

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Костянтину НЄМЧЕНКУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Рецензія

офіційного рецензента, завідувача кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидата фізико-математичних наук, доцента Рашби Георгія Ілліча на дисертаційну роботу Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультрахолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Головною метою дисертаційної роботи Унуковича В.І. є дослідити термодинамічні властивості ультрахолодних чотирикомпонентних фермі-газів з високими спіновими симетріями в періодичних потенціалах ґраток у термодинамічній границі, тобто для однорідних нескінченних систем, а також для випадків зі скінченною кількістю частинок за наявності зовнішнього гармонічного потенціалу оптичної пастки. Крім того, було поставлене завдання вивчити ефекти, що пов'язані з можливою просторовою анізотропією в амплітудах тунелювання в оптичній ґратці, а також наслідки явного порушення високої спінової симетрії на ефективних моделях опису, енергетичних спектрах та просторових розподілах густини атомів газу в оптичних пастках. Завдяки експериментальній реалізації конденсації Бозе-Ейнштейна (БЕК) та подальшого розвитку методів утримання атомних газів у періодичних оптичних потенціалах, дослідження фермі-систем почали привертати більшу увагу дослідників протягом останніх трьох десятиріч не тільки з теоретичного боку, але з можливістю практичної реалізації. Дослідження цікавих квантових явищ в

системах багатьох тіл (наприклад, БЕК або магнітного впорядкування) вимагають створення спеціальних умов, пов'язаних з охолодженням атомної хмари до температур, нижчих за певну характерну температуру квантового виродження. Ультраохолодні квантові гази, які розглядаються в дисертації, є об'єктом сучасних досліджень в галузі квантових багаточастинкових систем. Пошук нових підходів до експериментальної реалізації вироджених фермі-газів стимулює також інтерес до вивчення низькотемпературних режимів в газах лужноземельних (або подібних до них) атомів, які стають більш доступними завдяки сучасним досягненням у методах охолодження та квантової газової мікроскопії. Це викликає важливі питання щодо вивчення ефектів, які пов'язані з можливою просторовою анізотропією в амплітудах тунелювання в оптичній ґратці, а також наслідків явного порушення високої спінової симетрії на ефективних моделях опису. Зокрема, з ультраохолодними атомами стронцію-87 і ітербію-173 можна реалізувати групи високої симетрії. Центральний об'єкт досліджень рецензованої дисертації – чотирикомпонентна квантова система ферміонних атомів – може бути отримана з ультраохолодними атомами лужноземельних металів стронцію-87 і ітербію-173 шляхом видалення надмірної кількості компонентів із певними проекціями ядерного спіну. Унікальність таких систем полягає в тому, що вони слугують зручною платформою для детального дослідження звичайних систем, таких як сильнокорельовані діелектрики, магнетики, спінові рідини тощо, а також екзотичних станів матерії з високою симетрією.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Унуковича В.І. є, безумовно, **актуальною**.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг загального тексту дисертації складає 127 сторінок, з них основного тексту 103 сторінки. Робота ілюстрована 16 рисунками. Список використаних джерел містить 115 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету та основні задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів, описано методи, які були використані у дослідженнях і особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** викладаються теоретичні засади власного дослідження. Увагу приділено необхідності модифікувати підходи для врахування впливу просторово-періодичних потенціалів і надано огляд основних типів багаточастинкових станів у таких системах. Наведено основні кроки для отримання вихідної моделі Габбарда, яка необхідна для подальшого аналізу. Розглянуто формалізм теорії збурень із застосуванням перетворень Шріффера–Вольфа для випадку сильного зв'язку при отриманні ефективного спінового гамільтоніана, а також особливості застосування числового алгоритму динамічної теорії середнього поля у різних випадках заселення ґратки.

У **другому розділі** здійснюється детальний аналіз ефектів магнітного впорядкування в $SU(4)$ -симетричних фермі-газах за низьких температур у начвертьзаповненій найнижчій зоні оптичної ґратки. Приділено увагу існуванню ефектів геометричної фрустрації у регіоні низьких температур, що породжує складне плакетне покриття оптичної ґратки, на відміну від двопідґраткового покриття за більших значень температур. Також було досліджено розподіл ентропії на частинку для фермі-системи у гармонічній оптичній пастці.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження впливу просторової анізотропії тривимірної кубічної ґратки на низькотемпературні магнітновпорядковані фазові стани. Показано, що у двох граничних випадках анізотропії, ґратка приходить до паралельних площин з квадратною геометрією ґратки або ізотропної кубічної ґратки, у кожній з яких відбуваються магнітні впорядкування за різними сценаріями. Визначено діапазон значень фізичних параметрів залежно від параметра анізотропії ґратки, де обидва типи впорядкувань співіснують.

У **четвертому розділі** теоретичним шляхом отримано ефективні спінові моделі та досліджено їх енергетичні спектри у порівнянні з моделлю Габбарда у різних випадках явного порушення спінової симетрії $SU(4)$. Проаналізовано найнижчі енергетичні стани та ефективні магнітні сталі взаємодії для наступних випадків порушення спінової симетрії в гамільтоніані Габбарда: коли симетрія спінова симетрія $SU(4)$ розбивається на підгрупи симетрії $SU(3) \times U(1)$ або на $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$ за їх амплітудами тунелювання та взаємодії

В цілому дисертаційна робота Унуковича В.І. виконана на високому науковому рівні. Вона є завершеним теоретичним дослідженням, в якому отримані нові результати, що мають важливе наукове і практичне значення.

Висновки за результатами виконання дисертаційної роботи зрозуміло та коректно підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про те, що під час роботи було добре враховано результати сучасних наукових досліджень у галузі тематики рецензованої дисертації. Дисертація є завершеною науковою роботою.

Оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Наукові дослідження у дисертаційній роботі Унуковича В.І. є органічною складовою частиною науково-дослідної роботи з таких держбюджетних тем, які виконувались у Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна:

- «Вплив внутрішніх ступенів вільності частинок на фізичні характеристики квантових систем поблизу фазових переходів», № ДР 0120U102252 (2020–2022 pp.);

- «Магнітні властивості мезоскопічних систем із внутрішніми ступенями вільності», № ДР 0122U001575 (2022–2024 pp.).

Крім того, варто зазначити, що дослідження, що ввійшли до дисертаційної роботи, виконувались в рамках відомчого замовлення Національної академії наук України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за темами:

- «Розвиток методів статистичної фізики та квантової теорії поля для дослідження проблем фізики квантових систем багатьох частинок та індукованої гравітації й калібрувальних полів у теорії (супер)струн і бран» (№ ДР 0121U108722, 2021–2025 pp.).

Дослідження також проводились в рамках науково-дослідного проєкту, що фінансувався за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, за темою «Просторові кореляції та впорядковані фази, обумовлені ефектами взаємодії в ультрахолодних квантових газах» (№ ДР 0120U104963, 2020–2023 pp.).

Частина дисертаційної роботи була виконана за грантової підтримки закордонних дослідницьких організацій за договорами з Українським науково-технічним центром (УНТЦ).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних В.І. Унуковичем під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних і загальновідомих підходів та методів обчислювальної і теоретичної фізики, а саме: метода вторинного квантування, квантовомеханічної теорії збурень з точністю до поправок

другого порядку, динамічної теорії середнього поля, низки алгебраїчних та чисельних методів.

Основні результати дисертації опубліковані в 3 статтях в індексованих наукових журналах та доповідалися на 7 міжнародних і вітчизняних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

Серед отриманих у роботі результатів, на мою думку, необхідно відзначити наступні:

1. Уперше отримано залежності ентропії чотирикомпонентного $SU(4)$ -симетричного фермі-газу від амплітуди локальної взаємодії за різних значень температури в рамках підходу динамічної теорії середнього поля.
2. Уперше досліджено вплив просторової анізотропії оптичної ґратки на магнітні кореляції та отримано фазову діаграму магнітних фаз ультрахолодного $SU(4)$ -симетричного фермі-газу.
3. Уперше отримано та проведено числовий аналіз ефективних спінових моделей для випадків явного порушення спінової симетрії за допомогою перетворень Шріффера-Вольфа з моделі Фермі-Габбарда чотирикомпонентного газу..

Практичне значення одержаних результатів

Результати, що відносяться до фазових станів газів ультрахолодних атомів у зовнішніх полях можуть бути використані у методах охолодження атомарних систем, методах ентропійної інженерії, а також у розробці нових типів універсальних квантових симуляторів. Дослідження квантових атомарних фермі-газів можуть бути застосовані для подальшого експериментального вивчення більш складних твердотільних систем з метою посилення таких ефектів, як високотемпературна надпровідність, орбітальне та магнітне впорядкування тощо, чи для опису систем електронів з орбітальними степенями вільності у твердих тілах.

Таким чином, отримані в дисертації результати допомагають сформулювати розуміння того, наскільки важливим є вивчення фазових станів газів ультрахолодних атомів у зовнішніх полях з точки зору впливу на термодинамічні властивості цих систем. Тому однозначно можна стверджувати, що результати мають значення для подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

Дотримання академічної доброчесності

Під час аналізу дисертаційної роботи, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

У тексті дисертації міститься невелика кількість граматичних помилок, що не впливають на сприйняття змісту роботи. Крім того, виникло декілька питань щодо змістовної складової самого дослідження:

1. У назві дисертаційної роботи явно наведено, що вивчаються системи з високими спіновими симетріями. Проте саме дисертаційне дослідження проводилось з чотирикомпонентними фермі-газами. У чому полягає принциповість обмеження чотирма компонентами та чи можна досліджувати системи з більшою кількістю спінових компонент?

2. У розділах 2 та 3 було описано перехід Фермі рідина-діелектрик Мотта для $SU(4)$ -симетричного випадку для різних геометрій ґратки. Цікаво було дослідити, як різні порушення спінової симетрії, які розглядались у розділі 4, впливають на зазначений перехід.

Загальні висновки щодо дисертаційної роботи

Вважаю, що дисертаційна робота Унуковича В.І. «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультрахолодних фермі-газів з

високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» є актуальною, містить нові достовірні результати, має важливе прикладне й теоретичне значення та є завершеною науковою працею, яка відповідає всім вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої Ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Унукович Владислав Ігорович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувач кафедри теоретичної
фізики імені академіка І.М. Ліфшиця
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна

Георгій РАШБА

Підпис Георгія Рашби засвідчую

Начальник відділу кадрів
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Олена ГРОМИКО

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 17:12:28 31.07.2025

Назва файлу з підписом: рецензія_Рашба_final.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 211.7 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: рецензія_Рашба_final.pdf
Розмір файлу без підпису: 214.3 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ
П.І.Б.: РАШБА ГЕОРГІЙ ІЛЛІЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2592413194
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 17:12:29 31.07.2025
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000851F250106867C05
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Костянтину НЄМЧЕНКУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Рецензія

Офіційного рецензента, кандидата фізико-математичних наук, доцента кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця фізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Єзерської Олени Володимирівни на дисертаційну роботу Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультрахолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» представлену до захисту на здобуття ступеня доктора філософії (напрям 10 – природничі науки, спеціальність 105 – прикладна фізика та наноматеріали)

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Предметом дослідження дисертаційної роботи Унуковича В.І. є вивчення поведінки локально взаємодійного чотирикомпонентного атомарного фермі-газу за ультранизьких температур під впливом термальних флуктуацій, просторової анізотропії оптичної ґратки та порушення спінової симетрії. Задача багатьох фермі частинок двокомпонентного газу є досить відомою та важливою через можливість провести аналогію з взаємодійним газом електронів у твердих тілах. У такому сенсі, розглядання чотирикомпонентного фермі-газу є не тільки підставою для розширення методів на випадки більш різноманітної фізики, але важливо зазначити існування прикладного застосування, як можливої аналогії до електронів з орбітальними та спіновими ступенями вільності.

Для опису чотирикомпонентного фермі-газу в оптичній ґратці дисертантом було обрано модель Фермі-Габбарда, у якій ферміони взаємодіють локально лише в межах одного вузла та тунелюють тільки між сусідніми вузлами ґратки. Така модель є простою у формулюванні, проте розповсюдженою в сучасних дослідженнях багаточастинковою фізики, через

можливість описання та дослідження сильнокорельованих систем, спінових рідин, магнітних упорядкувань, надплинності та надпровідності. Особливо популярною тематикою атомарного газу в оптичних ґратках стала в останні десятиріччя з розвитком методів охолодження атомарних газів та оптичних пасток. За існування експериментальної бази з атомами лужних та лужноземельних металів, як калій та стронцій відповідно, стає можливим використовувати оптичні ґратки як симулятори для вивчення різних теоретичних моделей, як модель Габбарда.

У дисертаційній роботі було проведено кількісні оцінки та отримані значення таких фізичних величин, як густина заселення, параметри порядку, ентропія на частинку, усі з яких практично релевантними для досягнення. З цього можна впевнено стверджувати, що обрана тема дослідження є актуальною.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів з висновками у кінці кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Загальний обсяг складає 127 сторінок, з яких основного тексту 103 сторінки. У роботі проілюстровано 16 рисунків. У список використаних джерел наведено 115 найменувань.

У **вступі** аргументується вибір теми дослідження та визначають мета, об'єкт, предмет, методи дослідження, основні завдання дослідження. Також описано особистий метод здобувача та підсумовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** розглянуто та ретельно пояснено теоретичну базу, яка використовується у дисертаційній роботі. Значну увагу приділено отриманню $SU(4)$ -симетричної моделі Габбарда та виведенню відповідної спінової моделі Гайзенберга за допомогою перетворень Шріффера-Вольфа. Також у цьому розділі було розглянуто числовий алгоритм динамічної теорії середнього поля у різних варіаціях залежно від типу впорядкування на вузлах ґратки.

У **другому розділі** досліджено магнітні впорядкування $SU(4)$ -симетричного фермі-газу за низьких температур у начвертьзаповненій найнижчій зоні у квазідвовимірній оптичній ґратці. Через наявність геометричної фрустрації, у стані діелектрика Мотта за низьких температур утворюються особливий плакетний вид впорядкування на відміну від існуючого за вищих температур двопідґраткового впорядкування. Проведено кількісний аналіз параметрів порядку та значень ентропії залежно від

температури та амплітуди взаємодії, а також отримано розподіл ентропії у гармонічному потенціалі оптичної пастки.

У **третьому розділі** розглянуто вплив просторової анізотропії уздовж обраної кристалографічної вісі тривимірної ґратки з кубічною геометрією на магнітні впорядкування $SU(4)$ -симетричного фермі-газу за низьких температур. Показано суттєву відмінність заселення спіновими проєкціями вузлів ґратки у випадках ґратки з паралельних невзаємодіючих площин та ізотропної кубічної ґратки та досліджено значення фізичних параметрів за яких можливо співіснування фаз. Також отримано розподіли заселення вузлів атомами та намагніченості для оптичної ґратки, яка знаходиться у гармонічному потенціалі.

В **четвертому розділі** було отримано гамільтоніани ефективних спінових моделей Гайзенберга та досліджено їх енергетичні спектри низькоенергетичного стану у різних випадках порушення спінової симетрії $SU(4)$ для ультрахолодного фермі-газу. Було розглянуто випадки порушення симетрії «три на один» та «два на два», у яких формуються відповідні підгрупи різних проєкцій спіну з відмінними значеннями амплітуд тунелювання та взаємодії. Також для кожного випадку порушення спінової симетрії було отримано та проаналізовано просторові розподіли густини спінових компонент.

Зміст, структура та оформлення дисертації відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційне дослідження Унуковича В.І. належить до науково-дослідної роботи, яка виконувалась у Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет, з таких держбюджетних тем: «Вплив внутрішніх ступенів вільності частинок на фізичні характеристики квантових систем поблизу фазових переходів», № ДР 0120U102252 (2020–2022 рр.); «Магнітні властивості мезоскопічних систем із внутрішніми ступенями вільності», № ДР 0122U001575 (2022–2024 рр.).

Також дослідження проводились у рамках відомчого замовлення Національної академії наук України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський

фізико-технічний інститут» за темою «Розвиток методів статистичної фізики та квантової теорії поля для дослідження проблем фізики квантових систем багатьох частинок та індукованої гравітації й калібрувальних полів у теорії (супер)струн і бран» (№ ДР 0121U108722, (2021–2025 pp.) і науково-дослідних проєктів, що фінансувалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, за темами:

- «Просторові кореляції та впорядковані фази, обумовлені ефектами взаємодії в ультрахолодних квантових газах» (№ ДР 0120U104963, 2020–2023 pp.);
- «Новітні теоретичні підходи для всебічного опису корельованих квантових систем багатьох тіл» (№ ДР 0124U004372, 2024–2026 pp.).

Крім того, частину дисертаційної роботи було виконано за грантової підтримки закордонних дослідницьких організацій за наступними проєктними угодами з Українським науково-технічним центром (УНТЦ):

- проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2022”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2022–2023 pp.);
- проєктна угода з УНТЦ № P800 “US–Ukraine Quantum Forum 2023”, грантонадавач – US Office of Naval Research Global (2023 p.);
- проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2023”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2023–2024 pp.).

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

На основі застосованих методів у дисертаційній роботі таких, як: вторинне квантування, динамічна теорія середнього поля, числові методи точної діагоналізації, перетворення Шріффера-Вольфа, можна стверджувати коректність використання теоретичних підходів фізики багатьох частинок. Дивлячись на текст дисертаційної роботи можна відмітити логічну структуру, послідовність та обґрунтованість приведених положень, що свідчить про наявність фахових знань стосовно вивчаємих питань. Висновки лаконічно підсумовують викладений у розділах матеріалу та дають відповідь на поставлені питання в завданнях дослідження.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

За допомогою сучасних методів теоретичної фізики та чисельних розрахунків дисертантом було отримано умови існування різних магнітних упорядкувань $SU(4)$ -симетричного фермі-газу у кубічній оптичній ґратці за різних величин анізотропії ґратки та досліджено магнітні кореляції за низьких температур, разом з умовами можливого співіснування різних магнітних фаз та проведено ентропійний аналіз у випадку квазідвовірної

ґратки. Крім цього, було виведено ефективні спінові гамільтоніани моделі Гайзенберга для різних випадків порушення спінової симетрії чотирикомпонентного фермі-газу холодних атомів, для яких було отримано енергетичні спектри найнижчих власних станів та проаналізовано просторовий розподіл густин атомів в оптичній ґратці.

Результати дисертаційної роботи було опубліковано у 3 міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science та наведено у матеріалах і тезах 7 конференцій.

6. Дотримання академічної доброчесності

Проаналізувавши текст дисертаційної роботи Унуковича В.І., наукових праць та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com), можна впевнено стверджувати, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

З одного боку, отримані результати для чотирикомпонентних ультрахолодних фермі-газів можливо розглядати як опис SU(4)-симетричної моделі Фермі-Габбарда, яка своєю чергою придатна до опису мультиорбітальних систем, у яких існують внутрішні степені вільності чи опису екзотичних станів матерії. З іншого боку, модель розглянуті моделі Габбарда можуть використовуватись у квантових обчисленнях, на прикладі кубітів на основі багаторівневих систем чи для побудови квантових симуляторів. Також слід зазначити, що результати ентропійного розподілу чотирикомпонентного фермі-газу в оптичній пастці можуть бути використані у методах охолодження атомних газів.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

Під час ознайомлення з текстом дисертаційного дослідження виникло декілька наступних запитань:

1. У кінці розділу 1 наведено опис гістерезисної поведінки, хоча в самому тексті гістерезис майже не згадується. За якими параметрами було проведено аналіз гістерезису? Чи існує гістерезисна поведінка між різними магнітними фазами?
2. За текстом до рис. 2.5 дисертації стверджується, що заштрихована ділянка має не фізичні результати через відсутність монотонної

поведінки ентропії. Чому обмеження числового методу залежить від температури при збільшенні амплітуди взаємодії? Чи було обраховано ентропію в антиферромагнітних фазах?

3. У розділі 3 дисертантом було досліджено тільки випадки анізотропії, де система переходить з тривимірної геометрії до квазідвовимірної. У той же час є зворотній випадок, де зі збільшенням параметра анізотропії система переходить до квазіодновимірної геометрії. Чи є цей випадок цікавим для додаткового дослідження?

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультраохолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» є самостійною науковою працею, в якій розглядаються актуальні питання для сучасної фізики багатьох, а результати якою опубліковано у провідних міжнародних виданнях. Тому можна впевнено стверджувати, що дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності «105 – Прикладна фізика та наноматеріали» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. А дисертант, Унукович Владислав Ігорович, заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю «105 – Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри теоретичної фізики
ім. академіка І. М. Ліфшиця
фізичного факультету
Харківського національного університету
ім. В.Н. Каразіна

Олена ЄЗЕРСЬКА

Підпис Олени Єзерської засвідчую
Начальник відділу кадрів
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Олена ГРОМИКО

ЄЗЕРСЬКА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА

Результат перевірки підпису	Підпис вірний
П.І.Б.	ЄЗЕРСЬКА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА
РНОКПП	2094401446
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	12:18:39 31.07.2025
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F04000000BF0ADC01EDDA8606
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Костянтину НЄМЧЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

Офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача відділу надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України Шевченка Сергія Миколайовича на дисертаційну роботу Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультрахолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика і наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки»

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Дисертаційна робота В.І. Унуковича присвячена детальному теоретичному вивченню властивостей газів Фермі-Дірака у просторово-періодичних потенціальних ґратках за ультранизьких температур та фазових переходів і магнітних упорядкувань у таких системах, залежно від властивостей як самого газу, так і оптичних ґраток.

Дослідження квантових газів на теперішній час є однією з найпопулярніших тем квантової фізики багатьох частинок, завдяки експериментальним досягненням у методах охолодження, розвитку оптичних пасток та квантових симуляторів. Ультрахолодні атомні гази у оптичних ґратках є перспективним напрямком дослідження через унікальну можливість експериментально моделювати такі системи як сильнокорельовані діелектрики, магнетики, спінові рідини, екзотичні стани матерії з високою симетрією, ефекти надпровідності.

Для опису системи дисертант використовує важливу та родючу на фізичні явища модель теоретичної квантової фізики — модель Фермі-Габбарда. У свою чергу ця модель була створена Габбардом для опису

властивостей газу корельованими електронами в твердотільних кристалах. Тому, застосування даної моделі для опису взаємодійного фермі-газу з чотирма компонентами спінів є обґрунтованим та доцільним. Іншим важливим фактором є експериментальна можливість корегувати параметри моделі Габбарда за допомогою варіації параметрів оптичної ґратки, як глибина потенціалу чи геометрією ґратки.

Метою дисертаційної роботи було дослідити термодинамічні властивості чотирикомпонентного фермі-газу з високими спіновими симетріями у періодичних ґратках, вивчити ефект впливу порушення просторової симетрії та спінової симетрії на магнітні упорядкування, енергетичні спектри та розподіли густини атомів газу в оптичних пастках. Тому можна стверджувати, що тема дослідження є актуальною.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація являє собою самостійне, завершене та цілісне науково дослідження. Текст дисертації написано науковим стилем мовлення та добре структурований. Робота складається з вступу та 4 розділів, кожен з яких складається з декількох підрозділів та має загальні висновки у кінці кожного розділу. Список використаних джерел містить 115 найменувань.

Перший розділ – це огляд та аналіз літератури за темою дисертації. В ньому наведено вступ у фізичні аспекти опису ультрахолодних газів нейтральних атомів – як такі системи реалізуються на основі оптичних ґраток та як їх описувати теоретично у моделі Габбарда. Описано перетворення Шріффера-Вольфа, який у випадку сильного зв'язку дозволяє отримати ефективну спінову модель Гейзенберга. У розділі також описано як властивості ультрахолодних газів можуть бути описано чисельним рішенням за допомогою динамічної теорії середнього поля. Таким чином, у першому розділі послідовно і акуратно наведено формалізм для аналітичного та чисельного аналізу ультрахолодних газів, які в подальших розділах розглянуто для випадку з чотирма компонентами спінів.

У **другому розділі** лаконічно наведено опис термодинамічних характеристик чотирикомпонентного ультрахолодного фермі-газу в оптичній ґратці. Застосовано модель Габбарда при заповненні зони на одну чверть, що важливо для опису деяких кристалічних матеріалів. Продemonстровано існування фазового переходу метал-діелектрик Мота, а також наявність антиферомагнітної фази, узагальненої фази Нееля, та двопідґраткової антиферомагнітної фази. Аналіз термодинамічних величин дозволяє автору дисертації можливість обговорювати охолодження системи, як за допомогою

ефекту Померанчука, так і за допомогою утримання системи у гармонійній пастці.

Третій розділ присвячено дослідженню спінової моделі Фермі-Габбарда з порушеною просторовою симетрією в оптичних ґратках. Розглянуто випадок ґратки із заповненням вузлів ґратки на одну чверть, тобто з однією частинкою на вузлі. Система була чисельно обрахована за допомогою динамічної теорії середнього поля. Було визначено магнітні фази у стані діелектрика Мотта для ізотропної кубічної ґратки та для ґратки з паралельних незв'язаних площин, коли існують дві антиферромагнітні фази та одна парамагнітна. Отримано фазову діаграму, на якій є зони співіснування різних типів магнітних упорядкувань за низьких температур, обговорюється експериментальна реалізація різних фаз та контрольованих переходів між ними. Розраховано та побудовано просторовий розподіл псевдоспінових компонентів у гармонічному потенціалі для різних значень параметра анізотропії.

У **четвертому розділі** розглянуто випадки порушення спінової симетрії для фермі-газу з чотирма компонентами. У границі сильного зв'язку отримано відповідні ефективні псевдоспінові гамільтоніани, чисельний аналіз яких простіший у порівнянні з гамільтоніаном Габбарда. Зроблено порівняння енергетичних спектрів ефективних моделей та моделі Габбарда для кожного з випадків порушення високої спінової симетрії та наведено просторовий розподіл густини псевдоспінових станів у гармонічному потенціалі.

Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційне дослідження В.І. Унуковича було виконано в Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна в межах науково-дослідної роботи з держбюджетних тем: «Вплив внутрішніх ступенів вільності частинок на фізичні характеристики квантових систем поблизу фазових переходів», № ДР 0120U102252 (2020–2022 рр.); «Магнітні властивості

мезоскопічних систем із внутрішніми ступенями вільності», № ДР 0122U001575 (2022–2024 pp.).

Також, дослідження представлені у дисертаційній роботі здійснювались у рамках замовлення Національної академії наук України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за темою «Розвиток методів статистичної фізики та квантової теорії поля для дослідження проблем фізики квантових систем багатьох частинок та індукованої гравітації й калібрувальних полів у теорії (супер)струн і бран» (№ ДР 0121U108722, 2021–2025 pp.) та в рамках науково-дослідних проєктів, що фінансувались за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, за темами:

- «Просторові кореляції та впорядковані фази, обумовлені ефектами взаємодії в ультрахолодних квантових газах» (№ ДР 0120U104963, 2020–2023 pp.);

- «Новітні теоретичні підходи для всебічного опису корельованих квантових систем багатьох тіл» (№ ДР 0124U004372, 2024–2026 pp.).

Окрема частина дисертаційної роботи була виконана за грантової підтримки закордонних дослідницьких організацій за договорами з Українським науково-технічним центром (УНТЦ):

- проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2022”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2022–2023 pp.);

- проєктна угода з УНТЦ № P800 “US–Ukraine Quantum Forum 2023”, грантонадавач – US Office of Naval Research Global (2023 p.);

- проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2023”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2023–2024 pp.).

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Детально ознайомившись з текстом дисертаційної роботи та публікаціями Унуковича В.І. можна стверджувати, що дослідження відбувалось з коректним використанням фундаментальних підходів та методів багаточастинкової фізики та чисельного аналізу. У дисертаційному дослідженні були застосовані сучасні методи фізики для опису ультрахолодних газів, як метод динамічної теорії середнього поля у його різних варіаціях, та методи чисельного аналізу, як використання арифметично-геометричного середнього для розрахунку інтегралів. Матеріал викладено у доступній формі, а висновки логічно отримано з матеріалу, що свідчить про глибоке розуміння тематики дисертаційної роботи.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

У дисертаційній роботі було використано широкий спектр методів теоретичної фізики, а саме методи вторинного квантування, теорія збурень, перетворення Шріффера–Вольфа та методи динамічної теорії середнього поля. За допомогою наведених методів було досліджено різні магнітні упорядкування фермі-газу в оптичних ґратках за ультранизьких температур залежно від просторової анізотропії кубічної ґратки та знайдено діапазон параметрів моделі Габбарда, для яких можна спостерігати співіснування двох різних антиферромагнітних упорядкувань. Також важливо зазначити, що було отримано ефективні спінові гамільтоніани для різних випадків порушення симетрії, що значно спрощує теоретичний опис системи у режимі сильного зв'язку. Крім того, було досліджено вплив порушення, як просторової симетрії, так і спінової симетрії на просторовий розподіл густини на вузлах ґратки.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 10 наукових праць, серед яких: 3 публікації у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science; 7 праць – у матеріалах і тезах конференцій.

Результати дисертаційної роботи також було представлено дисертантом у рамках доповідді на семінарі нашого відділу 29 травня 2025 року. Співробітники відділу зазначили дуже високий рівень дисертаційної роботи.

6. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com), встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

Важливе значення отриманих дисертантом результатів полягає у отриманих умовах існування магнітних упорядкувань, що можна розглядати як орієнтир для експериментальних реалізацій систем у подальшому дослідженні ультрахолодних газів. У свою чергу, на практиці це може бути використано для отримання нових типів квантових симуляторів, а самі атомарні гази можливо використовувати для опису екзотичних та цікавих

квантово-фізичних ефектів у твердих тілах, як надпровідність, надплинність, магнітні упорядкування тощо.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

При ознайомленні з дисертаційною роботою виникли зауваження та запитання, яким не було достатньою мірою приділено увагу у тексті. До них відносяться такі:

1. В дисертаційній роботі наведені дослідження магнітних фаз для двокомпонентних систем, проте відсутнє порівняння з результатами інших робіт присвячених чотирикомпонентним газам Фермі. Як результати для чотирикомпонентного газу відносяться до раніше вже вивчених випадків газів Фермі у оптичних ґратках з нижчими симетріями $SU(2)$ та $SU(3)$?
2. У розділі 3 до Рис. 3.5(б) відмічено цікавий факт, що на вузлах оптичної ґратки на кінцях плато Мотта за четвертинного заселення може існувати двопідґраткове упорядкування. За наявності лише однієї відповідної точки на графіку густини, чому можна стверджувати стійке існування двопідґраткового упорядкування?
3. Як загально відомо ефект Померанчука було відкрито у минулому сторіччі в експериментах з гелієм-3, де при температурах порядку десятих кельвіна тверда фаза має вищу ентропію ніж рідка фаза. У рамках дисертаційної роботи ж розглядався перехід між магнітними фазами — рідиною Фермі та діелектриком Мотта. Не зовсім зрозуміло чому це явище також носить назву ефекту Померанчука?

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

В дисертації Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультраохолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» вирішується важлива та актуальна задача теоретичного опису термодинамічних властивостей ультраохолодних чотирикомпонентних фермі-газів з високими спіновими симетріями в періодичних потенціальних ґратках. Хочу наголосити, що дисертант кваліфіковано застосовує загальні методи теоретичної фізики, такі як модель Габбарда, метод Монте-Карло, динамічна теорія середнього поля,

квантовомеханічна теорія збурень. Таким чином, дисертаційна робота Унуковича В.І. повністю відповідає спеціальності 105 — «Прикладна фізика і наноматеріали», а її автор Унукович В.І. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 — «Прикладна фізика і наноматеріали» з галузі знань 10 — «Природничі науки».

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу надпровідних
та мезоскопічних структур
Фізико-технічного інституту
низьких температур ім. Б.І. Веркіна
Національної академії наук України

Сергій ШЕВЧЕНКО

ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

Результат перевірки підпису	Підпис вірний
П.І.Б.	ШЕВЧЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ
РНОКПП	2777711417
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	21:13:10 28.07.2025
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F04000000B75AD701DD337806
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Костянтину НЄМЧЕНКУ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

Офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора, головного наукового співробітника Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, академіка НАН України Лева Богдана Івановича на дисертаційну роботу Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультраохолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» представлену до захисту на здобуття ступеня доктора філософії (напрям 10 – природничі науки, спеціальність 105 – прикладна фізика та наноматеріали)

1. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Ультраохолодні атомні гази в просторово періодичних потенціалах є чудовим прикладом детального дослідження звичайних систем, таких як сильнокорельовані діелектрики, магнетики, спінові рідини, а також екзотичних станів матерії з високою симетрією. Головним об'єктом досліджень є чотирикомпонентна квантова система з високими спіновими симетріями та вона може бути отримана з ультраохолодними атомами шляхом видалення надмірної кількості компонентів із певними проєкціями ядерного спіну. Чотири внутрішні стани атомів, що залишаються, можна розглядати як різні кольори, аромати або псевдоспінові компоненти. Експериментальні дослідження показують, що низькотемпературні режими в газах лужноземельних (або подібних до них) атомів стають більш доступними, якщо використовувати новітні техніки лазерного охолодження атомів та методи квантової газової мікроскопії. Це викликає важливі питання щодо того, чи залишаються фази багатьох тіл, характерні для високосиметричних моделей локалізованих спінів, стабільними з включенням процесів стрибків і теплових збуджень. Крім того, для практичних цілей необхідні не тільки якісні, але й кількісні оцінки та вибір оптимальних фізичних параметрів для досягнення конкретних корельованих режимів у квантових системах багатьох тіл.

Для теоретичних досліджень однією з базових моделей у квантовій фізиці багатьох частинок є модель Габбарда, яка досить добре описує явища, які повсюдно поширені в природі. Це найпростіша модель, основною мотивацією створення якої була потреба в способі вирішення поведінки корельованих (на противагу до вільних) електронів у твердих тілах. Досі теоретичні дослідження узагальненої моделі Габбарда для випадків високих спінових симетрій з акцентами на реалізаціях в оптичних ґратках здебільшого зосереджувалися на випадку наполовину заповненої нижньої зони. У той самий час, через

складність відповідного теоретичного аналізу фізика відповідної систем з іншими значеннями заповнення частинками вузлів ґратки є набагато менш вивченою. Наприклад, у випадку великої амплітуди локальної взаємодії порівняно з амплітудою тунелювання та однієї частинки на вузол ґратки високосиметрична модель Габбарда може бути перетворена у відповідну модель Гейзенберга. У межі нульової температури на квадратній ґратці може розвиватися специфічне розташування атомів, яке називають плакетним упорядкуванням. Водночас стверджується, що з урахуванням теплових збуджень, тобто зі збільшенням ентропії, система може зазнати переходу в антиферомагнітний стан зі звичайною двосторонньою структурою антиферомагнітного впорядкування за типом шахової дошки.

Тема запропонованих досліджень представляється актуальною і відповідає поставленій меті – дослідити термодинамічні властивості ультрахолодних чотирикомпонентних фермі-газів з високими спіновими симетріями в періодичних потенціалах ґраток у термодинамічній границі, тобто для однорідних нескінченних систем, а також для газів зі скінченною кількістю частинок за наявності зовнішнього гармонічного потенціалу оптичної пастки; крім того, вивчити ефекти, що пов'язані з можливою просторовою анізотропією в амплітудах тунелювання в оптичній ґратці, а також наслідки явного порушення високої спінової симетрії на ефективних моделях опису, енергетичних спектрах та просторових розподілах густини атомів газу в оптичних пастках.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація присвячена дослідженню низькотемпературних рівноважних властивостей взаємодійних фермі-газів, що знаходяться в просторово-періодичних потенціалах ґраток та мають неперервні високі симетрії в спіновому просторі. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 127 сторінок, з них основного тексту 103 сторінки. Вона складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Робота ілюстрована 16 рисунками. Список використаних джерел містить 115 найменувань.

У **вступі** коротко обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні завдання дослідження, також об'єкт, предмет та методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації. Також приведені відомості про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячено огляду та аналізу літератури за темою дисертації. У цьому розділі розглянуто фізичні аспекти квантових систем багатьох частинок і, зокрема, ультрахолодних газів, до яких розвинуто подальшу методологію теоретичного опису. Увагу приділено необхідності модифікувати підходи для врахування впливу просторово-періодичних потенціалів і надано огляд основних типів багаточастинкових станів у таких системах. Наведено основні кроки для отримання вихідної моделі Габбарда, яка необхідна для аналізу. Розглянуто формалізм теорії збурень із застосуванням перетворень Шріффера–Вольфа для випадку сильного зв'язку, а також особливості опису без застосування теорії збурень за допомогою числового алгоритму динамічної теорії середнього поля.

Другий розділ присвячено детальному аналізу ефектів магнітного впорядкування в $SU(4)$ -симетричних фермі-газах за низьких температур у начвертьзаповненій найнижчій

зоні оптичної ґратки. Приділено увагу принциповій відмінності досліджуваної системи від випадку напівзаповненої зони, де магнітне впорядкування на квадратній або кубічній ґратці не зазнає ефектів геометричної фрустрації, а магнітне впорядкування відбувається за відносно простим двоїдґратковим сценарієм. Система в граничному випадку нульових температур та помірних амплітуд взаємодій проявляє так зване плакетне магнітне впорядкування зі збільшеною елементарною коміркою порівняно з двоїдґратковими типами впорядкування. Проведено кількісний аналіз критичних значень ентропії, що необхідні для досягнення різних типів магнітновпорядкованих станів і розподіл ентропії у гармонічних потенціалах оптичних пасток, що утворюються спеціально налаштованими лазерами.

В **третьому розділі** наведено результати дослідження впливу просторової анізотропії тривимірної кубічної ґратки на низькотемпературні магнітно-впорядковані фазові стани. Показано, що в граничних випадках відокремлених площин з квадратною геометрією ґратки та ізотропною кубічної ґратки може відбуватись магнітне впорядкування за різних сценаріїв. Побудовано просторові розподіли густини атомів і намагніченості в гармонічному потенціалі оптичної пастки.

В **четвертому, останньому розділі** введено ефективні спінові моделі та досліджено енергетичні спектри та термодинамічні характеристики чотирикомпонентних фермі-газів у випадках явного порушення спінової симетрії $SU(4)$. Проаналізовано енергетичні стани та ефективні магнітні сталі взаємодії у випадках, коли чотири взаємодійні спінові компоненти в гамільтоніані Габбарда незалежно утворюють підгрупи симетрії типу «три на один» або «два на два» відповідно до їх амплітуд тунелювання або взаємодії, вивчено поведінку відповідних ефективних моделей Гейзенберга в границі сильної взаємодії. Отримано та проаналізовано просторові розподіли густини спінових компонентів у гармонічній оптичній пастці для кожного випадку явного порушення симетрії.

Перелік використаної літератури включає 115 джерел, додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації. Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму, здійсненому автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційну роботу виконано в Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет. Харківському національному університеті імені В.Н.Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт. Результати досліджень дисертаційної роботи були отримані в межах виконання науково-дослідної роботи з таких держбюджетних тем: «Вплив внутрішніх ступенів вільності частинок на фізичні характеристики квантових систем поблизу фазових переходів», № ДР 0120U102252 (2020–2022 рр.); «Магнітні властивості мезоскопічних систем із внутрішніми ступенями вільності», № ДР 0122U001575 (2022–2024 рр.).

Дослідження, що ввійшли до дисертаційної роботи, виконувались в рамках відомого замовлення Національної академії наук України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут. за темою «Розвиток методів статистичної фізики та квантової теорії поля для дослідження проблем фізики квантових систем багатьох частинок та індукованої гравітації й калібрувальних полів у теорії (супер)струн і бран» (№ ДР 0121U108722,(2021–2025 pp.).

Дослідження також проводились в рамках науково-дослідних проєктів, що фінансувалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, за темами:

– «Просторові кореляції та впорядковані фази, обумовлені ефектами взаємодії в ультрахолодних квантових газах» (№ ДР 0120U104963, 2020–2023 pp.);

– «Новітні теоретичні підходи для всебічного опису корельованих квантових систем багатьох тіл» (№ ДР 0124U004372, 2024–2026 pp.).

Частина дисертаційної роботи була виконана за грантової підтримки закордонних дослідницьких організацій за договорами з Українським науково-технічним центром (УНТЦ):

– проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2022”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2022–2023 pp.);

– проєктна угода з УНТЦ № P800 “US–Ukraine Quantum Forum 2023”, грантонадавач – US Office of Naval Research Global (2023 p.);

– проєктна угода з УНТЦ № 9918 “Magnetism for Ukraine 2023”, грантонадавач – IEEE Magnetic Society (2023–2024 pp.).

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Висловлені положення та рекомендації відзначаються достовірністю. Детальне ознайомлення з текстом наукового дослідження і публікаціями Унуковича В.І. дозволяє стверджувати, що підхід дисертанта до аналізу предмета дослідження є фундаментальним і ґрунтовним. Дисертація має логічну структуру, яка дозволяє розкрити поставлені дослідницькі завдання та досягти поставленої мети. Дисертаційна робота В.І. Унуковича має чітку структуру, послідовність та аргументованість положень дисертації. Були застосовані сучасні методи теоретичної фізики, дослідження, а аналіз отриманих результатів представлено у висновках. Викладення матеріалу проведено в доступній для пересічного читача формі та проведене обґрунтування висновків. Все це свідчить про глибокі фахові знання стосовно питань, що вивчались в дисертаційній роботі. Висновки та практичні рекомендації логічно виходять із викладеного матеріалу та достатньо повно його відображають, дають відповідь на поставлені в роботі мету та завдання дослідження.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 10 наукових праць, серед яких: 3 публікації у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science; 7 праць – у матеріалах і тезах конференцій.

Методологічною основою дослідження є широкий спектр сучасних методів теоретичної фізики використаний в роботі, а саме

– метод вторинного квантування для побудови гамільтоніанів і операторів фізичних величин у термінах операторів народження і знищення частинок;

- квантовомеханічна теорія збурень з точністю до поправок другого порядку за збудженням до гамільтоніана системи;
- перетворення Шріффера–Вольфа для побудови ефективних спінових моделей з гамільтоніана Габбарда;
- динамічна теорія середнього поля;
- числовий метод точної діагоналізації гамільтоніанів у скінченновимірному гільбертовому просторі;
- узагальнення динамічної теорії середнього поля для координатного простору;
- метод арифметично-геометрично середніх при обрахуванні еліптичних інтегралів для густини станів у анізотропній ґратці;
- метод моделювання Монте-Карло при обрахуванні еліптичних інтегралів для густини станів у анізотропній ґратці;
- метод наближення локальної густини для знаходження просторових розподілів фізичних величин у гармонічних потенціалах пасток.

Використання наведених методів дало змогу отримати цілу низку непересічних результатів, а саме:

- Отримано залежності ентропії чотирикомпонентного $SU(4)$ симетричного фермі-газу від амплітуди локальної взаємодії за різних значень температури в рамках підходу динамічної теорії середнього поля.
- Побудовано просторові розподіли густини частинок та густини ентропії в чотирикомпонентному $SU(4)$ -симетричному фермі-газі для випадку зовнішнього гармонічного потенціалу оптичної пастки для нейтральних атомів.
- Отримано фазову діаграму з магнітно-впорядкованими станами для $SU(4)$ -симетричного фермі-газу на кубічній ґратці за допомогою динамічної теорії середнього поля.
- Побудовано залежності критичних температур переходів до магнітно впорядкованих станів від амплітуди тунелювання ферміонів між площинами в анізотропній кубічній ґратці.
- Отримано числові оцінки зон стабільності різних магнітно впорядкованих станів фермі-газів у випадку додаткового зовнішнього потенціалу пастки.
- Застосовано перетворення Шріффера–Вольфа для отримання ефективних спінових моделей у випадках явного порушення спінових симетрій у моделі Фермі–Габбарда з чотирма псевдоспіновими компонентами.
- Проведено числовий аналіз з порівняння енергетичних спектрів моделей Габбарда та Гейзенберга для різних випадків порушення високих спінових симетрій у чотирикомпонентному взаємодійному фермі-газі.
- Побудовано просторові розподіли густини частинок у гармонічному потенціалі оптичної пастки для чотирикомпонентного фермі-газу нейтральних атомів з різними амплітудами взаємодії та тунелювання.

6. Дотримання академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано

в антиплагіатній інтернет-системі (Strikeplagiarism.com), а також рецензій відповідних журналів, встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

7. Практичне значення отриманих результатів.

Результати, що відносяться до фазових станів газів ультрахолодних атомів у зовнішніх полях можуть бути використані при розробці та побудові нових високоточних квантових сенсорів і розробці нових типів універсальних квантових симуляторів. Квантові атомарні гази можуть бути застосовані для точного вивчення більш складних твердотільних систем з метою посилення таких ефектів, як високотемпературна надпровідність, колосальний магнетоопір, орбітальне та магнітне впорядкування. Щодо значення для прикладного застосування, то результати можуть бути корисними, зокрема, для розробки нових експериментів з високоспіновими квантовими газами, де можуть бути використані напрацювання з аналізу ентропійних розподілів для кращого охолодження газів. Самі системи, що експериментально реалізуються з ультрахолодними газами нейтральних атомів у оптичних ґратках, можуть бути використані в створенні нових пристроїв для зберігання та обробки інформації та у квантових обчисленнях.

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

1. Враховуючи обмеження самого підходу динамічної теорії середнього поля, отримані в першому розділі результати необхідно розглядати як приблизні для квазидвовимірних геометрій ґраток, які є основним фокусом в експериментах з холодними атомами. Вкрай важливо проаналізувати магнітні кореляції та термодинамічні величини за допомогою останніх нових теоретичних підходів.
2. Визначена симетрія поставлених задач, що відповідає групі $SU(4)$, дає можливість визначити спінорне представлення, що генерує додаткові інтеграли руху. Наявність таких інтегралів дає змогу записати загальний вигляд розв'язку задачі. Було б цікаво спробувати приступитися до рішень таким математичним апаратом.
3. В роботі показано що виникають зони співіснування двох різних типів магнітних упорядкувань, одне з яких може бути реалізовано в експерименті залежно від початкових умов системи. Це наштовхує на думку, що без методів описання просторово неоднорідних розподілів тут важко обійтися. А це вже методи нерівноважної статистичної термодинаміки. Отримані результати важливі для подальшого вивчення та визначення основного стану за ультранизьких температур за допомогою інших (точніших) теоретичних методів.
4. В дисертаційній роботі під явним порушенням симетрії вважається випадок, коли атоми в станах з різними проєкціями спінів відрізняються за фізичними характеристиками, наприклад амплітудами тунелювання або парної локальної взаємодії в рамках опису моделлю Габбарда. Видається більш доцільним приписати цьому порушенню більш наочну характеристику оскільки амплітуди тунелювання або парна взаємодія залежить в першу чергу від внутрішніх ознак.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

Зміст дисертації засвідчує, що дисертація Унуковича Владислава Ігоровича «Дослідження термодинамічних властивостей та фазових станів ультрахолодних фермі-газів з високими спіновими симетріями в оптичних ґратках» являє собою самостійну завершену наукову працю, в якій представлено авторське розв'язання багатьох актуальних задач теоретичної фізики. Дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності «105 – Прикладна фізика та наноматеріали» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. Поршень академічної доброчесності в дисертації та в наукових працях, у яких було представлено результати дисертації, я не виявив. Надана робота безумовно написана на високому науковому рівні, а її автор, Унукович Владислав Ігорович, заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю «105 – Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент

Доктор фізико-математичних наук,

професор, академік НАН України,

головний науковий співробітник

Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова

Національної академії наук України

Богдан ЛЕВ

ЛЕВ БОГДАН ІВАНОВИЧ

Результат перевірки підпису	Підпис вірний
П.І.Б.	ЛЕВ БОГДАН ІВАНОВИЧ
РНОКПП	1923109897
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	12:41:01 04.08.2025
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F04000000A8E5DC01F0998906
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований