

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Журавля Дениса Віталійовича "Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля", представлену до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 – Теоретична фізика, 10 --Природничі науки (104 – Фізика та астрономія)

В дисертаційній роботі Журавля Дениса Віталійовича досліджується низка актуальних задач для систем із сильними кореляціями, як у фізиці конденсованого стану, так і у фізиці елементарних частинок. Основним об'єктом досліджень є системи квантових точок та бозонні системи з сильною взаємодією при скінченних температурах та густинах ізоспіну. Актуальність досліджень транспорту у системах квантових точок пов'язана з практичними потребами мініатюризації електроніки, що поставило перед теоретиками низку важливих завдань, рішенню яких присвячена перша половина дисертації. Не менш актуальним є дослідження у другій половині дисертації бозонних систем з урахуванням можливості Бозе-Ейнштейнівської конденсації при скінченних температурах та густинах ізоспіну. Такі системи (з піонів, каонів, глюонів та інш.) викликають значний інтерес у зв'язку з дослідженнями важких ядер та зіткнень важких іонів.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел, що включає 120 найменувань, та списку публікацій автора за темою дисертації, а також відомостей про апробацію результатів. Загальний обсяг рукопису складає 147 сторінок.

У вступі обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета, вказано використані методи, особистий вклад здобувача, описані основні результати дослідження та інше.

У *першому розділі* досліджено електронний транспорт через однорівневу квантову точку в моделі Андерсона, приєднану до металевих контактів, в присутності зовнішнього магнітного поля. Між електронами у квантовій точці діє сильне кулонівське відштовхування. Така система досліджена дисертантом за допомогою методу нерівноважних функцій Гріна, для яких отримано нескінченний ланцюжок рівнянь для центральної області (квантової точки). Цей ланцюжок рівнянь було обірвано, нехтуючи деякими процесами, наприклад, процесами перевороту спіну. Показано, що дане наближення справедливо для температур більших за температуру Кондо. Отримані аналітичні вирази для стаціонарного та залежного від часу струму через таку систему дозволяють дослідити залежність від зовнішнього магнітного поля. Наведено графіки стаціонарних і залежних від часу струмів та

диференціальних провідностей як функцій прикладеної напруги. Дисертантом показано, що у стаціонарному випадку відбувається зняття виродження енергетичних рівнів, а у випадку залежного від часу струму, коли до системи прикладається скінченний імпульс зовнішньої напруги та магнітного поля, затухаючі осциляції змінюють частоту в залежності від величини магнітного поля. Проведено спектральний аналіз та показано, що частоти затухаючих осциляцій відповідають зміні енергії електрона при тунелюванні з контактів до квантової точки і навпаки. Також у дисертаційній роботі було проведено порівняння запропонованого наближення з іншими наближеннями, які використовують для дослідження таких систем.

У *другому розділі* автором досліджено електронний транспорт через систему двох квантових точок, в якій одна квантова точка виступає в ролі провідного каналу нанорозмірного транзистора, а друга в ролі затвора, який регулює тунелювання через цей канал. Обидві квантові точки розглядаються як однорівневі орбіталі в моделі Андерсона. Квантова точка, що відіграє роль провідного каналу, приєднана до двох металевих провідників. Квантова точка, що відіграє роль затвора, з'єднана з одним металевим провідником, на який подається запираючий потенціал. Між електронами, як всередині квантових точок так і в різних точках, діє сильне кулонівське відштовхування. За допомогою методу нерівноважних функцій Гріна в рамках неперехресного наближення дисертантом було отримано вираз для стаціонарного струму через таку систему в залежності від напруги затвора. Важливо, що розглянуте наближення дозволяє врахувати ефекти перевертоту спіну, а отже фізику ефекту Кондо. Автором показано, що при температурах нижче температури Кондо, спостерігається різкий перехід провідного каналу зі стану провідника в стан ізолятора при збільшенні запираючого потенціалу. Причому в околі точки переходу спостерігається ефект резонансного тунелювання у вузькому діапазоні значень напруги затвора. При температурах більших за температуру Кондо резонансний пік розмивається.

У *третьому розділі* досліджуються властивості двокомпонентної взаємодіючої бозонної системи за високих температур в рамках термодинамічного підходу. Зокрема досліджено можливість виникнення бозе-конденсату у такій системі. Розглядається система частинок та античастинок із нульовим ізоспіновим хімічним потенціалом, яка взаємодіє за допомогою потенціалу, що складається з доданку, який відповідає за притягання та доданку, що відповідає за відштовхування. В якості частинок розглядаються π -мезони, як найлегші частинки, що мають ізотопічний спін. Основною задачею, яку ставить автор, є оцінка масштабу та відношення між притягальною та відштовхувальною компонентами потенціалу взаємодії та дослідження умов, при яких можлива поява бозе-конденсату у такій

двокомпонентній системі. В рамках термодинамічно узгодженої моделі середнього поля було отримано самоузгоджене рівняння для густини частинок та побудовано рівняння стану системи. Показано, що при значеннях притягання більше критичного, виникає фазовий перехід першого роду в фазу Бозе-конденсату. Причому в конденсованій фазі система характеризується сталою густиною частинок. З підвищенням температури конденсат “випаровується” і система повертається в газо-рідинну фазу без конденсату. Дані факти підтверджуються розрахунками теплоємності та густини енергії.

У четвертому розділі досліджується така сама система як і в третьому розділі, але при сталому та відмінному від нуля ізоспіновому заряді. В рамках термодинамічно узгодженої моделі середнього поля здобувачем було отримано систему самоузгоджених рівнянь для густини частинок та густини ізотопічного заряду, з розв’язку якої знайдено рівняння стану для системи частинок-античастинок. В даному розділі автором був досліджений лише випадок “слабкого” притягання. Показано, що для системи із сталим та відмінним від нуля ізотопічним спіном, бозе-конденсат виникає лише для компоненти більшої густини, тобто частинок (в даному випадку π^- -мезонів). Система перебуває у конденсованій фазі для всіх температур менших за критичну. Перехід у фазу Бозе-конденсату є фазовим переходом другого роду на відміну від випадку нульового ізоспінового заряду. Даний факт підтверджується розрахунками теплоємності та густини енергії. Показано, що поведінка компоненти високої густини для розглянутих значень притягання, аналогічна поведінці ідеального релятивістського газу зі сталою густиною частинок.

Вважаю, що дана дисертаційна робота виконана на високому теоретичному рівні, вона є завершеною науковою працею. В дисертації отримано нові важливі результати для систем із сильними кореляціями, як у фізиці конденсованого стану (системи квантових точок), так і у фізиці елементарних частинок (Бозе-Ейнштейнівська конденсація піонів). Слід зазначити, що отримані результати мають як теоретичне, так і прикладне значення. Автором використані сучасні теоретичні методи досліджень підкріплені комп’ютерним моделюванням, що засвідчує достовірність та обґрунтованість отриманих результатів. Результати досліджень опубліковані в провідних вітчизняних та міжнародних наукових виданнях, доповідались на міжнародних конференціях. Стиль та оформлення дисертації відповідають нормам наукової літератури.

Серед найбільш вагомих результатів досліджень можна відзначити такі:

1. За допомогою методу нерівноважних функцій Гріна, модифікованого наближення Хаббарда та наближення широкої зони були отримані аналітичні вирази для рівноважного та залежного від часу струму через однорівневу квантову точку в моделі

Андерсона із сильним кулонівським відштовхуванням між електронами у присутності зовнішнього магнітного поля, що діє на квантову точку.

2. Показано, що частоти затухаючих осциляцій, які виникають при прикладанні до квантової точки імпульсу напруги та магнітного поля, залежать від величини магнітного поля, та визначаються зміною енергії електрона при тунелюванні з контактів до квантової точки і навпаки.
3. Показано, що при температурах нижчих за температуру Кондо, спостерігається різкий перехід провідного каналу Т-подібного пристрою, що складається з двох квантових точок з'єднаних ємнісним зв'язком, зі стану провідника в стан ізолятора при збільшенні запираючого потенціалу затвора. Причому в околі точки переходу спостерігається ефект резонансного тунелювання у вузькому діапазоні значень напруги затвора, а при збільшенні температури вище температури Кондо, даний резонанс розмивається.
4. В системі взаємодіючих π -мезонів із потенціалом взаємодії подібним до потенціалу Скірма та нульовим ізоспіном, при значеннях притягання більших критичного виникає фазовий перехід першого роду із утворенням бозе-конденсату для температур більших за критичну температуру T_c .
5. Для системи взаємодіючих π –мезонів з відмінним від нуля ізотопічним спіном, показано, що фазовий перехід в фазу із бозе-конденсатом виникає навіть для “слабкого” притягання, але лише для однієї компоненти системи, а саме, частинок або π^- -мезонів. Фазовий перехід є фазовим переходом другого роду.

До роботи можна висловити кілька зауважень.

1. Стосовно транспорту електронів через квантові точки дослідження проводяться в багатьох місцях як за кордоном, так і в Україні. Зокрема подібні дослідження проводились в Інституті теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова у відділі члена-кореспондента Е.Г. Петрова, але в дисертації відсутні порівняння отриманих автором результатів із результатами зазначених досліджень, а також посилання на ці роботи.
2. В третьому та четвертому розділах досліджується Бозе-Ейнштейнівська конденсація π^- -мезонів, але ці частинки мають електричний заряд, тобто конденсат буде заряджений. Що має компенсувати досить великий заряд конденсата?
3. Чому не розглядається конденсат нейтральних піонів в четвертому розділі? Очевидно, це вимагає розгляду трикомпонентної системи, проте не є таким вже складним узагальненням.

4. У дисертації широко використовують метод середнього поля, але відомо, що цей метод не дає правильних критичних показників при описі фазового переходу другого роду. У дисертації бажано було б відзначити цей момент та вказати можливості виходу за рамки методу середнього поля.

Проте зазначені зауваження не впливають на мою загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Резюмуючи, можна впевнено стверджувати, що дисертація "Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля" відповідає всім вимогам нормативних документів Міністерства освіти і науки України та Кабінету Міністрів України щодо дисертацій, поданих на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор Журавель Денис Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Рецензент:

Завідувач відділу астрофізики і
елементарних частинок
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, професор,
член-кор. НАН України

Валерій ГУСИНІН

Підпис В.П.. Гусиніна засвідчую
Вчений секретар
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України



Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ