

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 (спеціальність 01.04.02 – «теоретична фізика»)

У дисертаційній роботі А.Г. Сотнікова побудовано та розвинено теоретичні підходи до опису явищ у безпосередній близькості до фазових переходів у газових середовищах за низьких температур, де мають найяскравіший прояв квантові ефекти. Теоретичні методи включають як аналітичні, так і числові підходи квантової механіки, статистичної фізики та фізики твердого тіла, віртуозне володіння якими продемонстровано дисертантом в рамках проведеної роботи. Самі об'єкти дослідження — квантові гази стають все більше прикметними фізичними системами, якщо навіть не деякою мірою повсякденними з огляду на вражаюче велику кількість досліджень у провідних наукових центрах світу. Це робить обрану тему дисертаційної роботи актуальною.

Актуальність досліджень, проведених в рамках дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова, підтверджується чотирма науковими проектами, що виконувались в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України з 2006 по 2020 роки, 20 статтями в рейтингових журналах, 30 тезами доповідей на міжнародних конференціях і школах, а також виступами на семінарах у закордонних установах за запрошенням керівників дослідницьких груп. Важливо зазначити, що, крім виступів у закордонних центрах, у 2014 і 2018 рр. дисертант виступав на загальнофізичних семінарах фізико-технічного факультету ХНУ ім. В.Н. Каразіна з двома доповідями, присвяченими тематиці досліджень, які викликали великий інтерес у загальної аудиторії цих семінарів, включно зі студентами.

За *змістом і структурою* дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій — її викладено на 328 сторінках друкованого тексту, вона складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків і списку використаних джерел із 353 найменувань. У *вступі*, окрім окреслення зазначеної структури дисертаційної роботи, наведено обґрунтування вибору теми досліджень із зазначенням їх актуальності, сформульовано основні завдання, вказано на наукову новизну отриманих результатів, їх практичне та наукове значення, особистий внесок здобувача, апробацію результатів на міжнародних конференціях, школах і семінарах тощо.

Розділ 1 присвячено основам термодинаміки квантових газів бозонів і ферміонів, що необхідні для побудови належного теоретичного опису таких систем і досягнення поставлених завдань. Зроблено систематизацію основних теоретичних підходів, які розвинуто та узагальнено в подальших розділах: лінійної теорії відгуку, спіново-хвильового підходу, пертурбативних розкладань ґраткових гамільтоніанів, середньопольового підходу Вейса та динамічної теорії середнього поля. З огляду на високоякісне викладення матеріалу данного розділу та на дисертаційну роботу в цілому, є рекомендація подальшого використання підібраного та освітленого матеріалу в якості оглядової статті або монографії.

У *розділі 2* побудовано теоретичний підхід до опису близькокритичних явищ в ультрахолодних бозе-газах при взаємодії з зовнішнім електромагнітним полем. Зокрема, продемонстровано можливість фільтрації світлових сигналів за допомогою ультрахолодного газу атомів лужних металів у стані з конденсатом Бозе-Ейнштейна. Встановлено, що для появи ефекту Вавілова-Черенкова в ультрахолодному газі з конденсатом частинки повинні мати високу (релятивістську) швидкість, так як в розріджених газах показник заломлення близький до одиниці в області резонансних частот. Показано можливість визначення спектральних характеристик атомів лужних металів на основі детектування черенковського випромінювання в розріджених газах з бозе-конденсатом.

Розділ 3 присвячено дослідженню низькотемпературних властивостей охолоджених нейтральних атомів зі статистикою Фермі-Дірака, що взаємодіють між собою, в потенціалах оптичних ґраток. Для цього розвинено динамічну теорію середнього поля та аналітично виведено ефективні спінові моделі в границі сильної локальної взаємодії різних атомів. Показано, що двокомпонентні фермі-гази з різними амплітудами тунелювання компонент мають переваги з точки зору досягнення магнітно-впорядкованих фаз.

У *розділі 4* проведено суттєве узагальнення теоретичних підходів до опису ультрахолодних квантових газів, що складаються з атомів з багатьма внутрішніми ступенями вільності — будь то проекція сумарного спіну, або проекція орбітального моменту. Вперше в літературі вказано на наявність термально-індукованих переходів між три- та двопідґратковими антиферомагнітно-впорядкованими станами в $SU(3)$ -симетричній моделі Габбарда.

У *розділі 5* побудовано теорію бозе-конденсації спін триплетних екситонів у кристалічних сполуках оксидів кобальту, що демонструють унікальні магнітні властивості в околі кросоверу багатоелектронних спінових станів. Побудована теорія якісним чином описує експериментальні дані з магнітних властивостей таких систем у сильних магнітних полях. Врахування високої мобільності спін-триплетних двочастинкових збуджень (екситонів) дозволило також зробити

порівняння з експериментальними даними з резонансного непружного рентгенівського розсіювання та встановити дуже гарне узгодження теорії і експериментів.

Таким чином, у дисертаційній роботі А.Г. Сотнікова успішно застосовано першопринципні та середньопольові теоретичні підходи до опису близькокритичних явищ у квантових газах як за відсутності, так і при наявності зовнішніх полів. Дисертантом отримано суттєво нові та вагомні результати з наукової точки зору, побудовано нові та розвинено сучасні методи теоретичного дослідження. Дисертація **повною мірою відповідає спеціальності 01.04.02 — «теоретична фізика».**

Загалом, дослідження дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова доповнюють і розширюють існуючі уявлення про ультрахолодні квантові гази взаємодіючих атомів у зовнішніх полях, що **підтверджує фундаментальне теоретичне значення здобутих результатів.** Також, на мою думку, до найбільш вагомних наукових результатів, здобутих в дисертаційній роботі, необхідно віднести отримані фазові діаграми та обчислені кореляційні характеристики ультрахолодних газів атомів у оптичних ґратках. Такі системи можуть слугувати повноцінними квантовими аналогами (універсальними квантовими симуляторами) складних взаємодіючих та сильно корельованих квантових систем багатьох частинок, послідовний опис яких більш класичними методами є неймовірно ускладненим, таких як високотемпературні надпровідники, ізолятори Мотта, твердотільні сполуки, що демонструють унікальні властивості (колосальний магнетоопір, орбітальне та зарядове впорядкування тощо). Таким чином, **результати дисертаційної роботи та розроблені методи опису фізичних властивостей газів мають і вагоме практичне значення.**

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних і надійно апробованих методів теоретичної та обчислювальної фізики, а також підтверджується ретельно проведеними математичними розрахунками, наведеними у тексті. У рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є повністю обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються відповідним числовим аналізом.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи А.Г. Сотнікова фахівців університетів МОН України й інститутів НАН України, таких як: Київський національний університет ім. Т. Шевченка, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Національний університет «Львівська політехніка», Львівський національний університет І. Франка (м. Львів), Інститут фізики конденсованих систем НАН України (м. Львів), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків),

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (м. Харків), Інститут монокристалів НАН України (м. Харків).

По змісту дисертації виникло декілька зауважень здебільшого рекомендаційного характеру:

1) У першому розділі дисертації проводиться огляд основних теоретичних підходів, що використані в дисертаційній роботі. У той же час, у п'ятому розділі роботи побудова мультиорбітальної моделі Габбарда для конкретних сполук оксидів кобальту з перовскітною структурою спирається на обчислення за допомогою ще одного першопринципного підходу — теорії функціоналу електронної густини, за рахунок якої обчислюється зонна структура та хвильові функції Ваньє. Використання цього сучасного підходу для вирішення поставлених задач є цілком обґрунтованим і не підлягає сумніву. Більш того, у відповідних місцях у тексті присутні посилання на огляди та наведено значення параметрів, використаних у числових алгоритмах. Для повноти ж ймовірного огляду або монографії в майбутньому, а також з педагогічної точки зору я рекомендував би додатково навести основні принципи та наближення, які використовуються в теорії функціоналу електронної густини, в якості окремого підрозділу.

2) У дисертаційній роботі показано прояв конденсації екситонів на макроскопічному рівні для кристалів оксидів кобальту. У таких кристалічних структурах низькоенергетичні екситонні збудження мають спін рівний одиниці. Натомість, виникає питання, чи можливі у таких системах деякою мірою більш звичні, спін-синглетні екситонні збудження. Які переваги (або недоліки) з фізичної точки зору можуть мати системи з бозе-конденсатом спін-триплетних екситонів перед системами з когерентним станом екситонів зі спіном рівним нулю?

Наведені зауваження не зменшують наукову вагу та важливість отриманих результатів, а також загальну високу оцінку роботи. Дисертація відмінно структурована і якісно написана. Основні результати опубліковано в 20 статтях, більшість з яких у всесвітньо відомих фізичних журналах. Беззаперечним є особистий внесок дисертанта, що підтверджується як наявністю статей з одноосібним авторством, так і великою кількістю персональних доповідей на конференціях і семінарах. Новизна та наукове значення здобутих результатів не викликають сумнівів, а опубліковані роботи й автореферат повною мірою відображають зміст, висновки і особистий внесок автора дисертаційної роботи. Дисертація А.Г. Сотнікова є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові результати, що вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: послідовно побудовано теоретичні підходи до опису квантових газів у зовнішніх полях із залученням сучасних методів теоретичної та обчислювальної фізики, а також зроблено важливі передбачення для проведення майбутніх експериментів у новітніх квантових системах багатьох частинок.

Враховуючи високу актуальність обраної теми, наукову значимість і новизну отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що 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 дисертаційної роботи, Сотніков Андрій Геннадійович, повною мірою заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.**

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри кафедри фізики ядра
та високих енергій імені О.І. Ахієзера



В.Д. Ходусов

Підпис В.Д. Ходусова ЗАСВІДЧУЮ

