

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Сотнікова Андрія Геннадійовича

«Першопринципні та середньопольові підходи до опису
близькокритичних явищ у квантових газах»,

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

Дисертаційна робота А.Г. Сотнікова присвячена детальному теоретичному опису близькокритичних явищ та фазових переходів у квантових газах за допомогою першопринципних та середньопольових теоретичних підходів. Обговорюються випадки, що реалізуються в сучасних експериментах з ультраохолодними газами атомів лужних і лужноземельних металів й елементів групи лантану в спеціальних оптичних та магніто-оптичних пастках, а також в експериментах з дослідження фізичних властивостей кристалів оксидів кобальту в зовнішніх полях. Системи та явища, які вивчаються, важливі для перспективних елементів спінтроники та магнітних пристроїв, що потребують високої стійкості по відношенню до термічних флуктуацій та зовнішніх полів, для досконалення точності оптичних приладів і для розробки універсальних квантових симуляторів, які планується застосовувати для вивчення більш складних твердотільних систем та вдосконалення їх фізичних характеристик. Таким чином, тема дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова є безсумнівно **актуальною**. Варто відмітити, що дисертант зробив доповідь за матеріалами дисертації на семінарі нашого відділу Надпровідних і мезоскопічних структур у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, та співробітники відділу дали високу оцінку актуальності, новизні та рівню дисертації.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наступних проектів, які виконувались в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України: три базові програми НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки та техніки (номера державної реєстрації 080906UP0010, 0111U009549 та 0116U007065 з термінами виконання 2006-2010, 2011-2015 та 2016-2020 рр., відповідно), в яких дисертант виступав у ролі виконавця, і цільова програма наукових досліджень Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України «Фундаментальні проблеми у фізиці елементарних частинок, ядерній фізиці та ядерній енергетиці» (номер державної реєстрації 0109U006375, термін виконання 2009-2010 рр.), в якій він виступав у ролі керівника проекту.

Дисертаційна робота складається з п'яти розділів. Розглянемо основні результати у відповідній послідовності.

У **першому розділі** дуже послідовно наведено термодинаміку квантових газів бозонів та ферміонів. Послідовність, детальність та пропрацьованість розділу робить його перлиною дисертації. Можна брати цей розділ та за ним читати спецкурс студентам, або розвинути його і написати на його основі обзорну статтю. Розглянуто рівняння, що описують рівноважний стан квантових газів, їх хімпотенціали та відповідні функції розподілу; отримано вплив температури на термодинамічні характеристики – теплоємність, тиск, ентропію. Описано специфіку квантових газів що реалізуються за присутності періодичного потенціалу, такого як оптичні ґратки. Розвинуто теорію лінійного відгуку на зовнішнє електромагнітне поле. Наведено основні першопринципні та середньопольові методи, що використовуються в наступних розділах роботи для опису реалістичних систем, а саме такі: лінійна теорія відгуку, формалізм функцій Гріна, метод точної діагоналізації, теорія збурень, спіново-хвильовий підхід, середньопольова теорія Вейса, динамічна теорія середнього поля.

Викладання основної частини оригінальних результатів починається у **другому розділі**, в якому досліджено вплив електромагнітного поля на близькокритичні явища в бозе-газі. Досліджено найцікавішу ідею використовувати двокомпонентний Бозе-Ейнштейнівський конденсат (БЕК) в якості фільтра для електромагнітних сигналів; ця ідея основана на резонансній взаємодії світу з БЕК на певній частоті. Далі вивчено особливості проходження релятивістської частинки крізь БЕК. Також спираючись на незвичайне дисперсійне співвідношення та здобуту явну залежність хімічного потенціалу від температури, досліджено унікальне явище сильного уповільнення світла (майже до повної зупинки) в околі критичної температури переходу до стану з виділеним бозе-конденсатом.

Третій розділ присвячено магнітному впорядкуванню двокомпонентних ультрахолодних газів Фермі. Дослідження починається з гамільтоніану Фермі-Габбарда для системи з двома типами фермі-атомів. Для кількісного опису системи використовується динамічна теорія середнього поля, детально представлена в першому розділі. Описано оптимальні умови для спостереження явищ магнітного впорядкування в оптичних ґратках. Отримано фазові діаграми з фазовими переходами першого роду між різними магнітними станами. Досліджено стабільність магнітних фаз під впливом температурних флуктуацій. Зроблено висновки про можливість вивчення квантового магнетизму з такими системами.

Четвертий розділ також присвячений вивченню ультрахолодних ферміонів в оптичних ґратках, цього разу з акцентом на системи з багатьма компонентами.

Детально досліджено трикомпонентні та чотирикомпонентні гази Фермі. Проведено обчислення термодинамічних властивостей таких атомних сумішей в околі фазових переходів. Побудовано магнітні фазові діаграми; обчислені температурні залежності; досліджено порушення симетрії у моделі Габбарда. Було виявлено особливості магнітного впорядкування багатоконпонентних газів Фермі.

У **п'ятому розділі** віртуозне володіння динамічною теорією середнього поля дозволяє описувати фізичні властивості перовскітного оксиду кобальту та схожих матеріалів. Під впливом магнітного поля в цьому матеріалі рухливі збудження призводять до утворення однорідного екситонного бозе-конденсату. В околі фазового переходу, індукованого магнітним полем, обчислюються температурні залежності критичного поля, намагніченість, спектральна густина станів, вплив тиску на низькотемпературну фазу. Було переконливо показано, що отримані дисперсійні характеристики збуджень добре **узгоджуються з експериментами** в доступній частині зони Бріллюена.

Таким чином, в дисертаційній роботі А.Г. Сотнікова шляхом аналітичного і чисельного розв'язання мікроскопічних, середньополевих і ефективних теоретичних моделей для квантових газів як за відсутності, так і при наявності зовнішніх полів **отримано ряд нових цікавих результатів та розроблено нові методи теоретичного дослідження**. Дисертація повністю відповідає спеціальності **01.04.02 — «теоретична фізика»**.

На мою думку, **найбільш цікаві наукові результати**, що отримані у дисертації, пов'язані з теоретичними розрахунками щодо використання ультрахолодних атомних газів в якості фільтру для електромагнітних сигналів. А саме, показано унікальну можливість відокремлювати вузькі спектральні компоненти від початкових сигналів із застосуванням явища сильного сповільнення світла для частот близьких до відповідних резонансних переходів в атомах лужних металів та сильної залежності групової швидкості від напруженості керуючого магнітного поля. В першу чергу, це відкриває можливість використання таких систем для вдосконалення спектральних характеристик оптичних приладів. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розроблені методи мають практичне значення**. Загалом дослідження дисертаційної роботи доповнюють і розширюють існуючі уявлення про квантові гази і, зокрема, близькокритичні ефекти в таких системах, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики конденсованого стану, а також підтверджується ретельно

зробленими викладками, наведеними у тексті. В рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються чисельними розрахунками. Варто підкреслити, що автор віртуозно застосовує різні аналітичні та численні методи теоретичної фізики, такі як динамічна теорія середнього поля та метод Монте-Карло.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова 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), Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (м. Харків), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків), Інститут монокристалів НАН України (м. Харків).

По змісту дисертації можна зробити такі **зауваження**:

- 1) Як зазвичай мається на увазі, Бозе-Ейнштейнівська конденсація повинна порушувати калібрувальну симетрію $U(1)$, але екситон – це ж пара, утворена електроном і діркою. Здавалося б, заряд повинен зберігатися при такій конденсації, але тоді не зрозуміло, чому спостерігаються (наприклад, в підрозділі 5.1) фазові переходи другого роду, тобто згідно теорії Ландау такі, що порушують безперервну симетрію. З тексту дисертації не зрозуміло: відбувається все ж порушення калібрувальної інваріантності, пов'язаної зі збереженням числа частинок при бозе-конденсації екситонів, чи ні.
- 2) Інформація про основний об'єкт дослідження – ультрахолодні атомні гази – є дещо розосередженою по розділам дисертації. Немає чітко відокремленого місця (зокрема, у першому розділі), де загальним чином наводились би відповідні схеми та умови реалізації таких систем з відповідними посиланнями.
- 3) У підрозділі 2.2 наводиться приклад інверсної заселеності атомних станів у системі (див. рис. 2.8), що складається з ультрахолодних атомів, однак не обговорюється яким чином таку систему може бути реалізовано. Аналогічно обговорюється можливість експериментального спостереження ефекту Вавілова-Черенкова (у зв'язку з рис. 2.10), однак тільки на словах – відсутні як реальне порівняння з експериментом, так і посилання.

Однак зазначені зауваження не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація прекрасно структурована і написана доброю науковою мовою. Основні результати опубліковані в 20 статтях, більшість з яких у таких відомих профільних журналах як Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. A, Phys. Rev. B. При цьому, очевидно, що значний внесок в роботу належить особисто дисертанту, що додатково підтверджується

тим, що значна частина публікацій є одноосібними. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Оpubліковані роботи й автореферат повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація А.Г. Сотнікова є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: систематично побудовано або узагальнено теоретичні підходи для опису близькокритичних характеристик складних квантових систем багатьох частинок — квантових газів із залученням сучасних технік із вказівками на межі застосовності кожного методу; наведено важливі передбачення для сучасних та майбутніх експериментів у таких системах.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертація «Першопринципні та середньопольові підходи до опису близькокритичних явищ у квантових газах» повністю задовольняє вимогам, що ставляться до докторських дисертацій МОН України, зокрема пунктам 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а автор дисертації Сотніков Андрій Геннадійович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу
надпровідних і мезоскопічних структур
Фізико-технічного інституту низьких температур
ім. Б.І. Веркіна НАН України

 С.М. Шевченко

«Підпис С.М. Шевченка засвідчую.»

Вчений секретар ФТІТ ім. Б.І. Веркіна
НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук





О.М. Калиненко