

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на V седници Наставно-научног Већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 25. 3. 2026. одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације **"Контролисана фрагментација Беселових зрака у нелинеарним срединама"**, коју је кандидат Мирослав Петроски предао Физичком факултету у Београду дана 5. 3. 2026. године, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Мирослав Петроски рођен је у Гостивару 14.09.1970. године. Завршио је математичку гимназију 1989. године у Гостивару. Затим уписује Физички факултет Универзитета у Београду и завршава га 1997. године на смеру Теоријска и експериментална физика са просечном оценом 8,24/10,00.

Магистарске студије на смеру Теорија кондензованог стања материје уписао је 1997. године, а магистрирао је 2007. године. Магистарски рад под називом *"Вртлози и кластери оптичких солитона у сатурабилним Керр-овим срединама са кореном нелинеарношћу"* урадио је под менторством проф. др Милана Петровића. Просечном оцена магистарских студија је 8,40/10,00.

Докторске студије на смеру Физика кондензоване материје и статистичка физика уписао је школске 2023/2024. године. Докторску дисертацију урадио је у области Нелинеарне фотонике под руководством др Драгане Јовић Савић. Тема докторске дисертације под називом **„Контролисана фрагментација Беселових зрака у нелинеарним срединама“** му је одобрена на састанку Колегијума докторских студија одржаном дана 23. 04. 2025 године.

Његова област истраживања је изучавање транспорта у кондензованој материји, пре свега у фотонским решеткама. Резултате свог досадашњег истраживања публиковао је у четири рада који имају 27 цитата. Један рад је објављен у водећем међународном часопису категорије M21a+, два рада у два водећа међународна часописа категорија M21, и један рад у међународном часопису категорије M22.

1.2 Научна активност

Кандидат Мирослав Петроски се у свом научном раду бави проблематикама нелинеарне оптике, као што су: испитивање феномена који се односе на процес интеракције ласерског зрачења са нелинеарном оптичком средином, изучавање недифрагујућих Беселових зрака у различитим нелинеарним срединама, истраживање ефеката приликом простирања светлости у сложеним фотонским решеткама, као и експерименталном реализацијом

фотонских решетки и одговарајућих побуђених мода у њима уз помоћ оптички индуковане технике, с акцентом на њихове потенцијалне примене.

Током израде магистарског рада кандидат је изучавао начине за реализацију и испитивање стабилности оптичких прстенова и огрлица у различитим нелинеарним срединама. Коришћен је варијациони рачун за проналажење стабилних оптичких прстенова и огрлица у фоторефрактивној средини. У оквиру ове методе полази се од неких структура са специфичном расподелом фазе и интензитета, задаје се више параметара, и варијационим рачуном налазе се стационарне структуре као што су вртлози, огрлице и оптички прстенови. Следећи стандардне процедуре варијационог рачуна, преко густине лагранжијана за нелинеарну пропагацију електричног поља споро варирајуће амплитуде, нађени су параметри за стабилну пропагацију различитих улазних структура.

Пробне функције су формиране тако да представљају вртлоге са различитим тополошким наелектрисањима. Оне су биране тако да буду солитон облика прстена, који може азимутално да се модулише у облик огрлице са додатним фазним фактором за тополошко наелектрисање. Варијациони параметри прстена су амплитуда, ширина (дебљина) и радијус. Азимуталном модулацијом одређен је број перли (индивидуалних солитона) у огрлици. Избором пробне функције, генерисане су различите почетне структуре, огрлице и прстенови. Након тога, такве структуре су пропагиране у разним нелинеарним срединама. Затим су испитивани услови за њихову стабилност за различите врсте нелинеарности.

Дејство ових структура се формира лако, а оптималне вредности за параметре стабилне структуре (огрлица или прстен) добијене су из услова минималног дејства. Уз варијациони услов као и коришћењем константи (интеграла) кретања динамичког система (укупна снага, импулс, ангуларни моменат), добијене су једначине за параметре одређене структуре, које ће имати стабилну пропагацију.

У оквиру докторских студија кандидат се бавио изучавањем недифрагујућих зрака пре свега класом од посебног интереса као што су Беселови зраци. Акценат је стављен на примену ових зрака у нелинеарној оптици као и на услове за формирање различитих фотонских решетки уз помоћ оваквих зрака, како теоријски тако и експериментално. У експерименталној реализацији коришћена је техника оптичке индукције за уписивање фотонске решетке у фоторефрактивном кристалу стронцијум баријум ниобату допираном церијумом. Нумеричке симулације служиле су за егзактно симулирање експеримента, али и проналажење нових феномена.

Експериментално и нумерички је демонстриран начин за генерисање косих дискретних солитона путем нелинеарне интеракције чеоних фрагментисаних Беселових зрака у фоторефрактивном кристалу, без потребе за косим упадом снопа или претходно уписаним решеткама. Показано је да одговарајуће локализовано одступање симетрије и нелинеарност могу изазвати побуђивање косих солитона без косог пробног снопа. Коришћењем подесиве азимуталне и фазне модулације Беселових зрака, постиже се контролисана фрагментација снопа и посматра се спонтано формирање више парова косих солитона преко нарушавање симетрије изнад прага нелинеарности. Број, смер и угао косине резултујућих солитона су веома осетљиви на редослед, просторну скалу, фазу и улазну снагу Беселовог зрака и могу се прецизно подешавати.

Након тога уведен је метод за креирање микроструктура индукованих светлошћу састављених од увијених снопова зрака распоређених по различитим површинама. Као демонстрација, модулисани Беселови зраци су коришћени у експерименту оптичке индукције са једним пролазом унутар анизотропног фоторефрактивног кристала.

Нелинеарно понашање ових зрака испитивано је варирањем њихове величине, нивоа модулације и улазне снаге. Демонстрирано је формирање вишеструких дискретних солитона на површинама, без потребе за претходно уписаном фотонском решетком или косим упадом пробног зрака. Хеликоидни усамљени зраци се добијени истовремено са дискретним солитонима ограниченим на цилиндричним и хиперболоидним површинама, респективно. Метода која се овде користи, такође се може применити на друге типове недифрагујућих зрака и омогућава прецизну контролу над сноповима, укључујући број појединачних зрака, њихов смер увијања и облик њихових површина за простирање. Коришћењем вртложних структура, које су пронађене у оквиру ових истраживања, показано је да се могу користити за контролисање савијања светлости, контролисање фрагментације, дифракције светлости, као и појављивање светлости на излазу. Све ове карактеристике су неопходне у процесирању информација и производњи оптичких уређаја.

Кандидат се бавио испитивањем јединствених својстава Беселових зрака који доводе до нових начина контроле светлости, пре свега узрокованих нелинеарношћу, што може имати користи за многе области науке код којих се светлост може користити за манипулацију и контролу саме светлости. Нелинеарност материјала је неопходна уколико је потребно добити нелинеарне уређаје као што су оптичке диоде, транзистори, прекидачи итд. У оквиру истраживања за ову тезу показано је да се Беселови зраци у разним нелинеарним режимима могу користити за формирање кривих и спиралних таласовода. Формирање оваквих таласовода зависи од снаге и карактеристичних величина Беселових зрака. Осим тога помоћу оваквог приступа могуће је стварање тродимензионалних фотонских решетки применом Беселових зрака.

2. Опис предатог рада

2.1. Основни подаци

Дисертација је урађена под руководством др Драгане Јовић Савић, научне саветнице, запослене на Институту за физику у Београду и коменторством др Дејана Тимотијевића, научног саветника Института за мултидисциплинарна истраживања. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење израдом докторске дисертације јер је у научном звању и аутор је великог броја радова из области Нелинеарне оптике који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним и домаћим конференцијама. Дисертација је написана на српском језику на 87 страна, не рачунајући насловну страну, захвалницу, сажетак, садржај, биографију аутора и изјаве. У тексту се налази 35 слика, а у библиографији је наведена 140 референци. Дисертација је подељена у 6 поглавља.

2.2. Предмет и циљ рада

Предложена докторска дисертација је инспирисана изучавањем транспорта у кондензованој материји пре свега у фотонским решеткама, и бави се изучавањем фундаменталних феномена који су повезани са простирањем светлости у фотонским решеткама, оптички индукованим у фоторефрактивном кристалу стронцијум баријум ниобату допираном церијумом.

Област такозване комплексне или структуриране светлости, описује апстрактна тополошка својства светлости тј. снопове посебно дизајнираног интензитета, поларизације

и фазе, и управо та својства уводе прогрес у многим областима науке и технологије и представљају централну тачку за фундаменталне доприносе у оптици. Помак у фундаменталном разумевању, заједно са најновијим достигнућима у производњи структуриране светлости, преноси се и на низ различитих интердисциплинарних примена које обухватају микроскопију, комуникацију са великим брзинама преноса података, оптичко заробљавање и квантну оптику.

Локализовани таласни пакети, познати и као недифрагујући зраци, настали су у почетку као покушај да се добију снопови и импулси способни да се одупру дифракцији у слободном простору на великим удаљеностима. Овакви таласи су најпре добијени теоретски као решења таласне једначине почетком 1940-их, а експериментално су демонстрирани 1987. Данас, локализовани таласи представљају широку област истраживања у развоју, не само у вези са недисперзивним слободним простором, већ и за дисперзивне, нелинеарне и медије без губитака. Поред равног таласа, најпознатији таласни пакет без дифракције је Беселов сноп који су први увели Ј. Дурнин и сарадници. Овај пионирски рад отворио је пут открићу других недифрагујућих решења, укључујући Матјеове и параболичне Веберове снопове. Осим њих, самоубрзавајући таласни пакети који се могу простирати по закривљеној путањи привукли су велико интересовање, међу којима се посебно издваја Еиријев сноп који се простира дуж параболичне путање без икакве дифракције (или дисперзије). Од прве демонстрације, расте интересовање за недифрагујуће снопове и њихове могуће примене.

У оквиру фотонице издвајају се два приступа у контроли дифракције. Један од њих је нелинеаран и заснива се на формирању оптичких солитона. Они представљају локализоване структуре које одржавају свој облик балансирајући између ефеката дифракције и нелинеарног самофокусирања. Идеја и мотивација у оквиру истраживања за ову тезу биле су да се испита могућност за формирање неких специфичних врста солитона помоћу једног или више Беселових зрака. Други приступ је у основи линеаран и заснива се на контроли простирања светлости помоћу фотонских решетки. Фотонске решетке су један од начина реализације фотонских кристала и представљају оптичке таласоводе са периодичном променом индекса преламања средине у којима се фотони понашају попут електрона у полупроводнику. Због својих карактеристика представљају погодан оптички систем за манипулацију и контролу простирања светлости. Фотонске решетке се могу креирати нелинеарним процесом промене индекса преламања средине преко директног ласерског уписивања, оптичке литографије или технике бушења. Један од обећавајућих начина реализације комплексних фотонских решетки јесте могућност модулисања трансверзалног интензитета мултиплицираних или пертурбованих Беселових снопова и изучавање ефеката приликом нелинеарног простирања у фоторефрактивном материјалу, што је заправо предмет изучавања у оквиру ове тезе. Веома погодна експериментална метода је техника оптичке индукције у фоторефрактивном материјалу, која се заснива на промени индекса преламања изазваној електромагнетним зрачењем. Техника се базира на фоторефрактивном ефекту – промени оптичких својства материјала као одговору на електрично поље које споро варира у поређењу са фреквенцијом светлости. Оваква врста фотонских решетки омогућава контролу светлости самом светлошћу, а поред тога овакве решетке поседују значајне предности у односу на класичне фотонске кристале. На пример, оптички индуковане фотонске решетке, у различитим конфигурацијама и величинама, се могу уписати (и избрисати) без икаквих тешкоћа, једноставним осветљавањем кристала белом светлошћу.

Контролисање пропагације светлости самом светлошћу (нелинеарном интеракцијом) кључан је фактор за реализацију напредних потпуно оптичких технологија. Један од обећавајућих приступа, а који је и један од основних у оквиру истраживања за ову тезу, јесте примена Беселових структура и могућност контроле њиховог простирања, фрагментација, дифракција, закривљење светлости у фоторефрактивном материјалу. Ова теза представља један од првих корака ка дубљем разумевању пропагације Беселових зрака у нелинеарним срединама. Такво истраживање може бити од користи и за друге области физике као што су холографија, спектроскопија и физика материјала. Очекује се да експериментални резултати и методе неће бити само основа за даља фундаментална испитивања интеракције недифрагујућих снопова већ да могу да понуде велике могућности за контролу, обраду и пренос информација у модерним оптичким технологијама.

Главни циљ докторске дисертације кандидата био је проучавање феномена нелинеарне фотонице који су повезани са простирањем структуриране светлости у фоторефрактивним нелинеарним материјалима. Циљеви тезе били су:

1. проучавање феномена који су везани за простирање појединачних или здружених као и модулисаних Беселових зрака у фоторефрактивној средини,
2. изучавање услова за фрагментацију Беселових зрака и контроле дифракције
3. испитивања услова за формирање фотонских решетки са закривљеним таласоводима помоћу модулисаних Беселових зрака као и формирање нових типова тродимензионалних фотонских решетки.

За реализацију првог циља кандидат је најпре генерисао Беселове недифрагујуће зраке, како нумерички тако и експериментално а потом изучавао њихову нелинеарну пропагацију у фоторефрактивном материјалу. Такође је изучавао и карактеристике Беселових зрака као и могућност њихове фрагментације у фоторефрактивним материјалима.

У оквиру другог циља кандидат је открио нови приступ за формирање фрагментисаних Беселових зрака, помоћу кога је могуће контролисати број, величину и својства добијених фрагмената. Такође је изучавана промена снаге ових зрака како би се открили ефекти као што су дискретна дифракција, као и проналажење неких нових врсти дискретних или закривљених солитона.

При реализацији трећег циља испитивана је нелинеарна пропагација здружених као и пертурбованих Беселових зрака у фоторефрактивном материјалу. Истражени су ефекти приликом њихове нелинеарне пропагације, а пре свега могућност формирања сложенијих фотонских решетки.

За реализацију поменутих циљева дефинисани су теоријски модели за описивање поменутих проблематика. Најпре су пронађена нумеричка решења једначина одговарајућег модела. На крају су се испитивале могућности за експерименталну реализацију ефеката који су добијени уз помоћ нумеричких симулација.

2.3. Публикације чији су резултати приказани у дисертацији

На основу истраживања изведених у оквиру докторске дисертације објављена су два рада у водећим међународним часописима, један рад у часопису категорије M21a+, (IF:5.6), а други у категорије M21, (IF:3.8). У тези су обухваћени резултати следећих радова:

Радови у водећим међународним часописима категорије M21a+

1. **M. M. Petroski**, D. V. Timotijević, D. M. Jović Savić, and J. M. Vasiljević, "Head-on excitation of tilted solitons by fragmented Bessel beams", *Chaos Solitons and Fractals* 202, 117434 (2026). DOI: 10.1002/adom.201701355. (ISSN: 0960-0779, IF: 5.6)

Радови у водећим међународним часописима категорије M21

1. J. M. Vasiljević, **M. M. Petroski**, D. V. Timotijević, and D. M. Jović Savić, "Surface-distributed twisted beams nonlinearly induced by nondiffracting beams", *ASC Applied Optical Materials*, 4, 352, (2026) DOI: 10.1021/acsaom.5c00466 (ISSN: 2771-9855, IF: 3.8)

2.4 Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Ова докторска дисертација је написана на 87 страна, садржи 6 поглавља и 140 референци. У уводном поглављу дат је преглед досадашњих резултата у области нелинеарне фотонице и осврт на достигнућа у области нелинеарне оптике и њихов допринос у сродним областима као и могући правци за даља истраживања.

Друго поглавље даје кратак преглед класичне електродинике са којим се постављају теоријске основе за истраживања у овој тези. Полазећи од Максвелових једначина, добија се таласна једначина у параксијалној апроксимацији, користећи при томе Гаусову расподелу интензитета, која је у основи многих теориских и експерименталних истраживања. Разматран је концепт недифракционе пропагације кохерентних недифрагујућих зрака. Представљена је Беселова диференцијална једначина као једно од радијалних решења таласне једначине, па самим тим су уведене Беселове функције прве врсте.

У трећем поглављу разматрани су фотонски кристали као структуре које се налазе у природи, а исто тако као структуре које је створио човек. Од посебног значаја су фотонске решетке, које се могу јавити у све три просторне димензије, као периодичне, уређене или неуређене структуре. Од посебног интереса су спирално увијена фотонска кристална влакна и фотонске решетке са увијеним таласоводима. У овој тези посебно је испитано добијање увијених структура пропагацијом Беселових зрака.

Четврто поглавље је посвећено фоторефрактивном ефекту и његовом теоријском објашњењу, као кључном ефекту у разумевању многих нелинеарних оптичких феномена. Разматран је зонски модел транспорта наелектрисања у анизотропној апроксимацији, која веома добро описује реалне експерименталне резултате. Разматране су особине фоторефрактивног кристала стронцијума-баријума-ниобата, линеарни Покелсов и квадратни Керов електрооптички ефекат.

У петом поглављу приказани су резултати експерименталног и теоријског истраживања. Ово поглавље је подељено на пет засебних целина. У првом параграфу петог поглавља

приказана је шема експерименталне поставке за изучавање Беселових зрака у нелинеарној средини. Концепција технике оптичке индукције у фоторефрактивном кристалу је модулација индекса преламања узрокована спољашњим осветљењем. Ова техника је коришћена за генерисање различитих диелектричних структура вештачки дизајнираном модулацијом индекса преламања, као на пример хеликоидно увијених фотонских решетки. Извор светлости је тзв. *Nd:YVO4* (неодимијумом допирани итријум ортованадијум) ласер са удвострученом фреквенцијом и таласне дужине $\lambda = 532\text{nm}$. Поларизовани структурирани зрак се шири кроз споља поларизован (са спољашњим електричним пољем) кристал *SBN61:Ce*, допиран са цериум-диоксидом. Добијени резултати се снимају камером, која је повезана са рачунаром за чување и даљу анализу добијених слика. Теоријска анализа обухвата паралелно решавање нелинеарне параксијалне Шредингерове пропагационе једначине и анизотропне потенцијалне једначине без ефекта дифузије. За нумеричко решавање овог теоријског модела користи се симетризовани метод пропагације са подељеним кораком.

У другом параграфу петог поглавља приказано је добијање косих солитона помоћу фрагментисаних Беселових зрака у фоторефрактивном кристалу. Посматрају се различити ефекти дуж одвојених праваца који су узроковани анизотропијом кристала. Доступност финог подешавања ових солитона отвара нове могућности за напредну контролу светлости у нелинеарним срединама и има значајан потенцијал за примену у оптичком инжењерству, комуникацијама и обради информација. Трећи параграф петог поглавља садржи истраживање пропагације Беселових зрака, модулисаном амплитудом и фазом, који имају апериодични трансверзални профил интензитета и фазе састављене од концентричних прстенова са подесивим размаком, контрастом интензитета и уграђеним орбиталним угаоним моментом. Варирањем димензија снопа, редоследа, модулације и улазне снаге, изван прагова за модулацију и нелинеарност, индукују се увијени снопови дискретних солитона. Ако је улазни сноп у почетку ограничен на једну површину, нелинеарна интеракција омогућава пренос енергије на друге закривљене површине, што доводи до формирања микроструктуре једне или више површина. Последњи параграф петог поглавља садржи нову методу за контролисано формирање киралних таласовода, кроз нелинеарно простирање модулисаних Беселових снопова, омогућавајући директно и реконфигурабилно уписивање сложених структура у фоторефрактивној средини. Модулација индекса преламања се експериментално постиже путем једнопролазне оптичке индукције.

3. Списак публикација кандидата

Радови у водећим међународним часописима категорије M21a+

1. **M. M. Petroski**, D. V. Timotijević, D. M. Jović Savić, and J. M. Vasiljević, " *Head-on excitation of tilted solitons by fragmented Bessel beams* ", Chaos Solitons and Fractals 202, 117434 (2026). DOI: 10.1002/adom.201701355.
(ISSN: 0960-0779, IF: 5.6, 2 цитата)

Радови у водећим међународним часописима категорије M21

2. J. M. Vasiljević, **M. M. Petroski**, D. V. Timotijević, and D. M. Jović Savić, " *Surface-distributed twisted beams nonlinearly induced by nondiffracting beams* ", ASC Applied Optical Materials, 4, 352, (2026) DOI: 10.1021/acsaom.5c00466
(ISSN: 2771-9855, IF:3.8)
3. **M. M. Petroski**, M. S. Petrović, and M. R. Belić, " *Quasi-stable propagation of vortices and soliton clusters in saturable Kerr media with square-root nonlinearity* ", Optics Communications 279 (2007) 196–202 DOI:10.1016/j.optcom.2007.07.006
(ISSN: 0030-4018 IF: 1.3, 18 цитата)

Радови у међународним часописима категорије M22

4. N. B. Aleksić, A. I. Strinić, **M. M. Petroski**, and M. S. Petrović, " *Necklace beams in media with cubic-quintic nonlinearity* ", Optical and Quantum Electronics, 52, 73, (2020). DOI:10.1007/s11082-019-2189-x
(ISSN 0306-8919 IF: 2.08, 7 цитата)

4. Провера оригиналности докторске дисертације

ОЦЕНА ИЗВЕШТАЈА О ПРОВЕРИ ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „**Контролисана фрагментација Беселових зрака у нелинеарним срединама**”, аутора Мирослава Петроског, констатујем да утврђено подударање текста износи 2%. Овај степен подударности последица је личних имена, библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

У Београду, 16.3.2026. године

Ментор

др Драгана Јовић Савић
научни саветник
Институт за физику у Београду

5. Закључак

На основу изложеног, комисија закључује да резултати кандидата Мирослава Петроског приказани у оквиру ове докторске дисертације представљају оригиналан и значајан научни допринос у области физике кондензоване материје и нелинеарне оптике. Из области дисертације кандидат има два објављена рада у врхунским међународним часописима, при чему је један рад категорије M21a+, а други рад категорије M21. Сходно томе, комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану тезе:

„Контролисана фрагментација Беселових зрака у нелинеарним срединама“.

Београд, _____

Комисија:

др Ђорђе Спасојевић, редовни професор
Физичког факултета у Београду

др Сунчица Елезовић-Хацић, редовни професор
Физичког факултета у Београду

др Дејан Тимотијевић, научни саветник
Института за мултидисциплинарна истраживања у Београду