

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»

Дисертаційну роботу А.Г. Сотнікова присвячено побудові та розвиненню теоретичних підходів до опису фазових переходів і близькокритичних явищ у квантових газах. Такі підходи включають як теоретичний опис із перших принципів, так і ряд важливих середньопольових наближень. Особливу увагу в дисертаційній роботі присвячено теоретичному опису фізичних явищ, які мають яскравий прояв на макроскопічному рівні в газах атомів, охолоджених лазерними техніками до екстремально низьких температур. На цей час такі системи мають великі перспективи з точки зору побудови квантових аналогів більш складних квантових систем (наприклад, високотемпературних надпровідників), застосування газів у якості елементів пам'яті в квантових комп'ютерах, розробки надчутливих детекторів електромагнітних полів тощо. З огляду на велику кількість сучасних досліджень унікальних властивостей квантових газів у провідних наукових установах світу, тема дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова є, беззаперечно, важливою та актуальною.

Актуальність досліджень, наведених у дисертаційній роботі А.Г. Сотнікова, підтверджується також низкою наукових проектів, які виконувались в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України з 2006 по 2020 роки, великою кількістю доповідей на міжнародних конференціях і семінарах у закордонних наукових центрах за запрошенням.

Основна частина дисертаційної роботи складається з п'яти розділів. Наведемо основні результати у відповідній послідовності.

У **першому розділі** ретельно проаналізовано термодинаміку квантових газів бозонів і ферміонів, а також наведено огляд основних теоретичних підходів, розвиненню, узагальненню та успішному застосуванню яких присвячено наступні розділи дисертації. Розділ має чітку структуру, а його наявність у роботі є добре обгрунтованою з точки зору узагальнення деякою мірою розрізнених до цього часу підходів у **потужну систематизовану методологію теоретичного опису квантових газів**. Така систематизація підходів є визначною складовою дисертаційної роботи та робить її важливою з академічної точки зору.

Другий розділ присвячено ефектам відгуку ідеального газу атомів, які описуються статистикою Бозе-Ейнштейна, на зовнішнє збурення електромагнітним полем. Проаналізовано можливість використовувати бозе-ейнштейнівський конденсат (БЕК) для відокремлення корисних спектральних компонентів (фільтрації) оптичних імпульсів. Цей ефект обумовлено різною інтенсивністю та, відповідно, різними характеристиками резонансної взаємодії електромагнітних сигналів із конденсованим середовищем, що має особливі дисперсійні характеристики. Зокрема, на основі ефекту сильного уповільнення групової швидкості окремих спектральних компонентів **виявлено оптимальні фільтраційні властивості газів атомів лужних металів у стані конденсації** при пропусканні сигналів оптичного діапазону слабкої інтенсивності. Також важливим елементом розділу є дослідження обміну енергією між релятивістськими зарядженими частинками і газом у стані з БЕК. Цікавими результатами цього напрямку є наведення принципової схеми прискорення частинки за рахунок інверсної заселеності метастабільних станів атомів лужних металів у стані з БЕК, а також обрахована можливість визначення спектральних характеристик атомів завдяки ефекту Вавілова-Черенкова в газах із бозе-конденсатом.

У **третьому розділі** досліджено ефекти магнітного впорядкування в двокомпонентних ультрахолодних фермі-газах, що знаходяться у зовнішніх періодичних потенціалах оптичних ґраток. Такі ґраткові потенціали утворюються спеціально налаштованими лазерами, а сама система атомів (за достатньої інтенсивності зовнішніх полів) описується моделлю Фермі-Габбарда. Сама модель є добре відомою з області фізики твердого тіла, де вона застосовується для опису сильно корельованих станів електронів, зокрема, в кристалах оксидів перехідних металів, до яких відносяться і високотемпературні надпровідники. Відсутність методів точного розв'язку для моделі Фермі-Габбарда робить ультрахолодні гази атомів особливо привабливими для використання в якості універсальних квантових симуляторів. У третьому розділі дисертаційної роботи для спостереження магнітно-впорядкованих фаз, що є проміжним етапом для досягнення аналогу надпровідної фази в ультрахолодних газах, запропоновано використання незбалансованих сумішей фермі-атомів та **наведено переваги таких систем із відповідним аналізом фазових діаграм та термодинамічних характеристик.**

Четвертий розділ присвячено теоретичному опису термодинамічних властивостей багатокомпонентних фермі-атомів у періодичних структурах оптичних ґраток. За допомогою проведеного **узагальнення динамічної теорії середнього поля** для систем із високими спіновими симетріями проведено розрахунки кореляційних функцій та побудовано низькотемпературні фазові діаграми в таких сумішах. Показано переваги термодинамічних властивостей таких систем для досягнення та встановлення режиму антиферомагнітних кореляцій дальнього порядку.

У п'ятому розділі проведено теоретичні розрахунки для конкретних твердотільних систем, а саме для кристалів оксидів кобальту в зовнішньому магнітному полі, при легуванні домішками та застосуванні тиску з метою дослідження формування конденсату Бозе-Ейнштейна зі спин-триплетних екситонів — квазічастинок, що відповідають зв'язаним станам електрону з зони провідності та дірки з зони валентності з сумарним спіном одиниця. Примітно, що **побудована теорія конденсації екситонів добре узгоджується з проведеними експериментами в сильних магнітних полях.** У свою чергу, розвиток цієї теорії вже призвів до істотних змін у розумінні низькотемпературних властивостей кристалів оксидів кобальту з перовскітною структурою. Зокрема, це дало поштовх для проведення експериментів із резонансного непружного рентгенівського розсіяння з метою вивчення дисперсійних характеристик збуджень в таких системах. Результати відповідних експериментів у досяжній частині зони Бріллюена добре узгоджуються з теоретичними розрахунками, проведеними з застосуванням першопринципних та спіно-хвильових підходів.

Таким чином, у дисертаційній роботі А.Г. Сотнікова розвинуто як мікроскопічні, так і середньопольові підходи до опису близькокритичних явищ у квантових газах як за відсутності, так і при наявності зовнішніх полів. Дисертантом **отримано низку нових науково вагомих результатів, побудовано нові та узагальнено існуючі методи теоретичного дослідження.** Дисертація повною мірою відповідає спеціальності 01.04.02 — «теоретична фізика».

На мою думку, до **найбільш вагомих наукових результатів, що здобуті в дисертації, можна віднести побудову теорії екситонної конденсації в кристалах оксидів кобальту, що може бути індукована зовнішніми полями в широкому діапазоні температур.** Це відкриває можливість використання таких систем для побудови магнітних пристроїв, стійких до флуктуацій електромагнітних полів, температури, тиску тощо. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розроблені методи мають практичне значення.** Загалом, дослідження дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова доповнюють і розширюють існуючі уявлення про квантові системи багатьох частинок і, зокрема, квантові гази взаємодіючих атомів у зовнішніх полях, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** здобутих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики, а також підтверджується ретельно проведеними математичними викладками, наведеними у тексті. У рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є повністю обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються числовими розрахунками. Варто підкреслити, що автор володіє великим спектром теоретичних підходів (як аналітичних, так і числових), проводить розрахунки відповідних меж

застосовності і проводить контроль основних результатів якомога більшим набором методів із зазначенням найбільш надійних кількісних характеристик.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова фахівців інститутів НАН України і університетів МОН України, таких як: Інститут фізики НАН України (м. Київ), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Київський національний університет ім. Т. Шевченка, Інститут фізики конденсованих систем НАН України (м. Львів), Львівський національний університет І. Франка (м. Львів), 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) У розділі 2.1 теоретично досліджуються ефекти фільтрації електромагнітних сигналів оптичного діапазону за допомогою конденсата Бозе-Ейнштейна, що утворюється в газі атомів лужних металів. Дисперсійні характеристики обраховуються на прикладі використання конкретних рівнів надтонкої структури атомів натрію. При цьому, автором згадується ефект електромагнітно-індукованої прозорості, який може бути реалізовано в такій системі, але в конкретних розрахунках його не використано. Із точки зору повноти теоретичного аналізу, доцільним було би провести відповідні розрахунки або хоча б навести порівняння з існуючими експериментальними даними, де використовувався цей ефект.
- 2) У четвертому розділі послідовно проводиться теоретичний аналіз систем з декількома спіновими та орбітальними ступенями вільності на основі відповідних гамільтоніанів Габбарда та розроблених теоретичних підходів. Відповідний аналіз проведено для випадків спінових симетрій $SU(2)$, $SU(3)$ та $SU(4)$. З огляду на розділ в цілому, залишається не до кінця охопленим питання, чи цінними є випадки з ще вищою симетрією гамільтоніанів для додаткового аналізу з залученням розроблених теоретичних підходів, чи ні.
- 3) У п'ятому розділі досліджено конденсацію екситонів у кристалах оксидів кобальту в достатньо сильних магнітних полях порядку 100 Тесла. При цьому, на мій погляд, залишається деякою мірою неосвітленою можливість індукування конденсації екситонів не сталим магнітним полем, а змінними електромагнітними полями, налаштованими близько до окремих резонансних переходів. Чи є експериментальні або теоретичні дослідження у цьому напрямку перспективними?

У цілому, зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація добре структурована і написана якісною науковою мовою. Основні результати опубліковані в 20 статтях, більшість з яких у таких відомих профільних журналах, як *Physical Review*, *Scientific Reports*, *Journal of Physics* то-

що. При цьому, очевидно, що значний внесок в роботу належить особисто дисертанту, що додатково підтверджується тим, що в більшості публікацій із закордонними колегами він є першим у списку співавторів, або статті є одноосібними. Новизна та наукове значення здобутих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи й автореферат повно й вірно окреслюють 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, а саме: систематично побудовано теоретичні підходи для опису близькокритичних явищ у квантових газах взаємодіючих частинок із залученням сучасних теоретичних методів із вказівками на межі застосовності кожного; наведено порівняння з існуючими експериментальними даними та зроблено важливі передбачення для майбутніх експериментів.

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 до докторських дисертацій, зокрема, п.п. 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р.), а автор дисертації Сотніков Андрій Геннадійович, безсумнівно, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор, член-кореспондент НАН України,
головний науковий співробітник
відділу теоретичної фізики
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України

В.О. Ямпольський

Підпис головного наукового співробітника ІРЕ ім. О.Я. Усикова
НАН України Ямпольського В.О. засвідчую.

Вчений секретар ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук



І.Є. Почаніна