

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FIZIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Pošto smo na VI sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, održanoj 25. marta 2015. godine, određeni za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije **SIGNATURES OF HIDDEN QUANTUM CRITICALITY IN THE HIGH-TEMPERATURE CHARGE TRANSPORT NEAR THE MOTT TRANSITION** (Pokazatelji skrivene kvantne kritičnosti u visoko-temperaturnom transportu naelektrisanja u blizini Motovog prelaza) iz naučne oblasti Fizika kondenzovane materije i statistička fizika, koju je kandidat **JAKŠA VUČIČEVIĆ** predao Fizičkom fakultetu u Beogradu dana 23. marta 2015. godine, podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

1 Osnovni podaci o kandidatu

1.1 Biografski podaci

Jakša Vučićević je rođen 30. 05. 1984. godine u Beogradu. Osnovne studije na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Primenjena fizika i informatika završio je 2009. godine. Diplomirao je sa prosečnom ocenom 9.06 uz diplomski rad pod nazivom Uticaj asimetrije gustine stanja na osobine Motovog metal-izolator prelaza. Doktorske studije na smeru Fizika kondenzovanog stanja materije Jakša Vučićević je započeo 2009. godine, pod mentorstvom dr Darka Tanaskovića i ispite je položio sa srednjom ocenom 10.00.

Od kraja 2009. godine Jakša Vučićević radi u Laboratoriji za primenu računara u nauci na Institutu za fiziku u Beogradu, najpre kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju, na projektu osnovnih istraživanja: Modeliranje i numeričke simulacije kompleksnih fizičkih sistema (OI141035), a od 01. 01. 2011. godine Jakša Vučićević je zaposlen na Institutu za fiziku kao istraživač saradnik na projektima ON171017: Modeliranje i numeričke simulacije složenih višestaničnih sistema i III45018: Nanostrukturni multifunkcionalni materijali i nanokompoziti.

1.2 Naučna aktivnost

Naučno-istraživački rad Jakše Vučićevića je u oblasti teorijske fizike kondenzovane materije. Glavna tema rada i sadržaj doktorske disertacije je proučavanje transportnih osobina u blizini Motovog metal-izolator prelaza iz perspektive kvantnih faznih prelaza. Pored toga, Jakša Vučićević je radio na više drugih tema, od kojih se posebno ističe rad o superprovodnom sparivanju na dvosloju heksagonalne rešetke.

Jakša Vučićević radi od 2009. godine u Laboratoriji za primenu računara u nauci na Institutu za fiziku u Beogradu kojom rukovodi dr Antun Balaž. Na istraživačkim temama čiji su rezultati prikazani u disertaciji Jakša je radio sa mentorom, dr Darkom Tanaskovićem, uz veoma česte diskusije sa prof. dr Vladimirom Dobrosavljevićem sa Državnog univerziteta Floride, SAD. Pored saradnika prof. Dobrosavljevića (H. Terletska, T. H. Lee), Jakša je na različitim projektima aktivno saradivao sa većim brojem istraživača iz raznih zemalja: M. Milovanović (Institut za fiziku Beograd), M. Rozenberg, M. Goerbig (Pariz, Francuska), Z.Y. Meng (Peking, Kina), C. Aguiar, H. Braganca (Belo Horizonte, Brazil). U okviru saradnje sa Z.Y. Mengom, Jakša je proveo tri nedelje na studijskom boravku na Institutu za fiziku Kineske akademije nauka u Pekingu. Takodje, Jakša Vučićević je imao važnu ulogu u dva bilateralna projekta sa Francuskom: *Quantum critical transport near the Mott metal-insulator transition* i *Topological states and phases in low-dimensional electron systems*. Učestvovao je do sada na većem broju konferencija i naučnih škola, a svoje rezultate je predstavio i na predavanjima na Institutu za fiziku u Pekingu i Parizu (Collège de France).

U dosadašnjem radu Jakša Vučićević je objavio 3 rada u vrhunskim međunarodnim časopisima kategorije M21 (jedan Physical Review Letters i dva Physical Review B) a jedan rad je pod recenzijom u časopisu Physical Review Letters čiji je preprint dostupan na arhivi. Radovi su do sada citirani 16 puta bez autocitata i citata koautora.

2 Opis doktorske disertacije

2.1 Osnovni podaci

Doktorska disertacija Jakše Vučićevića pod nazivom *Signatures of hidden quantum criticality in the high-temperature charge transport near the Mott transition* (Pokazatelji skrivene kvantne kritičnosti u visoko-temperaturnom transportu naelektrisanja u blizini Motovog prelaza) napisana je na engleskom jeziku na 147 strana, ne računajući naslovnu stranu, zahvalnice, sažetak i sadržaj. Teza se sastoji od 5 poglavlja, sažetka na srpskom jeziku i spiska literature od 106 referenci. Rezultati u tezi su ilustrovani na 71 slika.

Mentor rada na disertaciji je bio dr Darko Tanasković, viši naučni saradnik Instituta za fiziku u Beogradu. On ispunjava sve uslove propisane za mentorstvo i imenovan je odlukom Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu na IX sednici održanoj 26. juna 2013. godine. Rezultati koji su prikazani u disertaciji ostvareni su kroz saradnju kolege Vučićevića sa nekoliko saradnika, pri čemu treba posebno istaći Prof. dr Vladimira Dobrosavljevića sa Državnog univerziteta Floride koji je bio uključen u kreiranje teme rada i mnogobrojne diskusije.

Rezultati prikazani u tezi su do sada objavljeni u jednom radu u časopisu Physical Review Letters (rad [1] iz spiska publikacija), jednom radu u časopisu Physical Review B (rad [3]), i radu koji je u procesu recenzije u časopisu Physical Review Letters i dostupan je na internet arhivi <http://arxiv.org/abs/1412.7960>.

2.2 Predmet i cilj doktorske disertacije

Motov metal-izolator prelaz je jedna od najvažnijih posledica jakih elektronskih korelacija i jedna od najaktivnijih oblasti istraživanja u fizici kondenzovane materije. I eksperiment i teorija jasno ukazuju da je Motov prelaz fazni prelaz prvog reda i da ispoljava koegzistenciju faza do neke kritične temperature T_c . Transportne i termodinamičke osobine u okolini kritične tačke su detaljno proučavane i pokazalo se da mogu da se opišu teorijom klasičnih faznih prelaza Izingove klase univerzalnosti. Ispod T_c fazni prelaz prvog reda razdvaja paramagnetni Motov izolator i paramagnetni metal. Na najnižim temperaturama obe faze često razvijaju dugodometno uređenje - antiferomagnetizam ili superprovodnost. Motov prelaz razdvaja dve različite faze sve do nulte temperature što ga čini kvantnim faznim prelazom.

Tema doktorske disertacije Jakše Vučičevića se odnosi na neka od najvažnih otvorenih pitanja o Motovom prelazu: da li Motov mehanizam može u nekim slučajevima da proizvede fenomenologiju drastično različitu od faznog prelaza prvog reda? Da li T_c može da se spusti na nulu, tj. može li Motov prelaz da se svede na kvantnu kritičnu tačku? Teorija sugeriše da je ovo moguće, ali takva predviđanja još uvek čekaju na eksperimentalnu potvrdu. Postoji li univerzalno ponašanje na visokoj temperaturi povezano sa Motovim prelazom, kakvo se često opaža u kontekstu kvantnih ($T = 0$) faznih prelaza?

Teorijski pristup korišćen u disertaciji je dinamička teorija srednjeg polja (DMFT) koja se koristi za proučavanje sistema u kojima je prisutna jaka odbojna među-elektronska interakcija. DMFT u okviru jedinstvenog teorijskog okvira opisuje različite transportne režime: Fermijevu tečnost, Motov izolator, metal-izolator prelaz koji ih deli ispod kritične temperature, kao i režim postepene destrukcije dugoživućih Landauovih kvazičestica (režim nekoherentnog transporta, odnosno lošeg metala). DMFT daje najbolje predikcije na visokim temperaturama kada su prostorne korelacije manje izražene, što je upravo i režim koji je od najvećeg značaja za rad iz disertacije.

2.3 Pregled naučnih rezultata izloženih u doktorskoj disertaciji

U doktorskoj disertaciji Jakše Vučičevića prikazano je do sada najdetaljnije rešenje DMFT jednačina za polupopunjeni i dopirani Habardov model u širokom opsegu faznog dijagrama. Numerički rezultati su dobijeni u aproksimaciji iterativne perturbativne teorije i metodom kvantnog Monte Karla u kontinualnom vremenu. Pokazano je da se osobine Motovog metal-izolator prelaza u visokotemperaturnom režimu između metala i izolatora poklapaju sa osobinama koje proističu iz postojanja kvantne kritične tačke, uprkos faznom prelazu prvog reda i regionu koegzistencije metalne i izolatorske faze kojima je kvantna kritična tačka zamaskirana.

U prvod delu rada je sa visokom rezolucijom izračunata provodnost širom faznog dijagrama za polupopunjeni Habardov model. Određena je linija nestabilnosti $U^*(T)$ u nadkritičnom delu faznog dijagrama, koja otkriva suštinsku podelu između metalnog i izola-

torskog ponašanja i predstavlja produžetak linije faznog prelaza prvog reda na nadkritične temperature (iznad kritične tačke (U_c, T_c)). Linija nestabilnosti je definisana minimumom zakrivljenosti funkcionala slobodne energije $F[G(i\omega_n)]$ pri zadatoj temperaturi, a u praksi je određena praćenjem brzine konvergencije rešenja u DMFT iterativnoj proceduri. Ova linija je jasno definisana i za čisto kvantni ($T = 0$) fazni prelaz, a u analogiji sa klasičnim faznim prelazima nazvana je kvantna Vidomova linija. Analizirani su i drugi mogući načini za određivanje linije nestabilnosti, na primer kao linije prevojnih tačaka u krivama otpornosti. Sprovedena je detaljna analiza skaliranja rezultata za otpornost (kako se to inače čini u slučaju čisto kvantnih faznih prelaza) da bi se utvrdila funkcija skaliranja sa temperaturom T u argumentu umesto udaljenosti od kritične tačke $|T - T_c|$. Pronađeno skaliranje, $\rho = \rho(U^*(T), T)F((U - U^*(T))/T^{-1/z\nu})$ je veoma kvalitetno, a pronašlo je potvrdu i u eksperimentalnom radu na Motovim organskim izolatorima koji su kolege iz Japana objavile u časopisu Nature Physics u februaru ove godine.

Drugi deo disertacije proširuje istraživanje na dopirani Habardov model određivanjem trodimenzionalnog faznog dijagrama u (μ, U, T) prostoru. Pokazano je smanjivanje kritične temperature koegzistencije faza T_c sa povećanjem interakcije U i primenjena je analiza skaliranja na ovaj slučaj. U ovom slučaju hemijski potencijal μ ulazi umesto interakcije U u zakon skaliranja $\rho = \rho(\mu^*(T), T)F((\mu - \mu^*(T))/T^{-1/z\nu})$. Pokazano je da je Motov prelaz povezan sa univerzalnim visoko-temperaturnim transportom tipičnim za postojanje kvantne kritične tačke, što se u dopiranom slučaju poklapa sa transportnim režimom lošeg metala sa linearnom otpornošću u funkciji temperature. Krećući od pretpostavke o važenju skaliranja, izvedena je poluanalitička formula koja reprodukuje i linearnost i nagib krivih otpornosti u visoko-temperaturnom delu DMFT faznog dijagrama, uz dobro kvalitativno slaganje sa eksperimentima na poznatom jedinjenju bakar-oksida $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.

2.4 Spisak publikacija Jakše Vučićevića

U dosadašnjem radu Jakša Vučićević je objavio 3 rada u vrhunskim međunarodnim časopisima: jedan rad u Physical Review Letters (IF=7.728) i 2 rada u Physical Review B (IF=3.664). Jedan rad je u procesu recenzije u časopisu Physical Review Letters čiji je preprint dostupan na arhivi <http://arxiv.org/abs/1412.7960>. Radovi su do sada citirani 16 puta bez autocitata i kocitata. Rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji su bazirani na radovima [A1] i [A3], kao i preprintu: **J. Vučićević**, D. Tanasković, M. Rozenberg, and V. Dobrosavljević, *Bad-metal behavior reveals Mott quantum criticality in doped Hubbard models*, <http://arxiv.org/abs/1412.7960>. Doprinos kandidata u objavljenim radovima je veoma veliki i ogleda se: u samostalnim analitičkim i, posebno zahtevnim, numeričkim proračunima, fizičkim zapažanjima, kao i inovativnom doprinosu u prezentaciji i pisanju radova.

- [1] H. Terletska, **J. Vučićević**, D. Tanasković, and V. Dobrosavljević, *Quantum Critical Transport Near the Mott Transition*, Phys. Rev. Lett. 107, 026401 (2011); (ISSN 1079-7114, IF=7.728, M21).
- [2] **J. Vučićević**, M. O. Goerbig and M. V. Milovanovic, *d-wave superconductivity on the honeycomb bilayer*, Phys. Rev. B **86**, 214505 (2012); (ISSN 1550-235X, IF=3.664, M21).
- [3] **J. Vučićević**, H. Terletska, D. Tanasković, and V. Dobrosavljević, *Finite-temperature crossover and the quantum Widom line near the Mott transition*, Phys. Rev. B **88**, 075143 (2013); (ISSN 1550-235X, IF=3.664, M21).

Zaključak

Doktorska teza Jakše Vučićevića sadrži značajne nove rezultate, kao i novi teorijski koncept za opis i razumevanje fizike u visoko-temperaturnom nekoherentnom transportu u okolini Motovog metal-izolator prelaza. Imajući u vidu aktuelnost teme, značaj dobijenih rezultata i način njihove prezentacije u disertaciji, kao i dosadašnji uspešan rad i publikacije kandidata, smatramo da doktorski rad *Signatures of hidden quantum criticality in the high-temperature charge transport near the Mott transition* (Pokazatelji skrivene kvantne kritičnosti u visoko-temperaturnom transportu naelektrisanja u blizini Motovog prelaza) kandidata Jakše Vučićevića predstavlja značajan doprinos naučnoj oblasti Fizika kondenzovane materije i statistička fizika, i da su zadovoljeni svi propisani uslovi za odobravanje javne odbrane teze. Stoga, predlažemo Nastavno-naučnom veću Fizičkog fakulteta da odobri njenu javnu odbranu.

Beograd, 25. mart 2015. god.

dr Darko Tanasković
viši naučni saradnik
Institut za fiziku u Beogradu

prof. dr Zoran Radović
redovni profesor
Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu

prof. dr Đorđe Spasojević
vanredni profesor
Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Mihajlo Vanević
docent
Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Nenad Vukmirović
viši naučni saradnik
Institut za fiziku u Beogradu