НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на II седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 21. 11. 2018. године одређени за чланове Комисије за оцену испуњености услова и оправданости предложене теме за израду докторске дисертације кандидаткиње Ане Худомал, мастер физичара, која је пријавила своју докторску дисертацију под називом **„Numerical study of quantum gases in optical lattices and in synthetic magnetic fields” (**наслов на српском језику: **„Нумеричко проучавање квантних гасова у оптичким решеткама и у синтетичким магнетним пољима”**), подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

Ана Худомал је рођена 8. 3. 1991. године у Београду, где је завршила основну школу и Математичку гимназију. Основне академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер Теоријска и експериментална физика, започела је 2010. године и завршила јула 2014. године са просечном оценом 10,0. Мастер академске студије на истом факултету, смер Теоријска и експериментална физика, завршила је октобра 2015. године са просечном оценом 10,0, одбранивши мастер рад на тему **„**New Periodic Solutions to the Three-Body Problem and Gravitational Waves**”** (**„**Нова периодична решења проблема три тела и гравитациони таласи**”**). Мастер рад је урађен под руководством др Вељка Дмитрашиновића, научног саветника Института за физику у Београду.

Од 2007. до 2011. године Ана Худомал је била стипендиста Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка, затим од 2011. до 2013. стипендиста Града Београда, док је од 2013. до 2015. била стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије. Ана Худомал је током академске 2014/2015. године учествовала у извођењу наставе на Физичком факултету Универзитета у Београду, као сарадник у настави на предмету Квантна теоријска физика (предметни наставник доц. др Душко Латас).

Новембра 2015. године уписала је докторске академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, ужа научна област физика кондензоване материје. Под руководством др Иване Васић ради на темама везаним за ултрахладне квантне гасове у оптичким решеткама са синтетичким магнетним пољима, са циљем разумевања улоге атомских интеракција у овим системима. Од марта 2016. године Ана Худомал је запослена у Институту за физику у Београду као истраживач приправник у Лабораторији за примену рачунара у науци, у оквиру Националног

центра изузетних вредности за изучавање комплексних система, на пројекту основних истраживања **„***Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система***”** **(**ОН171017) Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, којим руководи др Антун Балаж. Поред тога, учествовала је и на билатералним пројектима са Немачком (Гете универзитет у Франкфурту) и са Хрватском (Универзитет у Загребу), под руководством др Иване Васић. До сада је похађала неколико школа за докторанде, међу којима су International School on Thermal, Quantum, and Topological Phase Transitions – Bad Endorf, Germany (2016), Winter School on Topological Matter in Artificial Gauge Fields – Dresden, Germany (2018), ICAP2018 Summer School – Barcelona, Spain (2018).

До сада, Ана Худомал има један рад објављен у часопису категорије М21а, два рада објављена у часописима категорије М21, као и 5 саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (М34).

2. Научна активност

Кандидаткиња Ана Худомал се у свом научном раду од почетка докторских студија бави особинама ултрахладних квантних гасова у оптичким решеткама у присуству јаких синтетичких магнетних поља.

Системи ултрахладних атома, поред различитих других примена, пружају изузетне могућности за имплементацију и директно експериментално проучавање својстава релевантних Хамилтонијана, односно њихове квантне симулације. На пример, модели физике кондензоване материје се могу реализовати увођењем периодичног потенцијала, тзв. оптичке решетке, која настаје интерференцијом ласерске светлости. Типичне интеракције у овим системима су ван дер Валсове интеракције, које се углавном могу добро апроксимирати контактним потенцијалом. Темељним поређењем теоријских и експерименталних резултата је утврђено да се особине бозонских атома у оваквом периодичном потенцијалу могу добро описати у оквиру Бозе-Хабард модела. Применом стандардних алата атомске физике и квантне оптике могућа је потпуна експериментална контрола свих микроскопских параметара овог модела. На пример, однос јачине интеракција и амплитуде тунелирања атома између два суседна чвора решетке се може подешавати у веома широком опсегу, што је омогућило експерименталну реализацију квантног фазног прелаза између бозонског кондензата и Мот изолатора. Међутим, због чињенице да су атоми електрично неутрални, увођење магнетног поља, односно Лоренцове силе, је дуго било ван домета ових експеримената. Значајни истраживачки напори су уложени у реализацију тзв. синтетичких магнетних поља, која су у експериментима доступна тек од пре неколико година. Синтетичка магнетна поља се уводе на посредан начин, периодичним вођењем система, а у комбинацији са оптичким решеткама могу да

остваре релевантан и истраживачки веома интересантан Харпер-Хофштетер модел. Важна карактеристика овог модела су тополошке инваријанте енергетских зона, тзв. Чернови бројеви који су у основи квантног Холовог ефекта. У скорашњем експерименту [Nat. Phys. **11**, 162 (2015)], који представља прекретницу у области, динамички одговор некохерентних бозонских атома је употребљен за прво мерење Черновог броја у систему који се не састоји од електрона као основних градивних јединица. Иако су слабе, атомске интеракције су унеле значајну комплексност у овај експеримент и њихов допринос је процењен на основу додатних мерења. Како се очекује да мерење Черновог броја постане рутински корак у будућим експериментима, кандидаткиња развија и примењује аналитичке и нумеричке методе за опис динамике некохерентних бозона у вођеном Бозе-Хабард моделу, са фокусом на разумевање улоге атомских интеракција.

Уопштено, применом Флоке теорије, периодично вођеном систему се може придружити временски независан ефективни Хамилтонијан. За неинтерагујуће системе, ефективни Хамилтонијан се може одредити применом апроксимативног аналитичког приступа и у ту сврху се најчешће користи развој по инверзној фреквенцији вођења. Кандидаткиња је у досадашњем раду аналитички извела додатне чланове овог развоја, који су релевантни у експерименталном режиму, и показала да ти чланови не мењају Чернове бројеве ефективног модела, али мењају његову симетрију. Директним нумеричким решавањем временски зависне Шредингерове једначине, кандидаткиња је потврдила исправност поправљеног апроксимативног аналитичког решења и додатно одредила спектар модела са корекцијом.

Полазећи од ових резултата, кандидаткиња је нумерички имплементирала метод којим се описује динамика некохерентних бозона. У почетном тренутку атоми су припремљени као просторно локализована, статистичка мешавина кохерентних стања која равномерно насељавају најнижу енергетску зону ефективног модела. Овакав избор почетног стања је мотивисан експериментом. Динамички одговор система се побуђује гашењем спољашње замке (која на почетку ограничава атомски облак) и излагањем атома спољашњој сили дуж једног правца. Временска еволуција је испитана у оквиру периодично-вођеног Бозе-Хабард модела, а доприноси слабих међуатомских интеракција су узети у обзир у оквиру теорије средњег поља.

Нумерички резултати кандидаткиње пружају увид у очекиване вредности релевантних физичких величина као што су померај центра масе читавог система, ширина атомског облака и насељеност енергетских зона ефективног Хамилтонијана. Општи принципи указују на то да, за довољно дуга времена, вођење и интеракције доприносе загревању система. Ипак, на краћим временским скалама, нумеричке симулације показују да прелази у више енергетске зоне ефективног модела настају као последица ослобађања интеракционе енергије приликом ширења атомског облака. За последицу имамо да слабе интеракције компликују мерење Черновог броја, у складу са експерименталним резултатима. Ипак, посебно је интересантно да резултати кандидаткиње

показују да интеракције успоравају ширење атомског облака и на тај начин потискују доприносе чланова вишег реда у ефективном Хамилтонијану. Додатно, у присуству слабих атомских интеракција, атомска расподела у простору квазиимпулса је равномернија, па на тај начин заправо интеракције додатно поспешују мерење Черновог броја.

Кандидаткиња је до сада радила на разјашњавању улоге слабих интеракција у вођеним системима хладних атома. На корак даље од овог режима, комбинација јаких магнетних поља и јаких интеракција отвара могућност за проучавање јако корелисаних фаза, као што су фракциона Холова стања. У даљем раду кандидаткиња ће радити на налажењу оптималних протокола и параметара за реализацију ових интересантних и релевантних стања, што ће представљати други део планиране докторске дисертације.

3. Списак публикација

Радови у међународним часописима изузетних вредности (категорија М21а):

1. V. Dmitrašinović, M. Šuvakov, and **A. Hudomal**,
   Gravitational Waves from Periodic Three-Body Systems,
   Phys. Rev. Lett. **113**, 101102 (2014) [ISSN=1079-7114, IF(2014)=7.512].

Радови у врхунским међународним часописима (категорија М21):

1. **A. Hudomal**, I. Vasić, H. Buljan, W. Hofstetter, and A. Balaž,
   Dynamics of weakly interacting bosons in optical lattices with flux,
   Phys. Rev. A **98**, 053625 (2018) [ISSN=2469-9934, IF(2017)=2.909],
2. V. Dmitrašinović, **A. Hudomal**, M. Shibayama, and A. Sugita,
   Linear Stability of Periodic Three-body Orbits with Zero Angular Momentum and Topological Dependence of Kepler's Third Law: a Numerical Test,
   J. Phys. A: Math. Theor. **51**, 315101 (2018) [ISSN=1751-8121, IF(2017)=1.963].

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (М34):

1. **A. Hudomal**, I. Vasić, H. Buljan, W. Hofstetter, and A. Balaž, Transport in optical lattices with flux, 26th International Conference on Atomic Physics, 22 - 27 July 2018, Barcelona, Spain.
2. **A. Hudomal**, I. Vasić, H. Buljan, W. Hofstetter, and A. Balaž, Artificial gauge potentials in periodically driven optical lattices: numerical simulations of atomic transport, DPG Spring Meeting, 5 - 9 March 2018, Erlangen, Germany.
3. **A. Hudomal**, I. Vasić, H. Buljan, W. Hofstetter, and A. Balaž, Transport in optical lattices with flux, Winter School on Topological Matter in Artificial Gauge Fields, 26 February - 6 March 2018, Dresden, Germany.

4. **A. Hudomal,** I. Vasić, H. Buljan, W. Hofstetter, and A. Balaž, Transport dynamics in optical lattices with flux, The 6th International School and Conference on Photonics, 28 August - 1 September 2017, Belgrade, Serbia.
5. **A. Hudomal,** I. Vasić, W. Hofstetter, and A. Balaž, Transport dynamics in optical lattices with flux, DPG Spring Meeting, 6 - 10 March 2017, Mainz, Germany.

4. Оправданост теме

Предложена докторска дисертација припада области физике кондензоване материје, а физички системи којима се бави су ултрахладни квантни гасови бозона у оптичким решеткама у којима се могу реализовати јака синтетичких магнетна поља.

Проучавање ултрахладних квантних гасова је важна тема савремене физике. Настанак ове области је подстакнут потрагом за Бозе-Ајнштајн кондензатом - стањем које је предвиђено постулатима квантне статистичке физике уведеним почетком двадесетог века. У другој половини двадесетог века уложени су значајни експериментални напори како би се атомски гасови охладили до температура реда неколико стотина нанокелвина, где се при малим густинама очекује макроскопска насељеност основног квантног стања, односно појава кондензата. Први Бозе-Ајнштајн кондензати у системима ултрахладних атома су остварени 1995. године и овај успех је награђен Нобеловом наградом за физику 2001. године. У раним експериментима коришћени су слабо интерагујући бозонски атоми, што је оптимални режим за постизање кондензата. Данас се у системима ултрахладних атома проучавају различити физички режими, што ове системе чини правим квантним симулаторима. Поред хладних бозонских атома, разматрају се и квантно дегенерисани фермиони, као и смеше различитих атомских гасова. Посебно је интересантно што се у овим системима јачина и тип међуатомских интеракција могу контролисати, па интеракције могу бити слабе или јаке, кратко- или дугодометне. Увођењем стојећих светлосних таласа реализовани су периодични потенцијали за атоме, што је омогућило проучавање модела налик моделима физике чврстог стања. Ипак, компонента која је дуго била недоступна је јако синтетичко магнетно поље, које би деловало на атоме кроз Лоренцову силу. Први покушаји да се постигну јака ефективна магнетна поља су били засновани на аналогијама између Лоренцове и Кориолисове силе, и захтевали су ротације атомског облака. Испоставило се да ипак није могуће постићи довољно јака магнетна поља на овај начин. Због тога је приступ промењен и почев од 2013. године, јака синтетичка магнетна поља се успешно реализују у периодично вођеним оптичким решеткама. На овај начин реализован је један од основних модела физике кондензованог стања, Харпер-Хофштетер модел.

Принципијелно, доступност јаких интеракција и јаких магнетних поља отвара могућност за истраживање јако корелисаних фаза, као што су на пример фракциона Холова стања и њихове

енионске (anyon) ексцитације, које се сматрају погодним кандидатима за основу квантног рачунара. Међутим, чињеница да су јака магнетна поља доступна само кроз спољашње периодично вођење система захтева уопштавање познатих резултата физике кондензованог стања и отвара могућности за налажење нових квантних фаза. Главни циљ предложене докторске тезе је проучавање и разумевање улоге интеракција у вођеним оптичким решеткама. Општи физички аргументи указују на то да ће се вођени интерагујући систем после довољно дугог времена загрејати до бесконачне температуре, што свакако није стање од експерименталног интереса. У овом моменту и даље је отворена могућност налажења специјалних режима у којима је процес загревања довољно спор. Кандидаткиња ће управо радити на проналажењу оптималних експерименталних параметара за која се могу припремити и испитати релевантна квантна стања.

Недавно мерење Черновог број је прекретница која је означила реализацију тополошке енергетске зоне у системима хладних атома. Подстакнута овим експериментом, кандидаткиња је истраживала одговор некохерентних бозона на спољашњу силу у вођеним оптичким решеткама. Применом апроксимативног аналитичког развоја по инверзној фреквенцији вођења, кандидаткиња је показала присуство додатних чланова у ефективном Хамилтонијану и испитала њихов утицај на тополошке карактеристике ефективног Хамилтонијана. Главни фокус овог истраживања је био на улози слабих атомских интеракција, које су укључене у опис употребом теорије средњег поља. Овакав опис представља искорак у односу на постојеће резултате у литератури, па су добијени резултати кандидаткиње представљени у раду категорије М21, као и кроз предавање и постер презентације на неколико међународних конференција. Користећи нумеричке симулације и аналитичке увиде, кандидаткиња је утврдила да интеракције доприносе атомским прелазима између различитих енергетских зона ефективног модела, чиме се усложњава експериментална процедура у складу са очекивањима. Међутим, добијени резултати такође показују да слабе атомске интеракције олакшавају мерење Черновог броја на неколико начина. Како се очекује да мерење Черновог броја постане рутински алат у блиској будућности - први корак у припреми занимљивијих тополошких фаза - до сада добијени резултати о ефектима слабих интеракција су од значаја и за будуће експерименте.

Један од очекиваних наредних корака у експериментима је постизање фракционих Холових стања у системима од неколико јако интерагујућих бозона, за које се сматра да се загревање услед вођења може држати под контролом на довољно дугим временским скалама, реда неколико секунди. Постојећа литература се скоро у потпуности бави особинама ових стања у равнотежним условима, што значи да би очекивани резултати кандидаткиње имали значајан допринос за ширу научну заједницу која се бави потрагом и разумевањем особина јако корелисаних стања. Поред налажења оптималних режима, велики отворени изазов је и начин припреме и карактеризације нових фаза, што је још једна тема коју би предложена дисертација требало да покрије.

5. Закључак

На основу изложеног, Комисија закључује да кандидаткиња Ана Худомал испуњава услове за израду докторске дисертације прописане Законом о високом образовању, као и Статутима и одговарајућим правилницима Универзитета у Београду и Физичког факултета. Предложена тема је изузетно актуелна, релевантна и научно оправдана, циљ рада и методи рада су јасно одређени и могу се очекивати нови значајни резултати. Због тога Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да кандидаткињи Ани Худомал одобри израду докторске дисертације под називом **„Numerical study of quantum gases in optical lattices and in synthetic magnetic fields”.** За руководиоца докторске дисертације предлажемо др Ивану Васић, вишег научног сарадника Института за физику у Београду.

У Београду, 30. 11. 2018. године

_____

др Ивана Васић

виши научни сарадник
Институт за физику у Београду

_____

др Антун Балаж

научни саветник
Институт за физику у Београду

_____

доц. др Божидар Николић

доцент
Физички факултет

_____

проф. др Милан Кнежевић

редовни професор
Физички факултет