

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FIZIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Pošto smo na V sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 22. februara 2023. godine određeni za članove komisije za pripremu izveštaja o doktorskom radu Tijane Radenković pod nazivom “VIŠE GRADIJENTNE TEORIJE I KVANTNA GRAVITACIJA”, podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

1 Osnovni podaci o kandidatu

1.1 Biografski podaci

Tijana Radenković je rođena 21. marta 1992. godine u Beogradu, gde je završila osnovnu školu “Miloš Crnjanski” i Matematičku gimnaziju 2011. godine. Osnovne akademske studije na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu završila je u septembru 2016. godine, smer Teorijska i eksperimentalna fizika, sa prosečnom ocenom 9,33. Na istom smeru je završila i master studije septembra 2017. sa prosečnom ocenom 9,33 i odbranjenim master radom pod nazivom “Kvantna gravitacija na deo-po-deo ravnim mnogostrukostima”, pod rukovodstvom dr Marka Vojinovića, višeg naučnog saradnika Instituta za fiziku u Beogradu. Za master rad Tijani je dodeljena nagrada “Prof. Ljubomir Ćirković” za školsku 2017/2018. godinu. Doktorske studije Tijana Radenković je upisala 2017. godine na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, uža naučna oblast Kvantna polja, čestice i gravitacija, i položila sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija, sa prosečnom ocenom 9,50.

U periodu od 2011. do 2019. godine Tijana je radila honorarno pri programima Fizika i TEH u Istraživačkoj stanici Petnica. Iskustvo u nastavi stekla je školske 2016/2017 predajući fiziku u X Beogradskoj gimnaziji, i školske 2019/2020 kao profesor akustike u muzičkim školama “Stanković”, “Vatroslav Lisinski” i “Josip Slavenski”.

1.2 Naučna aktivnost

Tijana Radenković je uključena u istraživanja u oblasti teorijske fizike visokih energija, odnosno fizike gravitacije, čestica i polja. Od aprila 2017. godine zaposlena je na Institutu za fiziku u Beogradu, u Grupi za gravitaciju, čestice i polja. Učestvovala je na nekoliko međunarodnih naučnih konferencija i škola za doktorante, i kao član tima na sledećim istraživačkim projektima:

- 2017 – 2020: projekt ON171031 “Fizičke implikacije modifikovanog prostor-vremena”, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (rukovodilac prof. dr Maja Burić, redovni profesor Fizičkog fakulteta).
- 2020 – 2022: bilateralni projekt između Srbije i Portugala, finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, pod nazivom “Simetrije i kvantizacija”, broj 337-00-00227/2019-09/57, (rukovodilac dr Igor Salom, viši naučni saradnik Instituta za fiziku).
- 2021 – 2022: projekt “Symmetries and Quantization” (SQ2020), broj 6427195, iz programa DIJASPORA Fonda za nauku Republike Srbije (rukovodilac dr Igor Salom, viši naučni saradnik Instituta za fiziku).

- 2022 – danas: projekt “Quantum Gravity from Higher Gauge Theory” (QGHG-2021), broj 7745968, iz programa IDEJE Fonda za nauku Republike Srbije (rukovodilac dr Marko Vojinović, viši naučni saradnik Instituta za fiziku).

2 Opis predatog rada

2.1 Osnovni podaci

Doktorska teza “Više gradijentne teorije i kvantna gravitacija” urađena je pod rukovodstvom dr Marka Vojinovića, višeg naučnog saradnika Instituta za fiziku u Beogradu (dr Vojinović je određen kao mentor na VII sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta održanoj 12. maja 2021. godine). Teza tematski predstavlja istraživanje vezano za konstrukciju modela kvantne gravitacije i ujedinjenja sa ostalim fundamentalnim poljima, u okviru formalizma viših gejdž teorija. Rad je napisan na 242 strane i sadrži 9 slika, 21 tabelu i 48 referenci, ima 10 poglavlja i 5 dodataka.

2.2 Predmet i cilj rada

Formulisanje kvantne teorije gravitacionog polja predstavlja jedan od centralnih nerešenih problema moderne teorijske fizike. Formalizam kvantne teorije polja je uspešno primenjen za kvantni opis elektromagnetne, jake i slabe sile, kulminirajući u Standardnom Modelu elementarnih čestica. Standardni Model odlično opisuje sve negravitacione pojave na energetskim skalama dostupnim trenutnim eksperimentima. Međutim, ukoliko se isti metod kvantne teorije polja primeni za kvantni opis gravitacionog polja, rezultat je model koji nije renormalizabilan, zavisi od beskonačnog broja slobodnih parametara, i zbog toga gubi prediktivnu moć. Ovaj problem je moguće rešiti jedino formulisanjem teorije kvantne gravitacije na neperturbativan način, zadavanjem kako kinematike tako i dinamike u teoriji na proizvoljno visokim energetskim skalama, odnosno proizvoljno malim rastojanjima (tzv. *UV zatvaranje* teorije). U nedostatku eksperimentalnih podataka na skalama bliskim Plankovoj skali, koji bi sugerisali oblik i osobine UV zatvaranja teorije, razvijeno je mnogo teorijskih pristupa problemu, koji nude različite tipove UV zatvaranja, svaki sa svojim prednostima i manama. Jedan od najjuticajnijih i najviše razvijanih pravaca istraživanja, od 1980-tih godina do danas, predstavlja teorija struna. Osim teorije struna, drugi značajni pristupi su kvantna gravitacija na petljama, nekomutativna geometrija i nekomutativna gravitacija, kauzalne dinamičke triangulacije, teorija kauzalnih skupova, itd.

U okviru formalizma kvantne gravitacije na petljama, osnovni matematički gradivni objekt su Wilson-ove petlje, sa matematičkom strukturom holonomije, kojima se opisuju stepeni slobode gravitacionog polja na gejdž invarijantan način. Rezultujuća teorija kvantne gravitacije se može formulisati bilo kanonskom kvantizacijom (podelom prostorvremena na prostor i vreme), bilo formulisanjem odgovarajućeg Feynman-ovog integrala po konfiguracijama gravitacionog polja (kovarijantni metod). Prvi pristup je počev od 1986. godine razvijen u tzv. *kanonsku kvantnu gravitaciju na petljama*, dok je drugi pristup počeo da se razvija u ranim 1990-tim godinama pod nazivom *modela spinskih pena*. Oba pristupa daju uspešan neperturbativan kvantni opis gravitacionog polja, ali nažalost imaju i određene nedostatke. U kanonskom pristupu, centralni nedostatak je izuzetno komplikovana jednačina dinamike, koju je tehnički veoma teško rešavati, čak i u klasičnom limesu. Sa druge strane, pristup spinskih pena opisuje dinamiku teorije na zadovoljavajući način, ali isključivo za gravitaciono polje — ispostavlja se da je maltene neizvodljivo dodati polja materije u model, odnosno kuplovati Standardni Model sa ovako formulisanom kvantnom teorijom gravitacije.

Glavni predmet i cilj doktorske disertacije Tijane Radenković predstavlja istraživanje metoda kojim se mogu prevazići nedostaci postojećih modela spinskih pena, pre svega kuplovanje materije sa gravitacijom. Prvi korak ka rešavanju ovog problema ostvaren je uopštavanjem modela spinske pene na tzv. *spinkub model*, koji umesto simplicijalnog 2-kompleksa gravitacione stepene slobode opisuje simplicijalnim 3-kompleksom, i baziran je na opisu gejdž simetrije kategorijskom strukturom 2-grupe,

u kojoj za razliku od obične Lie-jeve grupe postoji ne samo koneksija i odgovarajuća holonomija, nego i tzv. 2-koneksija i 2-holonomija. Koncept 2-grupe potiče od ideje uopštenja pojma paralelnog transporta *duž linije* na paralelni transport *po površini*. Nekoliko osobina spinkub modela je već proučeno u literaturi. Međutim, za pravilno kuplovanje polja materije sa gravitacijom struktura 2-grupe nije dovoljna, već se ispostavlja da celu strukturu treba uopštiti za još jedan korak, na strukturu *3-grupe*. Doktorska disertacija Tijane Radenković predstavlja formulaciju temelja za nov model kvantne gravitacije (tzv. *spin-4 model*) baziran na strukturi 3-grupe i simplicijalnom 4-kompleksu, koji bi po prvi put na potpuno unificiran način opisivao stepene slobode svih polja, kako gravitacije tako i materije. Postupak konstrukcije modela predstavlja kategorijsko uopštavanje dobro poznatog postupka konstrukcije modela spinskih pena i spinkub modela, i centralni koraci konstrukcije novog modela su realizovani u Tijaninoj tezi.

2.3 Publikacije

Publikacije direktno proistekle iz ove doktorske teze su [1–6], navedene u odeljku 3. Do sada imaju ukupno 22 citata, od toga 12 heterocitata. Publikacije [1–4] su međunarodni naučni časopisi ([1,4] su kategorije M21, a [2,3] su kategorije M22), dok su [5,6] publikacije proistekle na osnovu predavanja na međunarodnim naučnim skupovima (kategorija M33). Zbirni impakt faktor svih publikacija iznosi **IF=18,817**.

2.4 Pregled naučnih rezultata izloženih u tezi

Naučni rezultati izloženi u doktorskoj disertaciji mogu se grupisati u tri celine — rezultati vezani za konstrukciju klasičnog $3BF$ dejstva sa vezama, koje predstavlja višu gejdž teoriju u kojoj je gravitaciono polje na prirodan način kuplovano sa poljima materije [1,5,6], zatim analiza simetrije i Hamiltonova analiza topološkog sektora $3BF$ teorije [2,3], i konačno konstrukcija topološke invarijante koja odgovara definisanju konfiguracionog integrala za topološko $3BF$ dejstvo, i predstavlja neperurbativnu kvantizaciju teorije [4].

2.4.1 Konstrukcija klasičnog dejstva

Da bi se program kvantizacije metodom spinske pene mogao realizovati i uopštiti u kontekstu viših gejdž teorija, kao prvi korak neophodno je preformulisati klasičnu teoriju u oblik pogodan za neperurbativnu kvantizaciju. Relevantna klasična teorija za fiziku predstavlja Opštu teoriju relativnosti (preciznije Einstein-Cartan-ovu teoriju) kuplovanu sa Standardnim Modelom elementarnih čestica (sa opisom neutrino sektora kao levih i desnih Dirakovih čestica). Korišćenjem formalizma viših gejdž teorija i opisom simetrije strukturom 3-grupe, rezultat doktorske teze i radova [1,5,6] predstavlja $3BF$ dejstvo sa vezama koje su pogodno određene da reprodukuju klasične jednačine kretanja za Yang-Mills-ovo, Klein-Gordon-ovo, Dirac-ovo, Weyl-ovo i Majorana polje kuplovano sa Einstein-Cartan-ovom gravitacijom. Ova polja pokrivaju svu poznatu materiju i interakcije u prirodi (sa mogućim izuzetkom tamne materije), dok odgovarajuće $3BF$ dejstvo sa vezama ima oblik neophodan za program kvantizacije metodom spinske pene. Takođe je definisan konkretan izbor 3-grupe koji odgovara celom Standardnom Modelu kuplovanom sa gravitacijom.

2.4.2 Hamiltonova analiza i simetrije

Budući da je topološko $3BF$ dejstvo osnova za kvantizaciju metodom spinske pene, u doktorskoj tezi i radovima [2,3] urađena je cela Hamiltonova analiza ovog dejstva, i određena kompletna gejdž grupa simetrije, dualna odgovarajućoj 3-grupi korišćenoj za konstrukciju dejstva. Osim što je dualnost između gejdž grupe i 3-grupe interesantna sa matematičke tačke gledišta, poznavanje ove dualnosti omogućava bolje razumevanje inicijalne strukture 3-grupe i njenim posledicama po osobine teorije.

Takođe, otvoren je put razumevanju načina na koji veze u ukupnom dejstvu narušavaju simetriju topološkog dejstva.

2.4.3 Konstrukcija topološke invarijante

Postupak kvantizacije metodom spinske pene vrši se tako što se konstruiše topološka invarijanta koja odgovara konfiguracionom integralu topološkog $3BF$ dejstva, zadatom na nekoj triangulaciji 4-dimenzionalne mnogostrukosti prostorvremena, nakon čega se ta invarijanta deformiše nametanjem veza iz ne-topološkog sektora dejstva klasične teorije. Dokaz da topološka invarijanta zaista ostaje nepromenjena kada se promeni izbor triangulacije mnogostrukosti vrši se ispitivanjem njenog ponašanja na tzv. Pachner-ove poteze — lokalne transformacije date triangulacije kojom se ona može pretvoriti u proizvoljnu drugu triangulaciju iste mnogostrukosti, u konačno mnogo koraka. Ovo je kritična osobina za metod tzv. topološke kvantne teorije polja, na kojoj se bazira postupak kvantizacije metodom spinske pene. Jedan od centralnih rezultata doktorske teze i rada [4] predstavlja eksplicitna konstrukcija tražene invarijante topološkog $3BF$ dejstva, za bilo koji izbor odgovarajuće 3-grupe simetrije. Takođe, dat je eksplicitan dokaz da invarijanta ostaje nepromenjena pri primeni Pachner-ovih poteza. Ovo je izuzetno značajan rezultat, ne samo kao eksplicitna konstrukcija konfiguracionog integrala za topološku kvantnu teoriju polja u kontekstu viših gejdž teorija, nego i u matematičkom smislu, jer je u pitanju nova invarijanta nad 4-dimenzionalnim mnogostrukostima.

3 Spisak publikacija kandidata

3.1 Radovi u međunarodnim časopisima

- [1] T. Radenković and M. Vojinović,
“Higher gauge theories based on 3-groups”,
JHEP **10**, 222 (2019).
[DOI: 10.1007/JHEP10(2019)222] [arXiv:1904.07566] [IF=5.875] [11 citata, 6 heterocitata]
- [2] T. Radenković and M. Vojinović,
“Hamiltonian analysis for the scalar electrodynamics as 3BF theory”,
Symmetry **12**, 620 (2020).
[DOI: 10.3390/sym12040620] [arXiv:2004.06901] [IF=2.713] [5 citata, 2 heterocitata]
- [3] T. Radenković and M. Vojinović,
“Gauge symmetry of the 3BF theory for a generic semistrict Lie three-group”,
Class. Quant. Grav. **39**, 135009 (2022).
[DOI: 10.1088/1361-6382/ac6b78] [arXiv:2101.04049] [IF=3.853] [3 citata, 2 heterocitata]
- [4] T. Radenković and M. Vojinović,
“Topological invariant of 4-manifolds based on a 3-group”
JHEP **07**, 105 (2022).
[DOI: 10.1007/JHEP07(2022)105] [arXiv:2201.02572] [IF=6.376] [1 citat]

3.2 Predavanja na međunarodnim konferencijama

- [5] T. Radenković and M. Vojinović,
“Construction and examples of higher gauge theories”,
SFIN XXXIII, 251 (2020).
[DOI: 10.48550/arXiv.2005.09404] [arXiv:2005.09404] [1 heterocitat]

- [6] T. Radenković and M. Vojinović,
“Quantum gravity and elementary particles from higher gauge theory”,
Ann. Univ. Craiova Phys. **30**, 74 (2020).
[DOI: 10.48550/arXiv.2103.08037] [arXiv:2103.08037] [1 heterocitat]

4 Zaključak

Na osnovu svega izloženog, komisija zaključuje da doktorska teza Tijane Radenković “VIŠE GRADIENTNE TEORIJE I KVANTNA GRAVITACIJA” daje značajan doprinos teorijskoj fizici visokih energija, odnosno naučnoj oblasti Kvantna polja, čestice i gravitacija, i da su zadovoljeni svi propisani uslovi za odbranu teze. *Zato predlažemo Nastavno-naučnom veću Fizičkog fakulteta da odobri njenu odbranu.*

Beograd, 20. mart 2023.

prof. dr Maja Burić
redovni profesor Fizičkog fakulteta

prof. dr Voja Radovanović
redovni profesor Fizičkog fakulteta

dr Branislav Cvetković
naučni savetnik Instituta za fiziku