

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
(напрямок 10 — природничі науки, спеціальність 104 – фізика та астрономія)**

Дисертаційна робота Журавля Дениса Віталійовича присвячена актуальній задачі вивчення кореляційних ефектів у фізиці конденсованого стану з урахуванням зовнішніх полів та температури. Зокрема, в роботі досліджується транспорт електронів в системах квантових точок, а також бозонні системи з сильною взаємодією при скінченних температурах та густинах ізоспіну. Актуальність цих досліджень зумовлена експериментальними досягненнями сучасних нанотехнологій та потребами мінітюаризації електронних приладів та обчислювальних пристроїв, що поставило перед теоретиками низку важливих питань, яким і присвячена перша частина роботи. Друга частина роботи, яка стосується дослідження бозонних систем з урахуванням сильних кореляцій та можливості Бозе-Ейнштейнівської конденсації при відмінних від нуля температурах, відноситься до області, яка також привертає значну наукову увагу в останні роки.

Дисертаційна робота складається зі Вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел та додатку із списком публікацій автора за темою дисертації, а також відомостей про апробацію результатів.

У Вступі дається загальна характеристика дисертації та обґрунтовується актуальність теми, а також робиться огляд літератури з досліджуваних питань.

У 1-му Розділі розглянуто електронний транспорт через квантову точку, під'єднану до двох металевих контактів за присутності зовнішнього поля в наближенні однорівневої моделі Андерсона. Розглянуто випадок стаціонарного струму (при постійній прикладеній напрузі та незалежних від часу висотах бар'єрів і сталому магнітному полі). Автор відзначає, що отримані результати є точними у наближенні без кулонівської взаємодії, що можна трактувати як випадок, коли кулонівське відштовхування сильно екрановане, а також для довільного значення магнітного поля в атомному наближенні, коли матричні елементи тунелювання в системі "контакт – квантова точка" нескінченно малі. Розглянуто також цікавий випадок залежного від часу струму у наближенні широкої зони. Показано, що він складається з двох доданків, один з яких пропорційний заселеності точки і описує безпосередній струм від точки до контакту, а другий доданок – це струм у зворотному напрямку від правого контакту до точки. Розрахунки проведені за допомогою методу нерівноважних функцій Гріна. Отримані аналітичні вирази для струму за стаціонарних та залежних від часу умов. На основі цих виразів чисельними методами були отримані графіки стаціонарних струмів та диференціальних провідностей як функцій прикладеної напруги для кількох значень магнітного поля, а також залежних від часу струмів для кількох значень магнітного поля. Також було проведено розрахунки іншим методом, і показано, що методи дають близькі результати.

У другому Розділі досліджено електронний транспорт через систему двох однорівневих квантових точок з урахуванням внутрішньо- та міжточкового кулонівського відштовхування в геометрії, коли квантова точка, що слугує провідним

каналом, приєднана до лівого та правого контактів, а квантова точка, що відіграє роль затвора, приєднана до верхнього контакту. Показано, що при високій температурі зі зростанням напруги на затворі має місце плавний перехід електронного транспорту з режиму слабкого ізолятора до режиму слабкої провідності, в той час як при низьких температурах цей перехід досить різкий, причому він відбувається через режим резонансного тунелювання, що тісно пов'язаний з ефектом Кондо та його різким резонансом поблизу рівня Фермі.

Наступні два розділи присвячено вивченню термодинамічних властивостей системи бозонів, яка складається з взаємодіючих частинок та античастинок при фіксованій густині ізоспіну, при нульовому (3-й Розділ) та ненульовому (4-й Розділ) хімічному потенціалі при кінцевих температурах та високих густинах. В рамках моделі середнього поля досліджено умови виникнення бозе-ейнштейнівського конденсату для сильновзаємодіючих бозонів при нульовому ізоспіновому заряді в залежності від співвідношення між притягувальними та відштовхувальними внесками в середнє поле. Показано, що при слабкій взаємодії Бозе-конденсація не відбувається і система знаходиться в газо-рідинній фазі у всьому діапазоні досліджуваних значень температури. При сильній взаємодії відбувається перехід першого роду із поглинанням прихованої теплоти в фазу Бозе-конденсату з різкою зміною густини частинок. Дещо інша картина має місце у випадку ненульового ізоспінового заряду (при відмінному від нуля хімпотенціалі). Для цього випадку показано, що навіть при слабкому притяганні при температурах, нижчих за критичну, виникає бозе-ейнштейнівський конденсат частинок (компоненти з високою густиною), що є наслідком фазового переходу другого роду при критичній температурі, причому густина конденсату є параметром порядку. Для випадку піонів цей результат означає, що в експериментах з пі-мезонами варто очікувати Бозе-конденсат лише для π^- -мезонів. Але слід зауважити, що цей результат отриманий без урахування нейтральних піонів.

Отже, дана робота виконана на високому теоретичному рівні і являє собою цілісну й завершену наукову працю, в якій отримано низку нових важливих результатів, що стосуються актуальних напрямів фізики конденсованого стану, які мають як теоретичне, так і прикладне значення. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів засвідчуються вибором відповідних сучасних методів, фізичним аналізом результатів та узгодженням з результатами комп'ютерного моделювання. Результати представлені в п'яти публікаціях в провідних вітчизняних та міжнародних наукових виданнях та пройшли апробацію на багатьох міжнародних конференціях. Обсяг проведених досліджень та особистий внесок автора не викликають сумніву. Стиль та оформлення дисертації відповідають нормам наукової літератури.

Серед найбільш вагомих результатів відзначу такі:

1. Розраховано стаціонарний та залежний від часу релаксаційний струм через квантову точку при прикладанні до контактів імпульсу зовнішнього потенціалу та імпульсу зовнішнього магнітного поля.
2. Показано, що частоти осциляцій затухаючого струму визначаються зміною енергії електрона при його тунелюванні з контакту до квантової точки через одноелектронний рівень.
3. Показано, що при температурах, нижчих за критичну, має місце перехід провідності квантової точки від стану ізолятора, до стану резонансного

тунелювання та до стану провідника при збільшенні запираючого потенціалу затвору.

4. Встановлено умови виникнення Бозе-конденсату в системі взаємодіючих бозонів з нульовим ізоспіном в залежності від співвідношення між притягувальним та відштовхувальним внесками в середнє поле.
5. Показано, що в системі бозонів, яка складається із взаємодіючих частинок та античастинок (наприклад, пі-мезонів) із потенціалом взаємодії типу потенціалу Скирма при фіксованій відмінній від нуля густині ізоспіну, при слабкому притяганні має місце Бозе-конденсація лише компоненти системи з більшою густиною (частинки), в той час як компонента з меншою густиною (античастинки) завжди перебуває у тепловій фазі.

В той же час робота викликає низку зауважень.

1. В описі стану проблеми стосовно електронного транспорту через квантові точки відсутні посилання на дослідження співробітників Інституту теоретичної фізики ім. М.М.Боголюбова НАН України, в якому дана робота виконана, та, відповідно, відсутні аналіз новизни і порівняння отриманих автором результатів з результатами колег з Інституту. Думаю, що ці посилання доречно доповнили б список використаних джерел, який містить 120 посилань, а порівняльний аналіз підкреслив би новизну та оригінальність результатів автора.
2. Автор відзначає, що в роботі не враховується електрон-фононна взаємодія, і стверджує, що вона не вносить "якісно нових ефектів у систему та не впливає на загальні властивості тунелювання". З цим важко погодитися у загальному випадку, адже за певних умов може мати місце нелінійне тунелювання, яке, до речі, досліджували в тому числі і співробітники Інституту (О.С. Давидов, В.М. Єрмаков, О.О. Понежа).
3. Варто було б обґрунтувати та вказати межі застосування використаного в роботі припущення про те, що коефіцієнти тунелювання між точкою та контактами однакові для електронів на всіх енергетичних рівнях контактів.
4. Думаю, було б корисним навести декілька прикладів значень магнітного поля, енергії кулонівського відштовхування, температури та інших величин в фізичних одиницях, наприклад, в системі Si , а не лише в використаних в роботі одиницях (зокрема, енергія в одиницях Γ), щоб дати уяву про їхнє співвідношення та порівняти з реальними фізичними системами.
5. Незважаючи на те, що кожен розділ дисертації містить висновки, варто було б сформулювати стисло основні узагальнені висновки дисертації за всіма розділами.
6. Є також зауваження до тексту дисертації. Мають місце деякі граматичні помилки та похибки при наборі тексту. Наприклад, лише у заголовку Розділу 1 відсутні два пробіли; у підписі до Рис. 1.1 написано "приєднану" замість "приєднана"; "ступінь поляризації квантової точки" замість "ступінь поляризації"; "тунелюючі бар'єри" – електрони можуть бути тунелюючими, а точніше, такими, що тунелюють, а бар'єри є бар'єри, через які електрони тунелюють, та інші. В тексті іноді відсутні пояснення позначень, наприклад, у формулі (1.1). Думаю, що на Рис. 1.10 мова йде не про верхню та нижню панелі, а про верхню та нижню групи кривих. У Вступі та в першому розділі міститься дивне твердження, що "У досліджуваному режимі Кондо фізика не

спостерігається”. Напевно, явище Кондо відсутнє, а фізика — вона завжди фізика і має місце у всіх режимах. У 2-му Розділі автор пише “Наявність різкого супутнього нульового піку або резонансу Абрикосова-Зула-Кондо на графіку диференціальної провідності [37, 38, 76, 80–83] дає можливість реалізувати пристрій з високочутливими комутаційними властивостями, який, наприклад, може бути використаний в молекулярній електроніці”. Мова йде про те, що можна сподіватися, що на основі цього ефекту можна буде створити пристрої, а можливість їх реалізації залежить від багатьох технологічних аспектів. На мою думку, варто уникати використання жаргону в наукових роботах.

В той же час зауважу, що зроблені мною зауваження ніякою мірою не впливають на достовірність результатів та не зменшують їх вагомість. Дисертація написана чіткою мовою, не переобтяжена зайвими математичними викладками, в неї включені якісні ілюстрації та дані пояснення до них, що значно полегшує її читання та сприйняття результатів, а вказані вище текстові помилки незначні.

В завершення відзначу, що актуальність та достатньо високий рівень проведених досліджень, а також значення та достовірність отриманих результатів свідчать про те, 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 теорії нелінійних процесів в конденсованих середовищах
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України,
доктор фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник



Лариса БРИЖИК

Підпис Л.С. Брижик засвідчую
Вчений секретар
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України



Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ