

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Майзеліса Захара Олександровича
«Поширення, взаємодія і декогеренція мод
у нелінійних квантових системах»,

яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика»

У зв'язку з розвитком сучасних технологій, які потребують зменшення розмірів багатьох елементів у різноманітних пристроях, виникає потреба у більш глибокому аналізі квантових законів їх функціонування. Наприклад добре відомий емпіричний закон Мура, передбачає подвоєння кількості транзисторів у мікросхемах кожні два року. Цей закон спостерігається вже більш ніж 50 років. Наслідком цього є бурхливий розвиток комп'ютерної техніки. Велику зацікавленість викликають і сучасні дослідження можливості створення нових надзвичайно потужних квантових комп'ютерів. Одним з найважливіших елементів таких пристроїв є кубіти, які будуть основою пам'яті квантових комп'ютерів.

Більшість досліджень таких систем присвячена чистим станам, які можна характеризувати деякими хвильовими функціями, та гамільтоновою динамікою їх еволюції. Водночас, у реальних експериментах будь-яка квантова система неодмінно взаємодіє з оточенням, вимірювальними системами та тощо. Незважаючи на інтенсивні дослідження і розробки, направлені на зменшення цього впливу, він і досі є визначальним. Така взаємодія призводить до двох явищ, затухання амплітуди і декогеренції. Останній фактор, зокрема, обмежує час зберігання інформації у кубітах і відповідно роботу квантових комп'ютерів. Саме це визначає **актуальність** теми дисертаційної роботи Майзеліса З.О., яка присвячена дослідженню еволюції мод саме у такому режимі, з урахуванням як контакту з термостатом, так і з джерелами адитивних та частотних шумів. У роботі розроблено метод відокремлення впливу цих двох типів шумів, що є дуже важливим з точки зору застосувань не лише для позбавлення від впливу адитивних термічних шумів, що часто переважають у системі, але і для вивчення характеристик частотних шумів, за якими можна отримати інформацію про джерела шумів. Окрім того, у роботі аналіз динаміки мод проводиться для досить популярних і важливих одно- та двовимірних систем, а також для шаруватих надпровідникових пластин. Такі системи є актуальними, оскільки їх можливо використати для управління електромагнітними модами терагерцового діапазону, що є важливим для медицини і біофізики. Враховуючи все це, можна стверджувати, що тема досліджень проведених у дисертації, є безумовно **актуальною**.

Треба зазначити, що **актуальність** проведених у дисертації Майзеліса

З.О. досліджень підтверджується тим, що вони виконані в рамках наукових державних програм та проєктів, які виконувались в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України: «Дослідження лінійних і нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених частинок» (номер державної реєстрації 0106U011978, термін виконання 2007–2011 рр.) «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами» (номер державної реєстрації 0112U000211, термін виконання 2012–2016 рр.), «Теоретичні та і експериментальні дослідження властивостей періодичних і стохастичних модульованих наноструктур в оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному діапазонах спектру» (номер державної реєстрації 0110U005642, термін виконання 2010–2014 рр.), «Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів» (номер державної реєстрації 0113U006217, термін виконання 2013 р.), «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» (номер державної реєстрації 0117U004038, термін виконання 2017–2021 рр.).

Дисертація Майзеліса З.О. складається з шести розділів, перший з яких являє собою огляд літератури за темою дисертації, а у п'яти останніх викладено оригінальні результати.

Перший розділ містить огляд літератури, в якому наведені результати найбільш фундаментальних робіт інших авторів тісно пов'язаних з питаннями, що вивчаються у дисертації. Подається короткий опис квантового кінетичного рівняння, що є основним методом подальших досліджень квантового стану системи за наявності контакту з термостатом. Подається стислий аналіз ефекту впливу нульових коливань вакууму на взаємодію тіл, ефект Казимира. Наведено опис моделі одновимірних електронних рідин, моделі Латтінжера, а також електронних станів у двовимірній системі, листі графену. Нарешті, викладено підхід до опису електродинаміки шаруватих надпровідників, квантових сильно анізотропних систем.

У другому розділі дисертації розвинуто метод аналізу впливу шумів, адитивних і частотних, на механічний резонатор. Як в класичному, так і у квантовому режимах показано, як саме може бути виключений адитивний шум, що має довільну амплітуду. Окрім методу детектування досліджено також і те, яким чином можливо характеризувати цей частотний шум, використовуючи старші моменти комплексної амплітуди резонатора. Порівняні частотні залежності моментів різних порядків і переконливо показано, як навіть кілька перших моментів можуть дати інформацію про джерело шуму тоді, коли спектр відгуку не дозволяє розрізнити їх.

У третьому розділі розглядається не абстрактні джерела частотних шумів, а важливий приклад квантової дворівневої системи, дисперсійно

зв'язаної з механічним резонатором. Показано, що контакт з квантовою системою може призвести до мультистабільності станів вимушених коливань моди. При монотонній зміні параметрів системи амплітуда вимушених коливань може змінюватися зі стрибками, і поблизу таких точок проаналізовано вплив квантових флуктуацій на швидкість переходу. Цікавим і показовим є приклад класичної системи, в якій за рахунок особливого, аргументального, зв'язку може формуватися дискретний, псевдоквантовий спектр можливих вимушених коливань.

У четвертому розділі досліджується ефект Казимира взаємодії тіл, обумовлений нульовими коливаннями вакууму. З одного боку показано, як цей ефект може бути використаний для аналізу електричних властивостей тонких плівок, для яких вплив їх характеристик на силу тяжіння до іншого, масивного, тіла, є особливо сильним. З іншого боку, ефект Казимира може негативно впливати на систему, що є одним з лімітуючих факторів для ультрахолодних атомів, захоплених у оптичних пастках всередині оптоволоконна. Такі системи використовуються для створення атомних годинників, і отже, ефект Казимира може обмежувати їх точність. В роботі проаналізовано похибку, викликану цим ефектом для переходу в атомі стронцію.

У п'ятому розділі дисертації здобувачем розглянуті одно- і двовимірні системи на прикладах одновимірного вігнерівського кристалу і листа графена відповідно. В одновимірному випадку виявляється, що нелінійність закону дисперсії визначає тепловий транспорт у системі. У роботі не лише отримано теплопровідність зразка деякої фіксованої довжини, але і досліджено релаксаційні процеси – при раптовій зміні числа мод, що розповсюджуються в одному з напрямків, перехід до рівноважного стану можливий лише за рахунок процесів, що змінюють напрямок розповсюдження мод та їх число.

Шостий розділ присвячений дослідженню електромагнітних мод у шаруватих надпровідникових системах. Як зазначалося, ці системи є сильно анізотропними, і результати, отримані в роботі, демонструють це дуже яскраво. Показано, що в залежності від напрямку розповсюдження мод у пластині шаруватого надпровідника по відношенню до площини його шарів, спектр мод може мати ділянки з аномальною дисперсією. Проаналізовано, як збудження цих локалізованих мод впливає на прозорість пластин до терагерцевого випромінення. Окрім того, специфічні нелінійні електродинамічні властивості шаруватих надпровідників дозволяють за рахунок статичного поля впливати на розповсюдження мод.

Обґрунтованість та достовірність, отриманих в дисертації теоретичних результатів, забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики, а також підтверджується ретельними розрахунками, наведеними у тексті. Низка одержаних результатів є точними або асимптотично точними розв'язками відповідних рівнянь та підтверджуються

результатами чисельних розрахунків.

Практичне і наукове значення отриманих результатів пов'язано, в першу чергу, з тим, що ці результати доповнюють і розширюють існуючі уявлення про динаміку мод за наявності контакту з термостатом і їх розповсюдження у одно-, двовимірних і шаруватих системах.

Результати, які отримано у дисертації, можуть бути використані при розробці приладів, що працюють у квантовому режимі, систем зчитування інформації квантового комп'ютера, а також електроніки терагерцового діапазону, а методи, що запропоновані у роботі, можуть бути застосовані для подальшого теоретичного дослідження.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Майзеліса З.О. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (м. Київ), Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (м. Харків), Національний науковий центр Харківського фізико-технічного інституту (м. Харків), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків), Інститут монокристалів НАН України (м. Харків).

Усі результати, одержані в роботі, є безумовно новими. На мій погляд, **найбільш цікавими науковими результатами** можна вважати такі:

1) Вперше побудовано теорію нелінійного відгуку гармонічного резонатора, дисперсійно зв'язаного з квантовою дворівневою системою. Показано, що амплітуда моди проявляє гістерезисні властивості у такому випадку, а при деяких амплітудах зовнішнього збудження можуть спостерігатися декілька станів системи. Ця специфічна мультистабільність пояснена особливою ефективною нелінійністю моди, що є наслідком дисперсійного зв'язку з квантовою системою. Розрахована швидкість переходу системи між станами рівноваги поблизу точок біфуркації.

2) Вперше побудовано теорію теплового транспорту у вігнерівському кристалі, що супроводжується взаємодією електронних мод. Показано, що саме нелінійність закону дисперсії і врахування міжмодового розсіювання дозволяє описувати динаміку термічного врівноваження системи. Отримана теплопровідність одновимірного вігнерівського кристалу з урахуванням ефектів такого міжмодового розсіювання.

3) Вперше вивчено поширення локалізованих джозефсонівських мод у пластині шаруватого надпровідника, для довільного напрямку їх хвильового вектора по відношенню до площини шарів. Знайдено і проаналізовано закон дисперсії таких мод в залежності від параметрів системи. Показано, що проходження терагерцового випромінення крізь зразок може бути суттєво

пригнічено за рахунок збудження локалізованих джоузефсонівських мод у пластині.

Ці результати найбільш чітко показують різноманіття отриманих результатів та їх важливість для аналізу складних квантових систем.

За змістом дисертації можна зробити такі зауваження:

1) У другому розділі дисертації аналізуються різні види частотних шумів: білі шуми (гауссівський та пуассонівський), марківські шуми (неперервні та дискретні, телеграфні). Цілком згодний з тим, що ці види шумів є важливими з точки зору практичних застосувань. Однак, на мій погляд, для багатьох задач було б важливо не просто мати можливість, перебираючи декілька видів шумів, виявити наявність деякого з них в системі, що розглядається, але мати можливість для будь-якого (не обов'язково одного з розглянутих) шуму знайти його статистичні характеристики. У зв'язку з цим у мене таке питання: чи можливе розв'язання оберненої задачі знаходження у явному вигляді характеристик шуму за моментами координати осцилятора?

2) У четвертому розділі оцінюється вплив ефекту Казимира на спектроскопію атомів у волокні з шестигранним перерізом. При цьому взаємодія з кожною стінкою волокна оцінюється як взаємодія з нескінченною площиною. Наскільки правомірним є таке припущення беручи до уваги те, що кут, під яким видно цю стінку з точки положення атома, дорівнює 60° і не є близьким до 180° ?

3) У шостому розділі розглядається розповсюдження мод у пластині шаруватого надпровідника у довільному напрямку по відношенню до площини шарів, і на рис. 6.9 і 6.10 показані залежності від однієї з проєкцій хвильового вектора при фіксованому значенні іншої проєкції. Не зрозуміло, який фізичний сенс мають такі залежності, оскільки рис. 6.8 показує залежність від кута розповсюдження, і така постановка експерименту є зрозумілою, логічною і вже описує розповсюдження у довільному напрямку.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертаційної роботи Майзеліса З.О. Без сумніву, вона є завершеною науковою працею, що відкриває нове вирішення важливої наукової проблеми. Робота виконана на високому науковому рівні, побудована на ретельній і великій за обсягом роботі автора та в ній отримані нові обґрунтовані наукові результати. Основні результати дисертації викладено у 28 наукових працях, серед яких 14 статей у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях, що рецензуються, в тому числі, 10 статей у періодичних виданнях, віднесених до першого Q1 квартиля за класифікацією Scimago, 1 стаття — до другого Q2 квартиля і 3 статті — до третього Q3 квартиля та у 14 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Зміст автореферату вірно відображає основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.02 - теоретична фізика. Положення, наукові

результати та висновки, що виносились на захист кандидатської дисертації, не виносяться на захист докторської дисертації.

Вважаю, що за своїм рівнем, обсягом досліджень, новизною та науковим значенням результатів, дисертаційна робота Майзеліса З.О. «Поширення, взаємодія і декогеренція мод у нелінійних квантових системах» повністю відповідає усім вимогам МОН України, що ставляться до докторських дисертацій, зокрема пунктам 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а автор дисертації — Майзеліс Захар Олександрович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика».

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу теорії
конденсованого стану речовини
Інституту монокристалів НАН України

В.В. Яновський

Підпис засвідчую:
Учений секретар Інституту монокристалів
НАН України
канд. фіз.-мат. наук



К.М.Кулик