

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на научна степен „доктор на науките“ в професионално направление 4.1 Физически науки, по процедура за защита във Физически факултет (ФзФ) на Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ)

Рецензията е изготвена от професор доктор на физическите науки Хассан Шамати – Институт по физика на твърдото тяло – БАН, в качеството му на член на научното жури, съгласно Заповед № РД 38-249 / 20.05.2022 г. на Ректора на Софийския университет.

Тема на дисертационния труд: „Критични явления и квантова метрология със силно корелирани квантово-оптични системи“

Автор на дисертационния труд: доц. д-р Петър Александров Иванов

I. Общо описание на представените материали

1. Данни за представените документи

Кандидатът доц. д-р Петър Иванов е представил дисертационен труд, написан на английски език и автореферат, придружени със задължителните таблици, съдържащи справка за изпълнението на минималните изисквания за Физическия ф-т от Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“. За целта на процедурата са представени и други документи. Такива са автобиография с пълен списък на научните трудове, диплома за успешно завършено обучение по образователно-квалификационната степен „Бакалавър“, диплома за придобита научна и образователна степен „доктор“, декларация за авторство удостоверяваща, че научните резултати в дисертацията са лично дело на кандидата, автореферат на английски език, както и копия на научните трудове, на които се основава дисертацията и списък на цитиранията.

Представените по процедурата материали от кандидата съответстват на изискванията на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“ (ПУРПНСЗАДСУ).

2. Данни за кандидата

През периода 01.03.2004 г. – 01.12.2008 г. дисертантът е зачислен като докторант във Физическия факултет на Софийски университет. От юни 2012 г. до юни 2015 г., заема академичната длъжност „гл. асистент“, а след това длъжността „доцент“ в същия факултет. Преподавателската му дейност е свързана с изнасяне на лекции и водене на упражнения по курсовете по квантова механика, теоретична механика, квантови фазови преходи, квантови симулации и квантова метрология. Радва се на успешно международно сътрудничество с изследователски групи от престижни университети от Германия и Испания.

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Научните изследвания в дисертацията са посветени на контрол на физическите свойства на системи от охладената материя чрез лазерни лъчи и/или магнитни полета. Показано е, че тези системи могат да се използват за симулиране на физическите свойства на добре известни модели в кондензираните среди и на практика в метрологията. Изпълнението на минималните национални изисквания (по чл. 2б, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ) и на допълнителните изисквания на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на научната степен „доктор на науките“ по професионално направление 4.1. „Физически науки“ се обобщава както следва:

Група от показатели	Показатели	Правилник ЗРАС РБ	Изисквания ФзФ – СУ	дисертант
А	1	50	50	50
Б	2	100	100	100
В	-	-	-	-
Г	4 – 10	100	100 14 статии Q1 и Q2	545 23 статии Q1 и Q2
Д	11 – 13	100	200	220
Е	-	-	-	-
Съществен принос	-	-	9 статии Q1 и Q2	9
h-index	-	-	6	12

Сравнителната таблица показва, че количествените показатели по всички групи надхвърлят с излишък както минималните изисквания на ФзФ на СУ, така както и тези, заложен в Правилника за прилагане на ЗРАС РБ.

От подадената от кандидата задължителна информация, включените в дисертационния труд научни статии не са използвани в предишни процедури за придобиване на научната степен „доктор“ и академичната длъжност „доцент“. Всички научни трудове са публикувани в реномирани международни специализирани списания след като са преминали строги процедури за рецензиране. Това е показателно за това, че залегналите в тях резултати, които са база за изработената дисертация са оригинални научни приноси на доц. Иванов. Предвид факта, че преди публикуване ръкописите са обект на проверка за плагиатство, изключвам възможността за такова под каквато и да е форма в представените за рецензиране материали.

4. Характеристика и оценка на преподавателската дейност на кандидата

Не се изисква.

5. Съдържателен анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата съдържащи се в материалите за участие в конкурса

Дисертационният труд е написан на малко над 300 страници и съдържа голям брой илюстрации, фигури и таблици. Уводът обосновава необходимостта от проведеното изследване и дава кратко описание на отделните глави. Глава първа въвежда теоретично подхода за получаване на системата от охладени атоми, захванати в капана на Паул, следващите шесет (от втора до седма) излагат оригиналните резултати на кандидата. Останалата част от дисертацията представлява 11 глави, които по същество са приложения, библиография със 315 литературни източника и списък на публикациите, залегнали в основата на дисертацията.

Използването на газове от охладени атоми в оптични решетки като средство за извършване на научни изследвания прави възможно изследването на много сложни физически проблеми, свързани с физиката на квантови многочастични системи в кондензираните среди. Такива системи позволяват контрол върху силата и обхвата на взаимодействието по много начини. Неравновесните явления са достъпни чрез контролирана дисипация или решетъчни пертурбации. Други ефекти могат бъдат стимулирани посредством спи-орбиталното взаимодействие, топологични решетки и фиктивни размери. При използването на определен вид алкалоземни елементи е възможно възпроизводство на широко използваните в теорията на фазовите преходи $SU(N)$ системи, какъвто е моделът на Хайзенберг. Такива модели и други свързани с тях изпитват квантов фазов преход вследствие на изменението на взаимодействието между „градивните им частици“ под действието на външен източник, например лазерно лъчение. Дисертацията следва именно тази тенденция и използва добре известни съвременни методи за решаване на залегналите в нея математически проблеми. Изложението показва, че кандидатът добре познава актуалното състояние на проблема и постиженията в тази бурно развиваща се област.

Първата глава въвежда читателя в физиката на газовете от охладените йони в капан на Паул на базата на квадруполна конструкция от електроди при наслагване на постоянно и бързо осцилиращо радиочестотно електрични полета. Такава установка води до генерирането на устойчив хармоничен потенциал, който да послужи като оптична решетка за заселване със заредените частици. Разгледано е изменението на физическите свойства на системата от йони под действието на електромагнитно поле.

В глава втора е направен подробен анализ на ефекта на поларитонни възбуждания в едномерна система от пет йона в капан на Паул в рамките на модела на Джейнс-Къминг-Хъбард под действието на лазерно поле. Показано е чрез определянето на поведението на дисперсията (като параметър на подреждане), че системата търпи квантов фазов преход от изолатор на Мот (по един йон във всеки минимум/възел на решетката) към свръхфлуидна фаза, вследствие на изменението на амплитудата на тунелиране и нейното взаимодействие с фононите. От друга страна във фазата на изолатор на Мот, фононното тунелиране индуцира Хайзенбергово спин-спин взаимодействие между локализираните йоните.

Глава трета е посветена на квантово симулиране на модел на Ян-Телер за взаимодействие на фермионни частици със спин $1/2$ и бозони с помощта на йони в ка-

пан на Паул с колективни вибрационни явления, създадени благодарение на градиенти на магнитно поле. Моделът, описващ взаимодействието на съвкупност от спинове с една вибрационен мод, е точно решаем (физическите величини се получават в затворена форма) в границата на безкрайна верига и постоянна плътност на заредените частици. В тази граница, поведението на фононните възбуждения в зависимост от взаимодействието между йоните и фононите сочи, че моделната система изпитва квантов фазов преход от нормална към фаза на свръхизлъчване на възбудените йони. За система с краен брой спинове, поведението на параметъра на подреждане е получен числено, чрез диагонализация на хамилтониана. Разглеждането на обобщения модел с равен брой спинове и фонони води до появата на структурен фазов преход до зигзагообразна решетка с антиферромагнитна подредба на спиновете. В този случай, основното състояние е спин-бозонен квазикондензат.

В глава четвърта е разгледан модел на йонна верига, състояща се от спинове с различна големина и вибрационни модове. Това се постига с помощта на приложено външно осцилиращо магнитно поле с ненулев градиент. В случая, когато честотата на магнитното поле не е в резонанс с никоя честота на трептене, ефектът от фононите може да се отдели и така се получава ефективен хамилтониан за описание на взаимодействието между спинове с различна големина. За илюстрация е изследван модел с три спина $(3,1/2,3)$ и са определени съответните квантови състояния.

Глава пета представя обстойно изследване на възможността за симулиране на поведението на неутрална релативистична частица с вътрешен електричен диполен момент в йонен капан. Обърнато е специално внимание на премахването на изродеността и прецесията на Лармор на спина вследствие на приложено електростатично поле върху частицата. Предлага се метод за практическа реализация на йонния трап. Изследването може да послужи за определяне поведението на системи във време-пространството при нарушаване на CP симетрията.

В глава шеста е разработена техника на стимулиран адиабатен преход за прехвърляне на орбитален ъглов момент посредством резонансна плътна атомна среда от класическо лазерно поле към фотоните в резонатор с непланарна геометрия. Преимуществото на тази геометрия е способността ѝ да създава ефективно магнитно поле за фотоните в резонатора с квантувани нива на Ландау. Изследванията показват, че определена атомна подредба води до появата на тъмни състояния, като комбинация от фотони в различни модове и атомни възбуждания. Показано е, че състояния от типа Лафлин могат да бъдат приготвени с голяма достоверност.

Глава седма е посветена на решаването на проблема с редуцирането на диполния момент на ридберговия йон вследствие на квадруполно взаимодействие между електронните състояния на йона с радиочестотно електрично поле на йонен капан. Показано е, че редуцирането на диполния момент може да се предотврати като се повишат честотите на Раби посредством лазерно поле. Обсъдени са и други ефекти, свързани с взаимодействието на лазера с ридберговата система.

Глава осма въвежда читателя в областта на квантовата информационна геометрия и взаимовръзката ѝ с квантовата метрология. Определението „метричен

тензор“ за разстоянието между две безкрайно близки квантови състояния играе фундаментална роля в теорията. В модели проявяващи квантов фазов преход разликата между основното и първото възбудено състояние става нула в критичната точката. Това води до разходимост на метричния тензор. Тук са изведени важни за теорията закономерности, които се използват в последващите глави. Например, показано е, че метричният тензор е пропорционален на квантовата информация на Фишер, която характеризира статистическата неопределеност при измерване на даден параметър.

Глава девета е посветена на изследването на квантовата метрология в рамките на критични модели в непосредствена близост до тяхната квантова критична точка. Точността на параметричното измерване в тази област е много голяма, благодарение на нарастването на информацията на Фишер в непосредствена близост до критичната точка. В дисертацията е разработен подход на базата на адиабатен преход при преминаването на разглежданата система от една една фаза в друга при спонтанно нарушаване на симетрията вследствие на външна пертурбация. Изследванията в рамките на модела на Дике показват, че еволюцията на системата се описва с многочастичен метрологичен протокол. Тук ориентацията на колективния спин е мярка за определянето на параметъра, а точността се дава с границата на Хайзенберг. Достоверността на метода се проверява, чрез прилагането му за измерване на слаби сили и градиантни полета. Като продължение на тази идея, в глава десета се разглеждат един йон или съвкупност от йони, захванати в капан на Паул в рамките на модела на Джейнс-Къминг, описващ спин-фононно взаимодействие посредством лазерно поле. Оценки за силите се получават от времевите осцилации на спиновите състояния на системата. Глава единадесета е посветена на мултипараметричната квантова метрология за случая на едновременно измерване на два самоспрегнати параметри: големината и фазата на оператора на отместване във фазовото пространство на неравновесна критична система с дисипативен фазов преход. При изследване на критичните свойства на едномерна система от йони (с две нива), които взаимодействат с бозонен мод, а обменът между бозоните в различните възли се осъществява чрез тунелиране. Показано е, че двата параметъра не могат да бъдат оценени едновременно с голяма точност.

Глава дванадесета е въведен метод за измерване на температурата на фононите в йонен капан на Паул извън границата на Ламб-Дике. Взаимодействието между трептенията на кристала и колективните вътрешни състояния на йоните се контролира с помощта на лазерно поле и се описва от нелинейния модел на Джейнс-Къминг. Благодарение на прехвърлянето на топлинните разпределения на фононите към спин-колективната степен на свобода е възможно извършване на спин-зависимо лазерно измерване на флуоресценцията в края на адиабатния преход. Показано е, че статистическата температурна неопределеност се дава от границата на Крамер-Рао.

Глава тринадесета проучва възникване на хаос във фазата със свръхизлъчване в квантовия модел на Раби. Пресметнат е квантовият налог на експонентата на Ляпунов в тази фаза и е показано, че моделът може да достигне равновесна фаза, в която спин осцилациите във времето са потиснати. Главите от четиринадесета до двадесет и първа да по същество приложения, които въвеждат използваните в ди-

сертацията модели с определения за техните параметри или широко използвани в литературата методи или техники за изследването им.

От проведения анализ се вижда, че настоящият научен труд има фундаментален характер с потенциал за приложение в метрологията или сензориката. Основава се на симулирането на добре дефинирани в литературата квантови моделни системи от една страна и разкриването на механизми, свързани с взаимодействието между светлината и материята. Подборът на разглежданите квантови модели е добре обоснован. Научните приноси, върху които се защитава дисертацията, касаят намиране на оптимални взаимодействия между йони в капан на Паул под влиянието на външно лазерно или магнитно полета. Определени са важни за теорията физически величини, характеризиращи вибрационни и спинови степени на свобода и е изследвано тяхното поведение. Получено е фазовото поведение на моделите в зависимост от техните параметри. Предложени са методики и прибори за практически измервания. Използваните методи и съпровождащите им приближения за извършване на научните изследвания са добре апробирани и се основават на аналитични и числени техники. Научните резултати тук могат да се характеризират като получаване и доказване на нови факти, а също така и получаване на потвърдителни такива, които проверяват и надеждността на използваните методи.

Дисертацията е написана въз основа на 23 научни труда. Те са публикувани в престижни международни списания: *Reviews of Modern Physics* – 1, *Physical Review Letters* – 1, *Physical Review A* – 11, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* – 1, *Journal Low Temperature Physics* – 1, *New Journal of Physics* – 1, *Scientific Reports* – 1, *Physical Review Applied* – 1, *Entropy* – 1, *Optics Communications* – 2, *Physical Review Research* – 1 и *Physica Scripta* – 1. Прави впечатление, че 17 от тях са в квартал Q1 от изданията, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (*Web of Science* и *Scopus*), а останалите са в квартал Q2. От деветте труда със съществен принос на кандидата 8 са с квартал Q1 и е първи автор в 8. Всички статии са плод на участието на кандидата в различни колективи и са получили широк отзвук в литературата. Те са цитирани общо 220 пъти в научни издания, реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (*Web of Science* и *Scopus*) по данни на кандидата. Работата му в *Reviews of Modern Physics* е цитирана повече от 68 пъти.

Съгласно формулираните в ПУРПН-СЗАДСУ на ФзФ критерии за съществен принос на дисертанта в публикациите включени в дисертацията, данните на доц. Иванов по този показател значително надхвърлят минималните изисквания.

6. Критични бележки и препоръки

В дисертацията се срещат известни слабости, които могат да затруднят заинтересувания читател. Няма да се спирам на конкретни случаи за такива слабости, но съм готов, при желание на кандидата, да му съдействам за редактирането ѝ. Авторефератът е с обем 117 страници. До голяма степен отговаря на съдържанието на дисертацията, като изключим факта, че главите пета и седма от дисертацията не са отразени в него. Предполагам, че всичко това се дължи на липса на време. Ето защо, призовавам дисертанта да направи обстойна ревизия както на дисертацията, така и на автореферата. Отбелязвам, че тези слабости са от чисто техническо ес-

тество и съвсем не омаловажават доброто научното качество на дисертационния труд.

7. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, Автореферат и другите материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържанието се в тях научни и научно-приложни приноси, потвърждавам, че научните постижения отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за приложение-то му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на научна степен „доктор науките“. В частност кандидатът удовлетворява минималните национални изисквания в професионалното направление 4.1 „Физически науки“ и не е установено плагиатство в представените по конкурса дисертационен труд, Автореферат и научни трудове.

Давам своята положителна оценка на дисертационния труд.

II. Общо Заключение

Въз основа на гореизложеното, препоръчвам на научното жури да присъди научната степен „доктор на физическите науки“ в професионално направление 4.1 „Физически науки“.

31.08.2022 г.

Изготвил рецензията:

(проф. дфн Хассан Шамати)