

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
докторці фізико-математичних наук,
старшій науковій співробітниці,
зав. відділу теорії нелінійних процесів в
конденсованих середовищах
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
Ларисі БРИЖИК

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

Члена-кореспондента НАН України, доктора фізико-математичних наук, старшого дослідника, провідного наукового співробітника відділу електродинаміки високих енергій у речовині ННЦ ХФТІ НАН України,
Кирилліна Ігоря Володимировича
на дисертацію Карпенка Владислава Олександровича
на тему: «**Фазові переходи у щільних системах взаємодіючих бозе-частинок**»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань «10 Природничі науки»
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія»

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота присвячена дослідженню фазових переходів і термодинамічних властивостей систем взаємодіючих бозонів, що складаються з частинок і античастинок. Як приклад розглядаються системи π -мезонів, які виступають природною моделлю для вивчення сильно взаємодіючої матерії при високих густинах і температурах. **Актуальність** дослідження обумовлена тим, що знання фазової структури мезонних систем при скінченних температурах та ізоспінових густинах є вирішальним для розуміння широкого кола явищ від зіткнень ядер до бозонних, піонних, нейтронних зірок. Ця область є важливою частиною сучасних активних досліджень гарячої та щільної адронної речовини.

2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості / достовірності положень, що в ній сформульовані

Матеріал, наведений у дисертаційній роботі, добре структуровано та викладено послідовно. Загальний обсяг роботи становить 143 сторінки. У **першому** розділі розроблено аналітичний формалізм моделі середнього поля для системи частинок і античастинок із фіксованою ізоспіновою густиною. Розгляд проведено для системи піонів. Визначено вирази для тиску, хімічного потенціалу, густини енергії та вільної енергії через інтеграли від функції розподілу Бозе-Айнштейна. Числові

розрахунки показали такі залежності густини числа частинок, енергії та теплоємності від температури, що відповідають існуванню фазового переходу другого роду. **Другий** розділ присвячений дослідженню фазових переходів за різної інтенсивності взаємодії. Відштовхування між частинками було фіксованим, але притягання між частинками, яке параметризувалося безрозмірним параметром κ , змінюється від нуля до деякого надкритичного значення ($\kappa > 1$). Показано, що при $\kappa \leq 1$ лише π^- компонента системи може утворювати конденсат Бозе-Айнштейна, а π^+ компонента перебуває в тепловій фазі для всіх температур. Обговорюється два підходи опису системи: через канонічний ансамбль (з фіксованим числом частинок) та великий канонічний ансамбль (з фіксованим хімічним потенціалом). Показано, що великий канонічний ансамбль є непридатним для опису багатокомпонентної системи у фазі конденсату, навіть якщо тільки один з компонентів перебуває в конденсаті. У **третьому** розділі вивчаються фазові діаграми системи бозонних частинок і античастинок. Розглядається взаємодіюча система частинок і античастинок, бозонна система зі змінною ізоспіновою (зарядовою) густиною і скінченною температурою. Для отримання фазових діаграм розраховано залежність тиску від ізоспінової густини для різних значень температури. **Четвертий** розділ присвячено розгляду Скірма-подібної моделі, в якій середнє поле включає також залежність від густини заряду частинок. Як і у попередніх розділах, розгляд моделі стартує від декомпозиції вільної енергії системи на вільну і взаємодіючу частини, до якої тепер додатково включається компонента, відповідальна за електричну взаємодію між частинками системи. Автор показує, що за умови фіксованої густини заряду електрична взаємодія призводить тільки до паралельного зсуву хімічного потенціалу, вільної енергії та тиску. З іншого боку, залежності густини частинок від заряду лишаються такими ж, як і в системі без електричної взаємодії.

Обґрунтованість та достовірність результатів підтверджується тим, що вони ґрунтуються на фізично розумних та загально прийнятих наближеннях, уявленнях про взаємодію кварків та інших частинок у зіткненнях при високих енергіях. Застосовувані автором методи та наближення є типовими для сучасної фізики високих енергій та конденсованих систем з кореляціями. Результати дисертації пройшли апробацію на наукових семінарах та конференціях, включаючи конференцію молодих вчених «Problems of Theoretical Physics». Це свідчить про високий рівень наукової комунікації дисертанта та визнання результатів дослідження науковою спільнотою.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Дисертаційне дослідження містить низку **нових** наукових результатів. Зокрема, вперше показано, що в системі яка складається з бозе-частинок та античастинок, і в якій ізоспінова густина не дорівнює нулю за умови «слабкого» притягання завжди існує бозе-айнштейнівський конденсат в температурному інтервалі

$0 \leq T \leq T_c$, який є результатом фазового переходу другого роду в системі, що відбувається при температурі T_c , а густина конденсату є параметром порядку, а також, що в бозе-системі може виникнути фазовий перехід першого роду для достатньо сильного притягання між частинками, утворюючи бозе-конденсат.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

В дисертації В.О. Карпенка розроблено самозгоджену термодинамічну модель середнього поля для системи взаємодіючих π -мезонів з урахуванням відштовхування та притягання. Ця модель дозволяє описувати як процес бозе-конденсації, так і фазові переходи типу «рідина-газ». Показано наявність в модельній системі з комбінації різного виду піонів наявність фазових переходів, які можуть мати місце лише для однієї з компонент. Обговорено межі застосовності канонічного і великого канонічного ансамблів для опису вказаної системи. Оцінено вплив електричної взаємодії на термодинамічні характеристики системи. Це не тільки збагачує теоретичні знання про системи взаємодіючих бозе-частинок та античастинок, але й розширює коло теоретичних підходів до інтерпретації та проведення нових експериментів з дослідження фундаментальних фізичних властивостей матерії на прискорювачах заряджених частинок і атомних ядер.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

На основі представленої в дисертації інформації можна зробити наступні висновки щодо повноти викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях здобувача: опубліковано 5 наукових статей за темою дисертації, серед них 3 статті у реферованих наукових виданнях України (з них одна стаття у виданні, індексованому в Scopus), 2 статті у закордонних наукових виданнях, індексованих в Scopus (Q1). Публікації прямо пов'язані з темою дисертації та розкривають її зміст. Положення і висновки дисертації обґрунтовані на основі особистих досліджень автора і відображені в його основних публікаціях. Наукові публікації відповідають вимогам п. 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р, оскільки включають необхідну кількість статей у фахових виданнях України та виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах.

Таким чином, можна зробити висновок, що наукові положення, висновки та результати дисертації **повно викладені** в опублікованих працях здобувача, які відповідають встановленим вимогам.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

На основі тексту дисертації можна виділити наступні дискусійні положення та зауваження:

1) У вступі наведено два об'єкти дослідження, а предмет дослідження не сформульовано. Краще було б визначити предметом дослідження те, що вказано як другий об'єкт дослідження.

2) При розгляді системи взаємодіючих піонів знехтувано наявністю нейтральних піонів. Слушно було б навести в дисертації аналіз того, як би змінилися результати при врахуванні нейтральних піонів.

3) Середнє поле, яке введено у розділі 1 роботи, представляється сумою лінійного та квадратичного доданків по повній густині числа частинок n . Але в цьому розділі відсутній аналіз того, як може вплинути на результати врахування інших ступенів n або залежність середнього поля від густини ізоспіну.

4) У розділі 4 розширено Скірма-подібну модель взаємодії піонів. Це зроблено шляхом включення до загальної густини вільної енергії компоненти, відповідальної за електричну взаємодію. При цьому залежність від густини заряду в системі обрано як квадратичну. Бракує детального аналізу потенційних обмежень та недоліків запропонованого підходу та аналізу ефектів, які можуть спостерігатися при відмінності залежності від квадратичної.

5) В переліку джерел посилання не у всіх статей вказано сторінки, на яких вони опубліковані, що ускладнює пошук цих джерел (див., наприклад, [13, 20]), у деяких статей назви записані з несуттєвими помилками (див., наприклад, [20, 35]).

6) У тексті присутні деякі стилістичні неточності та граматичні помилки. У тому числі є помилки в ініціалах та прізвищах («Н.Н. Боголюбов» замість «М.М. Боголюбов», «Бозе-Айнштайнайншта» замість «Бозе-Айнштайна»). Замість терміну «розділ» в багатьох місцях тексту вказана «секція». Швидкість світла у вакуумі в одних місцях дисертації дорівнює одиниці, а в інших не дорівнює (« $m = 139 \text{ MeV}$ », « $m = 139 \text{ MeV}/c^2$ »).

Хочеться також висловити побажання на майбутнє. Матеріал дисертації в основному (за єдиним виключенням) доповідався лише на вітчизняних конференціях та семінарах. Оскільки результати можуть бути використані для аналізу результатів експериментів на великих прискорювачах, було б дуже добре, щоб результати роботи були представлені також на закордонних конференціях, де з ними могли б ознайомитися спеціалісти, що працюють у світових прискорювальних центрах.

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку роботи, не зменшують вагомості та цінності отриманих при її виконанні наукових та практичних результатів.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертація Владислава Олександровича Карпенка виконана відповідно до вимог, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня

2017 р. № 40. Структура роботи відповідає стандартам, включаючи всі необхідні розділи: вступ, огляд літератури, основну частину, висновки, список використаних джерел та додатки. Оформлення дисертації в основному дотримується встановлених норм, включаючи стиль представлення матеріалу, що є науково коректним і логічним.

Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача, що підтверджується глибиною аналізу та новизною запропонованих підходів і висновків. Владислав Олександрович Карпенко продемонстрував здатність самостійно виконувати наукові дослідження високого рівня.

Аналіз тексту дисертації та супутніх наукових публікацій не виявив порушень академічної доброчесності. Оригінальність дослідження підтверджується новизною отриманих результатів. Таким чином, можна стверджувати, що дисертаційна робота відповідає усім вимогам щодо академічної доброчесності.

Загалом, дисертація повністю відповідає встановленим вимогам і заслуговує на позитивну оцінку.

8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Владислава Олександровича Карпенка є вагомим внеском у розвиток теоретичної фізики систем взаємодіючих бозонів. Робота відповідає вимогам, що зазначені у «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 від 12 січня 2022 р. № 44 та заслуговує на позитивну оцінку. Враховуючи новизну та теоретичну значимість дослідження, а також його актуальність, вважаю, що Владислав Олександрович Карпенко заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
відділу електродинаміки високих енергій у
речовині ННЦ ХФТІ,
старший дослідник

Ігор КИРИЛЛІН