

Odlukom Vijeća Prirodno-matematičkog fakulteta imenovani smo za članove komisije za ocjenu podobnosti teme magistarskog rada „Supeprovodljiva kugla u vremenski zavisnom magnetnom polju“ studentkinje Jovane Bogdanović. Na osnovu uvida u prijavu magistarskog rada podnosimo sljedeći

IZVJEŠTAJ

Predmet istraživanja. Jedna od osnovnih karakteristika superprovodljivih materijala jeste Majnsnerov efekat (istiskivanje magnetnog polja iz unutrašnjosti superprovodnika). Fenomenološke jednačine koje opisuju Majnsnerov efekat (Londonove jednačine ili Ginzburg-Landau jednačine) su najčešće date u formi koja važi za stacionarne, vremenski nepromjenljive fizičke veličine. Može se reći da je problem superprovodnika u spoljašnjem stacionarnom magnetnom polju veoma dobro izučen. Kada se superprovodnik izloži vremenski promjenljivom magnetnom polju, kao što je na primjer elektromagnetni talas, onda je i fizika koja opisuje raspodjelu magnetnog polja u prostoru bitno drugačija. U posljednje vrijeme obnovljen je interes za proučavanjem vremenski zavisnih Londonovih i Ginzburg-Landauovih jednačina. Studentkinja Bogdanović je odabrala da izučava problem superprovodljivog materijala, načinjenog u obliku kugle, u promjenljivom magnetnom polju kako bi razumjela na koji način geometrija problema utiče kvantitativno i kvalitativno na raspodjelu magnetnog polja upoređujući dobijene rezultate sa poznatim rezultatima za superprovodnike u obliku plan-paralelne ploče, odnosno polubeskonačnog superprovodnika.

Motiv i cilj istraživanja. Superprovodnici, materijali koji provode električnu struju bez otpora, samo ovom svojom karakteristikom daju snažan motiv istraživačima da istraže sve mogućnosti njihove tehnološke primjene. Jedna od mogućih primjena ovih materijala već se koristi kod akceleratora (ubrzivača) čestica visokih energija. Nove generacije akceleratora čestica koriste superprovodljive šupljine koje su podvrgnute dejstvu vremenski promjenljivog magnetnog polja (u pitanju su radio-frekvencije). Pregled ove oblasti fizike je dat u radu H. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays, "rf Superconductivity for Accelerators", 2nd ed. (Wiley, New York, 2008).

Ovaj magistarski rad ima za cilj da dodatno doprinese razumijevanju fizike superprovodnika unešenih u vremenski promjenljivo magnetno polje, tako što će se analizirati problem koji do sada nije bio razmatran u literaturi (superprovodljiva kugla u vremenski zavisnom magnetnom polju), da odgovori na zadata istraživačka pitanja i opovrgne ili potvrdi postavljenu hipotezu.

Istraživačka pitanja koja će se razmatrati o ovom magistarskom radu su:

1. Kako izgleda raspodjela električnog i magnetnog polja unutar i van superprovodljive kugle unešene u vremenski promjenljivo magnetno polje?
2. Da li se kompleksna susceptibilnost superprovodljive kugle i superprovodljive plan-paralelne ploče istih poprečnih dimenzija (prečnika, odnosno debljine) kvalitativno razlikuje?

3. Kolika je sila levitacije koja djeluje na superprovodljivu kuglu, i koliki je moment sile koji teži da zarotira kuglu?

Hipoteza

-Superprovodnici različitih geometrijskih oblika imaju kvalitativno isti odziv kada se unesu u spoljašnje vremenski promjenljivo magnetno polje. Drugim riječima, kompleksna susceptibilnost superprovodnika zavisi od magnetne dubine prodiranja λ i dimenzije R (debljine, prečnika) superprovodnika različitih oblika (kugla, elipsoid, ploča) na kvalitativno isti način, pri čemu se geometrijski oblik superprovodnika manifestuje samo kroz korektivni multiplikativni faktor.

Ako se ova hipoteza ispostavi kao tačna na primjeru dvije ekstremno različite geometrijske forme (kugla i ploča) onda bi se na taj način opravdalo da magnetni odziv ansambla superprovodljivih granula nepravilnog oblika (jedan od modela za detektore elementarnih čestica) možemo sasvim dobro aproksimirati magnetnim odzivom ansambla superprovodljivih kugli.

Pregled dosadašnjih istraživanja. Jedno od posljednjih istraživanja sa sličnom tematikom jeste rad V. G. Kogana i R. Prozorova [arXiv:2009.06682] u kome autori analiziraju superprovodljive materijale koji su anizotropni (normalna provodljivost zavisi od pravca struje, a takođe i dubina prodiranja magnetnog polja zavisi od njegovog pravca). Fokus njihovog istraživanja jeste anizotropija susceptibilnosti superprovodljive plan-paralelne ploče, kao i pojava mehaničke torzije usljed anizotropije. Ovaj rad predstavlja nastavak njihovog istraživanja raspodjele magnetnog polja unutar superprovodnika II vrste u promjenljivom magnetnom polju [Phys. Rev. B 102, 024506 (2020)], u kome analiziraju kako se mijenja interakcija vrtložnih superprovodljivih struja usljed kretanja vrtloga kao cjeline. U magistarskom radu student Jovana Bogdanović će se baviti problemom superprovodnika koji je unešen u slabo magnetno polje, ili je superprovodnik I vrste, a to su situacije u kojima ne dolazi do formiranja superprovodljivih vrtloga. Autori J. Hofer i M. Aspelmeyer [Phys. Scr. 94, 125508 (2019)] su se posvetili problemu levitacije superprovodljive kugle u spoljašnjem stacionarnom magnetnom polju. Oni su svom radu razmatrali slučaj stacionarnog, ali nehomogenog magnetnog polja. U ovom magistarskom planirano je da se izračuna sila levitacije koja djeluje na superprovodljivu kuglu od strane homogenog, ali nestacionarnog magnetnog polja. Autori B. Oripov i S. M. Anlage [Phys. Rev.E 101, 033306 (2020)] su numerički rješavali vremenski zavisne Ginzburg-Landau jednačine za slučaj superprovodnika smještenog u prostorno nehomogenom magnetnom polju koje se vremenski mijenja sa frekvencijama koje pripadaju oblasti radio-talasa, kao i uticaj graničnih uslova na dobijene rezultate. Autori B. Nasmith i N. Gauthier [Am. J. Phys. 76, 872 (2008)] dokazuju na primjeru superprovodljive kugle da se čak i u stacionarnom magnetnom polju unutar superprovodnika može indukovati stacionarno električno polje. U radu [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 424, 512-522 (1999)] autori izračunavaju numerički kako izgleda magnetno polje na obodu ansambla superprovodljivih kugli unešenih u spoljašnje magnetno polje, što predstavlja konfiguraciju koja se može koristiti u detektorima zasnovanim na

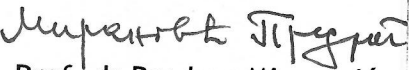
superprovodljivim granulama u pregrijanom stanju. Ernesto A. Matute [Am. J. Phys. 67, 786 (1999)] u svom radu daje jedan drugačiji način analize problema superprovodljive kugle u stacionarnom magnetnom polju, više sa pedagoške tačke gledišta. Naime autor je dao alternativno rješenje u literaturi poznatog problema, smatrajući da njegov metod rješavanja daje intuitivniju sliku samog rješenja. Autori J. R. Clem i M. W. Coffey [Phys. Rev. B 46, 14662 (1992)] su u svom radu analizirali dinamiku interagujućih superprovodljivih vrtloga koji nastaju u superprovodljivim filmovima II-vrste pod dejstvom magnetnog polja koji pravi električni provodnik paralelan površini filma. Revijalni rad [Advances in Condensed Matter Physics, Volume 2013, Article ID 104379] daje potpuni pregled različitih istraživanja koji se odnose na elektrodinamiku metalnih superprovodnika.

Metodologija. Problem koji treba da se rješava u okviru ovog magistarskog rada pripada oblasti teorijske fizike. To znači da se fizički problem koji se analizira svodi na matematički problem rješavanja jednačine koja opisuje datu fizičku situaciju. Zato se naučne metode koje se koriste u ovom istraživanju svode na matematičke metode. Neophodno je riješiti vremenski zavisnu Londonovu jednačinu. U pitanju je parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda po prostornim koordinatama i prvog reda po vremenu. Zbog geometrije problema diferencijalna jednačina po koordinatama će se rješavati u sfernom koordinatnom sistemu, (r, φ, θ) . Očekuje se da će se radijalni dio raspodjele polja izraziti preko specijalnih Beselovih funkcija, koje se tipično javljaju u problemima sa sfernom simetrijom. Takođe, očekuje se da će se ugaona zavisnost fizičkih veličina izraziti preko drugog tipa specijalnih funkcija: sfernih harmonika $Y(\varphi, \theta)$. Drugim riječima, očekivanje je da će se diferencijalna jednačina riješiti analitički, i da neće biti potrebe da se koriste numeričke metode.

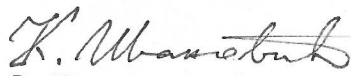
Očekivani rezultati. Razmatranje problema superprovodljive kugle u promjenljivom magnetnom polju, u poređenju sa poznatim rezultatima za superprovodljivi tanki film, neće dovesti do otkrića novih fizičkih efekata. U matematičkom smislu to će biti novi rezultat, jer ovakva geometrija problema (sferna) do sada nije rješavana u literaturi. Pošto se ansambl superprovodljivih kugli koristi kao jedan od modela detektora čestica, poznavanje ponašanja jedne superprovodljive kugle u promjenljivom magnetnom polju jeste od praktičnog interesa. Dakle, novina do koje se može doći u ovom magistarskom radu će biti raspodjela magnetnog i električnog polja (vremenski zavisnog) unutar i van superprovodljive kugle. Dalje, u literaturi je do sada razmatrana sila levitacije kojom stacionarno magnetno polje djeluje na superprovodnik. U ovom magistarskom radu kandidat planira da izračuna silu levitacije od strane nestacionarnog magnetnog polja. Ono što je novina jeste da u nestacionarnom magnetnom polju očekujemo da se javi i moment sile koji djeluje na superprovodnik, što do sada nije razmatrano u literaturi. Na osnovu dobijenih rješenja za prostornu i vremensku raspodjelu elektromagnetnog polja biće moguće uporediti rezultate iz ovog magistarskog rada za superprovodljivu kuglu sa rezultatima iz literature za plan-paralelnu ploču i na taj način testirati postavljenu hipotezu.

Zaključak. Smatramo da tema ovog magistarskog rada predstavlja problem koji do sada nije rješavan u literaturi. Lokalne Londonove jednačine, koje će se rješavati u ovom magistarskom radu uobičajenom metodologijom, su dobra polazna osnova za analizu raspodjele magnetnog i električnog polja u superprovodnicima. Težina problema je primjerena magistarskom radu. Preporučujemo Vijeću PMF-a da studentkinji Jovani Bogdanović odobri dalji rad temi „Supeprovodljiva kugla u vremenski zavisnom magnetnom polju“.

Komisija


Prof. dr Predrag Miranović


Prof. dr Borko Vujičić


Dr Krsto Ivanović