

## **ВИСНОВОК**

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

**Булахова Микити Сергійовича**

**«Роль нелокальної взаємодії в ультрахолодних бозе-газах з урахуванням  
спінових ступенів свободи»**

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

### **1. Оцінка роботи здобувача в процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.**

Здобувач, Булахов Микита Сергійович, виконав в повному обсязі індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана в повному обсязі. Він успішно склав наступні дисципліни:

- складено залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень» (71 бал);
- складено іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів (англійська мова)» (98 бал);
- складено залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» (81 бал);
- складено залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці» (97 бал);
- складено іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (94 бал);
- складено іспит з навчальної дисципліни «Сучасна ядерна фізика та фізика високих енергій (прикладні аспекти, теорія та експеримент)» (95 бал).

Усі заплановані види робіт були виконані вчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

## 2. Обґрунтування вибору теми дослідження

Вже майже три десятиліття вивчення фізичних властивостей квантових бозе-газів є предметом інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень. Такий інтерес обумовлено експериментальною реалізацією конденсації Бозе-Ейнштейна (БЕК) у розріджених атомних газах лужних металів завдяки методам лазерного охолодження та захоплення нейтральних атомів. Тепер ультрахолодні атомні гази забезпечують чудові можливості для вивчення й моделювання різних ефектів і явищ у квантових багаточастинкових системах. Зокрема, ультрахолодні високоспінові гази з БЕК дозволяють проводити дослідження різних магнітних станів і відповідних фазових переходів. Унікальність таких систем полягає в тому, що вони демонструють одночасний прояв надплинних і магнітних властивостей. Перші теоретичні дослідження так званих спінорних конденсатів стимулювалися оптичним захопленням атомів натрію, за якого атоми захоплюються незалежно від орієнтації їх спіну.

Теоретичний опис БЕК зазвичай базується на оригінальній мікроскопічній теорії Боголюбова або нелінійному залежному від часу рівнянні Гросса-Пітаєвського. Обидва підходи застосовні для розріджених слабковзаємодійних бозе газів і описують, відповідно, їх однорідні і неоднорідні стани за нульової температури. Хоча підхід Гросса-Пітаєвського виявився вдалим інструментом у описі неоднорідних структур, що мають відношення до експериментів (наприклад, вихори, солітони, профілі густини і дихальні режими), специфічна мікроскопічна теорія Боголюбова має більш сувору математичну постановку і добре виправдана з точки зору статистичної фізики. Остання також узагальнена для вивчення рівноважних просторовонеоднорідних станів (періодичних структур), виведення кінетичних рівнянь для функції розподілу квазічастинок і густини конденсату, а також гідродинамічного рівняння надплинної рідини. Крім того, паралельно з бозонною версією Хартрі-Фока-Боголюбова та Ф-орієнтованими наближеннями були розроблені інші схеми для опису фази БЕК, що не пов'язані з формалізмом  $s$ -чисел.

Експерименти підтвердили ряд передбачень, зроблених теорією слабковзаємодійного бозе-газу з конденсатом, розробленою Боголюбовим. Це була чи не перша теорія, де при описі ефектів взаємодії необхідно було по суті відмовитись від методів стандартного термодинамічного пертурбативного підходу через появу розбіжних доданків у ряді термодинамічної теорії збурень за малих значень імпульсу. Водночас теорія Боголюбова містить неаналітичність у взаємодії, яка не дозволяє здійснювати послідовне розкладення за взаємодією, як у стандартному термодинамічному пертурбативному підході. Ще одним слабким місцем є те, що вона справедлива за надзвичайно низької температури, близької до абсолютного нуля.

У фізиці холодних атомних газів широко використовується наближення довжини  $s$ -розсіювання, коли Фур'є-образ реальної міжатомної взаємодії замінюється сталою величиною. Незважаючи на те, що це наближення є дійсно потужним інструментом для опису ефектів взаємодії, воно має низку слабких місць. Зокрема, під час спроби обчислити хімічний потенціал або енергію основного стану у рамках підходу Боголюбова з урахуванням відповідних доданків з квадратичної частини усіченого гамільтоніана виникають розбіжності відповідних інтегралів при великих імпульсах. Для усунення цієї розбіжності необхідна певна процедура перенормування, застосована до членів другого порядку за операторами створення і знищення та членів вищого порядку також. Виникнення розбіжності пов'язане з тим, що наближення довжини розсіювання нехтує нелокальним характером міжчастинкової взаємодії, який, тим не менш, завжди їй притаманний. Зокрема, для спінових конденсатів це наближення не відтворює повну структуру одночастинкового спектра збудження. Роль нелокальної взаємодії у фізиці ультрахолодних бозе- і фермі-газів нещодавно обговорювалася у науковій періодиці. Крім того, застосовність наближення довжини  $s$ -розсіювання обмежена вибором потенціалу взаємодії. Дійсно, якщо взаємодія  $V \propto r^{-n}$ , тоді для  $n > 3$  це наближення підходить.

Зазвичай теоретичний опис спінових конденсатів базується на гамільтоніані взаємодії з константами зв'язку, параметризованими  $s$ -хвильовими

довжинами розсіювання. У цьому випадку попарний багаточастинковий гамільтоніан атомів зі спіном 1 визначається двома довжинами розсіювання  $a_0$  і  $a_2$ , що відповідають зіткненням двох атомів із загальним спіном  $S = 0, 2$ . Таким чином, він містить два члени взаємодії: перший не залежить від операторів спіну, а другий член є білінійним щодо них. З урахуванням лінійного і квадратичного ефекту Зеемана цей гамільтоніан породжує феромагнітний, квадрупольний (полярий), парамагнітний (антиферомагнітний) стани та стан з порушеною осью симетрії. На відміну від інших магнітних станів, стан з порушеною осью симетрії реалізується лише для системи, в якій має місце лінійний і квадратичний ефекти Зеемана водночас. Для конкретних режимів магнітних полів це було досліджено як теоретично, так і експериментально.

Слід звернути увагу, що більшість теоретичних досліджень були зосереджені на температурному режимі, значно нижчому за перехід до стану з БЕК, а окіл самої температури переходу в слабковзаємодійних бозе-газах набагато менш вивчений. Зокрема, існуючі теоретичні підходи не дають однозначної відповіді на основні питання, наприклад: як критична температура залежить від амплітуди потенціалу взаємодії або як розвиваються термодинамічні величини вище температури переходу в порівнянні з ідеальними бозе-газами.

**Мета дослідження** – дослідити вплив нелокальності взаємодії на термодинамічні характеристики слабковзаємодійного бозе-газу як у верхньому околі температури переходу (вище, але близько до неї) до стану з БЕК, так і в стані з БЕК за нульової температури; крім того, дослідити вплив нелокальності взаємодії на ефекти, пов'язані зі спіном, а також на структуру спектру одночастинкових збуджень слабковзаємодійного бозе-газу атомів з повним нульовим або одиничним спіном в стані з БЕК за нульової температури.

**Завдання дослідження:**

— побудувати термодинаміку слабковзаємодійного бозе-газу для верхнього околу температури переходу в стан з БЕК, загалом вважаючи взаємодію нелокальною;

- порівняти за припущення локальної та нелокальної взаємодій температурні залежності термодинамічних величин: тиску, хімічного потенціалу, ентропії і теплоємності за сталого об'єму --- котрі характеризують слабковзаємодійний бозе-газ у верхньому околі температури переходу в стан з БЕК;
- проаналізувати аналітично і чисельно спектр одночастинкових збуджень і термодинамічні величини: хімічний потенціал, густину частинок в конденсаті і густину термодинамічного потенціалу --- які характеризують слабковзаємодійний бозе-газ атомів з повним спіном нуль в стані з БЕК за нульової температури, вважаючи взаємодію нелокальною;
- з'ясувати вплив різних модельних потенціалів взаємодії на структуру спектра одночастинкових збуджень і термодинамічні характеристики слабковзаємодійного бозе-газу атомів з повним нульовим спіном в стані з БЕК за нульової температури;
- побудувати, вважаючи взаємодію нелокальною, гамільтоніан слабковзаємодійного бозе-газу атомів з повним спіном один у зовнішньому магнітному полі за нульової температури, який би повною мірою враховував внесок від індукованих спіном атома ступенів свободи: власне спінових і квадрупольних;
- отримати вектори всіх можливих магнітних станів і відповідні залежності термодинамічних величин: хімічного потенціалу, густини термодинамічного потенціалу та намагніченості --- що характеризують слабковзаємодійний бозе-газ атомів з повним одиничним спіном у зовнішньому магнітному полі в стані з БЕК за нульової температури, котрий описується гамільтоніаном, отриманим в попередній позиції;
- дослідити структуру гілок спектра одночастинкових збуджень в стані з порушеною осьовою симетрією й, особливо, вплив нелокальності взаємодії на неї;

— встановити умови стабільності знайдених магнітних станів і значень параметрів зовнішнього магнітного поля, за яких можливий перехід із одного магнітного стану в інший;

— побудувати діаграму магнітних станів слабковзаємодійного бозе-газу атомів з повним спіном один у зовнішньому магнітному полі в стані з БЕК за нульової температури, спираючись на результат, отриманий в попередній позиції.

**Об'єкт дослідження** --- слабковзаємодійний бозе-газ атомів з повним спіном нуль або один як у верхньому околі температури переходу в стан з БЕК, так і в стані з БЕК за нульової температури.

**Предмет дослідження** – вплив нелокальності взаємодії на термодинамічні характеристики слабковзаємодійного бозе-газу як у верхньому околі температури переходу в стан із БЕК, так і в стані з БЕК за нульової температури; окремо, вплив нелокальності взаємодії на ефекти, пов'язані зі спіном, а також на структуру спектру одночастинкових збуджень слабковзаємодійного бозе-газу атомів з повним нульовим або одиничним спіном у стані з БЕК за нульової температури.

**Методи дослідження:**

- вторинне квантування для побудови гамільтоніанів і операторів термодинамічних величин, що характеризують досліджувані бозе-системи;
- термодинамічна теорія збурень для побудови термодинаміки слабковзаємодійного бозе-газу в верхньому околі температури переходу в стан з БЕК;
- теорема Віка-Блоха-Домінісіса для обчислення поправок в рамках термодинамічної теорії збурень;
- теорія Боголюбова слабковзаємодійного бозе-газу в стані з БЕК для опису відповідних систем з нульовим і одиничним повним спіном атомів;
- канонічні перетворення Боголюбова для діагоналізації гамільтоніану, що описує слабковзаємодійний бозе-газ у стані з БЕК, і здобуття спектрів одночастинкових збуджень;

- низка алгебраїчних методів: часткове диференціювання, інтегрування, обчислення визначників матриць, розкладання функцій в ряд Тейлора, пошук власних значень і векторів матриці, метод простої ітерації для пошуку розв'язку системи нелінійних рівнянь і поправок до величин в рамках термодинамічної теорії збурень;
- низка чисельних методів: чисельне інтегрування з використанням алгоритму Гауса-Кронрода; чисельне диференціювання за двоточковим алгоритмом.

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

Дисертаційну роботу виконано в Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт. Результати досліджень дисертаційної роботи були здобуті 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 відомчого замовлення Національної академії наук України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за темами:

- «Дослідження класичних і квантових симетрій у теоретико-польових та струнних моделях та проблем статистичної механіки конденсованих середовищ» (№ ДР 0116U007065, 2016—2020 рр.);
- «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 рр.).

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 рр.).

#### **4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна**

Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна полягає в наступному:

1. застосовано термодинамічну теорію збурень для обчислення поправок першого й другого порядку за взаємодією до термодинамічних величин: тиску, хімічного потенціалу, ентропії й теплоємності за сталого об'єму — котрі характеризують слабковзаємодійний бозе-газ атомів із повним нульовим спіном у верхньому околі температури переходу в стан з БЕК;
2. вдосконалено алгоритм обчислення середніх за теоремою Віка–Блоха–Домінісіса за допомогою введення понять матриці й визначника Віка;
3. показано, що вплив нелокальності взаємодії на характеристики слабковзаємодійного бозе-газу атомів із повним нульовим спіном у верхньому околі температури переходу в стан із БЕК незначний, а, отже, припущення контактності взаємодії під час опису зазначеної системи є достатнім;
4. для слабковзаємодійного бозе-газу атомів із повним нульовим спіном у стані з БЕК розв'язана система рівнянь, що визначає хімічний потенціал і густину частинок конденсату за нульової температури, з урахуванням внеску квадратичних за операторами народження і знищення доданків та використанням низки модельних потенціалів нелокальної взаємодії;
5. показано, що внесок квадратичних доданків, згаданих вище, може бути такий самий за порядком величини, як і тих доданків, які походять з  $c$ -числової частини гамільтоніану;



6. продемонстровано, що внесок квадратичних членів у хімічний потенціал призводить, загалом, до енергетичної щілини в одночастинковому енергетичному спектрі збуджень;

7. знайдено й досліджено новий режим стану з порушеною осьовою симетрією слабковзаємодійного бозе-газу атомів із повним одиничним спіном;

8. побудовано для згаданого режиму діаграму магнітних станів, яка заснована на їхній намагніченості;

в рамках теорії збурень для магнітного стану БЕК із порушеною осьовою симетрією в слабковзаємодійному бозе-газі атомів із повним одиничним спіном отримано енергетичний спектр одночастинкових збуджень за нульової температури й з урахуванням поправок, що спричинені нелокальністю взаємодії.

## **5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Булаховим М.С., під час проведення досліджень за темою дисертаційної роботи забезпечується використанням фундаментальних підходів і методів теоретичної фізики. Отримані результати та зроблені висновки не суперечать сучасним науковим теоріям та положенням та узгоджуються з відомими результатами.

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

## **6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.**

Передусім отримані результати, як можна зрозуміти з теми дисертації, допомагають сформуванню розуміння того, наскільки значною є роль нелокальної взаємодії з точки зору впливу на фізичні властивості ультрахолодного бозе-газу. Зокрема, деякі характеристики однієї й тієї ж бозе-системи залежно від того, чи знаходиться вона в стані з БЕК, чи ні, можуть як досить суттєво змінювати свою теоретично передбачувану поведінку, так і майже не зазнавати якісних змін унаслідок нелокальності взаємодії, відповідно. Вочевидь, такий факт є важливим

не тільки під час планування експериментальних досліджень, а й під час тлумачення їхніх результатів.

Окремо слід звернути увагу на вдосконалення алгоритму підрахунку середніх за теоремою Віка-Блоха-Домінісіса. Цей результат стане в нагоді будь-кому, хто стикнеться з необхідністю підрахунку середніх за згаданою теоремою. Саме тому таке вдосконалення має стати бажаним доповненням до курсу кінетичної теорії газоподібних систем, фізики систем багатьох частинок тощо, які викладаються студентам відповідних спеціальностей.

Підґрунтям для подальших теоретичних й експериментальних досліджень також можуть стати такі питання: експериментальне підтвердження передбаченого режиму стану з порушеною осью симетрією, щілин в отриманих спектрах одночастинкових збуджень; подальші дослідження системи рівнянь, яка визначає хімічний потенціал і густину частинок конденсату слабковзаємодійного бозе-газу, а також інших термодинамічних характеристик (ентропії, питомої теплоємності за сталого об'єму тощо) за ненульової температури.

Загалом, результати роботи є корисними для вивчення таких макроскопічних явищ у квантових системах, як: надплинність, надпровідність, надплинний кристал тощо – оскільки явище БЕК стоїть за ними.

## **7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, серед яких 3 статті у виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 7 тез доповідей на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

*Наукові праці в періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science:*

1. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Re-examining the quadratic approximation in theory of a weakly interacting Bose gas with condensate: the role of nonlocal interaction potentials. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2018. Vol. 51. P. 205302. DOI: 10.1088/1361-6455/aae061 (Q2 (2018))

*Особистий внесок здобувача: написав чисельний алгоритм в середовищі розробки для розв'язку системи рівнянь, що визначає хімічний потенціал і густину частинок конденсату, та провів наступний чисельний аналіз термодинамічних величин, які характеризують систему, для всіх модельних нелокальних потенціалів взаємодії.*

2. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Thermodynamics of a weakly interacting Bose gas above the transition temperature. *Phys. Scr.* 2021. Vol. 96. P. 045401. DOI: 10.1088/1402-4896/abdcf5 (Q2 (2021))

*Особистий внесок здобувача: вдосконалив алгоритм обчислення середніх за теоремою Віка-Блоха-Домінісіса, отримав поправки за взаємодією до всіх обговорюваних термодинамічних величин, розробив відповідний чисельний алгоритм в середовищі розробки і виконав наступний чисельний аналіз цих поправок.*

3. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., and Slyusarenko Yu.V. Broken-axisymmetry state and magnetic state diagram of spin-1 condensate through the prism of quadrupole degrees of freedom. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2022. Vol. 55 P. 405003. DOI: 10.1088/1751-8121/ac9098 (Q2 (2022))

*Особистий внесок здобувача: розв'язав аналітично рівняння, що визначає вектори магнітних станів і відповідні хімічні потенціали; знайшов і дослідив структуру спектру одночастинкових збуджень в стані з порушеною осьовою симетрією; встановив умови стабільності магнітних станів і рівняння сепаратрис; побудував діаграми магнітних станів для усіх трьох режимів стану з порушеною симетрією.*

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Quadratic approximation in theory of a weakly interacting Bose gas with condensate: the role of non-local interaction potentials. *8th International Conference «Physics of Liquid Matter: Modern Problems»*: Abstracts (May 18 – 22, Kyiv, Ukraine, 2018, очна). Kyiv, 2018. P. 73.

2. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Quadratic approximation in theory of a weakly interacting Bose gas with condensate: the role of non-local interaction potentials. *IX International Conference for Professionals and Young Scientists «Low Temperature Physics»*: Conference Program and Book of Abstract (June 4 – 8, Kharkiv, Ukraine, 2018, очна). Kharkiv, 2018. P. 189.

3. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Role of nonlocal interaction in theory of a weakly nonideal Bose gas with condensate. *The 5th Conference «Statistical Physics: Modern Trends and Applications»*: Program and Abstracts (July 3-6, Lviv, Ukraine, 2019, очна). Lviv, 2019. P. 95.

4. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Sotnikov A.G. Thermodynamics of a weakly interacting Bose gas above the transition temperature. *International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020»*: Conference Program and Book of Abstract (June 8 – 14, Kharkiv, Ukraine, 2020, заочна). Kharkiv, 2020. P. 169.

5. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Thermodynamics of a weakly interacting Bose gas above the transition temperature. 735. *WE-Heraeus-Seminar «Exploring Quantum Many-Body Physics with Ultracold Atoms and Molecules»*: Booklet with abstracts (December 14 – 18, Bad Honnef, Germany, 2020, заочна). Bad Honnef, 2020. P. 61.

6. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Slyusarenko Yu.V. Brokenaxisymmetry state and phase diagram of spin-1 condensate through the prism of quadrupole degrees of freedom. *Всеукраїнська конференція наукових*

дослідників: тези доповідей (19 – 25 вересня, Львів, Україна, 2021, очна) Львів, 2021. 188 с.

7. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Slyusarenko Yu.V. Brokenaxisymmetry state and phase diagram of spin-1 condensate through the prism of quadrupole degrees of freedom. *III International Advanced Study «Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics»*: Book of Abstract (June 5 – 11, Kharkiv, Ukraine, 2023, заочна) Kharkiv, 2023. P. 186.

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

### **8. 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.

### **9. Апробація матеріалів дисертації.**

Результати проведених досліджень представлялись на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях у формі доповідей, за результатами яких опубліковано матеріали наукових конференцій:

1. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Quadratic approximation in theory of a weakly interacting bose gas with condensate: the role of non-local interaction potentials. *8th International Conference «Physics of Liquid Matter: Modern Problems»*: Abstracts (May 18 – 22, Kyiv, Ukraine, 2018, очна). Kyiv, 2018. P. 73.

2. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Quadratic approximation in theory of a weakly interacting bose gas with condensate: the role of non-local interaction potentials. *IX International Conference for Professionals and Young Scientists «Low Temperature Physics»*:

Conference Program and Book of Abstract (June 4 – 8, Kharkiv, Ukraine, 2018, очна). Kharkiv, 2018. P. 189.

3. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Peletminskii S.V., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Role of nonlocal interaction in theory of a weakly nonideal Bose gas with condensate. *The 5th Conference «Statistical Physics: Modern Trends and Applications»*: Program and Abstracts (July 3-6, Lviv, Ukraine, 2019, очна). Lviv, 2019. P. 95.

4. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Sotnikov A.G. Thermodynamics of a weakly interacting Bose gas above the transition temperature. *International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020»*: Conference Program and Book of Abstract (June 8 – 14, Kharkiv, Ukraine, 2020, заочна). Kharkiv, 2020. P. 169.

5. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., Slyusarenko Yu.V., and Sotnikov A.G. Thermodynamics of a weakly interacting Bose gas above the transition temperature. 735. *WE-Heraeus-Seminar «Exploring Quantum Many-Body Physics with Ultracold Atoms and Molecules»*: Booklet with abstracts (December 14 – 18, Bad Honnef, Germany, 2020, заочна). Bad Honnef, 2020. P. 61.

6. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Slyusarenko Yu.V. Brokenaxisymmetry state and phase diagram of spin-1 condensate through the prism of quadrupole degrees of freedom. *Всеукраїнська конференція наукових дослідників: тези доповідей* (19 – 25 вересня, Львів, Україна, 2021, очна) Львів, 2021. 188 с.

7. **Bulakhov M.S.**, Peletminskii A.S., and Slyusarenko Yu.V. Brokenaxisymmetry state and phase diagram of spin-1 condensate through the prism of quadrupole degrees of freedom. *III International Advanced Study «Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics»*: Book of Abstract (June 5 – 11, Kharkiv, Ukraine, 2023, заочна) Kharkiv, 2023. P. 186.

## 10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності в доступній для сприйняття формі. Дисертація написана науковою мовою, стиль роботи

відповідає стилю науково-дослідницьких публікацій експериментального спрямування, під час викладання матеріалу застосовано сучасну наукову термінологію. 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» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

#### **11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, з якої вона подається до захисту.**

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Булахова М.С. «Роль нелокальної взаємодії в ультрахолодних бозе-газах з урахуванням спінових ступенів свободи» відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

#### **12. Результат обговорення та проведення дисертації. Рекомендація дисертації до захисту.**

Здобувач представив основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій навчально-наукового інституту «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу № 2 розширеного засіданні кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій від 14 вересня 2023 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. На даному засіданні були присутні 15 співробітників із різних наукових та навчальних установ України, з яких 5 докторів наук, 8 кандидатів наук і 1 PhD. Булахову М.С. було задано 8 питань, на які він надав вичерпні відповіді. Також виступили 3

науковця, які позитивно відізначили про дисертаційне дослідження Булахова М.С.

У рамках цього розширеного засідання було ухвалено одноголосно (9 голосів) рекомендувати дисертаційну роботу Булахова Микити Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Доктор технічних наук, професор,  
в.о. завідувача кафедри матеріалів  
реакторобудування та фізичних  
технологій  
Харківського національного  
університету імені В.Н. Каразіна



Сергій ЛИТОВЧЕНКО