

ПРИМЉЕНО: 04.04.2024			
Рад.јед.	б р о ј	Арх.шифра	Прилог
0801	532/4		

НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

Извештај комисије за реизбор др Димитрија Степаненка у звање виши научни сарадник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 2. априла 2024. године именовани смо у комисију за реизбор др Димитрија Степаненка у звање виши научни сарадник.

Прегледом материјала који нам је достављен, као и на основу личног познавања кандидата и увида у његов рад и публикације, Научном већу Института за физику у Београду подносимо овај извештај, чији су саставни део и прилози из поднетог материјала.

1. БИОГРАФСКИ И СТРУЧНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Димитрије Степаненко је рођен 13. јула 1974. у Врању, где је завршио основну школу и Гимназију. Током школовања у основној и средњој школи учествовао је на такмичењима из физике. Освојио је похвалу на међународном такмичењу "First step to Nobel Prize in Physics" које је организовала Пољска академија наука. Освојио је прву награду на државном такмичењу из физике и био је изабран у тим за међународну физичку олимпијаду 1993. на коју национални тим није отишао.

Студирао је на Физичком факултету Универзитета у Београду, где је 1998. године дипломирао на смеру Теоријска и експериментална физика, са просечном оценом током студија 9.68. Током студија радио је у Истраживачкој станици Петница.

По дипломирању отишао је на постдипломске студије на Универзитет у Бостону (Boston University) где је провео две године као стипендиста универзитета (Presidential University Graduate Fellowship). Од 2001. наставља постдипломске студије на Државном Универзитету Флориде (Florida State University). Докторат из теоријске физике кондензованог стања одбранио је 2005. године. Докторат је нострификован на Универзитету у Београду, решењем бр. 06-613-7554/4-11 од 30. јануара 2012. Током постдипломских студија добио је Дирак-Хелманову награду за теоријску физику 2004. године. Радио је у настави и извођењу рачунских и експерименталних вежби на додипломским студијама и на постдипломском курсу квантне механике. Сарађивао је на истраживању у Националној лабораторији за јака магнетна поља (National High Magnetic Field Laboratory). Боравио је у истраживачким групама у IBM истраживачком центру (IBM T. J. Watson Research Center) и на Универзитету Охаја (Ohio University).

После доктората радио је на Универзитету у Базелу (Universitaet Basel), Швајцарска, у групама Гвида Буркарда и Даниела Лоса. Држао је одабрана предавања и рачунске вежбе на напредним курсевима физике кондензованог стања и физике многочестичних система и учествовао је у настави на уводним курсевима физике и примењене математике. Учествовао је у истраживањима на пројектима Швајцарске националне фондације (SNF), Европске комисије на Марија Кири пројекту MagMaNet и ФП7 пројектима MolSpinQIP и ELFOS, као и у

истраживањима у области квантне информатике под покровитељством агенција DOE и IARPA Сједињених Америчких Држава. Поред истраживања, на пројектима MagMaNet, MolSpinQIP и ELFOS радио је и као организатор локалне групе конзорцијума на Универзитету у Базелу. Боравио је на Институту за нанонауку Модена и Ређио Емилија у Модени као гостујући истраживач.

Од 2013. ради на Институту за физику у Београду у Лабораторији за наноструктуре. Водио је пројекте билатералне сарадње са Немачком и Француском и SCOPES програм сарадње Швајцарске националне фондације. Учествовао је у европској мрежи за молекуларни магнетизам у оквиру COST акције MolSpin.

Тема научног рада кандидата је контрола спинова и наелектрисања у наноструктурама и класична физика материјала са наноструктуром. Кандидат је развио принципе коришћења спин-орбит интеракције за контролу спинова, користећи временски променљива електрична поља као класичне контролне величине у квантним тачкама и молекуларним магнетима. Кандидат ради на обради квантних информација у молекуларним магнетима, оптичким методама контроле нуклеарних спинова у полупроводничким наноструктурама, квантном транспорту шупљина, транспорту наелектрисања у зрнастим филмовима и класичним особинама материјала са наноструктуром. У досадашњој каријери објавио је 22 рада категорије M20, од чега седам радова категорије M21a. У периоду релевантном за реизбор објавио је два рада категорије M21a и два категорије M21.

2. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ АКТИВНОСТИ

Научни рад др Димитрија Степаненка је у области теоријске физике кондензованог стања и односе се на својства материјала која зависе од њихове наноструктуре.

Просторна скала наноструктура их ставља на прелаз између квантног и класичног режима. У квантном режиму, истраживања кандидата се баве квантним својствима спинова у материјалима са наноструктуром и њиховом контролом помоћу класичних поља у сврху обраде квантних информација. Моћ сваког рачунског система, по тези Чурча и Тјуринга, једнака је моћи Тјурингове машине. Ова претпоставка омогућава заснивање теорије рачунске комплексности и представља границу развоја рачунара. За све до сада познате физичке системе, осим за квантне рачунаре, показано је да задовољавају ову границу. Зато су на тренутном степену развоја науке квантни рачунари једина могућност за суштинско превазилажење ограничења у перформансама рачунара. Међу системима који могу послужити као основа за изградњу квантних рачунара, спинови су специфични по томе што су све њихове особине инхерентно квантне и описане коначним, обично малим, бројем степени слободе. У класичном домену, кандидат се бави механичким и оптичким особинама материјала са наноструктуром. На горњој граници наноструктурних димензија, око 100 nm, оптичке особине зависе од сложене структуре са које се светлост расејава или кроз коју пролази. У истом домену, велики број механичких особина је одређен екстремним односом површине и запремине материјала као и неодређеним и неконтролисаним обликом површина и запремина супструктурних елемената.

Слободни спинови електрона су лош избор за носиоце квантне информације пошто је њима тешко манипулисати. Зато је квантна динамика јасно видљива и управљива

само код електронских спинова урођених у веће структуре. Временска скала квантне контроле мора бити довољно кратка како декохеренција не би уништила квантне особине спинова. Просторна скала контроле мора бити довољно мала да би се манипулисали појединачни спинови. Ови захтеви говоре да су најбољи носиоци квантних информација системи димензија између једног и сто нанометара. На просторним и временским скалама карактеристичним за наносистеме, брзо променљива, јака и локална електрична поља је знатно лакше произвести него одговарајућа магнетна поља. Док су дужа времена кохеренције повезана са мањим системима, једноставност контроле је особина већих. Зато свака архитектура квантног рачунара мора наћи равнотежу између ова два захтева избором компромисне величине.

Кандидатова истраживања се баве описом електронских спинова у квантним тачкама са карактеристичним димензијама реда величине десет до сто нанометра, мултифероични филмови са зрнима величине једног до сто нанометара и молекуларних магнетима са карактеристичним димензијама од десетог дела нанометра до неколико нанометара. У класичном домену теме се тичу класичне оптике и механике у целулози и биолошким материјалима са морфолошком структуром на скалама од 100 до 1000 nm. Оквирне теме његових истраживања су:

1. контрола спинова у квантним тачкама са спин-орбитном интеракцијом
2. ефективна интеракција спинова
3. транспорт у наноструктурама са спинском текстуром
4. квантна мерења и контрола декохеренције
5. спин-електрична интеракција у молекуларним магнетима
6. електричне особине материјала са мултифероичним зрнима
7. оптика и механика класичних наноструктурираних материјала

У наредним секцијама су укратко приказани главни научни резултати кандидата добијени у оквиру ових истраживачких тема.

2.1. Контрола спинова у квантним тачкама са спин-орбитном интеракцијом

Спин-орбитна интеракција изазива декохеренцију и тиме ствара озбиљан проблем у дизајну квантних рачунара базираних на спину електрона у једноелектронским квантним тачкама. Како су спински степени слободе знатно кохерентнији од орбиталних, спрезање смањује време кохеренције спина.

Кандидат је показао како се вероватноће грешака у квантним логичким колима могу минимизовати једноставном променом временске зависности контролних импулса. Критеријум минимизације је зачуђујуће једноставан и захтева једино симетрију временске зависности импулса у односу на свој центар. Комбинација симетрије интеракција и симетрије временске зависности гарантује овако једноставан начин елиминације грешака у првом реду по јачини спин орбитне интеракције.

Из уочене зависности примењеног квантног логичког кола од облика контролних импулса, развио је нови универзални скуп квантних логичких кола. Универзалност скупа логичких кола значи да се произвољна квантна операција на произвољно великом скупу логичких кубита може извршити узастопном применом кола из

скупа, без губитка перформанси у односу на стандардне некодиране кубите. Развио је формализам који даје квантно логичко коло у функцији временски зависног импулса. Нумеричким израчунавањем показао је да резултујућа зависност даје интуитивно јасан скуп доступних квантних операција. У примени на кодиране кубите, у којима је један логички кубит записан у стање два спина, овакав скуп је универзалан. Развио је универзалне скупове квантних операција за архитектуре квантних логичких кола са униформним и са јако нехомогеним магнетним пољем константним у времену. Тиме је поједностављена контрола квантних рачунара базираних на спину.

Кандидат је развио процедуру за контролу спинова у квантним тачкама која користи временски зависну енергију стања у празној квантној тачки која интерагује тунеловањем са суседном квантном тачком у којој лежи спински кубит. Анализа временске зависности стања система открива неинтуитиван и користан режим описан Ландау-Зенер прелазом. У овом режиму промена орбиталног стања везаног електрона је виртуелна, и сва промена је концентрисана на спинско стање. На основу овог прелаза конструисана је процедура која контролише спин електричним пољем, без мењања магнетног поља и без манипулације спин-орбитном интеракцијом. Специфичност описаног поступка контроле је могућност обављања прецизно дефинисане квантне операције без познавања јачине магнетног поља на месту квантних тачака.

- *Anisotropic spin exchange in pulsed quantum gates*
N. E. Bonesteel, **D. Stepanenko**, and D. P. DiVincenzo
Phys. Rev. Lett. **87**, 207901 (2001).
- *Spin-orbit coupling and time-reversal symmetry in pulsed quantum gates*
D. Stepanenko, N. E. Bonesteel, D. P. DiVincenzo, G. Burkard, and D. Loss
Phys. Rev. B **68**, 115306 (2003).
- *Universal quantum computation through control of spin-orbit coupling*
D. Stepanenko and N. E. Bonesteel
Phys. Rev. Lett. **93**, 140501 (2004).
- *Exchange-based CNOT gates for singlet-triplet qubits with spin-orbit interaction*
J. Klinovaja, **D. Stepanenko**, B. I. Halperin, and D. Loss
Phys. Rev. B **86**, 085423 (2012).
- *Coherent manipulation of single electron spins with Landau-Zener sweeps*
M. Rančić and **D. Stepanenko**
Phys. Rev. B **94**, 241301(R) (2016).

2.2. Ефективна интеракција спинова

Квантни рачунари су засновани на системима са малим бројем дискретних квантних бројева. Природа коришћених квантних бројева зависи од структуре система и они не описују цео систем. Са друге стране, примена квантних логичких кола захтева хамилтонијан који је функција искључиво кубитних степени слободе. Поједностављење пуног описа система на ефективни систем логичких кубита је користан први корак у дизајну квантних рачунара. Кандидат је развио ефективне описе за неколико типова кубита.

Квантни рачунари засновани на спиновима у квантним тачкама у оригиналном предлогу користе по један електронски спин на свакој квантној тачки као кубит.

Овакав дизајн успоставља технолошки тешко изводљиве захтеве. Наиме, неопходно је контролисати локално магнетно поље које је могуће усмерити у бар два ортогонална правца. Са кодираним кубитима, у којима стање више спинова кодира један кубит, овај захтев може бити ублажен.

У случају најједноставнијег кодираниог кубита са два електронска спина, интеракција два кубита, обухвата четири квантне тачке. Пун опис пара кубита је у простору стања четири спина који има 16 димензија, док квантна логичка кола оперишу у потпростору логичких стања са четири димензије. Кандидат је извео формални ефективни опис пара кубита у нестандартном али реалистичном случају када електрони тунелују само између квантних тачака који припадају истом кубиту. Преостала директна Кулонова интеракција је описана као ефективна интеракција спинова. У добијеном ефективном хамилтонијану уочен је параметар који мери моћ интеракције да створи уплетена стања логичких кубита.

Укупан спин у пару квантних тачака се може променити само интеракцијама које нарушавају ротациону симетрију спинова. Две најзначајније интеракције које то чине су спин-орбитна и нуклеарна хиперфина. Спин-орбитна интеракција потиче од асиметрије материјала у коме су направљене квантне тачке. Нуклеарна хиперфина интеракција делује између електрона и језгара атома који чине супстрат квантне тачке. Кандидат је показао да ове две интеракције улазе као различити чланови у ефективни спински хамилтонијан двоструке квантне тачке. Допринос чланова у тунеловању електрона између квантних тачака зависи од амплитуда и фаза компоненти спинског стања на две тачке. Кандидат је извео квантитативни облик ефективног хамилтонијана и нумерички пронашао како он зависи од класичних контролних параметара. Удео ове две интеракције које не одржавају спин су касније измерени и резултати одговарају предвиђеној зависности.

Најмањи логички кубити који омогућују универзални скуп квантних логичких кола контролисаних само изотропном интеракцијом спинова захтевају три квантне тачке за кодирање. Ако је спин-орбитна интеракција у оваквом кубиту довољно јака, могуће је контролисати квантни рачунар искључиво електричним импулсима. Зато је битно пронаћи ефективну интеракцију која приказује ефекте спин-орбитног спрезања. У случајевима када је интеракција довољно симетрична, могуће је додатно смањити грешке у квантном логичком колу. Кандидат је израчунао и испитао особине ефективне спинске интеракције у трострукој квантној тачки произвољне геометрије.

- *Quantum gates between capacitively coupled double quantum dot two-spin qubits*
D. Stepanenko and Guido Burkard
Phys. Rev. B **75**, 085324 (2007).
- *Singlet-triplet splitting in double quantum dots due to spin-orbit and hyperfine interactions*
D. Stepanenko, M. Rudner, B. I. Halperin, and D. Loss
Phys. Rev. B **85**, 075416 (2012).
- *Effective spin Hamiltonian of a gated triple quantum dot in the presence of spin-orbit interaction*
M. Milivojević and **D. Stepanenko**
J. Phys. Condens. Matter **29**, 405302 (2017).

2.3. Транспорт у наноструктурама са спинском текстуром

Електрични транспорт у наноструктурама на ниским температурама је одређен квантном интерференцијом путева кроз структуру. У случају носилаца наелектрисања са спиновима, детаљи интерференције зависе и од спинских степени слободе. Контрола кретања наелектрисања је основа електронике. Зависност транспорта наелектрисања од спина и спински транспорт су основе електронике засноване на спину - спинтроники. У III-V полупроводничким структурама, шупљине показују специфичан облик спин-орбитне интеракције, доминантно кубне по компонентама импулса, за разлику од стандардне линеарне интеракције електрона. Кандидат је показао како ова необична интеракција утиче на квантни транспорт.

Својствена стања носилаца у прстеновима од полупроводника са спин-орбитном интеракцијом имају спинску текстуру. У свакој тачки прстена, спин има преферентну оријентацију. Ова особина је заједничка за електроне и шупљине. Кандидат је пронашао спинске текстуре квантних стања шупљина у полупроводничким прстеновима и израчунао њихову електричну и спинску проводност. Док електрони имају текстуру која зависи само од особина материјала од ког је прстен израђен и иста је за сва стања, код шупљина свако стање има различиту текстуру. Последица спинских текстура стања шупљина је квантна интерференција која показује и спинску зависност. Интерференциона слика у зависности проводности од напона и примењеног магнетног поља показује сложен облик. Нумеричким израчунавањем показао је да се форма кубне спин-орбитне интеракције може одредити из спински зависне интерференције.

У разматрању проводности шупљина уочено је да кубна спин-орбитна интеракција даје члан у ефективном оператору струје повезан са спинском ротацијом. Кандидат је развио формализам за конструкцију опште матрице расејања у системима са произвољном спинском интеракцијом. Разматрањем квантног транспорта ограниченог законом одржања наелектрисања и непостојањем спински зависних центара расејања на спојевима проводника, али без ограничења на спинску интеракцију, добијен је општи облик проводности који важи у широкој класи мезоскопских спинских система.

- *Interference of heavy holes in an Aharonov-Bohm ring*
D. Stepanenko, M. Lee, G. Burkard, and D. Loss
Phys. Rev. B **79**, 235301 (2009).
- *Current-conserving Aharonov-Bohm interferometry with arbitrary spin interactions*
M. Lee and **D. Stepanenko**
Phys. Rev. B **85**, 075316 (2012).

2.4. Квантна мерења и контрола кохеренције

Квантна кохеренција је неопходан услов за функционисање квантног рачунара. Њена мера је време кохеренције, дефинисано као карактеристично време у коме стање кубита пређе из добро дефинисаног квантног стања у статистичку мешавину која не носи квантне информације. Код кубита заснованих на спиновима у квантним тачкама кохеренција је ограничена спин-орбитном интеракцијом и

хиперфином интеракцијом електронских и нуклеарних спинова. Контрола нуклеарног удела у декохеренцији је традиционално била заснована на поларизацији спинова језгара. Нажалост, за постизање значајно дужег времена кохеренције електронског спина, потребно је припремити скоро идеално поларисана језгра. Доступне поларизације од 0,8 су недовољне, а значајна побољшања су могућа тек око поларизација реда 0,99.

Кандидат је развио поступак припреме неполарисаних стања језгара која су по утицају на губитак кохеренције спина еквивалентна поларизацијама реда 0,99. Припрема је заснована на ефекту електромагнетски индуковане прозачности, мерењу времена емисије фотона и прилагођавању параметара експеримента у зависности од измерених времена емисије. У симулацији је показано да припремљена језгра изазивају спори губитак кохеренције.

- *Enhancement of electron spin coherence by optical preparation of nuclear spins*
D. Stepanenko, G. Burkard, G. Giedke, and A. Imamoglu
Phys. Rev. Lett. **96**, 136401 (2006).
- *Optical preparation of nuclear spins coupled to a localized electron spin*
D. Stepanenko and G. Burkard
Proc. 4th Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, 371 (2008).

2.5. Спин-електрична интеракција у молекуларним магнетима

У нерелативистичком лимиту, директна интеракција спина са електричним пољима не постоји. Симетријском анализом, кандидат је показао да у системима са спин орбитном интеракцијом и без симетрије у односу на просторну инверзију, електрична поља могу утицати на спинске степене слободе. Идентификовао је квантни степен слободе, киралност спинске текстуре, који у антиферромагнетним молекуларним магнетима са три магнетна центра интерагује са електричним пољима. Поља у равни магнетних центара обрћу киралност текстуре, а поље нормално на ову раван не утиче на њу. Анализирао је овакву интеракцију у низу геометрија и класификовао је могуће механизме интеракције. Предвидео је последице спин-електричне интеракције на одзив молекула у електронској спинској резонанци, магнетном одзиву у електричним пољима, нуклеарној магнетној резонанци и топлотном капацитету. Предвиђени ефекат је касније измерен.

Кандидат је предложио електричну контролу спинова у молекуларним магнетима као метод обраде квантних информација и показао да, уз одговарајуће кодирање, овај ресурс може бити довољан за универзалну контролу квантног рачунара. Посматрао је декохеренцију у простору својствених стања киралности изазвану хиперфином интеракцијом са спиновима језгара у молекулу. Пронађено карактеристично време кохеренције киралности је два до пет редова величине дуже него одговарајуће време кохеренције спина. Као кохерентни степен слободе који интерагује са електричним пољем, киралност је могући параметар поретка у фазним прелазима изазваним електричним пољем у којима су квантне корелације битне. Кандидат је анализирао могућност суперрадијантног квантног фазног прелаза молекула са спин-електричном интеракцијом у микроталасној резонантној шупљини. Предвиђен је фазни прелаз између фазе карактерисане празном

шупљином и суперрадијантне фазе карактерисане шупљином са макроскопским бројем фотона. Пронађено је да у суперрадијантној фази молекули показују јаке флукуације компоненти електричног диполног момента у равни магнетних центара.

- *Spin-electric coupling in molecular magnets*
M. Trif, F. Troiani, **D. Stepanenko**, and D. Loss
Phys. Rev. Lett. **101**, 217201 (2008).
- *Quantum computing with molecular magnets*
D. Stepanenko, M. Trif, and D. Loss
Inorg. Chim. Acta **361**, 3740 (2008).
- *Spin-electric effects in molecular antiferromagnets*
M. Trif, F. Troiani, **D. Stepanenko**, and D. Loss
Phys. Rev. B **82**, 045429 (2010).
- *Hyperfine-induced decoherence in triangular spin-cluster qubits*
F. Troiani, **D. Stepanenko**, and D. Loss
Phys. Rev. B **86**, 161409 (2012).
- *Field-dependent superradiant quantum phase transition of molecular magnets in microwave cavities*
D. Stepanenko, M. Trif, O. Tsyaplyatyev, and D. Loss
Semicond. Sci. Technol. **31**, 094003 (2016).

2.6. Електричне особине зрнастих мултифероичних материјала

Спин електрична интеракција која се може користити за обраду квантних информација није једини случај преплитања електричних и магнетних својстава материје. Многи материјали, мултифероици, показују истовремено електрично и магнетно уређење. Електрично уређење у кристалима повезано је са орбиталним степенима слободе конституената, док је магнетно уређење доминантно одређено њиховим спиновима. Бизмут ферит је фeroелектрик и антиферомагнет. Кандидат је проучавао електрична својства филмова који се састоје од зрна бизмут ферита. Зрнаста структура доводи делове материјала у јако електрично поље које природно постоји на границама зрна и у околини дефеката. Кандидат је проучавао промене у електричним особинама филмова бизмут ферита на путу од унутрашњости зрна, која по структури личи на унутрашњост великих кристала, до границе зрна које на њу не личи. Пронађено је да површина између два суседна зрна и њена околина у дубини до неколико нанометра проводи наелектрисање знатно боље од унутрашњости зрна. Механизам проводности у овој области не одговара ниједном од стандардних модела који описују полупроводници или метале. Пронађено је и да се ова необична област близу границе шири у јаким електричним пољима. Хистерезисни одзив проводности у функцији напона мења природу између две области.

Поред механичког напона на границама зрна, контрола кристалографске фазе може утицати на појаву јаким унутарњих електричних поља у материјалу и промене електричних својстава. Фeroелектрични прелаз је посебно занимљив, јер постоји и у материјалу који није прецизно уређен. Кандидат је посматрао промене диелектричних особина нанопрахова мултифероичног бизмут ферита са додавањем примеса холмијума. Уочена је изразита промена реманентне поларизације на ниским фреквенцијама код јако допитаних узорака. Овакво

понашање указује да се дефектни комплекси настали додавањем допаната лако оријентишу дуж правца локалне поларизације, прате њену динамику и доприносе укупној сопственој поларизацији материјала. У јако допираним узорцима, електрични пробој узорка се дешава на много јачим електричним пољима него у чистом узорку. Овај феномен је повезан са променом структуре и појавом нове кристалографске фазе која није примећена у недопираним праху.

Директно мерење проводности у наноправима и осталим зрнастим наноструктурама је ометено нехомогеношћу материјала на малим просторним скалама и осетљивошћу на детаље контакта између материјала и електрода. Ови проблеми се могу избећи мерењем проводности помоћу спектроскопског одзива материјала. Овим путем се елиминишу контакти из експеримента и посматра се проводност области која је много већа од димензија једног зрна.

У оваквим мерењима важно је одвојити универзална својства проводности од својстава која су условљена структуром на малим скалама. У случају проводника, једно од универзалних својстава је асиметрија спектралне линије у електронској спинској резонанци код јако проводних узорака. У лимиту високе проводности асиметрија линије, мерена параметром A/B , достиже константну асимптотску вредност. Систематском анализом облика линије и утицаја облика зрна на њега, показано је да овај однос има аналитичку вредност и да је ова вредност универзална.

Одређивање проводности спектроскопским методама пружа увид у механизме расејања носилаца и режим проводности. Посматрањем Раманског расејања на зрнима бизмут ферита нађено је да се механизам проводности мења са температуром. Проводност се у целом посматраном опсегу може описати режимом прескакања променљивог домета. Овај режим сугерише да је проводност условљена везивањем носилаца на дефектима у материјалу који могу обухватати неуређену структуру зрна и површинска стања на њима. Детаљи механизма се мењају са фазним прелазом између парамагнетне и антиферомагнетне фазе магнетног уређења у мултифероичним зрнима. Резултати о спектроскопским методама мерења проводности су представљени и у поглављу монографије о особинама мултифункционалних наноматеријала.

- *Variation of electric properties across the grain boundaries in BiFeO₃ films*
B. Stojadinović, B. Vasić, **D. Stepanenko**, N. Tadić, R. Gajić, and Z. Dohčević-Mitrović
J. Phys. D **49**, 045309 (2016).
- *Dielectric and ferroelectric properties of Ho-doped BiFeO₃ nanopowders across the structural phase transition*
B. Stojadinović, Z. Dohčević-Mitrović, **D. Stepanenko**, M. Rosić, I. Petronijević, N. Tasić, N. Plić, B. Matović, B. Stojanović
Ceram. Int. **43**, 16531 (2017).
- *Extreme conduction electron spin resonance: $A/B \rightarrow (5 + 3\sqrt{3})/4$, the universal limit of lineshape asymmetry ratio*
D. M. Djokić, **D. Stepanenko**, Z. Dohčević-Mitrović
J. Magn. Magn. Mater. **491**, 165616 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165616>

- *Probing charge carrier transport regimes in BiFeO₃ nanoparticles by Raman spectroscopy*
D. M. Djokić, B. Stojadinović, **D. Stepanenko**, Z. Dohčević-Mitrović
Scr. Mater. **181**, 6 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.02.008>
- *Transport properties of nanoscopic solids as probed by spectroscopic techniques*
D. M. Djokić, N. Paunović, B. Stojadinović, **D. Stepanenko**, S. Lazović, Z. Dohčević-Mitrović
Chapter in Fundamentals and Properties of Multifunctional Nanomaterials, Elsevier (2021).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822352-9.00009-2>

2.7. Класичне особине наноструктурираних материјала

Поред квантних, наноструктура утиче и на класичне особине материјала. Код фиксиране карактеристичне величине, граница између квантног и класичног домена је одређена у основи температуром и временском скалом мерења особина. Основни разлог појављивања нових класичних особина наноструктура је у морфологији која изазива екстремни однос површине узорка и његове запремине, која се види у великој порозности. Оваква структура се јако одражава на особине у домену оптике и интеракције са течностима путем површинског напона. У оптичком домену, показано је да наноструктуре на крилима лептира дају комплексан оптички одзив. Услед интерференције светлости одбијене са површина у наноструктури, боја одбијене светлости зависи од детаља структуре и осветљености. Комплексност добијене слике је квантификована и показано је да се комплексност структуре одражава на комплексност слике. У механичком домену, прецизније посматрањем квашења наноструктуриране целулозе, испитана је веза наноструктуре и површинске енергије. Модификацијом структуре мења се и њена површинска енергија, која одређује квашење.

- *Nitrogen plasma surface treatment for improving polar ink adhesion on micro/nanofibrillated cellulose films*
K. Dimic-Misic, M. Kostić, B. Obradović, A. Kramar, S. Jovanović, **D. Stepanenko**, M. Mitrović-Dankulov, S. Lazović, L.-S. Johansson, T. Maloney, and P. Gane
Cellulose **26**, 3845 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10570-019-02269-4>
- *Naturally safe: Cellular noise for document security*
D. Pavlović, M. D. Rabasović, A. J. Krmpot, V. Lazović, S. Čurčić, D. V. Stojanović, B. Jelenković, W. Zhang, D. Zhang, N. Vukmirović, **D. Stepanenko**, B. Kolarić, D. V. Pantelić
J. Biophotonics **12**, e201900218 (2019).
<https://doi.org/10.1002/jbio.201900218>

3. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАЛИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

3.1. Квалитет научних резултата

3.1.1. Научни ниво и значај резултата, утицај научних радова

Др Димитрије Степаненко је у свом досадашњем раду покренуо теме контроле спинова у квантним тачкама прилагођавањем временске зависности контролних параметара и спин-електричне интеракције у молекуларним магнетима. Објавио је 22 рада у међународним часописима категорије М20, од чега седам радова у часописима категорије М21а, 12 у часописима категорије М21, два у часописима категорије М22 и један у часопису категорије М23. Поред радова у часописима, објавио је једно поглавље у монографији категорије М13, а на међународним конференцијама има једно предавање по позиву категорије М32, једно саопштење категорије М33 и 15 саопштења која спадају у категорију М34. Такође има једно предавање по позиву са националне конференције категорије М62.

У периоду од реизбора у звање виши научни сарадник, кандидат је објавио два рада у часописима категорије М21а и два рада у часописима категорије М21.

Пет најзначајнијих радова кандидата су:

1. Mircea Trif, Filippo Troiani, **Dimitrije Stepanenko**, and Daniel Loss
Spin-Electric Coupling in Molecular Magnets
Phys. Rev. Lett. **101**, 217201 (2008).
М21а, цитиран 171 пута по Web of Science
2. Marko J. Rančić and **Dimitrije Stepanenko**
Coherent manipulation of single electron spins with Landau-Zener sweeps
Phys. Rev. B **94**, 241301(R) (2016).
М21, цитиран 5 пута по Web of Science
3. **D. Stepanenko**, M. Trif, O. Tsyaplyatyev, and D. Loss
Field-dependent superradiant quantum phase transition of molecular magnets in microwave cavities
Semicond. Sci. Technol. **31**, 094003 (2016).
М22, цитиран 9 пута по Web of Science
4. M. Milivojević and **D. Stepanenko**
Effective spin Hamiltonian of a gated triple quantum dot in the presence of spin-orbit interaction
J. Phys. Condens. Matter **29**, 405302 (2017).
М22, цитиран 5 пута по Web of Science
5. **D. Stepanenko**, Mark Rudner, Bertrand I. Halperin, and Daniel Loss
Singlet-triplet splitting in double quantum dots due to spin-orbit and hyperfine interactions
Phys. Rev. B **85**, 075416 (2012).
М21, цитиран 44 пута по Web of Science

У првом раду кандидат је представио откриће интеракције спинова у молекуларним магнетима са електричним пољем. Иако директна интеракција не постоји, корелације спинова у нискоенергетским стањима остављају могућност да електрично поље утиче на стања више спинова. Пронађена је форма интеракције и идентификовани су вишеспински степени слободе на које електрично поље утиче. Из ових резултата добијен је метод којим се може унапредити коришћење молекуларних магнета као кубита у квантним рачунарима базираним на спину. Кандидатов резултат је иницирао истраживања у пољу молекуларних магнета и спинтронике базиране на молекулима. Ефекат је потврђен у електронској спинској резонанци молекула у којима три јона бакра носе спински угаони момент. На основу овог резултата и каснијих истраживања спин-електричне интеракције, покренути су пројекти MagMaNet, ELFOS, и MolSpinQIP у којима су испитиване могућности електричне контроле спинова у молекулима и спинтронике базиране на овом ефекту.

Други рад представља нови облик контроле спинова помоћу временски зависних електричних поља. За разлику од претходних метода који се ослањају на контролу облика напонских импулса којим се контролише електрично поље, нови облик контроле се заснива на Ландау-Зенер прелазу између нивоа пуне и нивоа празне квантне тачке. Специфичност овог метода је да не захтева прецизно познавање параметара система за прецизну примену квантног логичког кола. Кандидат је показао да релативна неосетљивост прелазна на детаље система и спољног контролног поља чини прелаз неосетљивим на декохеренцију. Овај метод је повод за даљи развој метода временски зависне контроле.

У трећем раду показано је да систем молекуларних магнета који интерагују са квантизованим пољем резонантне шупљине може имати основно стање које садржи макроскопски средњи број фотона. Испитани су услови под којима овакав прелаз може настати и дискутован је однос овог резултата са предвиђањима стандардних модела квантне оптике за интеракцију емитера и поља. Кандидат је показано да у основном стању после фазног прелазна молекула карактерише флукутирајућа електрична поларизација у равни спинских центара.

У четвртном раду изведен је пертурбативни облик интеракције спинова у трострукој квантној тачки дефинисаној металним електродама нанесеним на супстрат дводимензионалног електронског гаса у III-V полупроводнику. Геометрија тачака је неубичајена у томе да тачке не леже на правцу, већ образују троугао у равни дводимензионалног електронског гаса. Кандидат је пронашао пертурбативни облик ефективне троспинске интеракције спинова. Ова интеракција показује да је киралност спинске структуре важан квантни број и у стањима ниске симетрије.

У петом раду, кандидат је представио метод којим се у укупној вероватноћи промене спина при тунеловању електрона између две квантне тачке могу раздвојити доприноси различитих интеракција. За то је користио разлику у орбиталним стањима насталим после промена спина изазване спин-орбитном и нуклеарном хиперфином интеракцијом. Параметри квантних тачака одређују амплитуде преласка. Међутим, разлика фаза амплитуда два прелазна омогућује да се доприноси две интеракција јасно дискриминишу у зависности вероватноће тунеловања од спољних параметра. Резултати експеримента потврђују облик израчунате

зависности и мере однос интензитета спин-орбитне и нуклеарне хиперфине интеракције у реалним системима.

3.1.2. Цитираност научних радова кандидата

Према подацима о цитираности аутора изведених из базе Web of Science, радови чији је кандидат коаутор цитирани су 893 пута, од чега 868 пута без аутоцитата, а Хиршов индекс је 12.

3.1.3. Параметри квалитета радова и часописа

Кандидат је у досадашњој каријери објавио седам радова у часописима категорије M21a, и то четири у Physical Review Letters, један у Ceramics International, један у Cellulose и један у Scripta Materialia. У часописима категорије M21, објавио је 12 радова, од тога девет у Physical Review B, један у Journal of Physics D: Applied Physics, један у Journal of Biophotonics и један у Journal of Magnetism and Magnetic Materials. У часописима категорије M22 објавио је три рада, по један у Journal of Physics: Condensed Matter, Semiconductor Science and Technology и Inorganica Chimica Acta. Кандидат је аутор поглавља “Molecular Magnets for Quantum Information Processing у монографији Molecular Magnets, Physics and Applications” (Springer, 2014) и поглавља “Transport properties of nanoscopic solids as probed by spectroscopic techniques” у монографији “Fundamentals and Properties of Multifunctional Nanomaterials” (Elsevier, 2021).

Додатни библиометријски показатељи у вези са објављеним радовима кандидата у релевантном периоду дати су у доњој табели. Она садржи импакт факторе (ИФ) радова, M20 бодове радова по категоризацији научноистраживачких резултата, као и импакт фактор нормализован по импакту цитирајућег чланка (СНИП) (најбоља вредност из периода до две године уназад од објаве рада). У табели су дате укупне вредности, као и вредности свих фактора усредњених по броју чланака и по броју аутора по чланку, за радове објављене у M20 категоријама.

	ИФ	М	СНИП
Укупно	15,57	36	4,69
Усредњено по чланку	3,89	9,00	1,17
Нормирано на број аутора	2,92	6,69	0,91

3.1.4. Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Кандидат је развијао идеје и рачунске и нумеричке методе потребне за решавање проблема у дискусијама са сарадницима. Основне идеје за разматрање проводности прстенова и спин-електричне интеракције потичу од кандидата, док су за проблеме који се баве спиновима у квантним тачкама идеје резултат дискусија са сарадницима, тако да су заједничке, са значајним доприносом кандидата. У истраживању електричних особина мултифероичних филмова, кандидат је допринео теоријским увидом у процесе који се могу одигравати у испитиваним материјалима и указивањем на интересантне детаље, док је основна идеја потекла из круга осталих сарадника. У радовима о класичним особинама наноструктура,

кандидат је допринео теоријским израчунавањима и обради резултата мерења, док основне идеје потичу од осталих аутора.

Сви теоријски резултати имају значајан допринос кандидата, док је нумерички део посла равномерно подељен међу свим сарадницима. Око једне трећине нумеричких израчунавања су резултати кандидата, док је остатак самостални допринос осталих сарадника. У раду на проблемима спин-електричног ефекта, поред доприноса теоријском разматрању и нумеричким израчунавањима, кандидат је организовао поделу рада међу сарадницима.

Кандидат сарађује са групама за теоријску физику кондензованог стања Универзитета у Базелу, Швајцарска, групом за квантну физику наносистема на Институту у Орсеју, Француска, групом за квантну спинтронику на Универзитету Констанц, Немачка, групом за молекуларни магнетизам на Националном центру за нанотехнологију у Модени, Италија, групом за неорганску хемију Универзитета у Валенсији, Шпанија и групом за физику квантне информације на институту Magtop Пољске академија наука, Варшава. Руководиоци ових група су Данијел Лос, Паскал Симон, Гвидо Буркард, Марко Аффронте, Еугенио Коронадо и Мирча Триф.

3.1.5. Награде

Кандидат је добитник следећих награда:

1. Presidential University Graduate Fellowship, Boston University. Стипендија за постдипломске студије на Универзитету у Бостону. Једна до две овакве награде се додељују студентима природних наука на овом универзитету сваке године.
2. Dirac-Hellman award for theoretical physics. Једна награда годишње се додељује студентима постдипломских студија или научним сарадницима на Државном Универзитету Флориде.

3.2. Ангажованост у формирању научних кадрова

Кандидат је био ментор мастер рада Зорице Ристић на Физичком факултету Универзитета у Београду. Био је коментатор докторске дисертације др Симона Иерина, одбрањене на Универзитету Модене и регије Емилија у Италији.

Кандидат је такође био члан комисије која организује такмичења из физике ученика средњих школа у Србији. Сарађује са Истраживачком станицом Петница.

3.3. Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

Радови кандидата од последњег реизбора у звање виши научни сарадник са темама о наноструктурираним кристалним материјалима су теоријски и експериментални резултати са до четири аутора и улазе са пуном тежином. Радови о класичним наноструктурама су теоријски и експериментални са великим бројем аутора и улазе са тежинама 0,56 и 0,46.

Укупан број М бодова које је кандидат остварио у изборном периоду је 36, а након нормирања тај број је 27,2. Ова разлика не утиче на квантитативну процену његових резултата.

3.4. Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

Кандидат је руководио пројектима билатералне сарадње са Савезном Републиком Немачком (пројекат 3, 2014-15), Републиком Француском (451-03-39/2016/09/16) и Швајцарском (SCOPES-IZ73Z0_152500), од 2014. до 2018. година. У оквиру националног пројекта ОН171032 од 2013. до 2019. године руководио је пројектним задатком који се бави утицајем локалних електричних поља на спинове у наноструктурираним материјалима. Учествовао је у мрежи међународне сарадње у области молекуларне спинтронике у оквиру пројекта COST-MOLSPIN, где је био заменик руководиоца радне групе за област квантних информација.

3.5. Активност у научним и научно-стручним друштвима

Кандидат је био члан комисије за организовање такмичења из физике за ученике средњих школа у Србији.

Рецензент је у часописима Nature, Nature Materials, Nature Quantum Information, Nature Scientific Reports, Physical Review Letters, Physical Review B. Био је рецензент пројекта у оквиру програма Истраживачког савета Европе (ERC Grant).

3.6. Утицај научних резултата

Утицај научних резултата огледа се у подацима о цитираности, наведеним у секцији 3.1.2.

Кандидатови резултати су стандардне референце за манипулацију спинова коришћењем ефекта спин-орбитне интеракције и за електричну контролу молекуларних магнета.

3.7. Конкретан допринос кандидата у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Кандидат је значајно допринео сваком раду у коме је учествовао.

Он је зачетник две уске области у контроли спинова помоћу електричних поља. Развио је метод коришћења временске зависности електричних импулса као контролног механизма за спинове. Овај метод користи некомутирање ефективних спинских хамилтонијана узетих у различитим тренуцима током примене импулса. Ненулни комутатори производе интеракцију спинова која не постоји у тренутним хамилтонијанима а користи се у примени квантних логичких кола. Метод је коришћен и за мерење интензитета интеракција које не очувавају спинове. Друга област је интеракција композитних спинских степени слободе у молекуларним магнетима са спољним електричним пољима. Обе области развија у сарадњи са колегама у иностранству и у Србији.

3.8. Уводна предавања на конференцијама, друга предавања и активности

Од претходног избора у звање, кандидат је одржао предавања о својим истраживањима у групама код којих је гостовао, на Универзитету Констанц у Немачкој и на Универзитету у Валенсији у Шпанији, као и предавање о спиновима

у полипептидима на међународној конференцији о хемији природних производа у Београду.

У претходном периоду је одржао предавање по позиву на конференцији The 19th Symposium on Condensed Matter Physics, Belgrade, Serbia, 2015.

4. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАНТИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

Остварени резултати у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	2	20	15,56
M21	8	2	16	11,64

Поређење са минималним квантитативним условима за реизбор у звање виши научни сарадник:

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	50/2=25	36	27,2
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90	40/2=20	36	27,2
M11+M12+M21+M22+M23	30/2=15	36	27,2

ЗАКЉУЧАК

Имајући у виду изузетно високу вредност и оригиналност научних радова др Димитрија Степаненка, као и његово значајно искуство у међународној сарадњи, мишљења смо да је кандидат достигао високу истраживачку зрелост и научну компетентност. На основу података из извештаја види се да он задовољава све квантитативне и квалитативне услове за реизбор у звање виши научни сарадник који су прописани Правилником о стицању истраживачких и научних звања Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије.

Због тога нам је изузетно задовољство да предложимо Научном већу Института за физику у Београду да донесе одлуку о прихватању предлога за реизбор др Димитрија Степаненка у звање виши научни сарадник.

У Београду, 04. 04. 2024. године

Чланови комисије:

др Антун Балаж
научни саветник
Институт за физику у Београду

др Зорана Дохчевић-Митровић
научни саветник
Институт за физику у Београду

др Божидар Николић
ванредни професор
Физичког факултета Универзитета у Београду