

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на X седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 11. 9. 2019. године одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације „Faraday waves in ultracold dipolar Bose gases” (наслов на српском језику: „Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима”) из научне области Физика кондензованог стања, коју је кандидат Душан Вудраговић, дипломирани физичар, предао Физичком факултету у Београду дана 9. 9. 2019. године, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Душан Вудраговић је рођен 03. 05. 1980. године у Сремској Митровици. Основну школу „Доситеј Обрадовић” завршио је у Путинцима, а гимназију „Стеван Пузић” у Руми. Основне студије је похађао на Физичком факултету Универзитета у Београду на смеру Примењена физика и информатика у периоду од 1999. до 2005. године. Током студија добио је стипендије Министарства науке Републике Србије и Владе Републике Србије, као и награду „1000 најбољих студената у Србији” Норвешке амбасаде у Београду. Дипломирао је 2005. године са просечном оценом 9.62. Дипломски рад под називом „Мерење ефективне трансверзалне емитансе јонског снопа” урадио је под руководством проф. др Ивана Аничина.

У периоду од 2006. до 2008. године боравио је у ЦЕРН-у (Женева) као сарадник на ФП6 пројектима SEE-GRID-2 и EGEE-II.

Студент је докторских студија на Физичком факултету Универзитета у Београду, а његова ужа научна област је физика кондензоване материје. Пре тога, кандидат се бавио физиком високих енергија и учествовао у раду АТЛАС експеримента, одакле потичу и раније публикације (нису везане за тему докторског рада). Под менторством др Антуна Балажа завршио је докторску дисертацију под насловом „Faraday waves in ultracold dipolar Bose gases” (наслов на српском: „Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима”), чија тема је одобрена на седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 28. 3. 2018. године, што је потврђено на седници Већа научних области природно-математичких наука Универзитета у Београду одржаној 21. 5. 2018. године.

Душан Вудраговић је запослен у Институту за физику у Београду као истраживач сарадник у Лабораторији за примену рачунара у науци Националног центра изузетних вредности за изучавање комплексних система. Поред пројекта основних истраживања ОН171017 којим руководи др Антун Балаж, делимично је ангажован и на интегралном пројекту ИИИ43007 на потпројекту којим руководи др Александар Богојевић, а у оквиру међународне сарадње тренутно је ангажован на H2020 пројектима SMARTCHAIN и NI4OS-EUROPE. Учествује и на билатералном пројекту

QDDb са Немачком, а раније је учествовао на билатералним пројектима IBEC и BEC-L са Немачком, као и на билатералном пројекту DUDFG са Аустријом.

Из теме доктората, Душан Вудраговић је објавио 4 рада категорије M21a, 1 рад категорије M22 и 6 саопштења категорије M34. Поред тога, на темама које нису везане за тему доктората, објавио је 2 рада категорије M21a, 5 радова категорије M21, 8 радова категорије M22 и 3 рада категорије M23, 3 поглавља категорије M13, као и 7 саопштења категорије M33, 2 саопштења категорије M34, 4 саопштења категорије M63.

1.2. Научна активност

Кандидат Душан Вудраговић се у свом научном раду бави проблемима ултрахладних бозонских гасова у присуству дипол-дипол интеракције, као и развојем паралелних нумеричких алгоритама и програма за нумеричке симулације ових физичких система.

Након пионирских експеримената у којима је реализована Бозе-Ајнштајн кондензација у системима са слабом контактном интеракцијом, била је потребна читава деценија да би се прецизност експеримената повећала и омогућила мерење ефеката дипол-дипол интеракције која постоји између атома или молекула са перманентним или индукованим електричним или магнетним диполним моментом. Први такав експеримент је изведен 2005. године са атомима хрома, а након тога су уследили експерименти са диспрозијумом и ербијумом, атомима са јаким магнетним диполним моментом, као и са поларним молекулима са далеко већим електричним и магнетним диполним моментом. Док је контактна интеракција симетрична и кратकोдетна, дипол-дипол интеракција између атома или молекула је анизотропна и дугодетна и доводи до читавог низа нових особина ултрахладних бозонских система. На пример, у систему се појављује нестабилност због привлачне компоненте дипол-дипол интеракције, па је систем стабилан само за број честица мањи од критичног. При томе, стабилност зависи од геометрије замке и оријентације дипола, који су готово увек усмерени у истом правцу, због присуства спољашњег магнетног или електричног поља, што је у експерименту неизбежно. Уколико систем постане нестабилан због промене геометрије или присуства броја честица већег од критичног, систем ће доживети динамички колапс током кога ће се појавити интересантне структуре.

Са теоријске тачке гледишта, Бозе-Ајнштајн кондензација се обично проучава у формализму друге квантизације, при чему одговарајући вишечестични Хамилтонијан садржи бозонске операторе креације и анихилације, а двочестичне интеракције су описане помоћу члана који садржи контактни и диполни интеракциони потенцијал. Пошто су интеракције слабе, могу се третирати пертурбативно и основни опис се може добити на основу теорије средњег поља. У случају Бозе-Ајнштајн-кондензованих система на нултој температури (односно када занемаримо термалне ексцитације) ово води ка нелинеарној Шредингеровој једначини, која се обично зове Грос-Питаевски једначина. Уколико је у систему присутна дипол-дипол интеракција, стандардна Грос-Питаевски једначина се проширује и укључује одговарајући интеракциони члан у облику конволуционог интеграла. Оваква једначина је способна да опише највећи број феномена и обично даје сагласност са експериментом реда неколико процената. Нелинеарност која се јавља у Грос-Питаевски једначини је последица вишечестичних интеракција и одговорна је за све поменуте нове феномене који се јављају у кондензованим системима. Добијена једначина за стање система и

његову еволуцију може се решавати нумерички или варијационо, а у неким случајевима и помоћу аналитичких апроксимативних метода (Томас-Ферми апроксимација).

Проучавање ултрахладних квантних гасова је веома активна истраживачка област којом се бави већи број теоријских и експерименталних група у свету. Шири интерес за област потиче од могућности да се особине оваквих система мењају у широком опсегу, што практично није могуће ни у једној другој области. На пример, јачина интеракција се може мењати по вољи коришћењем технике Фешбах резонанци. У околини неке од резонанци јачина контактне интеракције се може мењати од јако одбојне, до јако привлачне и то на динамички начин, током експеримента. Са друге стране, димензионалност система је такође слободан параметар и манипулацијом хармонијске замке систем се може трансформисати од тродимензионалног ка квази-дводимензионалном или квази-једнодимензионалном, такође на динамички начин. Ултрахладни квантни гасови представљају идеалан квантни симулатор према Фајнмановој дефиницији, што омогућава реализацију квантних симулација веома разноврсних физичких система, од чврстог стања, преко Џозефсонових спојева и квантних рачунара, до црних рупа.

Кандидат је успешно развио и имплементирао нумерички метод подељеног корака за решавање Грос-Питаевски једначине са контактним и диполним интеракционим чланом. Метод је прво развијен за ултрахладне Бозе гасове чије се интеракције могу описати помоћу контактне интеракционог потенцијала, а затим је уопштен на системе у којима се, поред контактне, у обзир мора узети и дипол-дипол интеракција. Иако су у дисертацији разматрани анизотропни тродимензионални системи, развијени метод је проширен и на специјалне ниже-димензионалне случајеве који узимају у обзир различите симетрије замке у којој је смештен Бозе-Ајнштајн кондензат: тродимензионалне аксијално- и радијално-симетричне замке, дводимензионалне цилиндрично-симетричне замке, изотропне сферно-симетричне и анизотропне једнодимензионалне и дводимензионалне замке. Рачунарски кодови су паралелизовани и прилагођени за коришћење на графичким картицама.

У свом истраживању кандидат је проучавао феномене Фарадејевих и резонантних таласа густине у ултрахладним бозонским системима са контактном и дипол-дипол интеракцијом. Овакви таласи настају као резултат хармонијске модулације система и представљају нелинеарне ексцитације система услед присуства интеракција, спрежањем колективних осцилација и параметарских резонанци. У оквиру теорије средњег поља кандидат је развио варијациони приступ за опис динамике Фарадејевих и резонантних таласа у диполним кондензатима. Овај приступ је заснован на Гаусовом варијационом анзацу који за параметре има ширине кондензата, конјуговане фазе, а укључује и модулације густине како би описао динамику таласа густине.

Користећи развијени варијациони приступ, као и пун нумерички приступ, детаљно је проучавао особине таласа густине у диполним кондензатима на нултој температури, где дипол-дипол интеракција игра важну улогу због нарушења симетрије услед анизотропије система. Извео је једначине кретања које описују динамику модулисаног диполног бозонског система и идентификовао најнестабилније моде које одговарају Фарадејевим и резонантним таласима. Даље, на основу тога, извео је аналитичке изразе за просторне периоде оба типа таласа густине, као и њихову зависност од јачине контактне и дипол-дипол интеракције. Добијене варијационе резултате упоредио је са резултатима детаљних нумеричких симулација које решавају диполну Грос-Питаевски једначину у три просторне димензије и добио веома добро слагање.

Кандидат је проучавао и утицај контактне и дипол-дипол интеракције на својства основног стања и колективних осцилација диполних кондензата. Док повећање јачине контактне интеракције увек доводи до ширења кондензата, ситуација је сложенија када се мења јачина дипол-дипол интеракције. За замку у облику цигаре у којој су диполи оријентисани у радијалном смеру, кандидат је показао да повећање јачине дипол-дипол интеракције доводи до ширења кондензата у лонгитудиналном правцу и у правцу поларизације, док се ширина у трећем правцу смањује. Поред тога, проучавао је и фреквенције колективних мода, где су ефекти интеракција мање изражени. Ово се посебно односи на монополну (дишућу) и квадруполну моду, чије вредности практично остају константне у целом распону експериментално релевантних вредности јачина интеракција. Са друге стране, фреквенција радијалне квадруполне моде је осетљивија на промену јачине интеракције, посебно јачине контактне интеракције, док при промени јачине дипол-дипол интеракције показује немонотно понашање.

2. Опис предатог рада

2.1. Основни подаци

Дисертација је урађена под руководством др Антуна Балажа, научног саветника, запосленог на Институту за физику у Београду. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење израдом докторске дисертације јер је у научном звању и аутор је великог броја радова из области физике кондензованог стања који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним и домаћим конференцијама.

Дисертација је написана на енглеском језику на 115 страна, не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак, садржај, биографију аутора и изјаве. У тексту се налази 4 табеле и 26 слика, а у библиографији је наведена 101 референца. Теза је подељена у 7 поглавља и садржи 6 додатака.

2.2. Предмет и циљ рада

Предложена докторска дисертација припада области физике кондензованог стања, а физички системи којима се бави су квантно дегенерисани ултрахладни гасови бозона са дипол-дипол интеракцијом (ДДИ).

Први експерименти који су коришћени за проучавање Бозе-Ајнштајн-кондензованих система фокусирали су се на мерење фреквенција колективних осцилација система, односно нисколежећих ексцитација. Пошто се могу експериментално мерити са великом тачношћу, оне се користе као први тест свих теоријских и нумеричких метода за опис Бозе-Ајнштајн кондензације. Док нам варијациони и други теоријски приступи омогућавају да изведемо функционалне зависности фреквенција колективних мода од параметара система, јасно је да је њихова тачност ограничена избором варијационе функције или реда апроксимације у пертурбативном развоју. Са друге стране, нумерички приступ нам даје већу тачност и директно решавање једначина теорије средњег поља или теорије вишег реда, али за сваку вредност параметара система морамо да спроведемо посебну нумеричку симулацију. Само кроз комбинацију аналитичких и нумеричких приступа могуће је на потпун начин описати и проучити системе ултрахладних гасова, уз поређење са резултатима експерименталних мерења.

Поред нисколежећих ексцитационих мода, експериментално су доступне и друге врсте нелинеарних ексцитација система. Пошто се овде ради о разређеним гасовима, то значи да можемо да посматрамо

и таласе густине индуковане хармонијском модулацијом замке или међучестичних интеракција. Мотивацију за ово представља добро познати класични феномен Фарадејевих таласа, који се појављују на површини плитког слоја течности уколико се посуда у којој се налази хармонијски осцилује у вертикалном смеру. У том случају појављују се површински таласи чије је патерне први посматрао и описао Мајкл Фарадеј почетком XIX века. Интерес за овакву врсту ексцитација појавио се поново осамдесетих година XX века у контексту нелинеарних течности, а у контексту ултрахладних гасова, Фарадејеви таласи су прво проучавани теоријски 2002. године. Иако су код течности у питању површински таласи, а у ултрахладним квантним гасовима се ради о таласима густине, користимо исти назив за те феномене. Након првих теоријских и нумеричких резултата за системе са контактном интеракцијом, у експериментима са Бозе-Ајнштајн кондензатом атома рубидијума су 2007. године Фарадејеви таласи измерени и карактерисани помоћу просторног периода, као и времена модулације које је потребно да се развијају. У овим експериментима коришћена је замка у облику цигаре чија је радијална фреквенција хармонијски модулисана, за разлику од теоријских радова у којима је модулисана јачина интеракције.

Фарадејеви таласи у ултрахладним гасовима су последица присуства параметарских резонанци у систему. Док просторни период ових таласа густине зависи од геометрије система и других параметара, фреквенција њихових осцилација је два пута мања од модулационе фреквенције, што је одлика параметарских резонантних феномена. У варијационом приступу ово води ка Матјеовој (Mathieu) диференцијалној једначини, која даје уочени однос фреквенција таласа и побуде. Поред Фарадејевих таласа густине, у ултрахладним бозонским системима појављују се и резонантни таласи у случајевима када је фреквенција модулације целобројан умножак одговарајуће радијалне фреквенције замке. Ова два феномена се лако разликују, јер је фреквенција резонантних таласа једнака фреквенцији побуде. Фарадејеви и резонантни таласи су до сада проучавани у једнокомпонентним и двокомпонентним системима са контактном интеракцијом, како хомогеном, тако и просторно нехомогеном.

Главни циљ докторске дисертације кандидата је проучавање феномена Фарадејевих и резонантних таласа у ултрахладним бозонским системима са јаким дипол-дипол интеракцијом. Ова тема није детаљно проучавана у литератури, а познато је да присуство просторно анизотропне дипол-дипол интеракције може да има значајан утицај на особине система. Као што је већ поменуто, она може да доведе до колапса система, па се може очекивати и значајан утицај интеракције на процес формирања таласа густине и њихове особине. Циљеви тезе су:

1. нумеричко и аналитичко проучавање колективних осцилација и динамике Фарадејевих таласа у ултрахладним бозонским системима са контактном и дипол-дипол интеракцијом;
2. проучавање појаве резонантних таласа и утицаја дипол-дипол интеракције на њихове особине у диполним Бозе-Ајнштајн-кондензованим системима;
3. развој паралелних нумеричких метода за решавање тродимензионалне Грос-Питаевски једначине са контактним и диполним интеракционим чланом.

За реализацију првог циља, кандидат је користио детаљне нумеричке симулације и варијациони приступ за испитивање утицаја контактне и дипол-дипол интеракције на фреквенције колективних мода и особине Фарадејевих таласа у диполним Бозе-Ајнштајн кондензатима. Посебно је проучавао зависност просторног и временског периода Фарадејевих таласа од јачине дипол-дипол интеракције. Сви прорачуни су изведени за реалистичне физичке системе, као што су атомски гасови хрома, диспрозијума и ербијума.

Типично време развоја резонантних таласа је много мање од времена које је потребно за појаву Фарадејевих таласа. У оквиру другог циља тезе кандидат је проучавао утицај јачине диполне интеракције на ова карактеристична времена. Такође, испитао је раније уочени феномен појаве снажнијег резонантног одговора система за модулатиону фреквенцију која је двоструко већа од радијалне фреквенције замке, иако би се очекивало да се најважнија резонанца добија када су ове фреквенције једнаке.

У оквиру трећег циља кандидат је развио нумеричку методу за решавање Грос-Питаевски једначине за ултрахладне бозонске системе са диполном интеракцијом, која представља резултат теорије средњег поља. Временски зависна диполна Грос-Питаевски једначина је парцијална диференцијална једначина по просторним координатама и времену и има структуру нелинеарне Шредингерове једначине, тако да садржи први извод таласне функције по времену и друге изводе по просторним координатама. Диполни интеракциони члан је описан помоћу просторног интеграла, пошто је у питању дугодоментна интеракција. Развијени метод подељеног корака за решавање Грос-Питаевски једначине укључује дискретизацију по простору и времену, појединачну интеграцију по просторним координатама и временску пропагацију дискретизоване једначине. Уколико је познато решење у једном временском тренутку, ова метода омогућава налажење решења после малог временског корака пропагирањем дискретизоване једначине. У овој тези кориштена је семи-имплицитна Кренк-Николсон дискретизациона шема која осигурава стабилност решења и чува норму таласне функције током пропагације у реалном времену. Нумерички алгоритми који су раније развијени за случај контактне интеракције су у оквиру тезе уопштени на Грос-Питаевски једначину са дипол-дипол интеракцијом. С обзиром на велику нумеричку захтевност тродимензионалних симулација за проучавање реалних физичких система, сви алгоритми су паралелизовани и прилагођени за коришћење на графичким картицама.

2.3. Публикације чији су резултати приказани у дисертацији

У овој докторској дисертацији су представљени резултати 5 радова, и то 4 рада објављена у часописима категорије M21a и једног рада објављеног у часопису категорије M22. Резултати су такође представљени на 6 међународних конференција, као саопштења категорије M34 (постер).

Радови објављени у међународним часописима изузетних вредности (M21a)

1. **D. Vudragović**, I. Vidanović, A. Balaž, P. Muruganandam, and S. K. Adhikari, C Programs for Solving the Time-dependent Gross-Pitaevskii Equation in a Fully Anisotropic Trap, *Comput. Phys. Commun.* **183**, 2021 (2012). DOI: 10.1016/j.cpc.2012.03.022; ISSN: 0010-4655; **IF(2012) = 3.078**
2. R. Kishor Kumar, L. Young-S., **D. Vudragović**, A. Balaž, P. Muruganandam, and S. K. Adhikari, Fortran and C Programs for the Time-dependent Dipolar Gross-Pitaevskii Equation in an Anisotropic Trap, *Comput. Phys. Commun.* **195**, 117 (2015). DOI: 10.1016/j.cpc.2015.03.024; ISSN: 0010-4655; **IF(2015) = 3.635**
3. L. Young-S., **D. Vudragović**, P. Muruganandam, S. K. Adhikari, and A. Balaž, OpenMP Fortran and C Programs for Solving the Time-dependent Gross-Pitaevskii Equation in an Anisotropic Trap, *Comput. Phys. Commun.* **204**, 209 (2016). DOI: 10.1016/j.cpc.2016.03.015; ISSN: 0010-4655; **IF(2016) = 3.936**

4. L. Young-S., P. Muruganandam, S. K. Adhikari, V. Loncar, **D. Vudragović**, and A. Balaž, OpenMP GNU and Intel Fortran programs for solving the time-dependent Gross-Pitaevskii equation, *Comput. Phys. Commun.* **220**, 503 (2017).
DOI: 10.1016/j.cpc.2017.07.013, ISSN: 0010-4655; **IF(2017) = 3.748**

Радови објављени у истакнутим међународним часописима (**M22**)

1. **D. Vudragović** and A. Balaž, Faraday and Resonant Waves in Dipolar Cigar-Shaped Bose-Einstein Condensates, *Symmetry* **11**, 1090 (2019).
DOI: 10.3390/sym11091090; ISSN: 2073-8994; **IF(2018)=2.143**

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (**M34**):

1. V. Lončar, **D. Vudragović**, A. Balaž, and A. Pelster, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, DPG Spring Meeting 2015, Heidelberg, Germany, 23-27 Mar 2015.
2. **D. Vudragović** and A. Balaž, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, 5th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 24-28 Aug 2015.
3. **D. Vudragović** and A. Balaž, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, 19th Symposium on Condensed Matter Physics - SFKM 2015, Belgrade, Serbia, 7-11 Sep 2015.
4. V. Lončar, **D. Vudragović**, A. Balaž, and A. Pelster, Rosensweig instability due to three-body interaction or quantum fluctuations?, DPG Spring Meeting 2016, Hannover, Germany, 29 Feb - 4 Mar 2016.
5. V. Lončar, **D. Vudragović**, S. K. Adhikari, and A. Balaž, Parallel solvers for dipolar Gross-Pitaevskii equation, 6th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 28 Aug - 1 Sep 2017.
6. **D. Vudragović**, V. Veljić, I. Vasić, and A. Balaž, Ground state and collective modes of dipolar BECs, 7th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 26-30 Aug 2019.

2.4. Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Ова докторска дисертација је подељена у 7 поглавља.

У првом поглављу дат је увод у проблематику која је разматрана у дисертацији и укратко су описани најважнији концепти који се користе: квантна статистика, Бозе-Ајнштајн кондензација, бозонски гас са дипол-дипол интеракцијом, колективне моде, Фарадејеви и резонантни таласи. Ово поглавље такође даје кратак преглед најважнијих резултата у области ултрахладних диполних квантних гасова који су од интереса за тему дисертације.

Поглавље 2 даје теоријски опис ултрахладног бозонског гаса и концепта дугодометног недијагоналног уређења. Бозе-Ајнштајн кондензација је прво разматрана у неинтерагујућем систему, а након тога у слабо интерагујућем систему. Након тога је изложена теорија средњег поља за диполни бозонски гас, која укључује контактну и дипол-дипол интеракцију. Уведен је и варијациони приступ, базиран на Гаусовој таласној функцији, израчунат је Лагранжијан система

који одговара теорији средњег поља, као и једначине кретања које следе из варијационог Лагранжијана.

У поглављу 3 се проучава основно стање система користећи варијациони приступ уведен у претходном поглављу, као и користећи нумеричке симулације. Прво су варијационе једначине решене у случају слабих интеракција, а онда су представљени нумерички резултати за основно стање атомског кондензата хрома, ербијума и диспрозијума. Проучен је утицај обе присутне врсте интеракција (контактне и дипол-дипол интеракције) на особине основног стања, односно на ширине кондензата. Упоредени су варијациони и нумерички резултати и добијено је релативно добро слагање.

Четврто поглавље проучава колективне моде и утицај јачине интеракција на њихове фреквенције. Прво је извршена линеаризација динамичких једначина кретања за ширине кондензата, изведених у другом поглављу. Анализом линеаризованих једначина изведени су изрази за фреквенције дишуће (breathing), квадруполне и радијалне квадруполне моде. Добијени варијациони резултати су након тога упоређени са нумеричким резултатима, који су израчунати коришћењем Фуријеове анализе динамичких решења диполне Грос-Питаевски једначине. Посебно су испитане зависности фреквенција колективних мода од јачина контактне и дипол-дипол интеракције.

Поглавље 5 представља најважније резултате дисертације везане за особине Фарадејевих и резонантних таласа густине. Прво је уведен варијациони приступ који омогућава њихов теоријски опис, базиран на модификацији раније уведеног Гаусовог анзаца, који сада укључује и модулацију густине у лонгитудиналном правцу, ортогоналном на смер модулације (вођења) система. Користећи овај приступ, изведени су услови за појаву Фарадејевих и резонантних таласа у систему, као и изрази за просторни период ових таласа. Након тога су изведене детаљне нумеричке симулације и анализирана је појава Фарадејевих и резонантних таласа у атомским кондензатима хрома, ербијума и диспрозијума. Показано је да се у временском домену појављују ексцитације са фреквенцијом два пута мањом од фреквенције модулације, што одговара Фарадејевим таласима у складу са представљеном теоријском анализом. Такође је показано да се под одређеним условима, када је фреквенција модулације једнака фреквенцији радијалног дела хармонијске замке (или је двоструко већа), у систему појављују резонантни таласи. Користећи Фуријеову анализу у просторном домену одређени су просторни периоди обе врсте таласа за све разматране елементе и испитана је зависност ових периода од јачина интеракција присутних у систему. Упоредени су нумерички и варијациони резултати и добијено је добро слагање, што показује да се изведени теоријски резултати могу користити за опис диполних бозонских гасова како у случају слабе, тако и у случају јаке дипол-дипол интеракције.

Нумерички алгоритми и детаљи имплементације паралелних програма који су развијени за решавање диполне Грос-Питаевски једначине су представљени у поглављу 6. Ово поглавље објашњава семи-имплицитну Кренк-Николсон методу и њену примену на системе са контактном и диполном интеракцијом. Дати су и детаљи примењене нумеричке диференцијације и интеграције, као и резултати тестирања ефикасности паралелизације развијених програма, који показују да се добија убрзање од 70% до 90% у односу на идеално, максимално могуће линеарно убрзање.

У поглављу 7 дат је преглед добијених резултата и сумирани су главни закључци. Дисертација садржи и шест додатака, који дају детаље извођења, дефиниције и особине коришћених специјалних функција, параметре разматраних физичких система, као и опис Кренк-Николсон дискретизационе шеме.

3. Списак публикација kandidata

Поглавља у тематским зборницима (M13):

1. D. Stanković, P. Jovanović, A. Jović, V. Slavnić, **D. Vudragović**, and A. Balaž, Implementation and Benchmarking of New FFT Libraries in Quantum ESPRESSO, High-performance computing infrastructure for South East Europe's research co-mmunities, p. 155-162, Springer (2014); DOI: 10.1007/978-3-319-01520-0_19
2. **D. Vudragović**, and A. Balaž, Science gateway for the Serbian condensed matter physics community, Science gateways for distributed computing infrastructures, Ed. Peter Kacsuk, p. 209-220, Springer (2014); DOI: 10.1007/978-3-319-11268-8_15
3. O. Prnjat, A. Balaž, **D. Vudragović**, I. Liabotis, C. Sener, B. Marovic, M. Kozlovsky, and G. Neagu, SEE-GRID eInfrastructure for regional eScience, Data driven e-Science, Eds. S. C. Lin and E. Yen, p. 91, Springer (2011); DOI: 10.1007/978-1-4419-8014-4_7

Радови у међународним часописима изузетних вредности (M21a):

1. Luis E. Young-S., P. Muruganandam, S. K. Adhikari, V. Lončar, **D. Vudragović**, and A. Balaž, OpenMP GNU and Intel Fortran programs for solving the time-dependent Gross-Pitaevskii equation, *Comput. Phys. Commun.* **220**, 503 (2017).
2. Luis E. Young-S., **D. Vudragović**, P. Muruganandam, S. K. Adhikari, and A. Balaž, OpenMP Fortran and C programs for solving the time-dependent Gross-Pitaevskii equation in an anisotropic trap, *Comput. Phys. Commun.* **204**, 209 (2016).
3. R. K. Kumar, Luis E. Young-S., **D. Vudragović**, A. Balaž, P. Muruganandam, and S. K. Adhikari, Fortran and C programs for the time-dependent dipolar Gross-Pitaevskii equation in an anisotropic trap, *Comput. Phys. Commun.* **195**, 117 (2015).
4. **D. Vudragović**, I. Vidanović, A. Balaž, P. Muruganandam, and S. K. Adhikari, C Programs for solving the time-dependent Gross-Pitaevskii equation in a fully anisotropic trap, *Comput. Phys. Commun.* **183**, 2021 (2012).
5. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Charged-particle multiplicities in pp interactions at s=900 GeV measured with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett. B* **688**, 21 (2010).
6. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Search for new particles in two-jet final states in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 161801 (2010).

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. B. P. Marinković, V. Vujčić, G. Sushko, **D. Vudragović**, S. Djordjević, S. Ivanović, M. Nešić, D. Jevremović, A. V. Solov'yov, and N. J. Mason, Development of collisional data base for elementary processes of electron scattering by atoms and molecules, *Nucl. Instrum. Meth. B* **354**, 90 (2015).

2. A. Balaž, I. Vidanović, D. Stojiljković, **D. Vudragović**, A. Belić, and A. Bogojević, SPEEDUP code for calculation of transition amplitudes via the effective action approach, Commun. Comput. Phys. **11**, 739 (2012).
3. A. Balaž, O. Prnjat, **D. Vudragović**, V. Slavnić, I. Liabotis, E. Atanassov, B. Jakimovski, and M. Savić, Development of Grid e-Infrastructure in South-Eastern Europe, J. Grid Comput. **9**, 135 (2011).
4. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Search for quark contact interactions in dijet angular distributions in pp collisions at $s=7$ TeV measured with the ATLAS detector, Phys. Lett. B **694**, 327 (2011).
5. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Performance of the ATLAS detector using first collision data, JHEP **9**, 056 (2010).

Радови у истакнутим међународним часописима (M22):

1. **D. Vudragović**, and A. Balaž, Faraday and Resonant Waves in Dipolar Cigar-Shaped Bose-Einstein Condensates, Symmetry **11**, 1090 (2019).
2. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons, Eur. Phys. J. C **71**, 1593 (2011).
3. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C **71**, 1512 (2011).
4. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Readiness of the ATLAS liquid argon calorimeter for LHC collisions, Eur. Phys. J. C **70**, 723 (2010).
5. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Drift time measurement in the ATLAS liquid argon electromagnetic calorimeter using cosmic muons, Eur. Phys. J. C **70**, 755 (2010).
6. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., The ATLAS inner detector commissioning and calibration, Eur. Phys. J. C **70**, 787 (2010).
7. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., The ATLAS simulation infrastructure, Eur. Phys. J. C **70**, 823 (2010).
8. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Commissioning of the ATLAS muon spectrometer with cosmic rays, Eur. Phys. J. C **70**, 875 (2010).
9. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., Readiness of the ATLAS tile calorimeter for LHC collisions, Eur. Phys. J. C **70**, 1193 (2010).

Радови у међународним часописима (M23)

1. **D. Vudragović**, L. Ilić, P. Jovanović, S. Nicković, A. Bogojević, and A. Balaž, VI-SEEM DREAMCLIMATE Service, Scal. Comput. Pract. Exp. **19**, 215 (2018).

2. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah, ... **D. Vudragović**, and et al., The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider, *J. Instrum.* **3**, S08003 (2008).
3. Lj. Simić, N. Vranješ, D. Reljić, **D. Vudragović**, and D. S. Popović, WW production and triple gauge boson couplings at ATLAS, *Acta Phys. Pol. B* **38**, 525 (2007).

Саопштења са међународних скупова штампана у целини (**M33**):

1. **D. Vudragović**, P. Jovanović, and A. Balaž, VI-SEEM virtual research environment, The 10th RO-LCG Conference, Sinaia, Romania, 26-28 Oct 2017.
2. J. Lappalainen, **D. Vudragović**, A. Balaž, F. Ruggieri, R. Barbera, R. Lovas, G. Stoitsis, and K. Kastrantas, Federating computation and storage resources to support agricultural science communities, EFITA-WCCA-CIGR conference, Turin, Italy, 24-27 Jun 2013.
3. V. Slavnić, B. Acković, **D. Vudragović**, A. Balaž, A. Belić, and M. Savić, Grid site monitoring tools developed and used at SCL, SEE-GRID-SCI User Forum 2009, Istanbul, Turkey, 9-10 Dec 2009.
4. V. Slavnić, B. Acković, **D. Vudragović**, A. Balaž, and A. Belić, Operational Grid tools developed at SCL, SEE-GRID-SCI User Forum 2009, Istanbul, Turkey, 9-10 Dec 2009.
5. **D. Vudragović**, A. Balaž, V. Slavnić, and A. Belić, Serbian participation in Grid computing projects, NEC 2009, Varna, Bulgaria, 7-14 Sep 2009.
6. O. Prnjat, A. Balaž, T. Gurov, M. Kon-Popovska, I. Liabotis, G. Neagu, B. Ortakaya, C. Sener, and **D. Vudragović**, National Grid initiatives set-up and monitoring guidelines, The first EELA-2 conference, Bogota, Colombia, 25-27 Feb 2009.
7. N. Vranješ, Lj. Simić, D. Reljić, **D. Vudragović**, and D. S. Popović, WW Production at the LHC in NLO Simulations, 6th international conference of the Balkan physical union, Istanbul, Turkey, 22-26 Aug 2006.

Саопштења са међународних скупова штампана у изводу (**M34**):

1. **D. Vudragović**, V. Veljić, I. Vasić, and A. Balaž, Ground state and collective modes of dipolar BECs, 7th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 26-30 Aug 2019.
2. V. Lončar, **D. Vudragović**, S. K. Adhikari, and A. Balaž, Parallel solvers for dipolar Gross-Pitaevskii equation, 6th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 28 Aug - 1 Sep 2017.
3. V. Lončar, **D. Vudragović**, A. Balaž, and A. Pelster, Rosensweig instability due to three-body interaction or quantum fluctuations?, DPG Spring Meeting 2016, Hannover, Germany, 29 Feb - 4 Mar 2016.
4. **D. Vudragović** and A. Balaž, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, The 19th Symposium on Condensed Matter Physics - SFKM 2015, Belgrade, Serbia, 7-11 Sep 2015.
5. **D. Vudragović** and A. Balaž, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, The 5th International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, 24-28 Aug 2015.

6. V. Lončar, **D. Vudragović**, A. Balaž, and A. Pelster, Faraday waves in dipolar Bose-Einstein condensates, DPG Spring Meeting 2015, Heidelberg, Germany, 23-27 Mar 2015.
7. **D. Vudragović**, V. Slavnić, I. Spasojević, V. Nedović, and A. Balaž, AgINFRA - a data infrastructure to support agricultural scientific communities: promoting data sharing and development of trust in agricultural sciences, 12th Congress of Nutrition, Belgrade, Serbia, 31 Oct 2012.
8. N. Manouselis, C. Thanopoulos, A. Balaž, **D. Vudragović**, V. Nedović, and I. Spasojević, AgINFRA - a data infrastructure to support agricultural scientific communities: promoting data sharing and development of trust in agricultural sciences, 6th Central European Congress on Food, Novi Sad, Serbia, 23-26 May 2012.

Саопштења са домаћих скупова штампана у целини (M63):

1. **D. Vudragović**, A. Balaž, A. Belić, C. Kourkoumelis, D. Fassouliotis, and S. Vourakis, Hybrid Pupil's Analysis Tool for Interactions in ATLAS, MIPRO 2010, Opatia, Croatia, 24-28 May 2010.
2. **D. Vudragović**, A. Balaž, A. Belić, and A. Bogojević, QSPEEDUP: Quasi-MC Implementation of the SPEEDUP Path Integral Code, INFOTEH 2010, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 17-19 Mar 2010.
3. **D. Vudragović**, V. Slavnić, A. Balaž, and A. Belić, WMSMON - GLite WMS Monitoring Tool, MIPRO 2009, Opatia, Croatia, 25-29 May 2009.
4. **D. Vudragović**, A. Balaž, V. Slavnić, and A. Belić, Dwarf - the Framework for Authorized YUM/APT Repositories Management, INFOTEH 2009, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 18-20 Mar 2009.

4. Провера оригиналности докторске 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 „**Faraday waves in ultracold dipolar Bose gases**” (наслов на српском језику: „**Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима**”) из научне области Физика кондензованог стања, чији је аутор Душан Вудраговић, као и на основу оцене тог извештаја коју је дао ментор (извештај из програма и оцена извештаја се налазе у прилогу), констатујемо да је утврђено подударане текста мање од 1%. Овај степен подударности последица је 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, изјављујемо да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

5. Закључак

На основу изложеног, Комисија закључује да резултати кандидата Душана Вудраговића приказани у оквиру ове докторске дисертације представљају изузетно оригиналан и значајан научни допринос у области физике кондензованог стања. Из области дисертације кандидат има пет објављених радова у међународним часописима, при чему су четири рада категорије M21a и један рад категорије M22. Сходно томе, комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану тезе:

**„Faraday waves in ultracold dipolar Bose gases”
(„Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима”)**

У Београду, 12. 9. 2019. године

др Антун Балаж
научни саветник
Институт за физику у Београду

др Ивана Васић
виши научни сарадник
Институт за физику у Београду

проф. др Милан Дамњановић
редовни професор Физичког факултета

проф. др Милан Кнежевић
редовни професор Физичког факултета

Faraday waves in ultracold dipolar bose gases

By: Dušan Vudragović

As of: Sep 10, 2019 12:14:53 PM
38,560 words - 6 matches - 5 sources

Similarity Index

0%

Mode:

sources:

50 words / < 1% match - Crossref

[Luis Young-S. "Dipolar Bose-Einstein condensates with large scattering length", Physical Review A, 03/2012](#)

29 words / < 1% match - Internet from 04-Mar-2012 12:00AM

uni-ka.the-jens.de

25 words / < 1% match - Internet from 24-Nov-2017 12:00AM

edocs.fu-berlin.de

22 words / < 1% match - Internet from 14-May-2011 12:00AM

www.kh.phys.waseda.ac.jp

20 words / < 1% match - Internet

archiv.ub.uni-heidelberg.de

paper text:

UNIVERSITY OF BELGRADE FACULTY OF PHYSICS Dušan Vudragović FARADAY WAVES IN ULTRACOLD DIPOLAR BOSE GASES Doctoral dissertation Belgrade, 2019 УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ФИЗИЧКИ ФАКУЛТЕТ Душан Вудраговић Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима Докторска дисертација Београд, 2019. година Thesis advisor, Committee member: Dr. Antun Balaž Research Professor Institute of Physics Belgrade University of Belgrade Committee member: Dr. Ivana Vasić Associate Research Professor Institute of Physics Belgrade University of Belgrade Committee member: Prof. Dr. Milan Damjanović Professor Faculty of Physics University of Belgrade Committee member: Prof. Dr. Milan Knežević Professor Faculty of Physics University of Belgrade Acknowledgements This thesis was completed at the Scientific Computing Laboratory, National Center of Excellence for the Study of Complex Systems, Institute of Physics Belgrade under supervision of Dr. Antun Balaž. The presented research was supported by the Ministry of Education, Science, and

ПРИЛОГ 2

ОЦЕНА ИЗВЕШТАЈА О ПРОВЕРИ ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ 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 „**Faraday waves in ultracold dipolar Bose gases**” (наслов на српском језику: „**Фарадејеви таласи у ултрахладним диполним Бозе гасовима**”) из научне области Физика кондензованог стања, чији је аутор Душан Вудраговић, констатујем да је утврђено подударање текста мање од 1%, након искључивања извора који садрже радове кандидата и дупликате. Овај степен подударности последица је 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, 12. 9. 2019. године

др Антун Балаж
научни саветник
Институт за физику у Београду