

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на 2. седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду, одржаној 25. новембра 2015. године, одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације под насловом

**„FORMATION OF DARK-STATE POLARITONS AND TWO-POLARITON BOUND STATES IN ARRAYS OF ATOMS AND OPTICAL CAVITIES“** ("ФОРМИРАЊЕ ТАМНИХ ПОЛАРИТОНА И ДВО-ПОЛАРИТОНСКИХ ВЕЗАНИХ СТАЊА У НИЗОВИМА АТОМА И ОПТИЧКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРА")

из научне области **Физика** и уже научне области **Фотоника и ласери**, коју је Анђело Мађити (Angelo Maggitti), дипломирани физичар-мастер нанофизике, предао Физичком факултету 20. новембра 2015. године, Наставно-научном већу подносимо следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Основни подаци о кандидату

#### 1.2 Биографски подаци

Анђело Мађити је рођен 4. септембра 1977. године у Базелу, Швајцарска. Завршио је основне студије нанонауке (*Nanoscience*) на факултету за филозофију и природне науке Универзитета у Базелу (*Philosophisch Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Basel*). Након основних студија, наставио је мастер студије такође на Универзитету у Базелу, на смеру нанофизика. Током мастер студија, учествовао је у три научна пројекта од којих је један био основа за мастер рад. Први научни пројекат под називом "Оптимизоване структуре  $Mg^+(Ne)_m$ -кластера ( $1+m \leq 8$ ) симулиране методом Фурије интеграла по трајекторијама" [*Fourier Path Integral Simulations and Optimized Structures of  $Mg^+(Ne)_m$ -Clusters ( $1+m \leq 8$ )*] припадао је области теоријске квантне хемије. Други научни пројекат о наномеханичким резонаторима на бази јонских замки (*Towards ion trap transducers of nanomechanical resonators*) био је из области теоријске наномеханике. Мастер рад, под називом "О квантованој проводности у двослојном графену" (*Towards quantized conductance in graphene bilayer*) урађен је на Техничком универзитету у Делфту у Холандији под руководством проф. др Ливен Вандерсајпена (*Lieven Vandersypen*) као ментора и коментора проф. др Martino Пођоа (*Martino Poggio*). За мастер рад је награђен стипендијом Универзитета у Базелу и учешћем у Еразмус програму. Анђело Мађити је уписао докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду 2011. године, на смеру Квантна, математичка и нанофизика.

## 1.2 Научна активност

Научно-истраживачки рад Мађити Анђела је везан за област теоријске квантне оптике и садржи два аспекта:

- Проучавање слободних, тамних поларитона у гасу атома са два енергијска нивоа који имају дегенерисане поднивоје,
- Реализација дво-поларитонских везаних стања у низовима оптичких микро-резонатора уз увођење модификованог Џејнс-Камингсовог модела.

Резултати оба аспекта су представљени у докторској дисертацији.

Анђело Мађити је на истраживачким темама чији су резултати приказани у докторској дисертацији примарно радио са ментором, др Миланом Радоњићем и у сарадњи са коментором др Браниславом Јеленковићем. Поред докторских студија, Анђело Мађити је учествовао у летњој школи *International Summer Schools on Nanosciences & Nanotechnologies, Organic Electronics and Nanomedicine (ISSON11) 2011*, одржаној у Солуну и на симпозијуму *2nd International Symposium about Quantum Mechanics based on a "Deeper Level Theory": Emergence of Quantum Mechanics*, одржаној у Бечу, у Аустријској академији наука, октобра 2013. године. У досадашњем раду Анђело Мађити је објавио два рада у врхунским међународним часописима категорије M21 и један рад је у припреми. Поред тога, своје научне резултате је презентовао на домаћим и међународним конференцијама.

## 2. Опис предатог рада

### 2.1 Основни подаци о докторској дисертацији

Докторска дисертација Анђела Мађитија под називом „**FORMATION OF DARK-STATE POLARITONS AND TWO-POLARITON BOUND STATES IN ARRAYS OF ATOMS AND OPTICAL CAVITIES**“ ("ФОРМИРАЊЕ ТАМНИХ ПОЛАРИТОНА И ДВО-ПОЛАРИТОНСКИХ ВЕЗАНИХ СТАЊА У НИЗОВИМА АТОМА И ОПТИЧКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРА") одговара форми захтеваној од стране Универзитета у Београду. Написана је на енглеском језику на 75 страна, не рачунајући насловну страну, захвалнице, резиме (сажетак) и садржај. Теза задржи 14 слика и 104 референци. Теза је подељена тематски у три целине и седам поглавља.

Израдом докторског рада руководио је др Милан Радоњић, научни сарадник Института за Физику, који је током последњих шест година публиковао 18 научних радова у врхунским међународним часописима категорије M21 и испуњава све услове прописане за менторство. Именован је за ментора одлуком Наставно-научног већа

Физичког факултета Универзитета у Београду на седници одржаној 1. јула 2015. године.

Резултати приказани у тези су до сада објављени у два рада: у часопису *Laser Physics* [A1] и *Physical Review A* [A2]. Треба нагласити да је у припреми још једна публикација чији је материјал приказан у поглављу број шест ове докторске дисертације.

## 2.2 Предмет и циљ докторске дисертације

У модерним истраживањима у физици често се тежи повезивању два истраживачка поља што може бити врло плодотворно. Један пример таквог споја је између физике чврстог стања и квантне оптике. Проучавање поларитона и тамних поларитона као подврсте (*dark-state polaritons*) је веома актуално и представља једну од спона између физике чврстог стања и квантне оптике. Формирање тамних поларитона је могуће у атомским системима који показују кохерентни ефекат електромагнетно индуковане транспаренције (*Electromagnetically Induced Transparency*). Типичан пример таквог система је атомски систем са три нивоа у тзв.  $\Lambda$ -конфигурацији у којој два ласера спрежу два дугоживећа нивоа са једним побуђеним нивоом. Деструктивна интерференција два могућа начина побуђивања омогућава формирање "тамних стања". Тамна стања представљају специфичне линеарне комбинације дугоживећих стања са особиним да се не могу побудити ни једним од ласера и у директној су вези са тамним поларитонима. Тамни поларитони су ниско-енергијске колективне екситације атома и електромагнетног поља без доприноса побуђених атомских стања. Као такви, тамни поларитони омогућавају успоравање светлости и складиштење фотонских стања у колективним екситацијама атомских система. Шта више, могу имати улогу квантних битова и самим тим бити коришћени у квантној информатици и квантном рачунању. Типични поларитони остварени у квантно-оптичким системима су неинтерагујући.

Интерагујући поларитонски системи су слабо проучавани. Њихово проучавање је од растућег интереса због бројних могућих примена у реализацији квантних логичких кола и симулације јако корелираних, вишечестичних бозонских система познатих из физике чврстог стања. Један од често коришћених приступа за обезбеђивање интеракција међу поларитонима, а ефективно преко њих и међу фотонима, је присуство оптичких, квантно-електродинамичких микрорезонатора (*optical QED cavities*) који интерагују са атомским системима. Оптички микрорезонатори обезбеђују режим јаког спрезања између фотона и атома. На тај начин се постиже нелинеарност неопходна за реализацију интеракција, као и могућност прецизног и ефикасног контролисања те интеракције. Основни модел за опис интеракције атома са два нивоа и електромагнетног поља оптичког, квантно-електродинамичког микрорезонатора је

Џејнс-Камингсов модел (*Jaynes-Cummings model*). Физичке особине поменутог модела су детаљно проучене теоријски и проверене експериментално. Квалитативно проширење модела на низове међусобно спрегнутих оптичких микрорезонатора представља Џејнс-Камингс-Харбадов модел (*Jaynes-Cummings-Hubbard-model*) који укључује и могућност размене фотона између суседних микрорезонатора. Физичке особине овог модела су предмет активних истраживања, између осталог и због доступне експерименталне реализације. Интеракција између поларитона у таквом систему доводи до појаве квантних фазних прелаза, нпр. Мот изолатор – суперфлуид, као и до формирања везаних дво-поларитонских стања. Везана дво-поларитонска стања су тек недавно постала предмет истраживања области квантне оптике и физике вишечестичних система. Проучавање физичких особина везаних дво-поларитонских стања може указати на нове фундаменталне основе за будућу реализацију квантних меморија и квантних мрежа. Са друге стране, отварају се значајне могућности у контексту проучавања квантних фазних прелаза, као и реализације фрустрираних, Хајзенбергових спинских система (*Frustrated Heisenberg Spin system*), а такође и сасвим нових вишечестичних система.

У првом делу дисертације проучавано је формирање тамних поларитона у ансамблу атома који поседују два нивоа, основни и побуђени, са дегенерисаним поднивоима. А атомски системи са нивоима са дегенерацијом су у литератури углавном претходно проучавани помоћу Морис-Шорове трансформације (*Morris-Shore transformation*). За разлику од тога, развијен је другачији алгоритам за испитивање тамних поларитона у таквом систему који представља нетривијално проширење познатог метода без дегенерације на случај система са дегенерацијом. Такође, приказана је могућност конверзије фреквенције и линеарне поларизације светлости коришћењем формираних тамних поларитона.

У другом делу дисертације проучавани су интерагујући поларитони у једно-димензионалном низу еванесцентно спрегнутих оптичких квантно-електродинамичких микро-резонатора од којих сваки интерагује преко једне од својих мода са атомом са три нивоа (два дугоживећа и једним побуђеним). Додатно, сваки атом је побуђиван спољашњим ласерским пољем тако да је остварен услов дво-фотонске Раманове резонанце у  $\Lambda$ -конфигурацији поља. Показано је да под одређеним условима у оваквом систему Џејнс-Камингс-Хабардовога типа долази до појаве везаних тамних поларитона. Уочено је да везани тамни поларитони показују занимљиву могућност коришћења као квантне меморије за тачно један фотон.

У наставку дисертације Анђела Мађитија уведено је контролисано периодично неуређење у једно-димензионалном низу спрегнутих оптичких микрорезонатора преко наизменично променљивог параметра спрезања  $J_1 - J_2 - J_1 - J_2 - \dots$ . Показано је да се у

таквој конфигурацији појављује специфичан тип везаних тамних поларитона који до сада није виђен. Ови резултати су у припреми за слање у часопис [A3].

### 2.3 Публикације у вези са дисертацијом

Докторска дисертација је базирана на резултатима истраживања које је кандидат публиковао у међународним часописима категорије M21:

[A1] A. Maggitti, M. Radonjić and B. M. Jelenković,  
*"Dark-state polaritons in a degenerate two-level system"*, Laser Physics **23**, 105202 (2013)  
**Рад у врхунском међународном часопису – првих 30% (M21)**  
импакт-фактор часописа **2.545** за 2012. годину

[A2] A. Maggitti, M. Radonjić and B. M. Jelenković,  
*"Dark-polariton bound pairs in the modified Jaynes-Cummings-Hubbard model"*,  
Прихваћен у часопису Physical Review A  
**Рад у врхунском међународном часопису – првих 30% (M21)**  
импакт-фактор часописа **2.808** за 2014. годину

У припреми за слање у часопис је:

[A3] A. Maggitti, M. Radonjić and B. M. Jelenković,  
*"Dark-polariton bound pairs in the modified Jaynes-Cummings-Hubbard model with induced staggered disorder"*

Аспекти проучени у радовима [A1] и [A2] су од знатног како теоријског тако и експерименталног интереса због могућности контролисања понашања система променом параметара спољашњих поља. У раду [A2] је по први пут уведен нов модел у оквиру кога особине везаног пара тамних поларитона могу да се подешавају на поменути начин. Додатно, везани пар тамних поларитона под одређеним условима могу постати основно стање система и бити коришћени као квантна меморија. У раду [A3] је по први пут дискутован утицај наизменичног неуређења на везане парове тамних поларитона.

Научни рад Анђела Мађитија карактерише се великом и значајном самосталношћу, оргиналношћу, као и темељитошћу у решавању проблема. Кандидат је самоиницијативно покренуо истраживачки пројекат тј. начинио избор теме и истраживачког правца и успешно их реализовао у сарадњи са менторима.

## 2.4 Преглед научних резултата изложених у тези

Докторска дисертација Анђела Мађитија је састављена из седам поглавља. Теоријске основе и научни резултати су изложени од другог до петог поглавља.

Прво поглавље је уводно и посвећено је изражавању значаја које у физици има спајање две истраживачке области у ширем контексту успеха истраживања. У овом случају је фокус на квантној оптици и физици чврстог стања. Изложен је значај тих појединачних области и кључних резултата у њима који су релевантни за саму тезу. У наставку је позиционирана теме ове тезе и дат је преглед дисертације и њен циљ.

Друго поглавље садржи детаљну дискусију теоријских основа у вези са неинтерагујућим и интерагујућим тамним поларитонима. Представљене су основе теорије електромагнетно индуковане транспаренције (*Electromagnetically induced Transparency*) и њене везе са тамним стањима која су носилац у формирању тамних поларитона (*dark-state polaritons*). Објашњен је мотив за посматрање микроскопских операторских једначина кретања и дато извођење за систем без дегенерације. Такође, у контексту интерагујућих везаних поларитона је изведен и детаљно дискутован модификовани Џејнс-Камингсов модел (*modified Jaynes-Cummings model*), по први пут уведен у овој дисертацији, који подржава појаву и формирање везаних тамних поларитона. Наиме, при великом једно-фотонском одступању од енергије одговарајућих атомских прелаза, показано је да се ефективна атомска динамика редукује на два дугоживећа нивоа. Притом се јачина спрезања између тих нивоа може ефикасно контролисати променом интензитета спољашњег ласерског поља. Модификовани модел је упоређен са стандардним Џејнс-Камингсовим моделом који је такође изведен и дискутован.

Треће поглавље се односи на неинтерагујуће тамне поларитоне у ансамблу атомских система са два нивоа који поседују дегенерацију. Основни и побуђени ниво су спрегнути помоћу два ласерска поља, од којих је пробно (слабо) поље третирано квантно, а контролно поље класично. Детаљно је изведен и презентован алгоритам заснован на решавању микроскопских операторских једначина кретања који до сада није примењиван на системе који имају дегенерисане поднивоје. Развијени алгоритам омогућава потпуну анализу формираних тамних поларитона у зависности од изабране поларизације примењених ласерских поља. Приказана је примена на случај експериментално значајне атомске паре рубидијума <sup>87</sup> и дискутовани су могући тамни поларитони. Додатно је разматрана могућност конверзије фреквенције и линеарне поларизације светлости. Ово поглавље је засновано на раду [A1], који је кандидат објавио.

Четврто поглавље даје увид у интерагујуће тамне поларитоне у низу спрегнутих оптичких микрорезонатора, у дво-ексцитационом потпростору. Као последица цикличне повезаности микрорезонатора установљено је да постоји добар квантни број, квази-импулс, којим су 'обележена' својствена стања система. Показано је да спектралне особине Хамилтонијана система зависе од Штарковог помераја атомских нивоа услед дејства класичног контролног поља, чији се утицај такође огледа и у новоуведеном модификованом Џејнс-Камингсовом моделу, детаљно дискутованом у другом поглављу ове докторске дисертације. Испоставља се да нека од својствених стања представљају заправо везане парове тамних поларитона. Детаљно је разматрана њихова природа анализом вероватноћа могућих типова ексцитација у систему. Поред тога, показано је да везани поларитонски пар може бити основно стање и може служити као квантна меморија за један фотон. Представљена је могућа експериментална реализација, као и особине потенцијалне квантне меморије. Материјал садржан у овом поглављу је заснован на објављеном раду [A2].

Садржај петог поглавља је базиран на материјалу за будући рад [A3]. Дискутован је ефекат индукованог неуређења на основно стање које је везани пар поларитона. Неуређење је уведено преко наизменичних параметра спрезања  $J_1$  и  $J_2$  између суседних микрорезонатора. Испоставља се да уколико је један од параметара спрезања много већи од другог, овакво неуређење доводи до појаве локализације фотона у подрешетки којој одговара јаче спрезање, док су у другој подрешетки доминантне ексцитације атомских кохеренци. Оваква нарочита врста локализације је анализирана разматрањем вероватноћа могућих ексцитација система, слично као у претходном поглављу.

У поглављу број шест сумирани су резултати истраживања. Истакнуто је да алгоритам коришћен за неинтерагујуће поларитоне може да буде проширен на више нивоа са дегенерацијом, што може имати примене у квантој информацији и квантном рачуњању. Наглашен је допринос резултата о интерагујућим поларитонима у контексту квантних мрежа и препарације система унутар њих. Представљена је корист присуства неуређења у систему за пренос квантних стања у облику везаних фотона или везаних тамних поларитона.

У последњем поглављу су дата отворена питања у вези интерагујућих тамних поларитона. Наведено је да проширење једнодимензионалног модификованог Џејнс-Камингс-Хабардовога модела на две димензије потенцијално омогућава проучавање оптичких решетки и реализацију фрустрираних Хајзенбергових спинских система увођењем различитих наизменичних параметара спрезања међу микрорезонаторима.

## ЗАКЉУЧАК

Имајући у виду постигнуте резултате Мајити Анђела, актуелност проблематике, оригиналност, квалитет и допирнос резултата у области квантне оптике, добијених из докторске дисертације "FORMATION OF DARK-STATE POLARITONS AND TWO-POLARITON BOUND STATES IN ARRAYS OF ATOMS AND OPTICAL CAVITIES", предлажемо Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да прихвати докторску дисертацију и одобри њену јавну одбрану.

У Београду,

25. децембра 2015.

---

др Бранислав Јеленковић, ко-ментор  
Научни саветник  
Институт за физику у Београду

---

проф. др Милорад Кураица  
Редовни професор  
Физички факултет у Београду

---

проф. др Никола Коњевић  
Редовни професор емеритус  
Физички факултет у Београду

---

проф. др Милан Дамњановић  
Редовни професор  
Физички факултет у Београду