

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за получаване на научната степен „доктор на науките”

Автор на дисертацията: доц. д-р **Петър Александров Иванов**,
доцент в катедра „Теоретична физика” към Физическия факултет на Софийския университет „Св. Кл. Охридски”

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

Професионално направление: 4.1 „Физически науки“

Рецензент: проф. дфн **Светлана Йорданова Пачева** (ИЯИЯЕ-БАН до 2018 г.)

1. Общо описание на представените материали.

Петър Иванов завършва успешно бакалавърската програма на Физическия факултет на СУ „Св. Кл. Охридски“ през 2002 г., след което в периода 2004-2008 г. е редовен докторант в катедрата по теоретична физика към ФзФ на СУ. През 2008 г. успешно защитава своята дисертация за получаване на научната и образователна степен „доктор“, базирана на общо 9 публикации във водещи световни списания като *Physical Review A* и *Optics Communications*.

В периода 2012-2015 г. Петър Иванов е главен асистент във ФзФ на СУ, а от м. юни 2015 г. е избран за доцент, също във ФзФ на СУ. Там чете лекции и води упражнения по бакалавърски и магистърски програми по редица основополагащи и съвременни курсове, в това число по квантова механика, методи и приложения на квантовата механика, теоретична механика, квантови фазови преходи, квантови симулации и квантова метрология. Научен ръководител е на един бакалавър и един магистър.

Дисертантът е представил следните материали: дисертация (302 стр.); автореферат (130 стр.); текстове в електронен формат на 23 научни статии, на които се базира дисертацията; автореферат на английски език (110 стр.); копия от дипломите за „бакалавър“ и НОС „доктор“; списък на цитиранията; справка за минималните изисквания по ЗРАС; декларация за авторство; кратка автобиография.

Авторефератът адекватно отразява съдържанието на дисертацията.

2. Актуалност на дисертационната тематика.

Класическите фазови преходи се извършват при крайни температури. Квантовите фазови преходи се отличават по същество от класическите. Те са преходи между различни фази на материята *при нулева абсолютна температура*. Различните квантови фази се различават по областите от стойности на физическите параметри в квантовия хамилтониан на системата (характерни честоти и маси на описваните материални частици и съответните константи на взаимодействие между тях), както по стойностите на параметрите, задаващи основното състояние, в което се намира системата при нулева абсолютна температура (например, характеристики на топологията на основното състояние). Тези параметри могат да се променят единствено вследствие на квантовите флукутации и тогава системата може да преминава от една квантова фаза в друга,

претърпявайки квантов фазов преход. Пример на квантов фазов преход е преходът на поларитони от фазата на изолатор на Мот към свръхфлуидна фаза.

В проективното Хилбертово пространство на вълновите функции или по-общо, в пространството на матриците на плътност на квантовата система, може да се въведе Риманова метрика, свързана с квантовата информация на Фишер. И двете величини са определящи за прецизността на измерването на един или повече физически параметри.

Експерименталното изучаване на квантовите фазови преходи е свързано с постигане и контролиране на системата при много ниски температури. Това може да се постигне например при оптични системи чрез използване на лазерно охлаждане и контрол на параметрите чрез лазерни полета.

В различните квантови фази системата може да притежава различни симетрии на хамилтониана и различни свойства, изучаването на които могат да доведат до разработването на нови важни технологии и други приложения.

Тематиката на дисертацията и приносите на кандидата принадлежат изцяло към тази интересна, актуална и силно конкурентна област.

3. Кратък анализ на основните научни приноси

Дисертацията съдържа 302 стр. и се състои от уводна глава, 12 глави, в които са изложени научните резултати, 25 приложения с конкретни теоретични пресмятания, използвани в основния текст, общо 32 стр., 315 библиографски заглавия и списък на трудовете на кандидата, върху които се основава дисертацията, общо 23.

Всички трудове на кандидата, отразени в тази дисертация, са публикувани след защитата на докторската му дисертация в едни от най-реномирани международни научни списания с висок импакт фактор в областта на теоретичната физика на кондензираните среди. 7 публикации са самостоятелни, в останалите (с изключение на 1) доц. д-р Иванов има решаваща роля за успеха на общите изследвания както в идейно отношение, така и при пресмятанията.

В уводната глава 1, състояща от 15 стр. , кандидатът очертава основните понятия и теоретични резултати във физиката на йони в капан на Паул. Теоретичната и експериментална платформа на капана на Паул (за който В. Паул получава Нобелова награда по физика през 1989 г.) е в основата на голяма част от изследванията на автора в дисертацията. Разгледани са уравнението за движение на заредена частица под действието на два хармонични потенциала: единия с независеща от времето, другия – с бързо-осцилираща в радиочастотния диапазон амплитуди. Резултиращият потенциал има стабилен минимум. Разгледани са следните случаи: определяне на равновесните положения на N-йона в капан на Паул, които взаимодействат помежду си още с с Кулонов

потенциал. В хармонично приближение (след развиване на потенциала в ред на Тейлър около равновесните положения и запазване на членовете от втори порядък се получават $3N$ моди на колективни трептения (вibrационни моди), чийто вид зависи от разположението на равновесните положения – дали в равновесно положение йонният кристал е едномерен, двумерен или тримерен. Всички случаи са разгледани поотделно. Разгледан е и случаят на йон с 2 вътрешни метастабилни състояния и произволен брой външни (вibrационни) степени на свобода в капан на Паул, взаимодействащ с лазерно поле разпространяващо се по оста на капана. В зависимост от честотата на лазерното поле преходите между двете вътрешни енергетични нива могат да се осъществяват с или без промяна на броя на вibrационните степени на свобода.

Изложението в синтезиран вид доказва, че кандидатът задълбочено познава проблемите във физиката на йони в капан на Паул, както и методите за решаването им.

В глава 2, състояща се от 30 стр., се разглежда квантовият модел на Джейнс-Къмингс-Хъбард, описващ квантово механична система, състояща се от атоми, всеки с две енергетични нива, квантувани бозонни (фононни) моди, член на взаимодействие между тях от най-простия възможен вид и член описващ преместването (тунелирането) на фононите по възлите на решетката. Предложена е физическа реализация на модела с решетка от N йони с две вътрешни спинови степени на свобода и бозонни степени на свобода, описващи трептенията на йона около равновесното му положение в капан на Паул.

Предполага се, че напречните честоти на улавяне на йоните са много по-големи от честотата в паралелна на оста на капана посока. В представяне на взаимодействие, в режим на Лемб-Дике и в приближение на бързо осцилираща вълна хамилтонианът приема вида на хамилтониан на Джейнс-Къмингс – (сума от енергиите на локалните фонони и спинови енергии и взаимодействието между тях) и добавка, описваща тунелирането на фонони между възлите на верижката. Всички членове заедно задават модела на Джейнс-Къмингс-Хъбард.

Моделът на Джейнс-Къмингс-Хъбард не е точно решаем (за разлика от модела на Джейнс-Къмингс), затова намирането на теоретични методи за изучаване на квантовата му фазова структура е от особен интерес. В публикациите на автора [2], [3] и [4] от списъка са получени следните резултати:

- В предложената реализация на модела се изследват детайлно наблюдаемите величини, отговорни за *квантов фазов преход на поларитони между фаза на изолатор на Мот и суперфлуидна фаза* (поларитоните са състояния, съставени от спиново и бозонни възбуждания). Важно е да се отбележи, че използвайки този теоретичен резултат на доц. д-р Иванов в *Phys. Rev. Lett.* 111, 160501(2013) от К.

Toyoda et. al. е публикувана първата експериментална работа , демонстрираща *квантовия фазов преход*.

- Предложено е и е проведено аналитично изследване на фазовата диаграма на модела на Джейнс-Къмингс-Хъбард посредством ефективни модели - анизотропния XYZ модел и модела на Хайзенберг във външно магнитно поле. Тези апроксимиращи модели дават възможност да се определи отношението между параметъра на тунелиране и параметъра на спин - бозонното взаимодействие в критичната точка. Аналитичните резултати са сравнени с числени симулации, които показват много добро съвпадение.

В глава 3, състояща се от 26 стр., основаваща се на резултатите в публикации [5] , [6], [7], се разглеждат колективният и кооперативният модел на Ян-Телер-Дике, реализирани с йони в капан на Паул. Моделът на Ян-Телер-Дике описва $U(1)$ -симетрично взаимодействие между фермиони със спин $1/2$ и бозони. Колективният модел на Ян-Телер-Дике задава взаимодействие на ансамбъл от N спина взаимодействащ с една вибрационна мода. Показано е, че в термодинамична граница, когато средната стойност на колективният спин $\rightarrow \infty$, моделът е точно решаем и описва *квантов фазов преход между нормална и свръх-радиантна фаза*. Когато броят на възлите е краен, е проведено числено диагонализиране на хамилтониана и е сравнено със съответните аналитични резултати. Разгледано е обобщение на колективният модел – кооперативен модел на Ян-Телер-Дике, при който ансамбъл от N спина взаимодейства с ансамбъл от N бозона. Основните приноси на автора в тази глава са:

- Показано е, че този модел описва *магнитен структурен квантов фазов преход*, в който равновесните положения на частиците в основното състояние се пренареждат от линейна в зиг-заг конфигурация, а спиновете образуват антиферомагнитна подредба. Основното състояние съответства на спин-бозонен квазиконденсат. Този квантов фазов преход настъпва вследствие на квантови флуктуации, при които се нарушава спонтанно непрекъснатата $U(1)$ симетрия.
- Използвайки приближение на средното поле са намерени са квантовите флуктуации и е показано, че спектърът се състои от три колективни моди.

В глава 4, обхващаща 11 стр., доц. д-р Иванов изучава квантовите магнитни свойства на смесен йонен кристал, състоящ се от спинове с различна големина във външно осцилиращо магнитно поле с ненулев градиент (разгледан е най-простия случай на такова поле, имащо ненулева компонента по остта на йонния кристал: $B_z = \text{const } z \cos\omega t$). Магнитното поле индуцира взаимодействие между различните спинове и колективните вибрационни моди. Научният принос на доц. д-р Иванов в тази глава е следният:

- Показано е, че когато честотата на магнитното поле ω не съвпада с никоя вибрационна мода, ефектът на фононите може да се усредни и системата да се опише с ефективен хамилтониан от взаимодействащи спинови степени на свобода.

Ако се приложи допълнително осцилиращо със същата честота ω магнитно поле насочено в напречна посока на оста z , моделът може ефективно да се опише от

Глава 4 е базирана на резултатите получени в публикацията [8] от списъка. Тези изследвания моделират йонен кристал с примеси.

В глава 5, обхващаща 7 стр., се разглеждат емуляции на електрически диполен момент на неутрални релативистки частици. Резултатите са публикувани в работа [9] от списъка.

Глава 6, съдържаща 15 стр., се основава на резултатите в публикация [10] от списъка. В нея основният принос на доц. д-р Иванов е:

- Предложен е метод на стимулиран Раманов адиабатен преход за пренасяне на орбитален ъглов момент от класическо лазерно поле към фотоните, живеещи в оптичен резонатор с непланарна геометрия. Такава геометрия създава ефективно магнитно поле за фотоните в резонатора с квантувани нива на Ландау. Пренасянето на орбитален момент се осъществява чрез атомна среда. Предложена е схема за създаване на топологични състояния на Лафлин между Ридбергови поларитони(състояния, формирани от Ридбергови атоми и фотони), след което се използва техниката на стимулиран адиабатен преход за прехвърляне на орбитален момент от лазерното поле към фотоните, населяващи най-ниското ниво на Ландау.

В глава 7, обхващаща 21 стр., се извежда протокол за премахване на негативният ефект на квадруполното взаимодействие, причиняващо намаляване на диполния момент на поставен в капан Ридбергов йон. Този ефект може да бъде премахнат чрез увеличаване на интензитета на лазерното поле с точно определен фактор, зависещ от честотата на Раби. Съдържанието на тази глава се основава на публикация [11] от списъка.

В глава 8, обхващаща 7 стр., са представени основните понятия в квантовата информационна геометрия и квантовата метрология: квантова метрика на Фишер и квантовата информация на Фишер. Квантовата метрика на Фишер се определя за един и много параметри в случай на чисти състояния и в по-общия случай на смесени състояния, когато системата се дефинира с матрица на плътност. Основната величина на квантовата метрология – квантовата информация на Фишер задава оценка на прецизността (минималната дисперсия) на измерването на даден физически параметър.

Глава 9, обхващаща 48 стр., е най-обемна. Съдържанието и е посветено на резултатите в публикации [12], [13] и [14] от списъка. В нея авторът разглежда квантови системи, които могат да бъдат описани чрез един от фундаменталните модели на квантовата оптика – модела на Дике. В този квантово-механичен модел на взаимодействащо електромагнитно поле(светлина) с материя светлинната компонента се представя от една бозонна мода, материята –чрез N йона, всеки с две енергетични нива (или еквивалентно, спинова степен на свобода със спин $1/2$) и член на взаимодействие между двата вида степени на свобода.

Когато $N=1$, моделът на Дике се нарича модел на Раби. И двата модела притежават дискретна Z_2 симетрия, на която съответства запазваща се величина – четността P на общия брой на възбужданията N_{ex} , $P = (-1)^{N_{\text{ex}}}$. Когато Z_2 симетрията се наруши спонтанно при $N \rightarrow \infty$, системата претърпява *квантов фазов преход към супер-радиантна фаза*.

Авторът разглежда реализация на квантовия модел на Дике с йони в капан на Паул, образуващи линеен кристал. Върху него са приложени 2 Раманови лазерни полета в напречна на кристала посока, осъществяващи взаимодействието в модела на Дике. Освен тях са приложени още 2 лазерни полета, създаващи малка пертурбация (пертурбация с малък параметър) на спиновете във решетката. Целта е да се определи теоретично и експериментално най-точно малкия пертурбиращ параметър чрез прилагане на законите на квантовата метрология, а именно, около точката на квантов фазов преход квантовата информация на Фишер нараства. Тя е обратно пропорционална на дисперсията на измерваната величина, следователно точността на измерването е най-голяма в близост до точката на квантов фазов преход. Приносите на доц. д-р Иванов в тази глава са:

- Изследвана е квантовата метрология за силно корелирани квантови системи, демонстриращи квантов фазов преход на примера на квантовия модел на Дике, в който има *квантов фазов преход от втори род между нормална и свръхрадиантна фаза*. Предложен е метод, основан на адиабатен преход между двете квантови фази, предизвикан от малка пертурбация, нарушаваща симетрия на системата, в разглеждания случай това е дискретната Z_2 симетрия. Предложен е метрологичен протокол, който може да бъде използван за измерване на честоти на преход с Хайзенбергова прецизност.

В глава 10, съдържаща 32 стр., са отразени резултатите на автора от публикации [15], [16], [17], [18], [19] от списъка. В нея като основни приноси могат да се посочат следните:

- Въведени са *квантови сензори с един йон или ансамбъл от йони в капан на Паул за измерването на много слаби сили*. При предлаганите конфигурации се прехвърля информация за силата към спиновата степен на свобода. Измерването на силата се извършва чрез наблюдение на времевите осцилации на спиновите състояния на йона или ансамбъла от йони. Моделиращият хамилтониан за квантовите сензори е хамилтонианът на Джейнс-Къмингс. При този сензор могат да се измерват се измерват осцилиращи сили от порядък 10^{-24} N.
- Предложени са методи за редуциране на ефекта на спин-дефазиране чрез прилагане на декупиращи полета, което е важно преимущество.

Глава 11, съдържаща 22 стр., е базирана на резултатите на автора в публикация [20] от списъка. Предметът на обсъждане е мултипараметричната квантова метрология, чиято задача е да се определи максималната прецизност при едновременната оценка на няколко

параметъра в отворена квантова система. Системата е отворена, ако е потопена в среда и взаимодействия с нея, като губи/печели бозонни възбуждания от средата. В този случай системата може да претърпи *дисипативен квантов фазов преход*. Дисипативните фазови преходи се характеризират с неаналитичност по параметрите на основното състояние в точката на квантов фазов преход. Авторът избира отворената система в околност на точка на дисипативен квантов фазов преход като обект за високо прецизна мултипараметрична квантова метрология. В тази глава се разглеждат процеси на загуба на бозонно възбуждане в квантовия модел на Раби. Като основно достижение на автора тук може да се посочи следното:

- Намерени са условия за оптимално измерване на два параметъра - големината и фазата на оператора на отместване във фазовото пространство, използвайки законите на квантовата метрология. Показано е, че в околност на дисипативния квантов фазов преход се постига значително подобрене на чувствителността на един или двата споменати параметъра.

В глава 12, съдържаща 27 стр., авторът предлага адиабатен метод за получаване на оптимална оценка на вибрационната температура на йони в капан на Паул, който може да работи извън режима на Лемб-Дике. Методът използва външно лазерно поле, което предизвиква взаимодействие между трептенията на кристала и колективните вътрешни състояния на йоните. Теоретичното описание се основава на нелинейния модел на Джейнс-Къмингс. При ниски температури при адиабатния метод информацията за топлинните разпределения на фононите се прехвърля към спин-колективните степени на свобода и по този начин се постига равенство между класическата и квантовата информация на Фишер (топлинните разпределения се контролират от класическата информация на Фишер, а спин-колективните – от квантовата). Това означава насищане на неравенството на Крамер-Рао, даващо оценка за прецизността на измерване на температурата, и следователно предложеният *квантов термометър* е оптимален. Тази глава отразява резултатите на автора в публикациите [21] и [22] от списъка. Като основен принос на автора в тази глава може да се посочи:

- Предложен е нов метод за оптимално измерване на температурата на йонен кристал.

Глава 13, съдържаща 9 стр. е посветена на определена характеристика на процеса *квантов хаос* в квантовия модел на Раби. (Този модел, носещ името на Нобеловия лауреат по физика за 1944 г. Айсидор Раби, е в основата на теорията на квантовите технологии и квантовите компютри.) Известно е от 2015 г. , че в термодинамичната границата $\eta \rightarrow \infty$ и $g = g_c$ моделът има *квантов фазов преход от състояние на хаос в свръхрадиантната фаза към равновесие* (тук $\eta = \omega_0/\omega$, ω_0 е честотата на вътрешните спинови степени на свобода, ω е честотата на фононите, g е константата на взаимодействие между тях). Авторът изучава поведението на ОТОС (“Out-of-time-order-correlator”) корелационна

функция, която измерва разпределението на квантовата информация по степените на свобода на системата и е индикатор за наличието на квантов хаос. За ОТОС се избира корелационната функция на два оператора, които комутират в началното състояние, но с времето комутаторът им става отличен от нула. Основните приноси на автора в тази глава са:

- Показано е, че в свръхрадиантната фаза ОТОС нараства експоненциално, което дава възможност да се определи квантовата критична експонента –квантовата експонента на Ляпунов.
- Показано е, че размерността на усреднената по времето матрица на плътност е по-голяма от размерността на спин системата и следователно бозонната мода може да се разглежда като ефективна среда, взаимодействаща със спина. Това води до намаляване на времевите осцилации за спиновите състояния и предизвиква преход към равновесие.

4. Публикации и значимост на резултатите

Дисертацията , както беше отбелязано, се базира на 23 научни публикации.

Характерът на тези трудове и техният брой напълно удовлетворява изискванията на ФЗФ на СУ „Св. Климент Охридски“ за получаване на научната степен „доктор на науките“. Основните приноси в дисертацията могат формално да се категоризират като:

- (а) получаване и доказване на нови научни факти, обогатяване на съществуващите знания и задълбочено разбиране на процесите и явленията в дадената научна област;
- (б) представяне на теоретична основа за поставяне на експерименти, необходими както за потвърждаване на теорията, така и за нови важни технологични приложения.

Това без съмнение определя тяхната научна значимост.

5. Отражение на научните публикации в международната научна литература

Научните трудове, върху които се основава дисертацията, се разпределят както следва:

- 7 самостоятелни, 16 – в съавторство. Във всеки един от тях (с изключение на първия [1]) доц. д-р Петър Иванов има съществен принос.
- 17 са в списания с Q1, 6 – в списания с Q2.
- Всички статии са публикувани във водещите международни списания за физика на кондензираните среди с висок импакт фактор, сред тях 1 статия в *Phys. Rev. Lett.* ([6] от списъка) , 10 – във *Phys. Rev. A*, по 2 – в *Scientific Reports* и *Optics Commun.* и др.

Общият брой трудове на доц. д-р Петър Иванов е 42 . Те имат широк отзвук сред специалистите в областта, което доказват забелязаните над 450 независими цитирания от чуждестранни учени във водещите световни научни списания. Индексът на Хирш на доц. д-р Петър Иванов е $h=12$.

Авторът е представил отделен списък от 220 независими цитирания на статиите, включени в самата дисертация.

6. Критични бележки.

Обичайно е в такъв обемен труд в текста на български да има някои незначителни технически грешки. Това, обаче, в никакъв случай не намалява отличното впечатление както от съдържанието, така и от структурирането на текста на дисертацията и автореферата.

7. Заключение

След като се запознах с всички материали за конкурса и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащите се в тях научни приноси, **потвърждавам**, че представената дисертация е на високо научно ниво и изцяло удовлетворява изискванията на ЗРАСРБ, Правилника за приложението му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ в научната област и професионално направление на конкурса за получаване на научната степен „доктор на науките“. **Потвърждавам също**, че доц. д-р Петър Иванов удовлетворява със значителен запас минималните национални изисквания за тази научна степен. За мен няма съмнение, че дисертантът е изграден високо ерудиран и международно признат учен в своята област, който има безспорен принос за развитието на физиката на кондензираните среди и прекрасни перспективи за по-нататъшно успешно развитие на академичната му кариера.

Давам своята категорична **положителна** оценка на кандидатурата.

ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на гореизложеното, **без колебание препоръчвам** на научното жури да предложи на компетентния орган по избора на Физическия факултет при СУ „Св. Климент Охридски“ да да **присъди на доц. Петър Александров Иванов научната степен „доктор на физическите науки“**. в професионално направление 4.1 Физически науки.

София, 26.08.2022 г.

Рецензент:

(проф. дфн Светлана Йорданова Пачева)