

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Карпенка Владислава Олександровича

“ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ У ЩІЛЬНИХ СИСТЕМАХ

ВЗАЄМОДІЮЧИХ БОЗЕ-ЧАСТИНОК”

представлену до захисту на здобуття ступеня доктора філософії

(напрям 10 - природничі науки, спеціальність 104 - фізика та астрономія)

Представлена дисертаційна робота присвячена дослідженню систем із сильними кореляціями в рамках моделей середнього поля. Досліджуються умови виникнення бозе-конденсату в системі сильно взаємодійних бозонів при високих температурах та сталій густині ізоспіну. Метод, який використано для опису такої системи - термодинамічно узгоджена теорія середнього поля, що параметризована по типу моделі Скірма. В рамках цього підходу було досліджено умови виникнення бозе-конденсату в системі піонних частинок та античастинок в залежності від співвідношення між притягальною та відштовхувальною компонентами взаємодії середнього поля при ненульових температурах. Такі дослідження мають вирішальне значення для розуміння широкого спектру явищ у ядро-ядерних зіткненнях, ядерній матерії, нейтронних зірках та космології, тобто у системах, в яких існують мезонні підсистеми та можливе утворення бозе-конденсату. Приділена увага саме до піонного конденсату пов'язана з тим, що піони є найлегшими адронними частинками і для створення піонного конденсату необхідна найменша температура в системі.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

У *вступі* обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета, вказано використані методи, а також робиться огляд літератури з досліджуваних питань.

У *першому* розділі розглядається система бозонів в рамках термодинамічно узгодженого методу середнього поля з взаємодією, яка є аналогом взаємодії ϕ -4 та ϕ -6 у скалярній теорії. Досліджується виникнення бозе-конденсату в сильно взаємодійній релятивістській бозонній системі при скінченній температурі та ненульовому ізоспіновому заряді з фіксованим відштовхуванням між частинками (модель жорсткого кору) та при різних значеннях інтенсивності притягання. Для обчислень термодинамічних

властивостей вибрана релятивістська система частинок-античастинок, що складається з пі-мезонів, які є найлегшими адронами. Середнє поле вважається залежним від повної густини кількості частинок й незалежним від температури та густини ізоспінового заряду. В рамках даного підходу дисертантом було отримано самоузгоджена система рівнянь відносно повної густини частинок і хімічного потенціалу, знайдено розв'язки та обраховано термодинамічні характеристики системи. Показано, що в бозонній мультикомпонентній системі при збереженні заряду виникає конденсат Бозе-Ейнштейна, починаючи з нульових температур. Цей конденсат зникає при нагріванні до критичної температури T_c , що супроводжується фазовим переходом другого роду. Або, іншими словами, при зменшенні температури системи до T_c і нижче у системі починає утворюватися бозе-конденсат, що супроводжується фазовим переходом другого роду при цій температурі.

У *другому* розділі досліджено фазові переходи у сильно взаємодійній двокомпонентній бозонній системі при як докритичних, так і надкритичних величинах притягання. Обговорюється непридатність застосування великого канонічного ансамблю в режимі конденсатного стану. Дисертант отримав, що при фіксованому надлишковому заряді та при докритичному, але великому параметрі притягання, бозонна система може декілька разів входити і виходити з конденсатного стану, і кожний такий перехід супроводжується фазовим переходом другого роду.

У *третьому* розділі було розраховано фазові діаграми бозонної системи, яка складається з частинок і античастинок при різних значеннях параметра притягання. Зроблено узагальнення правил Максвелла фазових переходів рідина-газ для релятивістської системи частинок та античастинок в залежності від густини заряду. Отримано, що при наявності притягання в системі відбувається фазовий перехід рідина-газ. Показано накладання двох типів переходів: газ-рідина та теплові частинки-конденсат, і формування відповідних діаграм.

У *четвертому* розділі розглядається модель з урахуванням електричної взаємодії між піонами. Визначено поправки до хімічного потенціалу, тиску та енергії внаслідок кулонівського відштовхування між зарядженими пі-мезонами. Обговорюється вплив електромагнітної взаємодії на фазові діаграми бозонної системи.

Найбільш цікавими я вважаю такі отримані дисертантом результати:

- 1) Показано, що в двокомпонентній системі пі-мезонів одна з компонент може перейти в стан бозе-конденсату, а інша ні.

2) Показано, що кожен перетин критичної кривої, тобто перехід системи в конденсатний стан при зменшенні температури, супроводжується фазовим переходом другого роду;

3) Отримано, що при критичному значенні коефіцієнта притягання, виникає точковий фазовий перехід другого роду, при якому спостерігається розрив третьої похідної вільної енергії без перетину критичної кривої, тобто без утворення параметру порядку;

4) Показано, що при збільшенні температури, починаючи з нуля, в релятивістській системі частинок-античастинок при надкритичному значенні притягання виникає стрибкоподібний перехід обох компонент в стан конденсату, ця зміна термодинамічного стану супроводжується фазовим переходом першого роду з поглинанням прихованої теплоти та утворенням максимальної густини конденсату.

Оцінка якості та обсягу проведених досліджень не викликає сумнівів, однак до роботи можна сформулювати такі зауваження:

- 1) В роботі бракує аналітичного доведення факту неперервності залежності густини енергії (ентропії) від температури при перетені критичної кривої, цей факт підтверджено тільки числовими розрахунками
- 2) В роботі бракує безпосереднього порівняння експериментальних даних адронної системи, що утворюється при протон-протонних зіткненнях в калайдерних експериментах, з теоретичними розрахунками.
- 3) В роботі не приділена увага нейтральній компоненті пі-мезонного поля. Ця компонента не приймає участі в електромагнітній взаємодії, але ж повинна давати внесок у сильну взаємодію між компонентами бозе системи. Також хотілося б побачити в роботі використання гамільтоніану системи пі-мезонів, частинок з одиничним ізоміном, що повинен мати ізотопічну симетрію по відношенню до сильних взаємодій.
- 4) До технічних помилок можна віднести певну кількість повторних означень величин і повторних посилань.

Ці зауваження, однак, не стосуються достовірності результатів досліджень і не зменшують їх важливість.

Представлена до захисту робота виконана на високому теоретичному рівні. Достовірність і обґрунтованість досліджень визначається

використанням надійних математичних методів та методів обчислень. Результати, наведені в дисертації, опубліковані в статтях у фахових наукових журналах, а також журналах, що входять до наукометричної бази SCOPUS. Наукові результати та їх апробація на наукових конференціях повністю відповідають умовам п.8 "Порядку присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р.

Вважаю, що дисертація Карпенка Владислава Олександровича "Фазові переходи у щільних системах взаємодіючих бозе-частинок" повністю відповідає спеціальності "104 Фізика та астрономія" 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, мною не виявлено. Надана робота безумовно заслуговує на позитивну оцінку, а її автор, Карпенко Владислав Олександрович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю "104 Фізика та астрономія".

Доктор фіз.-мат.наук,
професор кафедри
квантової теорії поля та космофізики
фізичного факультету
Київського Національного Університету
імені Тараса Шевченка

Володимир ГОРКАВЕНКО

