

# NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FIZIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Pošto smo na II sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 24. decembra 2025. godine određeni za članove komisije za pripremu izveštaja o doktorskom radu Pavla Stipsića pod nazivom “SIMETRIJE U VIŠIM GRADIJENTNIM TEORIJAMA”, podnosimo sledeći

## IZVEŠTAJ

### 1 Osnovni podaci o kandidatu

#### 1.1 Biografski podaci

Pavle Stipsić je rođen 19.10.1996. godine u Aleksincu, gde je završio osnovnu školu i osnovnu muzičku školu. Septembra 2011. godine je upisao i 2015. godine završio Matematičku gimnaziju i teoretski odsek srednje muzičke škole Mokranjac u Beogradu. Osnovne akademske studije na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Teorijska i eksperimentalna fizika i osnovne akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Elektrotehnika i računarstvo, modul Elektronika, upisao je 2015. godine. Osnovne studije fizike je završio septembra 2019. godine, sa prosečnom ocenom 9,51, a na Elektrotehničkom fakultetu osnovne studije je završio u martu 2023. godine, sa prosečnom ocenom 8,61.

Master akademske studije je završio na Fizičkom fakultetu, u periodu od oktobra 2019. godine do septembra 2020. godine sa prosečnom ocenom 10,0, odbranivši master rad na temu “Uticaj magnetnog polja na provodnost u Habardovom modelu”, pod rukovodstvom dr Jakše Vučičevića, višeg naučnog saradnika Instituta za fiziku u Beogradu. Upisao je doktorske studije fizike na Fizičkom fakultetu u Beogradu, u užoj naučnoj oblasti Kvantna polja, čestice i gravitacija oktobra 2020. godine.

Od aprila 2021. godine je zaposlen kao istraživač pripravnik na Institutu za fiziku u Beogradu, u grupi za Gravitaciju, čestice i polja, čiji je rukovodilac dr Branislav Cvetković, naučni savetnik Instituta za fiziku u Beogradu. Bavi se naučnim istraživanjem pod rukovodstvom dr Marka Vojinovića, naučnog savetnika Instituta za fiziku u Beogradu, radeći na temama vezanim za ispitivanje narušenja simetrija u višim gradijentnim teorijama. Na Kolegijumu doktorskih studija Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, održanom 12.04.2023. godine, odobrena je tema doktorske teze Pavla Stipsića pod naslovom “Simetrije u višim gradijentnim teorijama”, a za mentora je određen dr Marko Vojinović.

#### 1.2 Naučna aktivnost

Pavle Stipsić se u svom naučnom radu tokom doktorskih studija, pod rukovodstvom dr Marka Vojinovića sa Instituta za fiziku u Beogradu, bavi problemima kvantne gravitacije i njenog ujedinjenja sa ostalim fundamentalnim silama.

Dosadašnji naučno-istraživački rad Pavla Stipsića se može klasifikovati u tri oblasti: (1) izučavanje fononski indukovanih spinskih relaksacionih procesa u spinskim kubitima (qubits), (2)

izučavanje uticaja magnetnog polja na provodnost materijala koji se mogu modelovati Habardovim modelom, i (3) izučavanje simetrija i osobina kvantne teorije gravitacije formulisane preko  $3BF$  modela u kontekstu viših gradijentnih teorija. Prve dve oblasti spadaju u njegov istraživački rad vezan za master tezu, dok je treća oblast vezana za istraživački rad u okviru rada na doktorskoj tezi.

U okviru izučavanja fononski indukovanih spinskih relaksacionih procesa u spinskim kubitima, posmatran je uticaj simetrije kvantne tačke na Rabijevu frekvenciju i fononski indukovane spinske relaksacione procese u jednoelektronskom spinskom kubit i uticaj izbora gating potencijala na zavisnost vremena života od pravca magnetnog polja za nekoliko diskretnih simetrija kubita na konkretnim primerima trougaonog, kvadratnog i pravougaonog potencijala jame [1,2].

U okviru izučavanja uticaja magnetnog polja na provodnost materijala koji se mogu modelovati Habardovim modelom, numeričkim simulacijama je ispitivana zavisnost provodnosti materijala modelovanih Habardovim modelom od primenjenog spoljašnjeg magnetnog polja u režimu slabih elektron-elektron interakcija na čvorovima rešetke na različitim temperaturama. Posmatrana je prosta kvadratna rešetka sa parametrom skoka (hopping parameter) između najbližih suseda. Takođe, analitički je rešena inverzna Furijeova transformacija po Macubara frekvencijama Loranovog razvoja Grinovih funkcija na konačnoj temperaturi za fermione i bozone [3].

Konačno, u okviru izučavanja kvantne teorije gravitacije preko viših gradijentnih teorija, proučavan je mehanizam eksplicitnog i spontanog narušenja simetrije u  $3BF$  teorijama sa vezama, i razmatran je Higsov mehanizam. Takođe je dat doprinos izučavanju Eno-Tajntelbom simetrije. Zatim, detaljno je proučena veza između kvantne  $3BF$  teorije sa vezama i kvantne Ajnštajn-Kartanove teorije sa kontaktnom interakcijom. Konačno, formulisana je eksplicitna postupak kvantizacije  $3BF$  teorije sa vezama, definisanjem integrala po trajektorijama za celu teoriju, i urađena je preliminarana analiza semiklasičnog limesa teorije [4,5,6].

## 2 Opis predatog rada

### 2.1 Osnovni podaci

Doktorska teza “Simetrije u višim gradijentnim teorijama” urađena je pod rukovodstvom dr Marka Vojinovića, naučnog savetnika Instituta za fiziku u Beogradu (dr Vojinović je određen kao mentor na X sednici Nastavno-naučnog veća Fizičkog fakulteta održanoj 20. septembra 2023. godine). Teza tematski predstavlja istraživanje vezano za izučavanje simetrija i konstrukciju modela kvantne gravitacije, u okviru formalizma viših gradijentnih teorija. Rad je napisan na 88 strana i sadrži 5 tabela i 59 referenci, ima 6 poglavlja i 3 dodatka.

### 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 interakcije, 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 najuticajnijih 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 Vilsonove petlje (Wilson loops), sa matematičkom strukturom holonomije, kojima se opisuju stepeni slobode gravitacionog polja na gradijentno invarijantan način. Rezultujuća teorija kvantne gravitacije se može formulisati bilo kanonskom kvantizacijom (podelom prostorvremena na prostor i vreme), bilo formulisanjem odgovarajućeg Fajnmanovog integrala (Feynman integral) 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* (spin foam models). 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 neizvodljivo dodati polja materije u model, odnosno kuplovati Standardni Model sa ovako formulisanom kvantnom teorijom gravitacije.

Glavni predmet i cilj doktorske disertacije Pavla Stipsića predstavlja istraživanje metoda pomoću kog se mogu prevazići nedostaci postojećih modela spinskih pena, pre svega kuplovanje materije sa gravitacijom. U kontekstu viših gradijentnih teorija, Ajnštajn-Kartanova gravitacija kuplovana sa Standardnim Modelom elementarnih čestica može se formulisati kao  $3BF$  teorija sa vezama. U okviru rada na doktorskoj disertaciji, kandidat je pred sobom imao tri glavna zadatka. Prvi zadatak je bio da prouči postupke eksplicitnog i spontanog narušenja simetrije, kako bi se proverilo da formulacija teorije preko  $3BF$  dejstva ima isto ponašanje u kontekstu narušenja simetrije kao i standardno formulisana teorija. Drugi zadatak predstavlja poređenje  $3BF$  teorije sa vezama na kvantnom nivou, sa odgovarajućom kvantnom teorijom koja odgovara Ajnštajn-Kartanovoj gravitaciji sa materijom. Treći zadatak predstavlja eksplicitnu konstrukciju kvantne  $3BF$  teorije sa vezama, rigoroznim formulisanjem odgovarajućeg integrala po trajektorijama na deo-po-deo ravnoj mnogostrukosti prostorvremena. Na ovaj način se zadaje kompletna teorija kvantne gravitacije sa materijom, što predstavlja jedno od bazičnih dostignuća pristupa problemu kvantne gravitacije preko viših gradijentnih teorija. Kada je jednom zadat precizan model, prvi test koji treba da zadovolji je ispravan semiklasičan limes, što je takođe deo zadatka kandidatove doktorske teze.

## 2.3 Publikacije

Publikacije direktno proistekle iz ove doktorske teze su [5,6], navedene u odeljku 3. Osim njih, publikacije [1-3] su proistekle iz rada na master tezi, dok je publikacija [4] koautorski rad u kome je kandidat treći autor. Sve publikacije su vodeći međunarodni časopisi (kategorija M21), izuzev publikacije [4] koja je međunarodni časopis kategorije M22. Zbirni impakt faktor publikacija

[5,6] vezanih za doktorsku tezu iznosi **IF=5.8**, dok zbirni impakt faktor svih publikacija [1-6] iznosi **IF=16.772**.

## 2.4 Pregled naučnih rezultata izloženih u tezi

Naučni rezultati izloženi u doktorskoj disertaciji mogu se grupisati u tri celine. Prvu celinu čine rezultati vezani za izučavanje simetrija klasičnog  $3BF$  dejstva sa vezama, u kojima su detaljno proučeni mehanizmi kako eksplicitnog tako i spontanog narušenja simetrije, uključujući i BEH (Brout-Englert-Higgs) mehanizam. Drugu celinu čine rezultati koji opisuju vezu između kvantne  $3BF$  teorije sa vezama i kvantne Ajnštajn-Kartanove teorije drugog reda, sa spin-spin kontaktnom interakcijom. Treću celinu čine rezultati koji demonstriraju eksplicitnu proceduru kvantovanja  $3BF$  teorije sa vezama, izučavanje slabog i jakog nametanja veza, konstrukciju integrala po trajektorijama na zadatoj triangulaciji prostordremenske mnogostrukosti, i preliminaru analizu semiklasičnog limesa teorije.

### 2.4.1 Simetrije klasičnog dejstva

Proučeni su detalji eksplicitnog i spontanog narušenja simetrije klasične  $3BF$  teorije sa vezama koja opisuje Standardni Model elementarnih čestica kuplovan sa Ajnštajn-Kartanovom gravitacijom, uključujući i kosmološku konstantu. Najpre su diskutovane veze nametnute na topološko  $3BF$  dejstvo, i način na koji svaka od njih narušava inicijalnu simetriju topološkog dejstva. Zatim su proučeni spontano narušenje simetrije i BEH mehanizam za elektroslabi sektor teorije u formi  $3BF$  dejstva sa vezama, kako bi se ispitalo da li je Higsov mehanizam zaista moguće izvesti u okviru viših gradijentnih teorija. Takođe je proučeno dejstvo Proka teorije formulisano kao  $3BF$  teorija sa vezama. Dobijeni rezultati ukazuju na dobro ponašanje kako eksplicitnog tako i spontanog narušenja simetrije u kontekstu viših gradijentnih teorija, dok su BEH mehanizam i Proka teorija uspešno realizovani za odgovarajuće izbore  $3BF$  dejstva.

### 2.4.2 Veza $3BF$ teorije i Ajnštajn-Kartanove teorije

Proučena je eksplicitna korespodencija između  $3BF$  teorije sa vezama i Ajnštajn-Kartanove teorije sa kontaktnom spin-spin interakcijom (tzv. teorija drugog reda), na kvantnom nivou. Najpre je uveden pojam očekivane vrednosti za proizvoljnu opservablu koristeći apstraktni formalizam integrala po trajektorijama za obe teorije, a zatim postupkom integracije nekih varijabli u konfiguracionom prostoru kvantne  $3BF$  teorije uspostavljena je veza sa odgovarajućom opservablom u kvantnoj Ajnštajn-Kartanovoj teoriji sa kontaktnom interakcijom. Dobijena korespodencija između dve teorije je sasvim opšti rezultat koji važi na neperturbativnom nivou. Iznenadjujuće je da se korespodencija može uspostaviti bez eksplicitnog kvantovanja bilo koje od ove dve teorije. Takođe su razmotrene razlike u predikcijama ove dve teorije na primeru opservable gustine 4-zapremine prostordremena, kao i na primeru opservabli za gravitacione talase.

### 2.4.3 Kvantovanje $3BF$ teorije i konstrukcija integrala po trajektorijama

Formulacija kvantne  $3BF$  teorije sa vezama je izvedena u nekoliko ključnih koraka. Najpre je proučena eksplicitna diskretizacija klasičnog dejstva teorije, prelaskom sa glatke prostordremenske mnogostrukosti na deo-po-deo ravnu mnogostrukost, tzv. triangulaciju. Činjenica da

je dejstvo teorije formulisano isključivo preko diferencijalnih formi, bez korišćenja operacije Hodžovog duala, omogućava pravolinijski prelazak sa kontinualne na diskretnu teoriju. Takođe, budući da teorija sadrži samo prve izvode po poljima, diskretizacija pojma izvoda se može konzistentno izvesti upotrebom Stoksove teoreme. Ovi rezultati daju ne samo dobro definisanu diskretnu  $3BF$  teoriju sa vezama, već sugerišu kako se može bilo koja teorija uopštiti sa kontinualne na diskretnu formu, ukoliko ispunjava odgovarajuće kriterijume. Zatim je definisana mera integrala po trajektorijama za diskretizovano dejstvo, korišćenjem odgovarajućih Harovih mera za Lijeve grupe koje definišu model kvantne gravitacije u okviru viših gradijentnih teorija. Time je eksplicitno definisan integral po trajektorijama za celu  $3BF$  teoriju sa vezama. Uočena su tri sektora u integralu po trajektorijama — sektor topološke teorije, sektor interakcija, kao i sektor jako nametnutih veza. Konačno, istražen je semiklasičan limes teorije, postupkom usrednjavanja po triangulaciji i integracijom UV stepeni slobode, čime se teorija aproksimira na Redže kvantnu gravitaciju kuplovanu sa Standardnim Modelom elementarnih čestica. Za ovu aproksimaciju je u postojećoj literaturi već demonstrirano da ima dobar semiklasičan limes, pa je samim tim preliminarno demonstrirano da i ukupna kvantna  $3BF$  teorija sa vezama ima isti limes. Time je uspešno zadovoljen kriterijum semiklasičnog limesa, koji mora da zadovolji bilo koji predloženi model kvantne gravitacije.

### 3 Spisak publikacija kandidata

#### 3.1 Radovi u međunarodnim časopisima

- [1] S. Miladić, P. Stipsić, E. Dobardžić i M. Milivojević,  
 “Electrical control of a spin qubit in InSb nanowire quantum dots: Strongly suppressed spin relaxation in high magnetic field”,  
*Phys. Rev. B* **101**, 155307 (2020).  
 [DOI: 10.1103/PhysRevB.101.155307] [arXiv:1911.07942] [M21, **IF=4.036**]
- [2] P. Stipsić i M. Milivojević,  
 “Control of a spin qubit in a lateral GaAs quantum dot based on symmetry of gating potential”,  
*Phys. Rev. B* **101**, 165302 (2020).  
 [DOI: 10.1103/PhysRevB.101.165302] [arXiv:2001.03900] [M21, **IF=4.036**]
- [3] J. Vučičević, P. Stipsić i M. Ferrero,  
 “Analytical solution for time integrals in diagrammatic expansions: Application to real-frequency diagrammatic Monte Carlo”,  
*Phys. Rev. Research* **3**, 023082 (2021).  
 [DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.023082] [arXiv:2011.08226] [M21, **IF=N/A**]
- [4] M. Đorđević, T. Radenković, P. Stipsić i M. Vojinović,  
 “Henneaux–Teitelboim gauge symmetry and its applications to higher gauge theories”,  
*Universe* **9**, 281 (2023).  
 [DOI: 10.3390/universe9060281] [arXiv:2305.00117] [M22, **IF=2.9**]

- [5] P. Stipsić i M. Vojinović,  
 “Symmetry breaking mechanisms of the 3BF action for the Standard Model coupled to gravity”,  
*Jour. Phys. A: Math. Theor.* **58**, 215201 (2025).  
 [DOI: 10.1088/1751-8121/add7a5] [arXiv:2402.17675] [M21, **IF=2.1**]
- [6] P. Stipsić i M. Vojinović,  
 “Correspondence between 3BF and Einstein-Cartan formulations of quantum gravity”,  
*Class. Quant. Grav.* **42**, 195009 (2025).  
 [DOI: 10.1088/1361-6382/ae06e9] [arXiv:2506.17722] [M21, **IF=3.7**]

## 4 Zaključak

Na osnovu svega izloženog, komisija zaključuje da doktorska teza Pavla Stipsića “SIMETRIJE U VIŠIM GRADIJENTNIM TEORIJAMA” 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, 25. decembar 2025.

prof. dr Marija Dimitrijević Ćirić  
 redovni profesor Fizičkog fakulteta

doc. dr Dragoljub Gočanin  
 docent Fizičkog fakulteta

dr Igor Prlina  
 naučni saradnik Instituta za fiziku