

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Журавля Дениса Віталійовича

**«НЕРІВНОВАЖНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНСПОРТ В СИСТЕМІ
КВАНТОВИХ ТОЧОК ТА ВЛАСТИВОСТІ БОЗОННИХ СИСТЕМ ПРИ
НЕНУЛЬОВИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В РАМКАХ МОДЕЛІ СЕРЕДНЬОГО
ПОЛЯ»,**

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії

10 Природничі науки (104 Фізика і астрономія)

Дослідження систем із сильними кореляціями викликають значний інтерес, що обумовлено сучасними теоретичними та експериментальними досягненнями у різних галузях фізики. Зокрема, це відноситься до створення та детального вивчення властивостей систем, які є основою для побудови нанорозмірних транзисторів, кубітів та інших електронних пристроїв. Для їх дослідження використовується метод нерівноважних функцій Гріна в формалізмі Келдиша та низка більш сучасних методів. Важливою ознакою сучасного етапу досліджень є звернення або врахування глибинних властивостей матерії таких як Бозе-Ейнштейнівська конденсація у різних умовах і врахування її особливостей у пристроях чи обмежених системах. Ці властивості притаманні різним системам нерелятивістської і релятивістської фізики і вимагають для їх вивчення широкого спектру математичних методів як аналітичних, так і чисельних. Проведені дослідження відповідають вісім вимогам сучасної теоретичної фізики. Це відноситься до різних розділів виконаної роботи, які безпосередньо виглядають не зв'язаними між собою.

В роботі у порівнянні з існуючими в літературі були значно розширені обчислення механізмів конденсації для умов, які досліджуються. Характерною рисою дисертації є аналітичні обчислення та представлення результатів для широкого інтервалу температур. поданні. Також були запропоновані нові критерії, що можуть слугувати сигналами утворення конденсату в сучасних експериментах.

Актуальність обраної теми обумовлена поточними та новими експериментами у фізиці високих енергій та наносистем, що вимагають

теоретичного пояснення або його покращення. Ефекти, що виникають при зіткненні важких ядер високих енергій, потребують всебічного аналізу і різноманітних порівнянь, оскільки вони в основному спрямовані на відкриття та дослідження властивостей нових станів матерії у екстремальних умовах, що відповідають вкрай різним явищам.

З погляду розвитку теоретичної фізики, застосовувані автором методи і наближення є типовими для сучасної фізики високих енергій та конденсованих систем з кореляціям. Вони широко відомі науковій громадськості. Разом з тим, є гостра потреба використання потужних математичних, зокрема, комп'ютерних, засобів, що також є важливою ознакою сучасної фізики.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 120 найменувань, 24 , рисунків. Загальний об'єм обсяг становить 147 сторінок друкованого тексту. Кожен розділ дисертації містить вступ та висновки.

У Розділі 1 Вивчається електронний транспорт у рамках Однорівневої моделі Андерсона при наявності зовнішнього магнітного поля.

Будується модельний гамільтоніан , вивчається електронний транспорт через квантову точку. Розглянуто випадки стаціонарного струму, нерівноважного струму. Наведені чисельні результати . Серед значної кількості отриманих результатів слід відмітити, що для випадку залежного від часу режиму було показано, що використаний метод удосконаленого наближення Хаббарда I добре відтворює динаміку релаксацій заселеності квантової точки, яка спостерігалася в нещодавніх результатах отриманих за допомогою методу inchworm QMC. Однією з головних переваг використаного методу є те, що він дозволяє пояснити фізичну природу піків спектрів. Так було встановлено, що для обраних параметрів динаміка струму регулюється тунелюванням через одно-електронний рівень, тоді як транспорт, що включає тимчасово зайнятий двоелектронний рівень, дає стаціонарний внесок у провідність. Отримані результати демонструють адекватність обраних методів досліджень. Вони пояснюють важливі структурні особливості спектрів.

У Розділі 2 вивчається ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНСПОРТ через подвійну квантову точку.

Для опису системи, як і в попередньому розділі, використано однодорівневу модель Андерсона в рамках наближення НСА. Гамільтоніан моделі містить внески від контактів, точок і від тунелювання між контактами та точками, $H = H_{\text{leads}} + H_{\text{dots}} + H_{\text{tun}}$. Три некорельовані між собою металеві контакти.

Проведено детальні чисельні дослідження.

Більш детально, було досліджено електронний транспорт через подвійну квантову точку із сильним внутрішньо- та міжточковим кулонівським відштовхуванням у \perp -подібній пристрої. У такій системі струм може протікати від витоку до стоку лише через нижню точку. Верхня точка відіграє роль затвору та завдяки наявному міжточковому кулонівському відштовхуванню керує потоком електронів через провідний канал нижньої точки. Щоб досягти цього, напруга верхнього контакту регулює заселеність верхньої точки. При низьких температурах спостерігається дуже різке перемикання при підвищенні напруги на затворі: спочатку зі стану ізолятора точка раптово переходить у режим резонансного тунелювання, де провідність близька до теоретичного максимуму $G_0 = 2e^2/h$, а потім у стан нормальної металевої провідності. Розрахунки коефіцієнта Зеєбека та спектральних густин підтверджують, що ця особлива поведінка перемикання тісно пов'язана з ефектом Кондо та його різким резонансом поблизу рівня Фермі. При підвищенні температури Кондо пік розмивається і перехід стає більш плавним, а стани менш вираженими: при збільшенні напруги затвору при температурах $T \gtrsim T_K$ провідний канал плавно переходить зі стану "поганого" провідника до стану поганого "ізолятора".

У Розділі 3 вивчаються ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ ВЗАЄМОДІЮЧИХ БОЗОНІВ ПРИ НУЛЬОВОМУ ХІМІЧНОМУ ПОТЕНЦІАЛІ

Температура може сягати достатньо великих значень, а отже і концентрація теплових частинок може бути великою. Елементарні розрахунки для невзаємодіючого адронного резонансного газу показують, що густина частинок може досягати значень $(0.1 - 0.2) \text{ fm}^{-3}$ при температурах $100 - 150 \text{ MeV}$, які знаходяться нижче фазового переходу деконфайнменту. За таких умов ефекти взаємодії починають відігравати значну роль. Феноменологічне

середнє поле $U(n)$, подібне до так званого потенціалу Скірма, введене для врахування взаємодії між бозонами. Дане поле залежить тільки від густини частинок n . Термодинамічно узгоджені співвідношення (самоузгоджене рівняння відносно густини частинок), отримані в рамках даного методу, можуть бути використані для обчислення густини частинок, густини енергії та тиску як функцій температури. Важливою рисою розглянутої системи є те, що на відміну від так званої бозонної матерії, кількість бозонів не зберігається, а визначається за допомогою мінімізації термодинамічного потенціалу.

В рамках термодинамічно узгодженої моделі середнього поля розглянуто систему сильновзаємодіючих бозонів при нульовому ізоспіновому заряді, при високих температурах та густинах частинок. Метод був узагальнений для випадку присутнього у системі Бозе конденсату та застосований для дослідження системи взаємодіючих піонів із потенціалом взаємодії подібним до потенціалу в моделі Скірма. Було показано, що для конденсатних станів самоузгоджене рівняння (3.26) узагальнюється і замінюється рівнянням (3.32). Досліджено умови виникнення Бозе-конденсату в системі взаємодіючих піонів в залежності від співвідношення між притягувальним та відштовхувальним внесками в середнє поле $U(n)$. Критичне значення безрозмірного коефіцієнта притягання κ , яке рівне $\kappa_c = 1$, розбиває діапазон його значень на дві області, для яких поведінка системи принципово відрізняється. У випадку “слабкого” притягання, тобто для значень коефіцієнта $\kappa < \kappa_c = 1$, Бозе-конденсація в системі не відбувається і стани системи знаходяться в газо-рідинній фазі для всього діапазону досліджуваних значень температури. Для сильного притягання, коли $\kappa > \kappa_c = 1$, умова $U(n) \geq -m$ перестає виконуватись для густин з інтервалу $n_1 < n < n_2$, і в системі виникає Бозе-конденсат при температурі $T_c = 115$ MeV. Густина частинок змінюється стрибком зі значення $n_c = 0.06 \text{ fm}^{-3}$ до значення $n_2 = 1.09 \text{ fm}^{-3}$. При цьому відбувається перехід першого роду із поглинанням прихованої теплоти в фазу Бозе-конденсату. Підтвердженням цього є розрив на графіку залежності теплоємності від температури. Варто зауважити, що емпіричні дані та теоретичні розрахунки вказують на те, що піон-піонна взаємодія досить слабка при енергіях ≤ 100 MeV. Тим не менш, додатковий внесок у середнє поле може забезпечуватись за рахунок притягуючої взаємодії піонів із нуклонами у відносно холодній ядерній речовині, або за рахунок ρ -мезонних та баріон-антибаріонних пар при високих температурах.

Крім того, при високих температурах в адронній матерії буде з’являтися багато інших частинок. Вони можуть давати додатковий внесок у притягання

в середньому полі, який відчують піони. За рахунок цього можуть з'явитись нові доданки в оптичному потенціалі піонів, які будуть пропорційними до густини цих додаткових частинок. За таких умов ефективна маса піонів зменшиться, а отже зменшиться і температурний поріг для виникнення конденсату піонів, як показано у рівнянні (3.30).

Із проведеного детального аналізу випливає низка умов виникнення конденсації та зміна параметрів системи. Як на мій погляд, це цікавий результат, який потребує подальшого розгляду.

У Розділі 4 розглядається термодинамічні властивості взаємодіючих бозонів при ненульовому хімічному потенціалі.

Вивчається взаємодіюча система Бозе частинок- і античастинок при ненульовому та збереженому ізоспіновому заряді nI та скінченній температурі. Бозонні частинки названо «піонами». Такий вибір зроблено, оскільки π -мезони є, найлегшими адронами, які мають ізоспінний хімічний потенціал відмінний від нуля. Бозе-конденсат піонів може виникати у ядерній та нейтронній матерії.

Щоб врахувати взаємодію між бозонами, вводиться феноменологічне середнє поле $U(n)$ подібне до поля Скірма, яке залежить лише від повної густини мезонів n . Це середнє поле відображає наявність інших сильно взаємодіючих частинок в системі, ρ -мезони, пари нуклон-antinуклон при низьких температурах, глюони або пари кварк-антикварк при високих температурах, $T > T_{\text{qgp}} \approx 160 \text{ MeV}$.

Дослідження в даній главі є розвитком запропонованого підходу у попередньому розділі 3. Використано канонічний ансамбль з канонічними змінними температура T та ізоспінна густина nI . Досліджувана система розглядається в рамках іграшкової моделі, яка допомагає зрозуміти процеси Бозе-Ейнштейнівської конденсації та фазові переходи у широкому діапазоні температур і густин. В рамках Канонічного ансамблю розраховано термодинамічні характеристики неідеального гарячого “піонного” газу з фіксованою густиною ізоспіну $nI = n(-)\pi - n(+)\pi > 0$, де $n(\mp)\pi$ – густина $\pi \mp$ -мезонів, відповідно.

У роботі представлено термодинамічно узгоджений метод опису бозонної системи при кінцевих температурах та високих густинах, яка складається з взаємодіючих частинок та античастинок при фіксованій густині ізоспіну nI .

Було розглянуто систему мезонних частинок з $m = m\pi$ і нульовим спіном . Зокрема, було показано, що введена безрозмірна величина $\kappa = A/2\sqrt{mB}$ є масштабним параметром моделі. Крім того, цей параметр визначає різні можливі фазові сценарії, які реалізуються в системі бозе-частинок та -античастинок. Коефіцієнт притягання $A = \kappa A_c$, де $A_c \equiv 2\sqrt{mB}$, було параметризовано за допомогою κ таким чином, щоб $\kappa = 1$ відповідало критичному значенню, яке розділяє режим “слабкого притягання” ($\kappa \leq 1$) та режим “сильного притягання” ($\kappa > 1$). Було показано, що в мезонній системі частинок-античастинок, де густина ізоспіну nI зберігається, виникає бозе-ейнштейнівський конденсат в інтервалі температур $0 \leq T \leq T_c$. Це є результатом фазового переходу другого роду, що відбувається при температурі T_c , а густина конденсату є параметром порядку. Це твердження суперечить висновкам, які були отримані в третьому. Дійсно, було показано, що в разі досить сильного притягання середнього поля ($\kappa > 1$), у багатобозонній системі виникає фазовий перехід першого роду і, як наслідок, утворюється бозе-конденсат, починаючи з кінцевої температури. Отже, незалежно від параметрів середнього поля, мультибозонна система розвиває бозе-конденсат тільки для компоненти високої густини (частинок). Це означає, що в піонному газі, де $nI = n(-)\pi - n(+)\pi > 0$, лише $\pi -$ мезони зазнають фазового переходу до бозе-ейнштейнівського конденсату. У той же час $\pi +$ -мезони існують лише в тепловій фазі для всього діапазону температур. Варто звернути увагу, що хіральна теорія збурень передбачає, що перехід між вакуумом і БЕК є фазовим переходом другого роду з класом універсальності $O(2)$. Для опису термодинамічних властивостей система розглядалась в рамках канонічного ансамблю, для якого хімічний потенціал μ є термодинамічною величиною, яка залежить від канонічних змінних (T , nI). Було розраховано залежність хімічного потенціалу від температури для різних значень параметра притягання κ і показано, що $\mu \approx \text{const}$ в “конденсатному” інтервалі температур $0 \leq T \leq T_c$. Величина хімічного потенціалу $\mu \approx \text{const}$ в цій області залежить від інтенсивності притягання. Водночас температура $T(-)$ с фазового переходу до бозе-ейнштейнівського конденсату $\pi -$ мезонів (компонента високої густини) слабо залежить від κ . Для всіх значень $0 \leq \kappa \leq 1$, які були розглянуті, критичні температури відрізняються одна від одної не більше ніж на 4 MeV. Тому можна ввести певне середнє значення $T_c = \langle T(-) \rangle$ переходу до фази бозе-ейнштейнівського конденсату. Отримані результати відповідають відомим властивостям ідеального релятивістського бозе-газу: конденсація Бозе-Ейнштейна являє собою фазовий перехід третього роду або розрив похідної теплоємності. В рамках представленої моделі було отримано, що таким же

чином похідна теплоємності зазнає розриву при температурі T_c . Плавні залежності густини енергії та густини ентропії від температури і відсутність прихованого виділення теплоти при T_c на нижній панелі рис. 4.3 доводять, що в системі насправді виникає фазовий перехід другого роду при цій температурі.

Перейдемо до аналізу отриманих результатів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації

Результати, здобуті автором, ґрунтуються на фізично розумних та загально прийнятих наближеннях, уявленнях про взаємодію кварків та інших частинок у зіткненнях при високих енергій. Вони спираються на певний попередні результати отримані методом фонового поля та розширюють його можливості, враховують нові умови експериментів. Розділи дисертації, присвячені аналітичним модельним дослідженням, також відповідають сучасним уявлення і методам квантової теорії поля в екстремальних умовах. Таким чином, результати автора є фізично обґрунтованими і мають вагоме практичне значення.

Новизна

На захист винесено низку результатів, які є добре представленими. Всі вони, на мій погляд, є новими. Особливо цікавими, з точки зору розвитку теорії є другий та третій розділи. Використання моделей виглядає вельми доречним і відповідає теоретичним ідеям А. Мігдала про те, що основний внесок у конденсати дають лише певні моди, які можливо виділити і записати для них ефективні Гамільтоніани. Дуже цікавим є використання аналогії з моделлю Скірма, яка є добре відомою, що дозволяє отримати додаткові аргументи на користь результатів проведених досліджень. В цілому, автор продемонстрував широкий спектр сучасних методів та підходів теорії поля для дослідження цікавих мезосистем.

Опубліковані праці

Дисертація написана за результатами 5 робіт. Більшість з них опублікована в провідних міжнародних журналах. Результати дисертації

також усно доповідались на багатьох фахових міжнародних конференціях, і тому можуть вважатися загально відомими та апробованими.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Результати дисертації достатньо повно відображені в публікаціях, але іноді викладені більш спрощено. Також в дисертації не проведено повною мірою порівняння з результатами інших робіт та підходів, яке можна знайти в існуючій літературі. Кваліфікаційна робота вимагає приділяти цьому більше уваги. Втім, спрощення змісту дисертації можна вітати, оскільки вона містить велику кількість розрахунків та ілюстративного матеріалу.

Недоліки

У представлених результатах важко знайти недоліки. Іде систематичний аналіз у межах використаної моделі та проводяться аналітичні обчислення. Як на мій погляд, до недоліків можна віднести замалу інформацію про використані методи досліджень та їх роль і історію. Наприклад, автор використовує метод Л.В. Келдиша, але корисно було б докладно його описати. Наприклад, на відповідну статтю Л. В. Келдиш «Диаграммная техника для неравновесных процессов», ЖЭТФ (1964), том 47, вып. 4 (10), стр.1515, з нерівноважною функцією розподілу існує більше двох тисяч посилань. Аналогічно, практично не обговорюється базова ідея А. Мігдала про можливість виділення окремо динаміку мод, відповідних зв фазовий перехід, знехтуючи іншими модами. Але при аналізі отриманих результатів це практично підтверджується навіть на графіках. Зрозуміло, що згадане не впливає на отримані результати роботи та на загальне позитивне враження про дисертацію.

Хочеться також висловити, скоріше, побажання на майбутнє. В присутності далекосяжних кореляцій (в даному контексті певних мод з малими частотами) слід враховувати внески в ефективний потенціал рядів так званих daisy (ring) діаграм. Вони, як мінімум, дають числові корекції до результатів. В класичних роботах, на яких ґрунтується дисертація, ці діаграми на враховувалися. Їх роль стала вивчатися в середині 80-х років при дослідженнях фазових переходів у всесвіті.

Підсумовуючи, в дисертації розв'язано значну кількість сучасних актуальних задач. Всі розділи дисертації є взаємопов'язаними. Дисертація виконана на належному математичному рівні і встановлює паралелі з теорією

фазових переходів, теорією елементарних частинок. Вона є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності. В сукупності представлені результати є значним досягненням для розвитку теорії та опису сильно взаємодіючої речовини.

Вважаю, що дисертаційна робота Журавля Дениса Віталійовича «**НЕРІВНОВАЖНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНСПОРТ В СИСТЕМІ КВАНТОВИХ ТОЧОК ТА ВЛАСТИВОСТІ БОЗОННИХ СИСТЕМ ПРИ НЕНУЛЬОВИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В РАМКАХ МОДЕЛІ СЕРЕДНЬОГО ПОЛЯ**», задовольняє всім вимогам МОН України до PhD дисертацій, зокрема пп. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і наукового звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою №567 Кабінету Міністрів України від 24.07.2013, а її автор, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 фізика та астрономія.

Офіційний опонент

Доктор фіз.-мат. наук, професор

Володимир Скалозуб