotemperaturni supravodiči. Konvencionalni supravodiči, poput žive, zahtijevaju izuzetno niske temperature, dok visokotemperaturni supravodiči, poput keramike, mogu postati supravodljivi na višim temperaturama, iako još uvijek daleko ispod sobne temperature.

Eksperiment u fizici je vrlo važan alat u proučavanju, spoznavanju i shvaćanju svakodnevnih pojava u prirodi. U današnje vrijeme eksperimenti se provode u svim granama znanosti, te potiču bolje razumijevanje, shvaćanje i zanimanje studenata. Upravo takve eksperimente obavili smo za magnetsku levitaciju i supravodljivost, kako bi što detaljnije ušli u temu i pokušali objasniti na najbolji način.

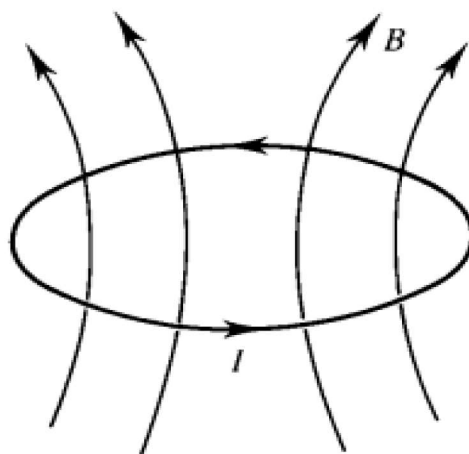
Primjena supravodljivosti se proteže daleko izvan magnetske levitacije. Na primjer, supravodljive zavojnice koriste se u medicinskoj tehnologiji za stvaranje jakih magnetskih polja u uređajima za magnetsku rezonancu (MRI). Također, istraživanja u oblasti supravodljivosti obećavaju razvoj energetske efikasne električne mreže, snažnih akceleratora čestica i kvantnih računala.

Supravodljivost i magnetska levitacija predstavljaju revolucionarne koncepte s velikim potencijalom za budućnost, omogućavajući napredne tehnologije koje mogu transformirati transport, energetiku i medicinu.

2. TEORIJSKI UVOD U SUPRAVODLJIVOST I MAGNETSKU LEVITACIJU

Supravodljivost je 1911. u Leidenu otkrio H. Kamerlingh Onnes, samo tri godine nakon što je prvi put ukapljio helij i imao tehnologiju hlađenja potrebnu za postizanje temperatura od nekoliko Kelvinovih stupnjeva. Desetljećima je mnogim znanstvenicima koji su radili na ovom polju nedostajalo temeljno razumijevanje ovog fenomena. Zatim se u 1950-im i 1960-im godinama pojavila vrlo cjelovita i zadovoljavajuća teorijska slika klasičnih supravodiča. Ta situacija je preokrenuta 1986. otkrićem nove klase visokotemperaturnih supravodiča od strane Bednorza i Mullera, i tema je ponovno oživljena. Čini se da novi supravodiči slijede istu opću fenomenologiju kao i klasični supravodiči, ali temeljni mikroskopski mehanizmi ostaju otvoreno i kontroverzno pitanje u vrijeme objavljivanja otkrića.

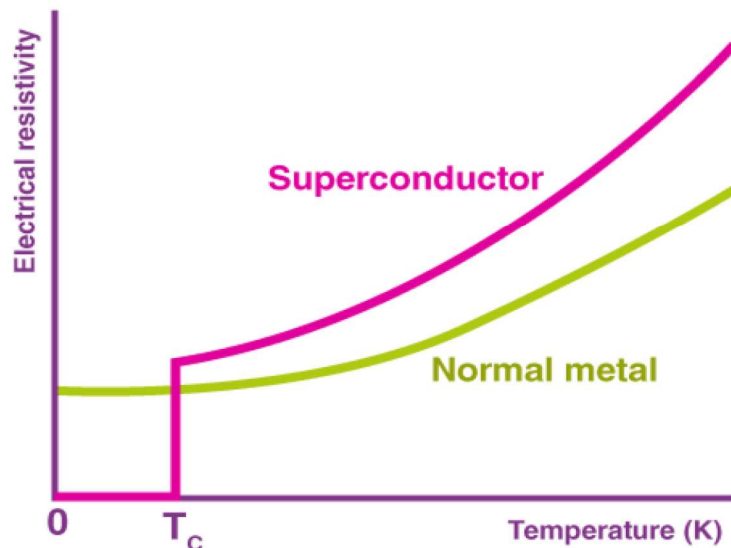
Osnovni fenomen koji je Kamerlingh Onnes primijetio je da električni otpor raznih metala kao što su živa, olovo i drugi potpuno nestaje u malom temperaturnom rasponu karakterističnom za kritičnu temperaturu materijala, T_c što je jedna od karakteristika materijala. Potpuni nestanak otpora najbolje je prikazan eksperimentalnim pokusima sa stalnim strujama u supravodljivim prstenovima, kao što je shematski prikazano na slici 1.[1,2]



Slika 1. Shematski dijagram eksperimenta sa stalnom strujom. [2]

Nakon takvih eksperimentalnih pokusa u kojima su takve struje uspostavljene, promatrano je da teku godinu dana bez ikakvog mjerljivog smanjenja, a korištenjem nuklearne rezonancije za otkrivanje bilo kakvog (čak i neznatnog) smanjenja magnetskog polja koje stvara cirkulirajuća struja, određena je donja granica od oko 10^5 godina za njihovo karakteristično vrijeme raspadanja.

Supravodljivost se definira kao svojstvo potpunog nestanka električnog otpora u čvrstim tvarima kada se ohlade ispod karakterističnih temperatura. Ova temperatura se zove temperatura prijelaza ili kritična temperatura.[1,2,3]

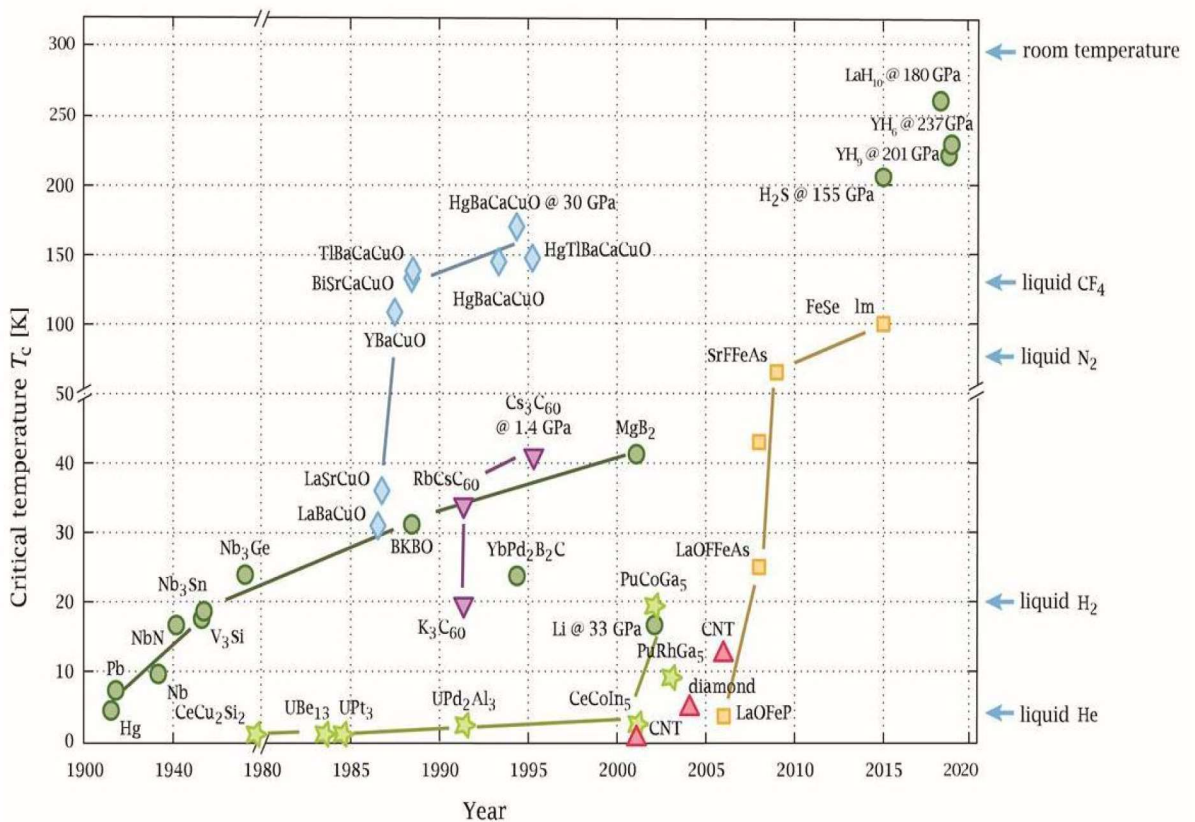


Slika 2. Prikaz kritične temperature supravodljivih materijala. [2]

Ključne značajke u mnogim supravodičima je izbacivanje magnetskih polja, tj. ispod temperature prijelaza, oni pokazuju savršen dijamagnetizam. Suprotno rečeno, supravodiči ne dopuštaju postojanje nikakvog magnetskog polja unutar njih. Kada materijal postane supravodljiv, on izbacuje svako magnetsko polje iz svoje unutrašnjosti (Meissnerov efekt). To čini supravodiče potpuno idealnim dijamagnetima, uzrokujući da odbijaju vanjska magnetska polja i rezultiraju efektima poput magnetske levitacije.[2,4]

Supravodljivost je kvantni fenomen. Elektroni u supravodiču grupirani su u parove poznate kao Cooperovi parovi. Ovi se parovi koherentno kreću kroz materijal bez rasipanja, dopuštajući nulti otpor.

Svaki supravodljiv materijal ima neku kritičnu temperaturu, a ispod te kritične temperature materijal postaje supravodljiv. Kritična temperatura je različita za različite materijale. Neki materijali poput žive imaju vrlo niske kritične temperature; oko 4K. Visokotemperaturni supravodiči mogu biti određena vrsta materijala koji će pokazivati supravodljivost na mnogo višim temperaturama od konvencionalnih, ali su još uvijek ispod sobne temperature.[4,5]



Slika 3. Porast kritične temperature supravodiča različitih materijala tijekom godina [6]

2.1 LONDONOVE JEDNDŽBE

Dva temeljna elektrodinamička svojstva koja supravodljivost čine jedinstveno privlačnim lijepo su opisala braća F. i H. London 1935., koji su predložili dvije jednadžbe koje upravljaju mikroskopskim električnim i magnetskim poljima.[2]

$$E = \frac{\partial}{\partial t} (\Delta J_s)$$

$$h = -c \nabla \times (\Delta J_s)$$

$$\Delta = \frac{4\pi\lambda}{c^2} = \frac{m}{n_s e^2}$$

gdje je Δ fenomenološki parametar. Očekuje se da će n_s (gustoća supravodljivih elektrona) kontinuirano varirati od nule pri T_c do granice reda veličine n gustoće vodljivih elektrona pri $T \ll T_c$. Također, uveli smo konvenciju označavanja gdje se h koristi za označavanje vrijednosti gustoće magnetskog toka na mikroskopskoj razini, E za označavanje električnog polja i J_s za gustoću struje dok je B rezervirano za označavanje makroskopskog prosjeka, a c brzina svjetlosti u vakuumu. [2]

Prva od ovih jednadžbi opisuje savršenu vodljivost, budući da bilo koje električno polje ubrzava supravodljive elektrone umjesto da jednostavno održava njihovu brzinu u odnosu na otpor, kao što je opisano Ohmovim zakonom u običnim vodičima. Druga Londonova jednadžba kombinirana sa Maxwelllovom jednadžbom $\nabla \times h = 4\pi J/c$ daje:

$$\nabla^2 h = \frac{h}{\lambda^2}$$

To implicira da magnetsko polje eksponencijalno opada u unutrašnjosti uzoraka s dubinom prodiranja λ (Meissnerov efekt). Parametar λ je stoga operativno definiran kao dubina prodiranja magnetskog polja u supravodič; empirijski, temperaturna ovisnost od λ može se grubo opisati na sljedeći način:

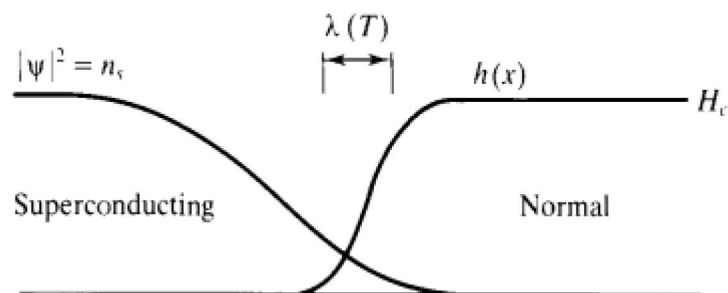
$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-1/2}$$

2.2 GINZBURG-LANDAU TEORIJA

Taj je smjer utjelovljena Ginzburg-Landauova teorija supravodljivosti, koja se u potpunosti usredotočila na supravodljive elektrone, a ne na ekscitacije, a zapravo je predložena 1950., sedam godina prije BCS-a. Ginzburg i Landau uveli su složenu pseudovalnu funkciju ψ kao parametar reda u općoj Landauovoj teoriji faznih prijelaza drugog reda. Ovaj ψ opisuje supravodljive elektrone, a lokalna gustoća supravodljivih elektrona (kako je definirano u Londonovim jednadžbama) dana je izrazom:

$$n_s = |\psi(x)|^2.$$

Kada je prvi put predložena, teorija se činila prilično fenomenološkom i njena se važnost općenito nije cijenila. Međutim, 1959. Gor'kov je uspio pokazati da je GL teorija, zapravo, ograničavajući oblik mikroskopske teorije BCS-a (prikladno generaliziran za rješavanje prostorno promjenjive situacije), vrijedi u blizini T_c , u kojoj je ψ izravno proporcionalan parametaru energijskog procijepa Δ . Više fizički, ψ se može smatrati valnom funkcijom centra mase Cooperovih parova. GL teorija je sada univerzalno prihvaćena kao majstorski potez fizičke intuicije koja na jednostavan način utjelovljuje makroskopsko kvantno-mehaničku prirodu supravodljivog stanja koje je presudno za razumijevanje njegovih jedinstvenih elektrodinamičkih svojstava.[2,5]



Slika 4. Poveznica između supravodljive i normalne domene u međustanju [2]

3. MAGNETSKA LEVITACIJA

Magnetska levitacija, ili maglev, je metoda podizanja objekta pomoću magnetskog polja bez ikakvog kontakta s površinom ispod. U ovoj tehnologiji, magnetska sila se koristi za suzbijanje ili ravnotežu sile gravitacije tako da objekti mogu slobodno lebdjeti ili kliziti bez ikakvih suprotnih sila. Koncept se temelji na odbijanju između istoimenih magnetskih polova (sjever-sjever ili jug-jug). Ako su magneti ispravno postavljeni, oni će uzrokovati držanje objekta u stabilnom levitiranom položaju.

Pogledajmo primjer maglev vlakova. Magnetni na vlaku i setovi magnetna na tračnicama međusobno se odbijaju i tako podižu vlak iznad tračnica. Magnetizam djeluje na takav način da se istoimeni polovi odbijaju, a ta se odbojna sila može iskoristiti za držanje predmeta na određenoj visini. Magnetsko polje je ono koje je odgovorno za stabilnost, a to se mora postići stabilizacijom predmeta na toj visini uz preciznu kontrolu magnetskih sila. Dinamička kontrola levitacije može se postići pomoću elektromagneta. Prolaz struje kroz elektromagnet uzrokuje stvaranje magnetskog polja. U slučaju da je struja različite jakosti, jakost rezultirajućeg magnetskog polja također varira, što omogućuje točnu regulaciju visine i položaja objekta. Za Maglev vlakove, ovo je jako važno jer se elektromagnetska sila mora stalno mijenjati kako bi vlak ostao u zraku dok se kreće.[7,8,9]

3.1 POVIJEST MAGNETSKE LEVITACIJE

800. godine prije nove ere prvi put su otkriveni magnetski fenomeni u Europi i Kini. Grci su u blizini grada Magnesia otkrili crni mineral koji je privlačio željezne ljuskice, a po gradu je mineral nazvan magnetit. [9,10]

Prema Pliniju, prva osoba koja je koristila magnet bio je egipatski arhitekt Sinokrat, koji je počeo graditi strop od magnetskih materijala u hramu u Aleksandriji. Na taj je način želio da magnetski strop privuče željezni kip, kako bi željezni kip lebdio. Do 100. godine prije Krista, Kinezi su znali da je plosnati magnet postavljen u smjeru sjever-jug, te da se tako postavljen magnet može okretati, što je bilo od velikog značaja za mornare koji su ga koristili za navigaciju.

Prvi magnetski kompas izumili su Kinezi za vrijeme dinastije Han davne 206. godine pr. Kasnije ga je u navigacijske svrhe usvojila dinastija Song tijekom 11. stoljeća, a kasnije u zapadnoj Europi i Perziji u 13. stoljeću. Izdubili bi magnet u obliku žlice i stavili bi ga na ravnu kamenu ploču s drškom okrenutom prema jugu.



Slika 5. *Izgled prvog kompasa [10]*

U 13. stoljeću Petrus Peregrinus Maricurtensis je uočio da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni da se privlače. Početkom 20. stoljeća francuski inženjer Emile Bachelet iznio je ideju o maglevu pomoću izmjenične struje za levitaciju objekata. Iako je to bio pionirski rad na magnetskoj levitaciji koji će na kraju biti i praktično realiziran, suvremena tehnološka ograničenja nisu dopuštala njezin daljnji razvoj. U roku par godina njemački inženjer Hermann Kemper došao je na ideju o elektromagnetskom levitacijskom vlaku i dobio patent za "magnetski vlak". Iako u to vrijeme nije bilo praktičnih sustava, njegove su ideje bile ključne za razvoj tehnologije maglev.[7,10]

Japan je bio jedna od prvih zemalja koja je započela ozbiljno istraživanje maglev tehnologije. Sustave levitacije razvili su 1960-ih istraživači u Japanu.

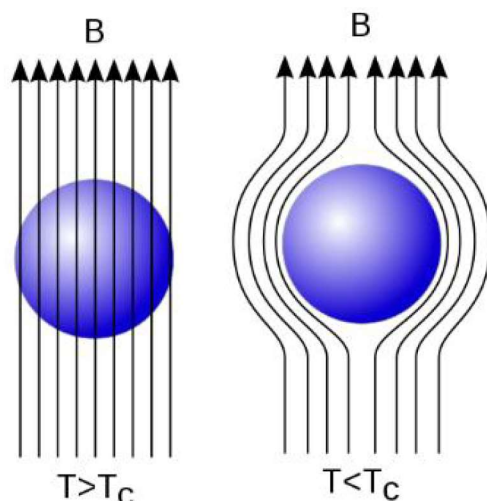
Do 1970-ih, prototipovi prvih maglev vlakova testirani su u Japanu. Japan je 1972. predstavio jedinstveni uspješan model maglev koji koristi elektrodinamičku levitaciju (EDL) koja omogućuje levitaciju na malim visinama iznad tračnica pri vrlo velikim brzinama. Istodobno je Zapadna Njemačka razvijala vlastiti sustav maglev. Thyssen Henschel je 1971. napravio prvi maglev prototip u Njemačkoj koristeći tehnologiju elektromagnetske levitacije (EML). To je omogućilo vlaku da lebdi iznad svojih tračnica uz pomoć snažnih elektromagneta.[7,10]

3.2 MEISSNEROV EFEKT

U supravodičima ispod kritične temperature događa se još jedna pojava poznata kao Meissnerov efekt, gdje supravodič izbacuje sva magnetska polja iz sebe. Jedna od njegovih najpoznatijih demonstracija je da Meissnerov efekt uzrokuje da magnet lebdi iznad supravodiča.

Na temperaturama iznad T_c , niti jedan supravodič neće odgurnuti magnetsko polje budući da magnetsko polje može otvoreno prodrijeti u supravodič. Supravodič na kritičnoj temperaturi ili ispod nje uzrokuje da primijenjeno vanjsko magnetsko polje ne prolazi kroz supravodič, već se zakrivljuje oko njega. Razlog tome je što pod djelovanjem vanjskog magnetskog polja, površinske supravodljive struje induciraju teći stvarajući magnetizaciju unutar supravodiča. To se proteže sve do izbacivanja linija magnetskog toka, pri čemu su one jednake i suprotne primijenjenom magnetskom polju tako da ga poništavaju posvuda unutar mase materijala. To mu daje savršen dijamagnetski odgovor (magnetska susceptibilnost je -1). Dok većina materijala pokazuje neki oblik dijamagnetizma, on je zanemariv; supravodiči se svrstavaju u jake dijamagnete. Za dijamagnete, budući da imaju magnetizaciju koja se suprotstavlja svakom primijenjenom magnetskom polju, supravodič se odbija od magnetskog polja. Ako postavimo magnet iznad supravodiča, događa se da ta odbijajuća sila može biti jača od gravitacijske. Ali ne dopušta stabilnu levitaciju magneta iznad supravodiča. Konfiguracija nije posve stabilna zbog nekih sila koje djeluju protiv nje, dajući magnetu malu slobodu da se vrti dok pokušava poravnati svoje polove. Kada se magnetsko polje ukloni ili se supravodič podigne iznad svoje kritične temperature, površinske struje i magnetizacija nestaju: kao rezultat, levitacija prestaje.

[2]



Slika 6. Usporedba između ponašanja supravodiča iznad i ispod kritične temperature T_c [2]

Magnetska indukcija uzorka određena je vanjskim poljem \vec{H} i magnetizacijom \vec{M} :

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

Gdje je μ_0 permeabilnost vakuumu. Magnetizacija je proporcionalna s vanjskim poljem:

$$\vec{M} = \chi\vec{H}$$

Sa χ smo označili magnetsku susceptibilnost materijala, time jednadžba magnetske indukcije postaje:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H},$$

Da bi magnetska indukcija bila jednaka nuli, mora biti:

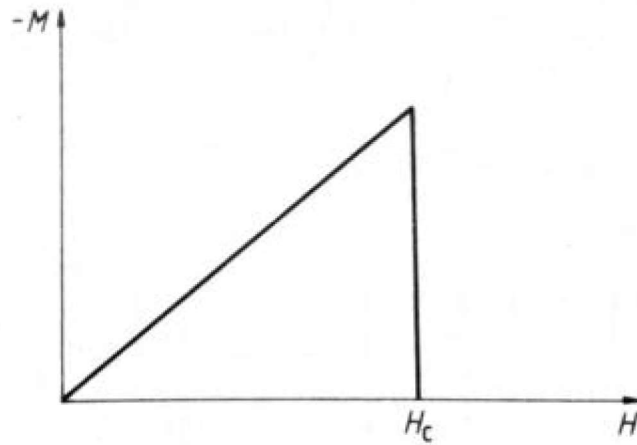
$$\chi = -1$$

Što nam daje izraz za magnetizaciju:

$$\vec{M} = -\vec{H}$$

U unutrašnjosti supravodiča inducira se magnetizacija koja djeluje suprotno od smjera vanjskog magnetskog polja. Ta je pojava karakteristična za dijamagnete. Dijamagnetski efekt u supravodičima toliko je jak da inducirano polje poništava djelovanje vanjskog polja. Zato supravodiče nazivamo idealnim dijamagnetima. Povećanjem vanjskog magnetskog polja povećava se iznos magnetizacije u supravodiču. Takva proporcionalnost vrijedi samo do kritičnog magnetskog polja H_c , jer tada supravodič prelazi u normalno stanje. Na slici 7.

možemo vidjeti kada vanjsko polje dosegne kritičnu vrijednost H_c iznos magnetizacije u supravodiču naglo iščezava.[8]

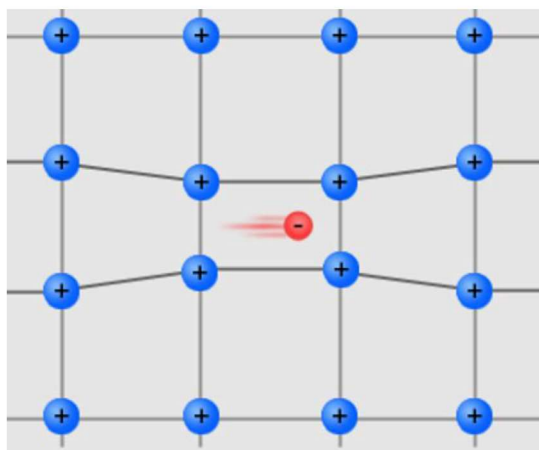


Slika 7. *Negativna magnetizacija kao funkcija vanjskog magnetskog polja u supravodičima prvog tipa [8]*

4. BCS TEORIJA

Na temelju spoznaja da međudjelovanje elektrona s fononima može inducirati dodatno elektron-elektron međudjelovanje zbog kojeg se elektroni privlače, razvijene su 1957. godine dvije teorije supravodljivosti. One polaze od sličnih fizikalnih ideja, a razlikuju se prema svojoj matematičkoj formulaciji. To su teorija BCS (nazvana prema slovima američkog fizičara Bardeena, Coopera i Schriefferera) i teorija ruskog fizičara Bogoljubova i njegovog suradnika. Mikroskopsko objašnjenje supravodljivosti ima svoje osnovne pojmove ukorijenjene u kvantnoj fizici. Stoga ćemo izbjegavati ulaziti u razumijevanje BCS teorije s duboko vezanim matematičkim formalizmom.

Prema Coulombovu zakonu, dva elektrona se uvijek međusobno odbijaju. Problem dinamičke interakcije elektrona u vodičima daleko je složeniji. Prisutnost pozitivnih iona u vodičima može uvelike utjecati na elektronsku interakciju. Zamislimo dva elektrona koja se gibaju vodičem. Prvi elektron privlači pozitivne ione, a kako je ionska masa mnogo veća od elektronske, ioni se gibaju mnogo sporije od elektrona. Zbog toga se uz elektronsku stazu povećava koncentracija pozitivnog naboja i taj poremećaj ostaje još neko vrijeme nakon prolaska prvog elektrona. Na tako polariziranu rešetku dolazi drugi elektron. Privlači ga područje povećane koncentracije pozitivnih iona. Odnosno, kretat će se u skladu s putanjom prvog elektrona. Osim izravnog Coulombovog odbijanja u vodičima, postoji dodatno elektronsko privlačenje u vodičima. Uzrokuje ga kretanje pozitivnih iona u kristalnoj rešetki.[8,11]



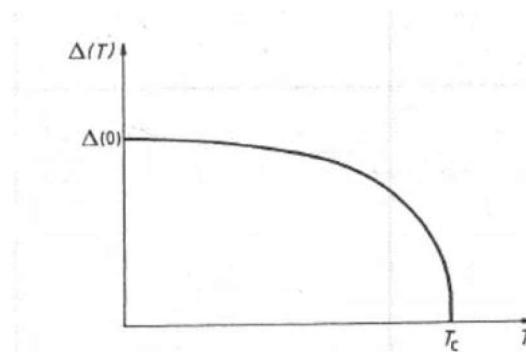
Slika 8. Prikaz privlačenja pozitivno nabijene rešetke od strane elektrona [11]

Duž staze elektrona mijenja se stupanj pobuđenja kristalne rešetke. Harmonijski oscilatori, koji opisuju titranje kristalne rešetke, prelaze pod djelovanjem elektrona na nova kvantna stanja. Svaki takav prijelaz znači promjenu broja fonona. Elektroni u vodiču mogu stvarati i poništavati fonone. Točnija kvantnomehanička analiza pokazuje da privlačenje elektrona nastaje izmjenom fonona. Fononski inducirano privlačenje elektrona može postati toliko snažno da prevlada kulonsko obijanje, odnosno stvara se supravodljivo stanje. (veza između elektrona i fonona mora biti jaka). Iz toga nam je lakše zaključiti zašto metali, koji su u normalnom stanju dobri vodiči električne struje, nisu supravodiči.[8,11,12]

4.1 COOPER OVI PAR OVI

Interakcijom s fononima, energija elektrona se mijenja u malim količinama jer je tipična energija elektrona puno veća od energije fonona. prema Paulijevom principu to znači da međusobno djeluju samo elektroni čija je energija približno jednaka Fermijevoj energiji E_f .

Točnijom analizom pokazujemo 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. Udruživanjem elektrona u Cooperove parove prelaze iz jednih kvantnih stanja u druga. U supravodljivom stanju elektronski sustav sastavljen je od velikog broja Cooperovih parova, pri čemu se sastav svakog para konstantno mijenja. Da bi se Cooperov par nekako razdijelio na dva posebna elektrona, potrebno je energiju povisiti na određeni iznos. Ta je energija jednaka energijskom procijepu. Što je omjer T/T_c manji, to su elektroni u Cooperovom paru jače vezani, pa će energijski procijep biti širi.[8,11]



Slika 9. Temperaturna ovisnost širine energijskog procijepa u supravodiču [8]

5. TIPOVI SUPRAVODIČA

Supravodiči tipa I su oni materijali koji pokazuju supravodljivost ispod kritične temperature. Pokazuju savršen dijamagnetizam i savršenu vodljivost. Savršeno se pokoravaju Meissnerovom efektu jer svaka neznatna nečistoća uništava ovo stanje supravodljivosti. Supravodiči tipa I imaju vrlo nisku kritičnu temperaturu (T_c). Primjeri uključuju Hg, Pb, Zn (živa, olovo, cink).

Supravodiči tipa II su materijali koji pokazuju supravodljivost na temperaturama iznad kritične temperature. Ne pokazuju savršen dijamagnetizam. To su materijali koji imaju relativno slabija magnetska polja od supravodiča tipa I. Općenito su poznati kao visokotemperaturni supravodiči. Sastoje se od slitina i složenih oksida keramike. Djelomično se pokoravaju Meissnerovom efektu. Postoji značajan učinak male nečistoće na supravodljivost supravodiča tipa II. Primjeri: NbTi, Nb₃Sn (niobij-titan i niobij-kositar)

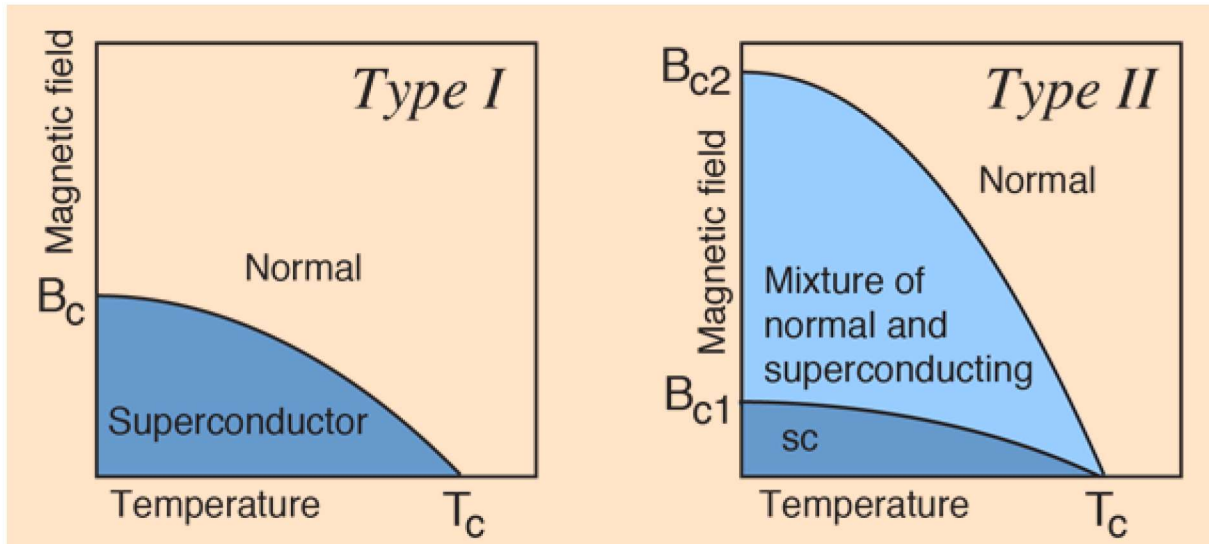
Niobij- titan se često koristi u medicinskim uređajima za stvaranje jakih magnetskih polja potrebnih za magnetsku rezonanciju, te za Magnetsku levitaciju, u sustavima magnetske levitacije i drugim aplikacijama koje zahtijevaju snažna i stabilna magnetska polja.

Niobij-kositar se koristi u fuzijskim reaktorima zbog svoje otpornosti na visoka polja, kao što je ITER, te na Magnetskoj rezonanciji i NMR, zbog svoje sposobnosti da podnese visoka magnetska polja, koristi se u naprednim sustavima magnetske rezonancije (NMR).

Razlika između tipa I i tipa II ima podosta, ali najbitnije su da tip I ima jedno kritično polje, te su poznati kao niskotemperaturni supravodiči, dok tip II ima dva kritična polja i poznati su kao visokotemperaturni supravodiči.

Na slici 8. vidimo supravodič tipa I u dijagramu magnetskog polja s temperaturom, ispod krivulje je takozvana Meissnerova faza i označuje supravodljivost, a ako povećamo temperaturu ili magnetsko polje prelazimo iznad krivulje gdje je nesupravodljivo (normalno) stanje materijala. Na dijagramu pored vidimo također Meissnerovu fazu kao u tipu I, ali se razlikuju u tome da kada povećamo magnetsko polje, mogu se stvoriti vrtlozi magnetskog polja unutar materijala, to su „cijevi“ gdje magnetski tok može putovati kroz materijal, a ako

povećamo magnetsko polje još više, gustoća tih vrtloga će se povećati dok ne pređemo drugu krivulju gdje supravodljivost prestaje. Dio između Meissnerove i normalne faze naziva se faza vrtloga.[11,12]



Slika 10. Razlika između supervodiča tipa I i tipa II [12]

6. PRIMJENA U STVARNOM ŽIVOTU

Supravodljivost omogućuje nesmetan protok električne energije, zbog čega nalazi svoju primjenu u raznim područjima poput medicine, energetike i znanstvenih istraživanja. Jedna od važnijih primjena supravodljivosti je medicinska dijagnostika gdje supravodljivi magneti nalaze primjenu u magnetskoj rezonanci, što je od vitalnog značaja za medicinsku dijagnostiku. Ova vrsta magneta proizvodi vrlo jaka i stabilizirajuća magnetska polja, bez kojih se ne mogu dobiti oštre medicinske slike unutrašnjosti tijela. Prednosti su mu što supravodljivi magneti dopuštaju stvaranje visokih magnetskih polja uz vrlo male količine energije, a time i detaljne slike visoke rezolucije.

Osim toga, supravodljivi magneti koriste se u visokoenergetskim akceleratorima čestica, kao što je veliki hadronski sudarač (LHC) u CERN-u, za usmjeravanje i ubrzavanje snopova čestica vrlo visokih energija. [2,5]

6.1 MAGNETNO LEVITACIJSKI VLAK (MAGLEV)

Početak tehnologije koja je dovela do maglev vlakova može se pratiti unatrag do rada provedenog u Nacionalnom laboratoriju Brookhaven, SAD. Potkraj 1960-ih inženjeri Powell i Danby dobili su prvi patent za dizajn koji je uključivao magnetski levitirani vlak. Ideju je dobio Powell dok je bio zaglavljnjen u prometu, razmišljajući o automobilima koji su se kretali cestama pužući branik uz branik, o vlakovima koji voze po fiksnim tračnicama. Mislio je da mora postojati bolji način na koji se može putovati kopnom. Palo mu je na pamet da pokuša upotrijebiti supravodljive magnete za levitaciju vlaka. Supravodljivi magneti nastaju hlađenjem elektromagneta (načinjenih od supravodiča) na ekstremno niske temperature; to uzrokuje da prestanu pružati bilo kakav otpor prolasku električne struje kroz njih zbog čega mogu generirati intenzivna magnetska polja.

Prvi komercijalno upravljani brzi supravodljivi Maglev vlak otvoren je u Šangaju 2004., dok drugi rade u Japanu i Južnoj Koreji. U Sjedinjenim Državama istražuju se brojne rute za povezivanje gradova poput Baltimorea i Washingtona, D.C. [9,13,14]



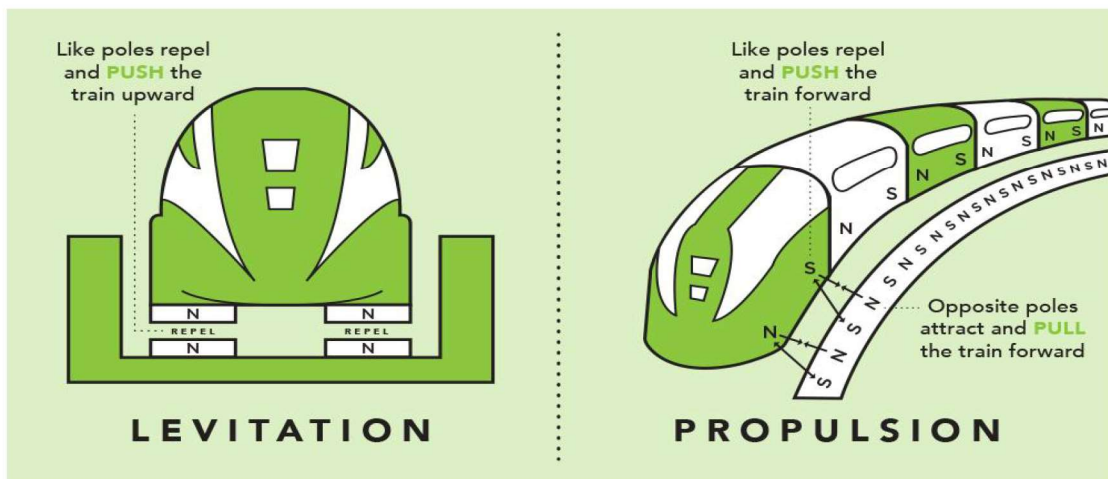
Slika 11. Izgled Magleovog vlaka 2004. godine [9]

U Maglevu, supravodljivi magneti vješaju vagon iznad betonske vodilice u obliku slova U. Supravodljivi magneti rade na istim principima kao i tipični magneti; kada su polovi isti, oni se odbijaju. Prema Jesseju Powellu, vagon Maglev vlaka je u osnovi kutija s magnetima na četiri ugla. Vrsta magneta koji se koriste su supravodiči koji mogu proizvesti jaka magnetska polja za pokretanje i zaustavljanje vlaka. Oni su u interakciji s osnovnim metalnim petljama ugrađenim u betonske zidove Maglev tračnica. Petlje se sastoje od vodljivih materijala kao što je aluminij, a kada na njih djeluju prolazna magnetska polja, induciraju električne struje koje proizvode dodatna magnetska polja.

Tri vrste petlji postavljaju se na šinu u određenim intervalima kako bi se izvršile tri važne zadaće: Prvo se stvori polje koje čini da vlak lebdi oko 13 cm iznad tračnice; drugo, držite vlak stabilnim vodoravno. Obje petlje koriste magnetsko odbijanje kako bi zadržale vagon na optimalnom mjestu; što se više udaljava od središta vodilice ili bliže dnu, veći je magnetski otpor koji ga gura natrag na stazu.

Treći skup petlji je sustav levitacije napajan izmjeničnom strujom. Magnetska levitacija omogućuje brzo i glatko kretanje vozila po vodilici. Zamislite našu kutiju i dodajte još jedan set magneta za ukupno četiri – po jedan u svakom kutu. Magneti na prednjim uglovima su vanjski polovi okrenuti prema sjeveru, dok su oni u stražnjim uglovima vanjski polovi okrenuti prema jugu. Polarizacija ovih petlji stvara magnetska polja koja vuku vlak (sprijeda) i guraju ga straga kako bi krenuo naprijed. Ovaj dizajn s plutajućim magnetom omogućuje glatko putovanje. Unatoč tome što vlak doseže brzinu od čak 600 km/h rezultirajuća turbulencija za vozača manja je u usporedbi sa standardnim vlakom s čeličnim kotačima jer je jedino trenje zrak. [9,14]

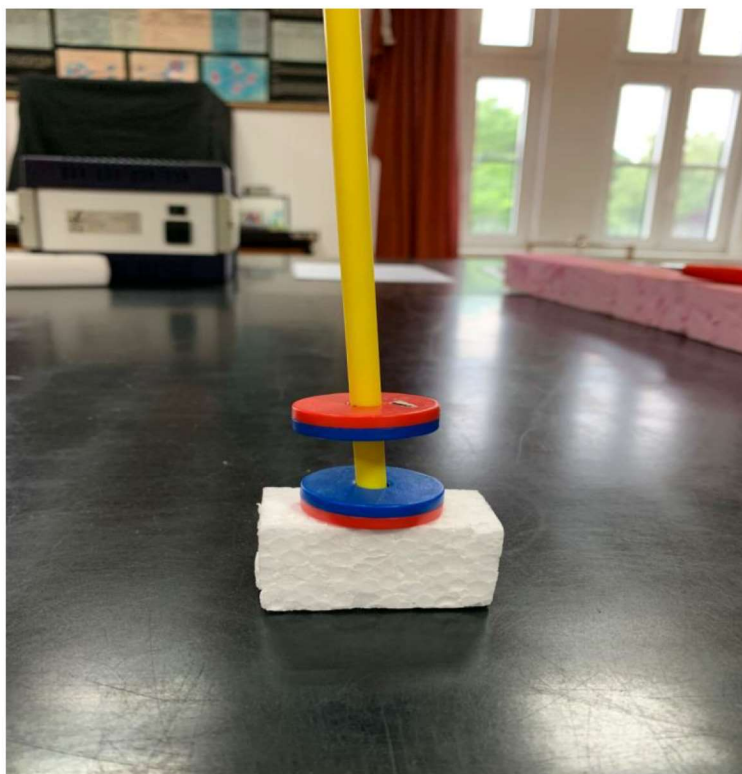
Na slici 10. možemo vizualno predočiti kako se magneti istog imena odijaju i uzrokuju magnetsku levitaciju, te kako se raznoimenu u isto vrijeme privlače i vuku vlak naprijed.



Slika 12. Levitacija i odbijanje magneta na Magleovom vlaku [14]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

Prvi i najosnovniji pokus koji pokazuje magnetsku levitaciju je kada imamo dva magneta u obliku diska s rupom na sredini postavljena na štapu (slika 12.) tako da su im isti polovi okrenuti jedan prema drugom i odbijaju se.



Slika 13. Odbijanje istoimenih magneta na štapu.

To znači da će se dva magneta pokušati udaljiti jedan od drugog, stvarajući odbojnu silu između njih koja je nevidljiva, ali vrlo stvarna. Odbijanje uzrokuje da svaki magnet pokušava "pobjeći" od drugog magneta. Ako su oba magneta slobodna na štapu i ako se mogu pomicati, oni će se udaljiti jedan od drugog do točke gdje su magnetska odbojna sila i gravitacija uravnotežene.

Sustav ima potencijalnu energiju zbog magnetskih sila. Ako su magneti vrlo blizu jedan drugome, potencijalna energija sustava je veća zbog snažnog odbijanja. Kako se magneti udaljavaju, potencijalna energija se smanjuje, jer sila odbijanja opada s udaljenosti.

Drugi pokus je također pokus magnetske levitacije, gdje koristimo okrugli čep od boce soka/vode, magnet te tekući dušik pokušavajući postići magnetsku levitaciju. Prvo moramo ohladiti supravodljivi materijal. Supravodljivi materijal stavlja se na čep ili neku sličnu posudu, a zatim se prelije tekućim dušikom kako bi se ohladio ispod svoje kritične temperature. Tekući dušik je vrlo hladan i brzo će ohladiti supravodič do potrebne temperature. Kada se supravodljivi materijal ohladi ispod svoje kritične temperature, postaje supravodljiv. Sada možemo iznad supravodiča postaviti mali permanentni magnet od neodimija i dobivamo magnetsku levitaciju. Slika 13 pokazuje već objašnjeni Meissnerov efekt: magnetsko polje permanentnog magneta nastoji proći kroz supravodič, ali ga supravodič istiskuje stvarajući vrtložne struje na svojoj površini čije magnetsko polje je usmjereno suprotno od polja permanentnog magneta. Time dobivamo međusobno odbijanje supravodiča i magneta što omogućava levitaciju magneta iznad supravodiča.

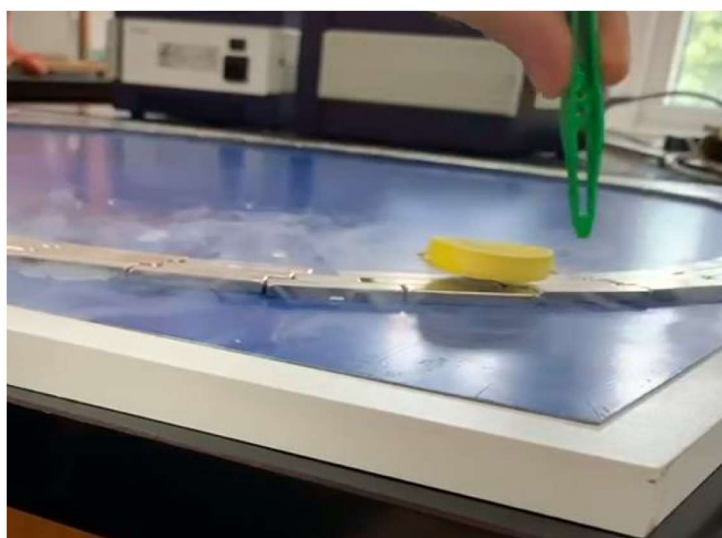


Slika 14. *Magnetska levitacija pomoću tekućeg dušika.*

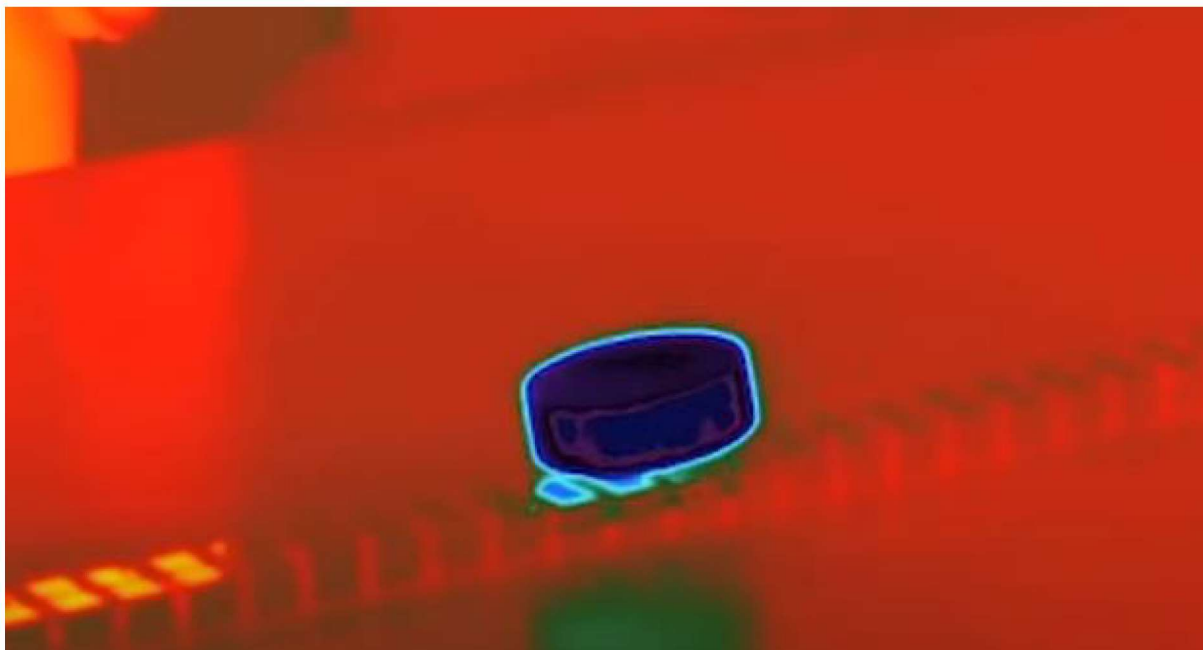
Treći i vjerojatno najzanimljiviji pokus se sastoji od magnetskih tračnica koje su načinjene od jakih neodimijevih magneta poredanih u krug. Koristimo isti supravodljivi magnet od prošlog pokusa, koji se ohladi uz pomoć tekućeg dušika.

Tračnice od magneta postavljaju se na ravnu površinu. Magneti su postavljeni tako da stvaraju uniformno magnetsko polje iznad svoje površine. To polje može biti kontinuirano duž tračnica. Supravodič se stavlja u posudu s tekućim dušikom kako bi se ohladio ispod svoje kritične temperature. Kada je supravodljivi materijal dovoljno ohlađen, postavlja se iznad magnetskih tračnica. Zahvaljujući Meissnerovom efektu, supravodljivi magnet izbacuje magnetsko polje iz svoje unutrašnjosti i počinje levitirati iznad tračnica.

Supravodljivi magnet lebdi stabilno iznad tračnica jer magnetsko polje stvoreno u tračnicama i supravodiču stvara silu koja održava levitaciju. Ako se supravodljivi magnet lagano gurne, može se kretati duž tračnica dok lebdi. Budući da nema trenja između supravodiča i tračnica, kretanje je vrlo glatko i bez otpora, osim minimalnog otpora zraka. Supravodič ostaje stabilan i ne mijenja visinu ili položaj u odnosu na tračnice, zahvaljujući tzv. "zaključavanju" magnetskog polja unutar supravodljivog materijala (efekt "pinning").



Slika 15. *Magnetska levitacija iznad tračnica*



Slika 16. *Termografska slika ohlađenog magneta i podloge [15]*

8. ZAKLJUČAK

Supravodljivost i magnetska levitacija zanimljivi su fenomeni koji imaju vrlo velik potencijal ako se praktički primijene. Proveli smo mnogo eksperimenata pokušavajući razumjeti ključne principe koji ovu vrstu fenomena čine mogućim, kao što je Meissnerov efekt i stabilno lebdjenje supravodiča nad magnetskim stazama.

Eksperimenti su pokazali da se hlađenjem supravodljivih materijala na njihovu kritičnu temperaturu, materijal nije samo bez otpora, već također magnetski samo pričvršćuje polje, tj. potpuno izbacuje magnetsko polje iz unutrašnjosti supravodiča. To dovodi ne samo do stabilne magnetske levitacije, već i do gibanja magnetu bez trenja, što ima važne implikacije za razvoj tehnologije u područjima kao što su maglev vlakovi, beskontaktni ležajevi i komponente kvantnog računala.

Naši eksperimenti potvrdili su i teorijske osnove supravodljivosti i praktične mogućnosti koje ti fenomeni nude. Supravodljivost je izniman fenomen koji otvara goleme tehnološke perspektive industriji, energetici i prometu. Ovi nalazi naglašavaju važnost daljnjih istraživanja koja bi mogla donijeti tehnologije još viših generacija uz korištenje supravodljivosti i magnetske levitacije. Supravodljivost, kao jedno od najzanimljivijih područja u modernoj znanosti i tehnologiji, iako još nepotpuno istražena, obećava transformirati brojne industrije i svakodnevni život. Već smo svjedoci značajnih primjena, poput magnetskih levitacijskih vlakova (maglev) i visokoučinkovitih magnetskih rezonantnih uređaja (MRI), budućnost supravodljivosti nosi još veće potencijale.

9. LITERATURA

- [1] *"Superconductors: Science and Technology"* by R. G. Sharma (2000)
- [2] *"Introduction to Superconductivity"* by Michael Tinkham (2nd Edition, 2004)
- [3] *"High-Temperature Superconductivity"* by J. Robert Schrieffer (1997)
- [4] Superconductivity
URL: <https://byjus.com/physics/superconductor/>
(Pristupljeno: 17.08.2024)
- [5] Basics of superconductivity
URL:
<https://indico.cern.ch/event/440690/contributions/1089766/attachments/1148948/1648368/U3-final.pdf>
(Pristupljeno: 18.08.2024)
- [6] Supervodljivost: skandal
URL: <https://www.chemistryworld.com/features/superconductivity-the-search-and-the-scandal/4019292.article>
(Pristupljeno: 18.08.2024)
- [7] Magnetic levitation in chemistry
URL: <https://projects.iq.harvard.edu/files/gmwgroup/files/1330.pdf>
(Pristupljeno: 11.8.2024.)
- [8] Šips, V. Uvod u fiziku čvrstog stanja, Školska knjiga, Zagreb, (1991)
- [9] Maglev trains
URL: https://physics.anu.edu.au/engage/outreach/_files/MAGLEV.pdf
(Pristupljeno: 24.08.2024)

- [10] Prvi kompas za putnike
URL: <https://www.haldemanfordhamilton.com/blog/2017/february/21/the-first-compass-for-travelers-and-road-warriors.htm>
(Pristupljeno: 20.08.2024)
- [11] Cooperovi parovi
URL: <https://www.quantumgrad.com/article/648>
(Pristupljeno: 11.08.2024)
- [12] *"Superconductivity: Theory and Applications"* by A. V. Narlikar (2003)
- [13] Griffiths, D. J. Introduction to electrodynamics. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, (1999.)
- [14] How Maglev works
URL: <https://www.energy.gov/articles/how-maglev-works>
(Pristupljeno: 20.08.2024)
- [15] Magnetska levitacija
URL: https://www.youtube.com/watch?v=X5EoUD-BIss&ab_channel=Vsauce3
(Pristupljeno: 20.08.2024)

10. ŽIVOTOPIS

Matej Sundi, rođen je 05. kolovoza 1998. godine u Vinkovcima, Republika Hrvatska. Pohađao je osnovnu školu Ivana Brlić-Mažuranić u Vinkovcima (2005.-2013.) nakon čega upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer mehatronika (2013.-2017.). Godine 2017. upisuje prijediplomski studij na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, na kojem i sada studira. Tečno govori hrvatski i engleski jezik te poznaje osnove njemačkog jezika. Ima iskustva u raznim programima za obradu teksta i podataka te programskim jezicima Python i C++.