

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Журавля Дениса Віталійовича**

“Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля”,

яку подано на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 – Теоретична фізика, 10 --Природничі науки (104 – Фізика та астрономія)

Актуальність теми дисертаційної роботи

Представлена дисертаційна робота присвячена дослідженню систем із сильними кореляціями в рамках моделей середнього поля. Частина роботи присвячена вивченню електронного транспорту через нанорозмірний пристрій, що складається з однієї квантової точки в зовнішньому магнітному полі та системи квантових точок при температурах нижче температури Кондо. Методика досліджень суттєво спирається на техніку нерівноважних функцій Гріна в рамках формалізму Келдиша, на основі якого були отримані аналітичні вирази для струму через квантову точку та систему квантових точок в рамках додаткових наближень. Очевидною мотивацією для дослідження подібних систем є опис експериментів, в яких досліджується нанотранспорт, та процес неперервного прагнення мінімізації електронних систем. Інша частина роботи присвячена дослідженню умов 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. В рамках даного 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 за скінченних температур та густини ізоспіну. 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.

Структура дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох основних розділів, списку використаних джерел, що містить 120 найменувань, та додатку, що включає список публікацій автора за темою дисертації та відомості про апробацію результатів. Загальний обсяг рукопису складає 147 сторінок.

У *вступі* обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета, указано використані методи, обґрунтована новизна, описані основні результати дослідження та інше.

У *першому розділі* досліджено електронний транспорт через однорівневу квантову точку в моделі Андерсона із сильними міжелектронними кореляціями. На електрони в квантовій точці діє зовнішнє магнітне поле, квантова точка під'єднана до провідних контактів. Підхід,

що був застосований для дослідження цієї системи – метод нерівноважних функцій Гріна в межах формалізму Келдиша. У рамках вдосконаленого наближення Хаббарда та неперехресного наближення дисертанту вдалось отримати аналітичні роз'язки для функції Гріна квантової точки, які були використані для дослідження стаціонарного та залежного від часу струмів через таку систему. Дані наближення вносять певні обмеження на діапазон досліджуваних температур. Оскільки не було враховано процеси перевероту спіну, в рамках запропонованої моделі не можна врахувати Кондо - ефект, а отже спостерігати нульовий пік на графіку залежності струму від напруги. Тобто, досліджувані температури є більшими за температуру Кондо, що було підкреслено автором у роботі. Було побудовано графіки залежного від напруги струму при різних значеннях зовнішнього магнітного поля. Показано, що у незалежному від часу випадку в системі спостерігається розщеплення електронних рівнів при збільшенні зовнішнього магнітного поля, тобто ефект Зеемана. На наступному етапі досліджень дисертант розглянув нерівноважний струм, який виникає як відгук такої системи на збурення у вигляді імпульсу зовнішньої напруги та магнітного поля. Було показано, що внаслідок розщеплення в магнітному полі електронних рівнів, характер затухаючих осциляцій струму змінюється. Частоти цих осциляцій відповідають зміні енергії електрона при тунелюванні з провідного контакту до квантової точки.

У *другому розділі* досліджено електронний транспорт через Т-подібну систему, що складається із двох квантових точок, між якими існує ємнісний зв'язок. Кожна квантова точка розглядається як одноелектронна орбіталь в моделі Андерсона. Квантова точка, яка приєднана до двох провідних контактів, виконує роль провідного каналу, а інша – затвору і приєднана лише до одного контакту, через який в неї накачуються електрони. Між двома електронами з різними проекціями спіну в кожній квантовій точці діє сильне кулонівське відштовхування. Так само як і в попередній главі, був використаний метод нерівноважних функцій Гріна в рамках формалізму Келдиша. В рамках наближення NCA було отримано вираз для струму через кожную квантову точку та досліджено вплив ємнісного зв'язку на провідність каналу. Дане наближення, на відміну від розглянутого в попередньому розділі, дозволяє врахувати ефекти перевероту спіну, а отже і Кондо фізику. Автором показано, що при збільшенні заселеності квантової точки, яка виконує роль затвору, та накачки її електронами, провідність каналу іншої квантової точки плавно зменшується від “поганого” провідника до “поганого” ізолятора. Така ситуація спостерігається для температур, більших за температуру Кондо. Для температур менших за температуру Кондо, спостерігається перехід системи зі стану провідника до стану ізолятора через вузьку смугу напруги затвору, в якій спостерігається явище резонансного тунелювання. У цьому вузькому інтервалі провідність каналу стає близькою до теоретичного максимуму.

У *третьому розділі* досліджено умови виникнення бозе-конденсату в сильно взаємодійній релятивістській бозонній системі при скінченній температурі та нульовому ізоспіну в залежності від співвідношення між притягальною та відштовхувальною компонентами середнього поля. Система бозонів досліджується в рамках термодинамічно узгодженого методу середнього поля з потенціалом взаємодії подібним до потенціалу Скірма. Для прикладу на роль бозе-частинок вибрані піони, які є найлегшими мезонами. Середнє поле вважається незалежним від температури та густини ізоспінового заряду. В рамках даного підходу автором було отримане самоузгоджене рівняння для густини частинок, побудовано його розв'язок та отримано термодинамічні характеристики. Показано, що в такій системі бозе-конденсат виникає лише у випадку, коли притягання є більшим за певне критичне значення. Фазовий перехід до стану з бозе-конденсатом виникає для температур, більших за певне критичне значення T_c та є фазовим переходом першого роду. Дані висновки підтверджені розрахунком тисків та теплоємностей для різних фаз.

У *четвертому розділі* досліджено умови виникнення бозе-конденсату в сильно взаємодійній релятивістській бозонній системі частинок-античастинок при скінченній температурі та при сталому ізоспіновому заряді, відмінному від нуля в залежності від співвідношення між притягальною та відштовхувальною компонентами середнього поля. Метод із попереднього розділу був логічним чином узагальнений на випадок системи частинок-античастинок. Автором була розглянута система піонів та антипіонів у рамках термодинамічно узгодженого методу середнього поля з потенціалом взаємодії, подібним до потенціалу Скірма. Була отримана система самоузгоджених рівнянь, розв'язки якої дозволили обчислити основні термодинамічні величини для даної системи. Було показано, що в системі частинок-античастинок перехід у фазу із утворенням бозе-конденсату виникає навіть для величини притягання, меншої за критичне значення. Але при цьому конденсуються лише частинки високої густини, тобто π^- -мезони. Показано, що конденсована фаза існує при температурах, менших за критичне значення, та що фазовий перехід є фазовим переходом другого роду. Відповідні висновки підкріплені розрахунком тисків та теплоємностей у різних фазах. Проведено порівняння поведінки π^- -мезонів в системі із взаємодією та поведінки ідеального однокомпонентного релятивістського газу зі сталою густиною частинок. Показано, що температура фазового переходу в обох випадках майже збігається.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації

Дослідження, проведені автором, ґрунтуються на загально відомих та перевірених методах та наближеннях, уявленнях про електронний транспорт у наносистемах та бозе-конденсацію в мезонних системах. Вони спираються на попередні розробки в даних областях

знань та являються їх логічним продовженням. Таким чином, результати є фізично обґрунтованими і мають вагоме теоретичне та практичне значення.

Новизна

Основні результати, наведені у роботі, мають беззаперечну актуальність та є новими.

Серед основних нових результатів, що представлені в роботі, хотілось би виділити наступні:

- 1) Досліджено відгук однорівневої квантової точки в моделі Андерсона з сильною кулонівською взаємодією між електронами на прямокутний імпульс зовнішньої напруги та магнітного поля, та показано, що частота затухаючих осциляцій залежить від величини зовнішнього магнітного поля.
- 2) Показано, що для температур, нижче температури Кондо, у Т-подібній системі з двох квантових точок, де одна квантова точка відіграє роль провідного каналу, а інша затвору, спостерігається різкий перехід зі стану провідника у стан ізолятора через вузьку смугу резонансного тунелювання.
- 3) Показано на прикладі піонної системи, що в системі сильно взаємодіючих релятивістських бозонів із скінченною температурою та густиною ізоспіну, виникає перехід у фазу із утворенням бозе-конденсату в залежності від співвідношення між притягальною та відштовхувальною компонентами взаємодії. Для системи із нульовим ізоспіновим зарядом фазовий перехід виникає лише для “сильного” притягання в системі, але для температур, більших за критичну температуру. Для системи із ненульовим ізоспіновим зарядом фазовий перехід виникає навіть у випадку “слабкого” притягання, але лише для однієї компоненти системи.

Опубліковані праці

Дисертація написана за результатами 5 робіт. Дві роботи були опубліковані в провідних міжнародних журналах, а інші три у провідних українських виданнях. Результати дисертації доповідались на багатьох фахових міжнародних конференціях, тому рівень апробації результатів не викликає сумнівів.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Результати дисертаційної роботи в повній мірі відображені в публікаціях. При цьому дисертація є більш розширеним дослідженням, яке містить додаткові результати, рисунки та більш детальні пояснення деяких явищ та ефектів, що не були опубліковані. Також хотілося б відзначити, що перший розділ роботи містить порівняння з експериментальними дослідженнями, чого не було зроблено в статтях.

Зауваження

Незважаючи на наведені експериментальні дані та якісне порівняння результатів дослідження, в роботі бракує кількісних розрахунків та безпосереднього порівняння

експериментальних кривих з теоретичними. Наскільки мені відомо, існує досить велика кількість експериментів з даної тематики та експериментів з квантовими точками. Мені видається, що було б доцільно застосувати розглянуту теорію для опису якогось конкретного експерименту, в тому числі наведеного в роботі. Аналогічне зауваження є і до другої частини роботи. Чи існують експерименти в обласні ядро-ядерних зіткнень або в дослідженнях ядерної матерії, які б могли підтвердити отримані теоретичні результати?

Чи можна було в дослідженнях, проведених в першому розділі, розглянути функції Гріна більш високих порядків та врахувати ефекти перевероту спіну та Кондо ефект? Якщо так, то чому це не було зроблено?

У другій частині роботи, яка присвячена дослідженню бозе-конденсації у сильновзаємодіючій системі піонів зі сталою густиною ізоспіну, середнє поле вибирається незалежним від густини ізоспінового заряду. Таке наближення викладає деякі запитання. Так виглядає, що можна було б урахувати таку залежність, наприклад, у вигляді додаткового члена в середньому полі у вигляді непарної функції $U(n_i)$.

На завершення варто відзначити актуальність та високий рівень проведених досліджень. Незважаючи на наведені деякі зауваження, отримані результати без сумніву мають високу наукову цінність. На мою думку дисертаційна робота "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.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,
академік НАН України,
начальник відділу статистичної фізики та квантової
теорії поля Інституту теоретичної фізики
імені О.І. Ахієзера, ННЦ ХФТІ НАНУ

Ю.В.Слюсаренко

Підпис академіка Слюсаренка Юрія Вікторовича ЗАСВІДЧУЮ:
ТВО директора Інституту теоретичної фізики
ім. О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ НАН України
кандидат фізико-математичних наук

Л.М. Давидов