

Potruga za novim elektronskim fazama u jako poddopiranim kupratnim supravodičima

ANA NAJEV

Mentor: prof. dr. sc. Miroslav Požek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Sveučilište u Zagrebu, Bijenička c. 32, 10 000 Zagreb

27. siječnja 2017.

Sažetak

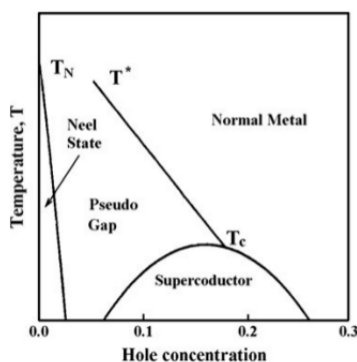
Za potrebe seminara konstruirana je proba za detekciju malih promjena u toplinskim kapacitetima koja se bazira na diferencijalnoj termalnoj analizi. Posebno smo raspravili o metodama otklanjanja šuma i analizi dobivenih podataka kojima je moguće detektirati signale reda veličine $0.5\mu V$. Provedena su mjerenja na monokristalnom uzorku CoF_2 i uzorcima u prahu optimalno dopiranog ($x = 15\%$) i poddopiranog ($x = 3\%$) $La_{2-x}Sr_xCuO_4$. Uspješno je izmjeren antiferomagnetski prijelaz CoF_2 te supravodljivi prijelaz u optimalno dopiranom LSCO-u. Nadalje, u poddopiranom uzorku LSCO-a detektiran je nepoznati signal na temperaturama od oko 11K koji bi se mogao objasniti teorijski predviđenim feronematskim prijelazom.

I. UVOD

Pojava supravodljivosti još od svog otkrića 1911. godine pobuđuje veliki interes fizičara. Među supravodičima posebno se svojom visokom temperaturom supravodljivog prijelaza ističe familija kuprata. Unatoč velikoj raznolikosti, kuprate povezuje zajednički strukturni element - CuO_2 ravnine jedinstvene elektronske i magnetske strukture. Trenutne kvantne teorije, uspješne u opisu konvencionalnih vodiča i supravodiča, ne uspijevaju objasniti "visoko korelirane elektronske sustave" među kojima su kuprati najčešći primjer.

Stehiometrijski nedopirani kuprati su općenito antiferomagneti ispod pripadne Neelove temperature. Iako bi po konvencionalnoj teoriji vodljivih vrpca oni trebali biti metali, jake elektronske interakcije čine ih Mottovim izolatorima. Dopiranjem, uglavnom šupljinama, kuprati prelaze prvo u metalno, a zatim u supravodljivo stanje. Općenito, koncentracija nosioca naboja x jako utječe na fizikalna svojstva i temperaturu supravodljivog prijelaza T_C . U našem

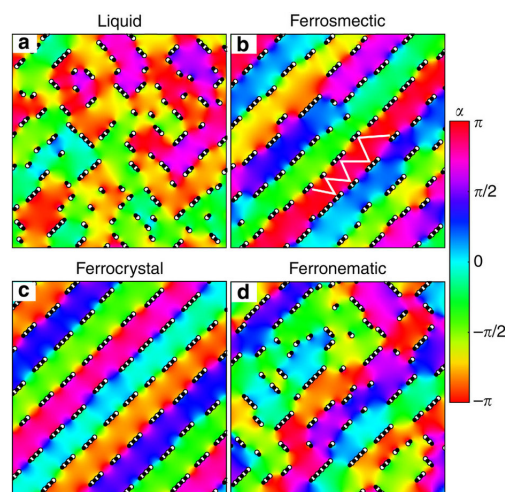
istraživanju, mjerenja smo proveli na različito dopiranom kupratu La_2CuO_4 . Njegovo dopiranje vrši se postavljanjem atoma Sr na mjesta La. Kako Sr posjeduje jedan elektron manje u zadnjoj ljusci od La, njegovim se dodavanjem spoj proporcionalno dopira šupljinama. Već za jako mala dopiranja, dugodosežni antiferomagnetizam se narušava. Daljnjim povećanjem koncentracije šupljina postiže se supravodljivost ispod kritičnih temperatura T_C . Općenito, temperatura supravodljivog prijelaza ima paraboličnu ovisnost o x s maksimumom za optimalno dopiranje x_{opt} . U faznom dijagramu kuprata (Slika 1) razlikujemo dva režima: poddopirano područje za $x < x_{opt}$ i naddopirano područje za $x > x_{opt}$. Kuprati također pokazuju određena anomalna fizikalna svojstva u poddopiranom području ispod karakteristične temperature T^* . Tada se otvara procjep u elektronskom spektru i to područje faznog dijagrama nazivamo pseudoprocjep. U većini slučajeva, upravo je pseudoprocjep stanje iznad T_C iz kojeg se supravodljivost kondenzira pri snižavanju temperature. To područje ka-



Slika 1: Generički fazni dijagram kupratnih supravodiča. (Preuzeto iz [1])

rakterizira velika supresija elektronske gustoće stanja na niskim energijama koju nije lako jednostavno povezati s nekim oblikom slomljene simetrije. Pseudoprocjep je vrlo aktualan predmet istraživanja, a dosadašnji eksperimentalni rezultati u tom području faznog dijagrama pronalaze bogatstvo različitih uređenja kao što su razni oblici valova gustoće naboja (CDW), valova spinske gustoće (SDW), elektronskog nematskog uređenja, vrpce itd.

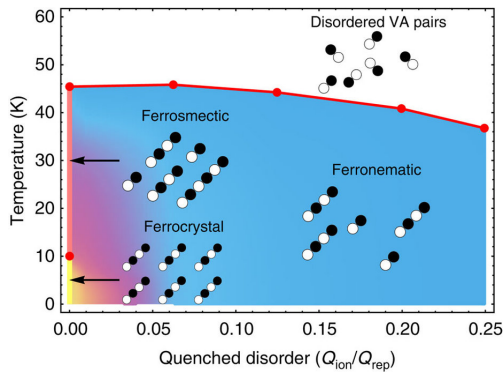
Vrlo recentna teorijska objašnjenja i predviđanja [2] elektronskih uređenja u jako poddopiranom režimu kupratnih supravodiča poslužila su kao motivacija pri odabiru teme ovog seminarskog rada. Nabojna uređenja (CO) u poddopiranom području kupratnog faznog dijagrama rezultat su tendencije Mottovih antiferomagneta da istiskuju i segregiraju naboj. Pri vrlo niskom dopiranju ponašanje segregiranog naboja može se povezati s pojavom topoloških pobuđenja u dopiranih antiferomagneta. Dopirane šupljine stvaraju virove (V) i antivirove (A) spinskog uređenja koje vrlo brzo narušava dugodosežni antiferomagnetizam. Virovi i antivirovi se sparuju u VA dimere ili "nematogene". Njihova sposobnost samoorganizacije stvara efekte specifične za meku materiju kao što je proces polimerizacije. Tada se naboj segregira u segmente jako vezane za V i A spinske teksture. Ovakvi segmenti se uređuju tvoreći nematsko stanje. Također oni mogu lomiti inverzijsku simetriju zbog čega takvo stanje naziva-



Slika 2: Nabojne i spinske konfiguracije u različitim fazama. Bijele i crne točke predstavljaju pozitivne i negativne topološke naboje, a različite boje prikazuju kut magnetizacije. Snimke a – c prikazuju sustav bez nereda u termički uređenoj fazi na $T=50K$ za sliku a, $T=38K$ za sliku b te $T=8K$ za sliku c. Slika feronematske faze dobivena je za potisnuti nered veličine $Q_{ion}/Q_{rep} = 0.125$ te temperature $T=40K$. (Preuzeto iz [2].)

vamo feronematik, a prati ga spinsko spiralno stanje koje podržava spinsku struju. Provedene Monte Carlo simulacije [2], na visokim temperaturama pronalaze klasičnu tekućinu dimera koji snižavanjem temperature tvore sve duže polimere. U čistim sustavima ($Q_{ion}=0^1$) ponašanje nabojnih i spinskih konfiguracija slijedi prikaz na Slici 2, a – c. Snižavanjem temperature segmenti se polimeriziraju u tzv. smektički red u kojem sustav posjeduje dugodosežno uređenje u jednom smjeru, ali ostaje "tekućina" u drugom smjeru. Zbog jednakih orijentacija nabojnog uređenja takvih topoloških dimera ovakvo stanje nazivamo ferosmektikom. Daljnjim snižavanjem temperature ispod $10K$ formira se Wignerov kristal dugodosežnog nabojnog i spinskog uređenja, tzv. ferokristal. S druge strane, uvođenjem prigušenog nereda u

¹ Q_{ion} predstavlja ionski potencijal nereda koji djeluje na dopirane šupljine. Q_{rep} opisuje dugodosežno kulonsko odbijanje među šupljinama.



Slika 3: Fazni dijagram kao funkcija temperature i jačine nereda. Žuto područje odgovara kratkodosežnom ferokristalnom uređenju, a ružičasto kratkodosežnom ferosemktičnom uređenju. Za konačne vrijednosti nereda pronalazimo ferone-matsku fazu, a tekućina polimera nalazi se iznad temperatura označenih crvenom linijom. (Preuzeto iz [2].)

sustav, dugodosežno uređenje se gubi, a prijelaz iz ferosemktika u ferokristal se razmazuje. Iznenadujuće, simulacije za konačnu razinu nereda ukazuju na postojanje dugodosežnog nematskog uređenja popraćenog lomom inverzijske simetrije, tj. faza sustava tada odgovara ferone-matiku (Slika 2, d). Iako je nabojno uređenje gotovo sasvim uništeno, kratkodosežno spinsko uređenje opstaje. Fazni dijagram u ovisnosti o veličini nereda [2] prikazan je na Slici 3.

Detekcija takve ferone-matske faze u kupratnim supravodičima jedan je od ciljeva ovog seminara. Kao uzorak za takvo istraživanje odabran je LSCO dopiran s $x = 3\%$ šupljina. Pretpostavljamo da bi efekti koji stvaraju ferone-matik, zbog blizine antiferomagnetske faze, trebali biti dovoljno jaki za detekciju.

II. KALORIMETRIJSKA METODA ISPITIVANJA UZORAKA - DIFERENCIJALNA TERMALNA ANALIZA

Promjene u toplinskom kapacitetu reflektiraju fazne prijelaze materijala. Za detekciju elektronskih faza izabrali smo visokopreciznu

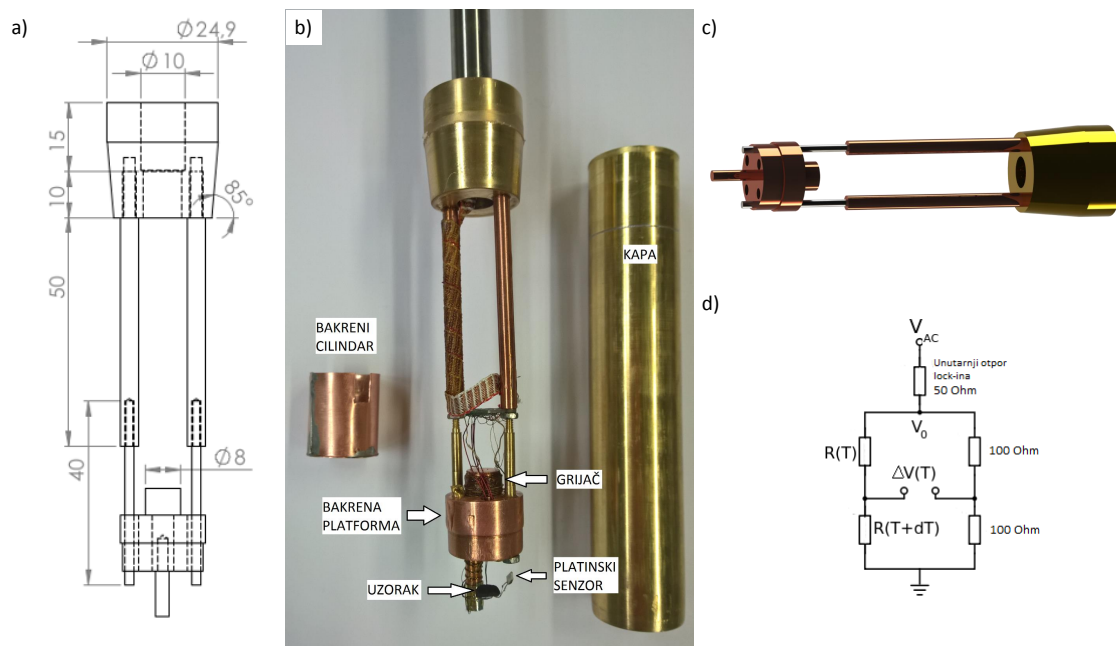
diferencijalnu termalnu analizu (DTA) [3] kao metodu mjerenja malih toplinskih kapaciteta ispod sobne temperature. Uzorak od interesa i referentni uzorak glatkog toplinskog kapaciteta postavljaju se na otporne termometre koji su termički slabo vodljivim žicama povezani s masivnom platformom. Platforma služi kao rezervoar topline kojem možemo linearno kontrolirati temperaturu T_b . Mjerenje se bazira na činjenici da će temperature uzoraka kasniti za temperaturom platforme proporcionalno njihovom toplinskom kapacitetu.



Slika 4: Stakleni kriostat korišten u eksperimentu.

II.A. KONSTRUKCIJA PROBE

Ekperimentalnu realizaciju takvog postava započeli smo izradom prikladne probe za stakleni kriostat (Slika 4). Pri konstrukciji probe naglasak je stavljen na izradu dovoljno masivne platforme od bakra (zbog njegove jako



Slika 5: Proba za DTA. a) Nacrt s mjerama dijela probe na koji se postavlja uzorak. b) Eksperimentalna realizacija probe za DTA. c) Digitalni izgled probe. d) Shema sklopa za DTA.

dobre toplinske vodljivosti) kako bi se izbjegle veće oscilacije temperature pri njenom grijanju. Grijanje se postiže postavljanjem malih napona na otpornu žicu omotanu oko platforme. Također pazilo se i na termalni kontakt bakrene platforme s "glavom" od mesinga (na temperaturi tekućeg helija, 4.2K) kako bi se za razumne vrijednosti napona na grijaču postigle potrebne brzine grijanja. Na Slici 5 prikazane su mjere i izgled dijela probe na koji se postavlja uzorak. Temperatura bakrene platforme određuje se CERNOX temperaturnim senzorom, čije je baždarenje prethodno izvršeno. Ožičavanje probe provelo se u dva dijela. Prvo su provučene bakrene žice koje povezuju vanjski dio probe, na sobnoj temperaturi, s dijelom u tekućem heliju. Kako bi se izbjegle termičke oscilacije, žice smo dobro termalizirali omatanjem oko bakrene šipke. Također, termalizacija žica je važna kako toplina sa sobe ne bi dodatno grijala platformu s uzorkom. U ostatku postava korištene su konstantanske žice čiji se otpor gotovo ne mijenja s promjenom temperature.

Spoj za DTA realiziran je vješanjem dva

platinska termometra o bakrenu platformu. Ti termometri ($R(T)$ i $R(T+dT)$) su međusobno spojeni u most s vanjskim otpornicima po shemi prikazanoj na Slici 5, d. Na jedan od platinskih termometara pomoću Apiezon N masti (koja poboljšava termički kontakt) lijepi se uzorak. Kako bi se umanjio utjecaj zračenja oko uzorka se postavlja bakreni cilindar, a zatim se cijela proba zatvara postavljanjem kape od mesinga na kraj s uzorkom. Kao dodatnu prevenciju od zračenja postavili smo malo presavijene aluminijske folije na početak inoxne cijevi iznad uzorka. Konačan izgled dijela probe s postavljenim uzorkom može se vidjeti na Slici 5, b. Prije hlađenja proba se ispumpava kako bi se postigao visoki vakuum, kojim se uzorak termički izolira od okoline. Na Slici 6 vidimo gornji dio probe s izlazom za vakuum i konektorom za eksperimentalno mjerenje. Nakon što se bakrena platforma termalizira na temperaturi tekućeg helija, fazno osjetljivim pojačalom (Lock-in pojačalo) mjeri se disbalans napona ΔV na mostu. Taj napon otkriva nam ponašanje toplinskog kapaciteta uzorka, ali on ujedno



Slika 6: Dio probe s vakuumskim izlazom i konektorom.

ovisi i o brzini grijanja platforme te promjeni otpora platinskih senzora s temperaturom [3].

$$\Delta V \propto C_p \frac{dT}{dt} \frac{dR}{dT} \quad (1)$$

Iako iz ovakvog postava nije lako odrediti apsolutne vrijednosti toplinskog kapaciteta, zbog visoke osjetljivosti metode, mogu se uspješno detektirati male promjene uzrokovane faznim prijelazima.

II.B. PRINCIP MJERENJA, SMANJENJE ŠUMA I ANALIZA DOBIVENIH PODATAKA

Mnogi uzorci na kojima se obavljaju mjerenja dolaze u obliku tabletiranog praha. Tada se uzorak sastoji od kristalnih zrnaca različitih veličina i orijentacija. Zbog toga su signali koji se mjere na takvim uzorcima vrlo mali (reda μV) i lako se stope s pozadinskim šumom. Kako bi se dobio što čišći signal potrebno je posebnu pažnju dati otklanjanju šuma samih eksperimentalnih uređaja.

Za određivanje i kontrolu temperature pri mjerenju koristili smo *Lakeshore 336* temperaturni kontroler. On se direktno spaja na grijač i ima mogućnost kontrole brzine i vremena grijanja. Pri mjerenjima u kojima je na uređaju korištena postojeća opcija linearnog grijanja, primijećene su velike oscilacije topline

koje unose dodatne neželjene oscilacije napona. Taj problem je otklonjen direktnom kontrolom snage na grijaču. Iako zbog toga funkcija brzine grijanja (K/min) više nema linearnu ovisnost, ona postaje dovoljno glatka da ne unosi dodatne oscilacije u mjerenje. Kako bi ipak imali linearan porast temperature s vremenom, modelirali smo vlastitu funkciju snage u ovisnosti o vremenu te pomoću *LabView* programa, njom kontrolirali snagu grijača na uređaju. To smo postigli pronalaženjem funkcije (2) koja dobro opisuje dobivena mjerenja snage grijanja u vremenu.

$$P(t) = \frac{\xi t^2}{1 + \eta t} \quad (2)$$

Funkcijske parametre ξ i η , zatim smo modelirali da daju prihvatljivu linearnu ovisnost. Tako dobivena funkcija nam je generirala izlaznu snagu u *LabView* programu za kontrolu grijača. Ovim postupkom postigli smo linearno grijanje platforme uz što manje oscilacije topline.

Dodatan problem koji se pojavio pri mjerenju temperature platforme pomoću našeg temperaturnog kontrolera bio je njegovo ograničenje na preciznost od 6 decimala pri mjerenju otpora. Očitani otpor u uređaju se uspoređuje s bazom diskretnih vrijednosti otpora i temperatura za pripadni temperaturni senzor. Takvo svojevrsno usrednjavanje unosi veliki šum pri mjerenju vrlo malih signala. Zbog toga smo za određivanje temperature CERNOX senzora koristili *Agilent 34420A* digitalni multimetar koji ima mogućnost očitavanja otpora s preciznošću od 7 decimala.

Pri analizi podataka treba imati na umu da stvarna temperatura uzorka donekle kasni za izmjerenom temperaturom na platformi. Zbog toga ne možemo detektiranim faznim prijelazima pridijeliti apsolutno točne vrijednosti temperature. Jedan od načina kako korigirati takav efekt je analiza sklopa uz uzimanje u obzir promjene osjetljivosti platinskih senzora. Za početak, kako bi izračunali kašnjenja stvarne temperature na uzorku za izmjerenom temperaturom na bakrenoj platformi ΔT koristili smo podatke ovisnosti otpora platinskih senzora o temperaturi [4] te prilagodbom odre-

dili parametre funkcije (3) koja opisuje takvo ponašanje.

$$R(T) = AT \exp(-(\Delta/T)^\beta) \quad (3)$$

Analizom sheme spoja na Slici 5, *d* pronašli smo sljedeće ovisnosti mjerenog o narinutom naponu ($V_{AC}=100\text{mV}$) na Lock-in pojačalu:

$$\frac{V_0}{V_{AC}} = \frac{R_{most}}{R_{most} + 50\Omega} \quad (4)$$

$$R_{most}^{-1} = \frac{1}{200\Omega} + \frac{1}{R(T) + R(T + \Delta T)} \quad (5)$$

$$\frac{V_0}{V_{AC}} = \frac{4}{5 + \frac{200\Omega}{R(T)+R(T+\Delta T)}} \quad (6)$$

te konačno:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_{AC}} \frac{1}{4} \left(5 + \frac{200\Omega}{R(T) + R(T + \Delta T)} \right) \quad (7)$$

S druge strane, mjereni napon ΔV ovisi o naponu na mostu V_0 na sljedeći način:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{2} - \frac{R(T)}{R(T) + R(T + \Delta T)} \quad (8)$$

Numeričkim rješavanjem transcendentálnih jednadžbi (7) i (8), za izmjerene vrijednosti ΔV , pronalaze se pripadne razlike temperatura bakrene platforme i uzorka ΔT . Ovakav postupak otkriva nam stvarnu temperaturu uzorka, ali kako ne funkcionira na temperaturama ispod 18K odlučili smo ga izostaviti pri obradi mjerenja prikazanih u ovom seminaru.

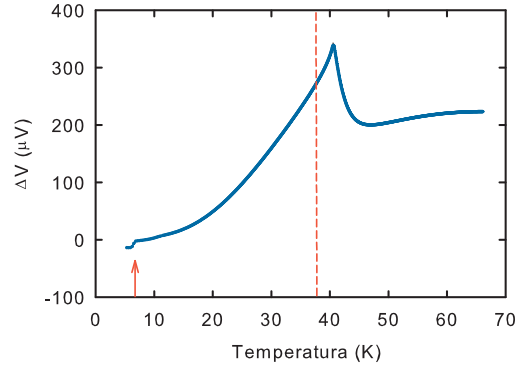
Također, bitno je naglasiti da osjetljivost platinskih termometara na temperaturama ispod 50K drastično opada [4] što uvodi neuklonjivu nepreciznost u mjerenja.

III. REZULTATI MJERENJA I DISKUSIJA

Izloženom metodom ispitali smo tri uzorka. Prvo mjerenje izvršeno je na CoF_2 zbog njegovog jakog antiferomagnetskog prijelaza na oko 38K. Preostala dva mjerenja izvršena su na različito dopiranim $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ kupratnim supravodičima $x_{opt} = 15\%$ te $x_{ud} = 3\%$ s namjerom detekcije feronematske faze.

III.A. CoF_2

Monokristalni uzorak kobalt fluorida (mase 25mg) ima poznatu vrijednost Neelove temperature $T_N=38\text{K}$. Rezultati mjerenja za ovaj uzorak prikazani su na Slici 7. Dobi-

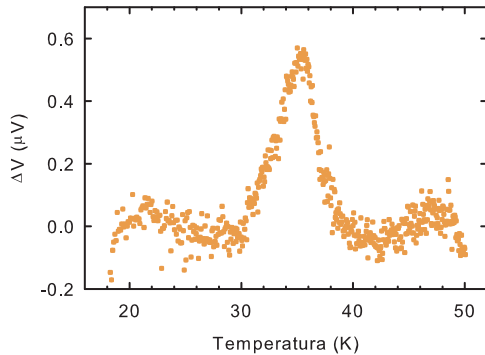


Slika 7: Ponašanje toplinskog kapaciteta u ovisnosti o temperaturi uzorka CoF_2 . Iscrtkana crvena linija označava stvarnu temperaturu antiferomagnetskog prijelaza. Crvena strelica označava temperaturu supravodljivog prijelaza lema.

veni rezultati slažu se s očekivanim jakim antiferomagnetskim faznim prijelazom drugog reda što opravdavaju korištenu metodu mjerenja. Prikazane vrijednosti temperature u ovom mjerenju nisu preračunate u stvarnu temperaturu uzorka. Na grafu, crvenom iscrtkanom crtom, označena je stvarna temperatura prijelaza ovog uzorka. Vidimo očito "kašnjenje" faznog prijelaza za oko 2K. U mjerenju vidimo i maleni skok u toplinskom kapacitetu na temperaturi od oko 6.5K. Njegovo objašnjenje pronalazimo u supravodljivom prijelazu legure $60\text{Sn}-40\text{Pb}$ koja se koristi pri lemljenju žica, a čija je stvarna temperatura prijelaza na 7.8K [5].

III.B. OPTIMALNO DOPIRAN LSCO

Pri optimalnom dopiranju mjereni monokristal $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ posjeduje supravodljivi prijelaz na temperaturi 37K. Supravodljivi prijelaz ostavlja slabiji signal od antiferomagnetskog. Nadalje, ovaj uzorak je odabran zbog

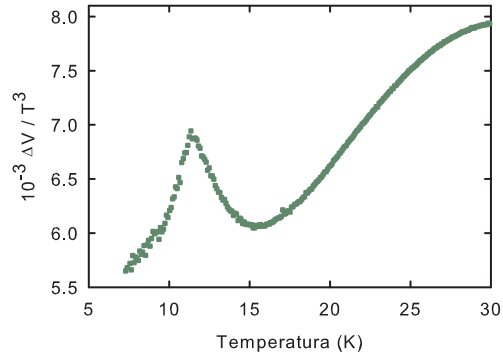


Slika 8: Ponašanje toplinskog kapaciteta u ovisnosti o temperaturi za optimalno dopiran LSCO.

njegove vrlo male mase (6.9mg) što dodatno umanjuje signal. Time smo htjeli testirati osjetljivost naše metode. Kako bi detektirali tako mali signal, bio je potreban poseban pristup pri obradi dobivenih podataka. Iz dobivenog mjerenja izdvojili smo podatke oko vrha supravodljivog prijelaza. Na preostale podatke vršili smo prilagodbu funkcijom čije smo vrijednosti oduzeli od ukupnog mjerenja. Konačan, obrađen signal prikazan je na Slici 8. Vidi se jasan, proširen vrh na temperaturi od oko 38K. Jačina izmjenog signala od oko $0.5\mu V$ ukazuje na visoku osjetljivost ove metode mjerenja.

III.c. LSCO DOPIRAN S $x_{ud} = 3\%$ ŠUPLJINA

Jedan od ciljeva ovog seminara bio je detekcija feronematske faze u jako poddopiranim kupratnim supravodičima. Za takav uzorak odabran je poddopiran LSCO s $x_{ud} = 3\%$ dopiranih šupljina. Uzorak je, za razliku od optimalno dopiranog LSCO-a, puno veće mase (124.7mg) te u prahu. U dobivenom mjerenju jasno se vidi fazni prijelaz na oko 11K. Kako bi istaknuli signal iz pozadinskog šuma, dobivene podatke podijelili smo s T^3 . Fizikalno opravdanje ovakvog postupka pronalazimo u činjenici da fononi, čija je ovisnost o temperaturi upravo takva, najviše doprinose toplinskom kapacitetu na niskim temperaturama. Rezultati

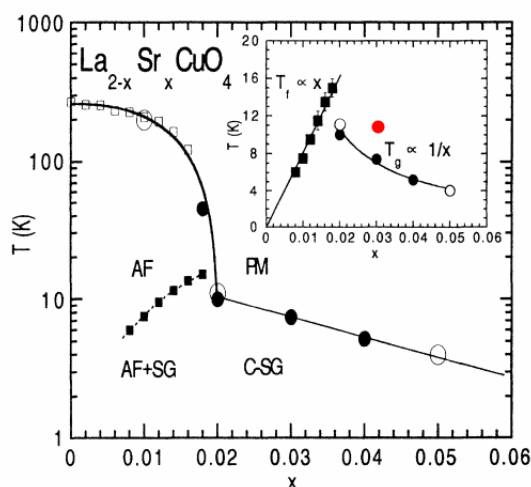


Slika 9: Rezultat dobiven dijeljenjem izmjenog napona s T^3 u ovisnosti o temperaturi za poddopiran LSCO, $x_{ud} = 3\%$.

obrade podataka na ovakav način prikazani su na Slici 9. Mjerenja ukazuju na postojanje jasnog faznog prijelaza na temperaturi od oko 11K. Konzultiranjem s literaturom, usporedili smo naša mjerenja s mjerenjima obavljenim nuklearnom kvadrupolnom rezonancijom [6] (Slika 10). Za dopiranje od $x_{ud} = 3\%$ u citiranom članku postoji tzv. spin glass prijelaz na nižim temperaturama od oko 7K koji ne objašnjava naš pronalazak. S druge strane, na istom dijagramu za uzorke dopirane do $x = 2\%$ detektirana su neobična dugodosežna spinska uređenja čija je temperaturna ovisnost proporcionalna s koncentracijom dopiranih šupljina $T_f \propto x$. Nadalje, kao objašnjenje takve pojave u članku se navode mikroskopske teorije koje predviđaju vezanje lokaliziranih šupljina preko dugodosežnih perturbacija induciranih u AF pozadini. Njihove predviđene temperature T_f zamrzavanja efektivnih spinova šupljina su se dobro slagale s NQR mjerenjima. Ovakvi zaključci opravdavaju pripisivanje feronematske faze signalu u našem uzorku na 11K.

IV. ZAKLJUČAK

DTA pokazala se kao vrlo uspješna metoda detekcije promjena u toplinskim kapacitetima reda veličine $0.5\mu V$. Za mjerenje tako malih signala potrebno je što više suzbiti ter-



Slika 10: Magnetski fazni dijagram $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Crni kvadrati prikazuju mjerenja dobivena NQR. Crvenom točkom označeno je dobiveno mjerenje. PM (paramagnet), AF (antiferomagnet), SG (spin glass), CSG (klusterski spin glass). Preuzeto iz [6].

malni šum te šum eksperimentalnih uređaja. Pri konstrukciji probe važno je dobro termalizirati sve eksperimentalne žice i paziti na utjecaj toplinskog zračenja. Posebno je bila važna glatka kontrola temperature uzorka koju smo postigli modeliranjem vlastite funkcije koja generira potrebne vrijednosti snage grijača. Nadalje, pri mjerenju malih signala potrebni su uređaji velikih preciznosti. U provedenim mjerenjima uočeno je da zaokruživanje vrijednosti otpora na 6 decimala pri određivanju temperature uvodi dovoljno velik šum koji otežava obradu dobivenih rezultata. Zbog toga smo umjesto *Lakeshore* temperaturnog kontrolera za određivanje temperature CERNOX senzora koristili *Agilent* digitalni multimetar više preciznosti.

Mjerenja faznih prijelaza provedena su na monokristalnom uzorku CoF_2 i uzorcima u prahu optimalno dopiranog ($x = 15\%$) i poddopiranog ($x = 3\%$) $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Za uzorak CoF_2 pronalazimo očekivani oblik signala antiferomagnetskog prijelaza drugog reda. Za preostala mjerenja preračunali smo izmjerene tem-

perature na bakrenoj platformi u stvarne temperature uzorka korištenjem podataka o shemi elektroničkog sklopa i ovisnosti otpora platinjskih termometara o temperaturi. Uspješno je detektiran signal od supravodljivog prijelaza optimalno dopiranog uzorka LSCO-a koji se slaže s očekivanim vrijednostima temperature. Pokušaj otkrivanja feronematske faze u poddopiranom uzorku LSCO-a s $x = 3\%$ dopiranih šupljina, rezultirao je jasno detektiranim signalom na temperaturi od oko 11K. Usporedba s literaturom u kojoj je za isti uzorak mjerenje provedeno NQR metodom nije opovrgla naše sumnje da se uistinu radi o feronematskom faznom prijelazu. Prijedlog za daljnja istraživanja feronematske faze bio bi mjerenje uzoraka s različitim postotcima dopiranja. Također bilo bi potrebno odrediti vrstu slomljene simetrije i provjeriti njezino slaganje s teorijskim pretpostavkama. Mjerenje piezo efekta, mogla bi biti jedna od metoda za testiranje loma inverzijske simetrije.

ZAHVALE

Zahvaljujem se prof. Miroslavu Požeku na omogućavanju izrade ovog seminara te poticaju i ohrabrenju za bavljenje znanošću. Posebno hvala Damjanu Pelcu na uloženom vremenu, strpljivosti, pristupačnosti te prenesenom znanju i iskustvu.

LITERATURA

- [1] N. Plakida, High-Temperature Cuprate Superconductors, Springer series in solid-state science 166, 2010.
- [2] Capati, M. *et al.* Electronic polymers and soft-matter-like broken symmetries in underdoped cuprates. *Nat. Commun.* 6:7691 doi:10.1038/ncomms8691 (2015).
- [3] A. Schilling, O. Jeandupeux, High-accuracy differential thermal analysis: A tool for calorimetric investigation on small high-temperature-superconductor specimens. *Phys. rev. B* 52, 9714 (1995).

- [4] <http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-temperature-sensors/platinum-rtds/models/pages/overview.aspx>
- [5] <http://www.mtm-inc.com/ac-20140407-when-superconductivity-is-unanticipated.html>
- [6] F. C. Chou *et al.* Magnetic Phase Diagram of Lightly Doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ from ^{139}La Nuclear Quadrupole Resonance. *Phys. Rev. Lett.* 71, 232 (1993)
- [7] Pelc, D. *et al.* Unconventional charge order in a co-doped high- T_c superconductor. *Nat. Commun.* 7:12775 doi: 10-1038/ncomms12775 (2016).
- [8] S. A. Kivelson *et al.* Electronic liquid-crystal phases of a doped Mott insulator. *Nature* 393, 550-553 (11 June 1998)
- [9] D. S. Fisher, G. M. Grinstein, Anil Kurana. Theory of Random Magnets, *Phys. Today* 56, Dec. 1988.
- [10] J. Zaanen *et al.* From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides. *Nature* 518, 179–186 (12 February 2015)
- [11] E. Fradkin *et al.* Theory of intertwined orders in high temperature superconductors. *Rev. Mod. Phys.* 87, 457 (2015)