

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»**

Дисертаційна робота Майзеліса З.О. присвячена дослідженню механічних мод у системах, де вони можуть взаємодіяти з дисипативним оточенням та іншими системами, в тому числі і квантовими, електромагнітних мод у шаруватих надпровідниках, а також квантових локалізованих мод у одновимірних і двовимірних системах. Аналіз проводиться з урахуванням як дисипацій у системі, які призводять до декогеренції та затухання, а також за наявності контакту з джерелами адитивних та частотних шумів. В роботі розвивається теоретичний підхід до такого роду складних систем, який дозволяє за наявності сильного адитивного шуму виявити і характеризувати властивості частотного шуму, який може превалювати у системі.

Актуальність дисертації зумовлена тим, що в ній досліджуються динаміка мод у квантовому режимі, при врахуванні взаємодії моди з квантовими системами, що має низку важливих застосувань у сучасних експериментальних установках, у роботі квантових комп'ютерів, а також у багатьох пристроях, мініатюризація яких виводить їх у квантовий режим. Окрім того, у дисертації досліджено не лише окремі моди, але і системи з більшою кількістю ступенів вільності, зокрема шаруваті надпровідники, які є дуже перспективними матеріалами і можуть бути використані у пристроях терагерцевого діапазону. Цей діапазон представляє інтерес зокрема у медицині, і є недостатньо вивченим. Важливими системами, для яких нелінійність закону дисперсії є не поправкою або додатковим фактором, а визначає тепловий транспорт або релаксаційні явища, є квазіодновимірні системи, що моделюються вігнерівським кристалом. Актуальність цих досліджень визначається можливістю застосувань їх для аналізу транспорту у квантових нанотрубках або волокнах.

Актуальність досліджень, які проведено в дисертаційній роботі Майзеліса З.О., підтверджується також тим, що вони є складовою частиною проектів, які виконувались в рамках академічної тематики Відділення фізики і астрономії НАН України («Дослідження лінійних і нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених частинок», термін виконання 2007–2011 рр., «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами»,

термін виконання 2012–2016 рр., «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами», виконується з 2017 р.), в рамках цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій», проект «Теоретичні та і експериментальні дослідження властивостей періодичних і стохастичних модульованих наноструктур в оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному діапазонах спектру», термін виконання 2010–2014 рр., а також в рамках конкурсу спільних українсько-японських проектів Державного фонду фундаментальних досліджень, проект «Квантові явища в системах на основі джозефсонівських контактів», термін виконання 2013 р.

Метою дисертаційної роботи є виявлення специфічних закономірностей у динаміці мод за наявності їх контакту з джерелами різних шумів, з урахуванням нелінійності та контакту з іншими системами, зокрема квантовими, а також мод у одно-, двовимірних і шаруватих надпровідникових системах.

Для вирішення поставлених у дисертації задач були використані методи, що базуються на використанні квантового кінетичного рівняння для матриці густини змішаного стану, метод повільних змінних, метод кінетичного рівняння Больцмана для аналізу транспорту енергії та імпульсу, метод аналізу комплексної координати моди, метод аналізу міжшарової різниці фаз параметру порядку у шаруватих надпровідникових системах.

Дисертація З.О. Майзеліса **повністю відповідає** спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота складається з шести розділів. Перший розділ присвячено огляду літератури, в якому стисло обговорено основні закономірності еволюції мод за наявності їх контакту з термостатом, властивості електронних мод у одно- і двовимірних системах, а також особливості опису електромагнітного поля у шаруватих надпровідниках. В другому розділі розвинуто метод аналізу впливу шумів на динаміку моди, показано як за допомогою старших моментів можливо виявити властивості джерела частотного шуму. В третьому розділі цей аналіз проводиться для важливого випадку взаємодії моди механічного резонатора з квантовою дворівневою системою, досліджена мультстабільність в такій системі. Четвертий розділ присвячено аналізу взаємодії Казимира, викликаній коливаннями вакууму. Показано, як це може бути використано для аналізу електричних властивостей речовини тіл, а також вивчено негативний вплив ефекту Казимира на точність роботи квантового годинника. П'ятий розділ присвячено вивченню одно- та двовимірних систем. Для одновимірних вігнерівських кристалів досліджено транспортні властивості, обумовлені нелінійністю системи, а також релаксації

теплових збуджень. Для двовимірної системи, листа графена, специфічні властивості поверхні Фермі призводять до особливостей у розповсюдженні електронних мод у листі. Нарешті, шостий розділ дисертації присвячено дослідженню розповсюдження електромагнітних мод у довільних напрямках у шаруватому надпровіднику, сильно анізотропній нелінійній квантовій системі.

Наукову новизну дослідження визначають наступні результати.

1. Розвинуто теоретичний метод відокремлення впливів адитивного і частотного шумів для аналізу динаміки квантової моди за наявності її затухання та декогеренції при збудженні системи на частоті, близькій до резонансу. Показано, як вивчення статистичних моментів старших порядків системи дозволяє виявити наявність різних шумів, що не є можливим виходячи з аналізу лише спектру відгуку.

2. Отримані аналітичні вирази для статистичних моментів старшого порядку комплексної координати моди за наявності частотного шуму з різними статистичними властивостями, з урахуванням ефектів затухання та декогеренції. Запропоновано схему проведення експериментальної перевірки отриманих закономірностей для механічного торсіонного мікрорезонатора і доведено можливість відокремлення частотного шуму від адитивного.

3. Побудовано теорію нелінійного відгуку гармонічного резонатора, дисперсійно зв'язаного з квантовою дворівневою системою. Показано, що завдяки цьому зв'язку амплітуда моди як функція вимушувальної сили проявляє гістерезисні властивості, а при деяких амплітудах зовнішнього збудження можуть спостерігатися декілька станів системи.

4. Досліджено функцію розподілу коливальної системи за модами аргументальних коливань на прикладі маятника Дубошинського. Показано, що у класичній аргументальній системі може формуватися псевдоквантовий спектр вимушених коливань під дією локалізованої сильнонелінійної зовнішньої сили.

5. Вивчено ефект Казимира впливу квантових мод вакуума на взаємодію тонкої плівки та масивного тіла за наявності дисипацій при ненульовій температурі. Цей ефект призводить до виникнення сили тяжіння, яка складається з двох вкладів, радіаційного та дисипаційного.

6. Досліджено вплив сили Казимира на точність спектроскопії Лемба-Діка ультрахолодного атому стронція у фотонно-кристалічному волокні. Досліджено ширину спектральної лінії і вплив на неї різних факторів, зокрема ефекту Казимира взаємодії зі стінками порожнини та взаємодії атомів одного з іншим. Оцінена точність оптичного атомного годинника, який побудований таким чином.

7. Побудовано теорію теплового транспорту у вігнерівському кристалі, що супроводжується взаємодією електронних мод. Показано, що саме нелінійність закону дисперсії і

врахування міжмодового розсіювання дозволяє коректно описувати динаміку термічного врівноваження системи.

8. Досліджено вплив густини електронних мод, локалізованих на потенціальному бар'єрі, створеному електричним полем, на електропровідність листа графена. Розраховано електропровідність листа графену у вигляді суми вкладів за модами.

9. 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.

Результати, що представлені у дисертації, і її висновки є **обґрунтованими та достовірними**, оскільки вони отримані із застосуванням сучасних та добре апробованих методів теоретичної фізики, аналітичні результати підтверджено чисельними розрахунками, а також надано прозору фізичну інтерпретацію передбачених ефектів.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що розвинуті у дисертації методи можуть бути використані для аналізу умов і швидкості роботи нанопристроїв, зокрема систем зчитування інформації квантових комп'ютерів, установок вимірювання стану квантових систем, квантових годинників. Дослідження мод у низькорозмірних системах можуть бути використані для аналізу транспорту у карбонових нанотрубках та штучних нановолокнах, у системах з графеном. Дослідження мод у шаруватих надпровідниках можуть бути використані для розробки пристроїв у терагерцовому діапазоні частот, інтерферометрів, фільтрів та детекторів.

Дисертація добре структурована і характеризується якісним науковим стилем викладу. Наукові результати належним чином опубліковані у **14 статтях** у фахових міжнародних і вітчизняних періодичних виданнях, в тому числі, 10 статтях у періодичних виданнях, віднесених до першого Q1 квартиля за класифікацією Scimago, 1 статті — до другого Q2 квартиля та 3 статтях — до третього Q3 квартиля, а також пройшли переконливу апробацію на 14 вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Автореферат повністю відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи. Положення, наукові результати та висновки, що виносились на захист кандидатської дисертації, не виносяться на захист докторської дисертації.

До змісту дисертації і автореферату є такі зауваження:

1. В другому розділі дисертації розглядається модель взаємодії осцилятора з термостатом, в якій гамільтоніан взаємодії є лінійним і за координатами осцилятора, і за узагальненими координатами, що відповідають ступеням вільності термостату. Водночас, цікавим було б розглянути або хоча б якісно порівняти цей випадок з іншими типами зв'язку, оскільки наприклад

дисперсійний зв'язок є ключовим при розгляді взаємодії осцилятора з дворівневою системою у третьому розділі.

2. У п'ятому розділі розглядається екранований кулонівський потенціал для опису вігнерівського одновимірного кристалу. Не зрозуміла мотивація вибору саме такого виду потенціалу і які з отриманих результатів можуть бути перенесені на інші види потенціалів.

3. У першому розділі розглядається підхід до опису електродинамічних властивостей шаруватих надпровідників, що базується на зв'язаних синусоїдальних рівняннях Гордона. Водночас у шостому розділі для опису мод, що розповсюджуються під довільними кутами до площини шарів, використано інший підхід. Не зрозумілим залишається, як ці два підходи узгоджуються між собою і чи можна застосувати рівняння Гордона у шостому розділі.

Зазначені зауваження не впливають на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи.

Дисертація Майзеліса З.О. є завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива проблема теоретичної фізики, а саме, побудовано теорію еволюції мод довільної природи з урахуванням взаємодії з термостатом і джерелами шумів, а також поширення мод у низькорозмірних і шаруватих системах.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, новизною та науковим значенням отриманих результатів, достовірністю і обґрунтованістю висновків дисертація "Поширення, взаємодія і декогеренція мод у нелінійних квантових системах" задовольняє всім вимогам, які ставляться МОН України до докторських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 10 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів", а її автор, Майзеліс Захар Олександрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри теоретичної
фізики імені І. М. Ліфшиця
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна

Валерій Олександрович Шкловський

Підпис д.ф.-м.н., проф. В.О. Шкловського засвідчую:

Зав. кафедр

фізичного факультету



Коршук 9/13