

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор Інституту теоретичної фізики

ім. М. М. Боголюбова НАН України

академік НАН України

Анатолій ЗАГОРОДНІЙ

“ _____ ” _____ 2023 р.

ВИСНОВОК

Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Журавля Дениса Віталійовича на тему: «Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 – Теоретична фізика, 10 – Природничі науки (104 – Фізика та астрономія)

ВИТЯГ

з протоколу № 21 від 17 лютого 2023 р. засідання
відділу теорії ядра і квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

СЛУХАЛИ: провідного інженера відділу теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України Журавля Дениса Віталійовича за матеріалами дисертаційної роботи “Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля”, що висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

ПРИСУТНІ:

керівник семінару – доктор фіз.-мат. наук, В. С. Василевський;
член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. Ю.О. Ситенко;
член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. В.П. Гусинін;
академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, проф. Ю.В. Слюсаренко;
доктор фіз.-мат. наук, О. В. Нестеров;
доктор фіз.-мат. наук, Д. В. Анчишкін;
доктор фіз.-мат. наук, А.В. Назаренко;
кандидат фіз.-мат. наук, В. І. Жаба;
кандидат фіз.-мат. наук, С. М. Перепелиця.

УХВАЛИЛИ: вважати дисертаційну роботу Д.В. Журавля “Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Журавля Дениса Віталійовича “Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля” написана за матеріалами робіт, що виконані ним під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (2016-2020 рр.) у відділі фізики високих густин енергії та роботи на посаді провідного інженера в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (2020-2022 рр.) у відділі теорії ядра і квантової теорії поля. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України від 15 листопада 2016 р., керівником призначено доктора фіз.-мат. наук, старшого наукового співробітника Д.В. Анчишкіна.

Актуальність роботи

Протягом трьох десятиліть з моменту появи перших гетероструктур арсеніду галію, в яких окремі електрони можуть нести транспортні сигнали, ентузіазм щодо дослідження квантових точок (QD), як нині прийнято називати дані пристрої, постійно збільшується. Зокрема завдяки експериментальним реалізаціям, які на даний момент включають такі речовини як, наприклад, кремнієві та вуглецеві нанотрубки. Такі регульовані "штучні атоми" забезпечують ідеальні умови для перевірки квантової теорії в діапазонах параметрів недоступних у звичайних системах. Досліджувані явища варіюються від кулонівської блокади, квантового ефекту Холла, Кондо-ефекту, термоелектрики до фазових переходів та квантової критичності. Крім очевидного фундаментального інтересу, транспортні властивості QD можуть бути використані у прикладних цілях, включаючи польові транзистори, фотоефект та інструменти візуалізації молекулярних процесів у нейродослідженнях.

Нанорозмірні транзистори на основі квантових точок та квантові ефекти в них є напрямком активних досліджень, які мотивовані насамперед процесами мінітюаризації електроніки. QD зазвичай моделюються як однорівнева або багаторівнева орбіталь, що приєднана до двох металевих контактів. Електрони у квантовій точці взаємодіють між собою за допомогою кулонівського відштовхування, внаслідок чого у системі виникають сильні електронні кореляції, для яких точні рішення недоступні, а наближення неминучі. Серед останніх наближень, які застосовувались для розгляду подібних систем, варто

згадати теорію ефективного поля Смірнова та Грифоні у рамках формалізма Келдиша. За допомогою цього наближення вони досліджували ерозію резонансу Кондо як наслідок наявності зовнішнього магнітного поля у системі; так званий i -DFT ефект. У подальшому цей ефект було використано Стефануччі та Куртом для дослідження переходу від Кондо до режиму блокади Кулона; схеми роз'єднання нерівноважних функцій Гріна, такі як розширення допоміжного режиму Кроя та Заалмана, або SOQRE на основі техніки підкорених бозонів (slave-bosons).

Паралельно було розроблено велику різноманітність чисельних підходів, починаючи від чисельної ренормгрупи (NRG), над ренормгрупою матриці щільності (DMRG) до методу квантового Монте-Карло (QMC). Один з основних недоліків чисельних методів полягає в тому, що вони майже не дають інформації про основні фізичні процеси, які можуть бути головним чином відповідальними за ті чи інші процеси.

Для опису таких систем зазвичай використовується домішкова модель, введена Андерсоном понад 50 років тому для дослідження, здавалося б, не пов'язаної теми локалізованих магнітних моментів у перехідних металах. На відміну від систем, які Андерсон мав на меті описати своєю моделлю, досліджувана QD не перебуває в тепловій рівновазі, а знаходиться у зовнішньому електричному полі, прикладеному між провідними контактами. Таким чином, транспорт через квантову точку має бути описаний відповідним нерівноважним формалізмом, таким як, наприклад, формалізм Келдиша.

Подолання кулонівської блокади і відновлення провідності через такий пристрій як квантова точка, що приєднана до провідних контактів, є необхідною умовою функціонування нанорозмірного транзистора. Для досягнення такого ефекту можливі різні конфігурації зовнішніх полів або включення додаткових керуючих провідників та квантових точок. Одним з прикладів такого керуючого зовнішнього поля, що першим спадає на думку, є зовнішнє магнітне поле.

Частина роботи присвячена дослідженню нерівноважного електронного транспорту через одноорбітальну QD, приєднану до двох металевих контактів. Електрони у точці взаємодіють між собою за допомогою кулонівського відштовхування, а також із зовнішнім магнітним полем, яке спричиняє спінове виродження орбіталі (ефект Зеемана). Контакти або провідники, навпаки, моделюються як ідеальні некорельовані метали, які не взаємодіють із зовнішнім магнітним полем. У досліджуваному режимі Кондо фізика не спостерігається, оскільки, як відомо, колективне екранування спіну на точці електронами провідників витримує лише температури, напруги зміщення та магнітні поля порядку шкали Кондо. Розглянуто зміну провідності в залежності від прикладеного зовнішнього магнітного поля, а також релаксаційні процеси, які виникають при прикладанні до такого пристрою імпульсу напруги та магнітного поля.

Іншим способом керування провідністю каналу QD може бути додаткова

квантова точка, яка приєднана ємнісним зв'язком. Для такого Т-подібного пристрою затвор (вивід 2) безпосередньо не контролює енергетичний рівень квантової точки 1 у каналі провідності між лівим (L) і правим (R) контактами. Але завдяки зміні напруги на затворі змінюється заселеність квантової точки 2 і саме ця зміна зрештою ініціює початок струму через провідний канал завдяки наявному кулонівському відштовхуванню між електронами на різних КТ.

В наступній частині дисертаційної роботи, яка присвячена системі квантових точок із ємнісним зв'язком, показано, що при достатньо низькій температурі така система з подвійною квантовою точкою дає можливість побудувати квантовий транзистор, здатний з високою чутливістю перемикатися між трьома станами замість двох: ізолятора, нормальної провідності та резонансної провідності за допомогою ефекта Кондо.

Іншим прикладом систем із сильними кореляціями, які мають бути враховані при дослідженні, є система мезонів. Інформація про фазову структуру мезонної системи при скінченних температурах та густинах ізоспіну має вирішальне значення для розуміння широкого спектру явищ: від ядро-ядерних зіткнень до нейтронних зірок і космології. Ця область є важливою частиною досліджень гарячої і щільної адронної матерії, яка привертає в останні роки значну наукову увагу. Водночас дослідження мезонних систем має свою специфіку, зумовлену можливістю бозе-ейнштейнівської конденсації взаємодіючих бозонних частинок.

У другій половині дослідження увага концентрується на вивченні властивостей взаємодіючих бозонних систем в рамках термодинамічно узгодженої моделі середнього поля. Основними задачами є оцінка масштабу та відношення між притягальною та відштовхувальною компонентами потенціалу взаємодії та дослідження умов, при яких можлива поява Бозе-конденсату у системі взаємодіючих частинок. Проблема Бозе-конденсації пі-мезонів у ядерній матерії вивчалася починаючи з піонерських робіт Мігдала та інших авторів.

У дисертаційній роботі розглядається релятивістська систем взаємодіючих Бозе частинок-античастинок при нульовому ізоспіновому заряді n_1 і скінченній температурі, а також при ненульовому ізоспіновому заряді, який зберігається. Бозонні частинки, які були вибрані для дослідження є пі-мезони. Вибір був зроблений саме на користь цих частинок тому, що заряджені пі-мезони є найлегшими адронами які мають ізоспіновий хімічний потенціал відмінний від нуля. З іншого боку, піони є найлегшими бозе-частинками які приймають участь у ядерних взаємодіях, тому врахування народження теплових пар таких частинок при збільшенні температури є актуальною проблемою, яку вирішує квантова статистика.

Для врахування взаємодії між бозонами було введено феноменологічне середнє поле $U(n)$ подібне до поля Скірма, яке залежить лише від повної

густини мезонів n . Це середнє поле вiдображає наявнiсть iнших сильно взаємодiючих частинок в системi, таких як, наприклад, ρ -мезони, пари нуклон-антинуклон, глюони або пари кварк-антикварк при високих температурах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертацiйна робота виконувалась у вiддiлi Фiзики високих густин енергiї Інституту теоретичної фiзики iм. М.М. Боголюбова НАН України в рамках держбюджетних науково-дослiдних робiт (2016–2019 рр.): “Пошук нових форм сильновзаємодiйної матерiї в зiткненнях адронiв та ядер за високих енергiй” (РК № 0118U003197); та у вiддiлi Теорiї ядра i квантової теорiї поля Інституту теоретичної фiзики iм. М.М. Боголюбова НАН України в рамках держбюджетних науково-дослiдних робiт (2019–2022 рр.): “Використання теоретико-польового пiдходу для вивчення квантових систем iз сильною взаємодiєю” (РК № 0117U000237). Дисертацiйна робота також виконувалась в рамках цiльової програми Вiдiлення фiзики i астрономiї НАН України (2017–2022 рр.): “Структура та динамiка статистичних та квантово-польових систем” (РК №. 0117U000240),

Метою дослiджень, проведених у дисертацiї, є вивчення властивостей систем iз сильними кореляцiями, таких як квантовi точки iз сильним кулонiвським вiдштовхуванням мiж електронами та системи бозонiв з сильною взаємодiєю. Для її досягнення було поставлено такі задачі:

- узагальнення транспортних рiвнянь для випадку наявного зовнiшнього магнiтного поля, що дiє на квантову точку в моделi Андерсона;
- отримання аналітичного виразу для функцiї Грiна однорiвневої квантової точки приєднаної до провiдних контактiв в зовнiшньому магнiтному полi;
- чисельнi розрахунки рiвноважного струму для рiзних значень зовнiшнього магнiтного поля та вiдгуку такої системи на прикладений скiнченний iмпульс напруги та магнiтного поля;
- отримання аналітичного виразу для функцiї Грiна T-подiбного пристрою, що складається з двох квантових точок iз ємнiсним зв'язком (провiдний канал та керуючий затвор), та дослiдження провiдностi такої системи при температурах нижче температури Кондо;
- отримання самоузгоджених рiвнянь для системи взаємодiючих релятивiстських Бозе-частинок та -античастинок у рамках термодинамiчного пiдходу для нульового iзоспiнового заряду та ненульового, але фiксованого iзоспiнового заряду;
- дослiдження можливостi та умов виникнення Бозе-конденсату у системi взаємодiючих частинок та античастинок iз нульовим iзоспiновим числом в залежностi вiд спiввiдношення мiж притягальною та вiдштовхувальною компонентами потенцiалу взаємодiї;
- дослiдження можливостi та умов виникнення Бозе-конденсату у системi взаємодiючих частинок та античастинок iз ненульовим iзоспiновим числом в

залежності від співвідношення між притягальною та відштовхувальною компонентами потенціалу взаємодії, але для випадку “слабкого” притягання. Серед **найбільш важливих наукових результатів**, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- отримано функцію Гріна для однорівневої квантової точки в моделі Андерсона та при наявності зовнішнього магнітного поля в рамках наближення Хаббарда та наближення широкої зони;
- обчислено стаціонарний та залежний від часу релаксаційний струм, що протікає через квантову точку при прикладанні до контактів імпульсу зовнішнього потенціалу та імпульсу зовнішнього магнітного поля, оцінено період затухання сигналу;
- показано, що частоти осциляцій затухаючого струму співпадають зі зміною енергії електрона при тунелюванні з контакту до квантової точки через одноелектронний рівень;
- отримано функції Гріна для системи із двох квантових точок, що взаємодіють між собою, в рамках неперехресного наближення (NCA) та наближення широкої зони;
- показано, що при температурах $T < T_K$ спостерігається перехід провідності квантової точки від стану ізолятора, до резонансного тунелювання та до стану провідника при збільшенні запираючого потенціалу затвору, причому резонансний пік розмивається для температур $T > T_K$;
- в рамках термодинамічного підходу отримано самоузгоджені рівняння для системи взаємодіючих релятивістських бозонів та антибозонів;
- для системи пі-мезонів із потенціалом взаємодії подібним до потенціалу Скірма та нульовим ізоспіном показано, що Бозе-конденсація можлива лише для значень параметра притягання більших за критичне значення $k > k_c = 1$;
- показано, що Бозе-конденсат може існувати лише в проміжку температур $T_c < T < T_2$, причому $T_c > 0$;
- для системи пі-мезонів із потенціалом взаємодії подібним до потенціалу Скірма та ненульовим ізоспіном показано, що для “слабкого” притягання, тобто $k < k_c = 1$, у Бозе-конденсаті може знаходитись лише компонента системи з більшою густиною, тобто частинки, в той час як античастинки завжди перебувають у тепловій фазі.

Практичне значення одержаних результатів

Робота має теоретичний характер. Отримані результати можуть бути використані: 1) при дослідженні транспортних властивостей мікроелектронних пристроїв та релаксаційних ефектів; 2) для дослідження властивостей сильновзаємодіючої матерії, що народжується у ядро-ядерних та протон-протонних зіткненнях та пояснення існуючих ефектів пов'язаних з явищем Бозе-конденсації.

Особистий внесок здобувача.

У роботах [2-3] : 1) транспортні рівняння узагальнені для випадку наявного зовнішнього магнітного поля, що діє на квантову точку в моделі Андерсона; 2) отримано функцію Гріна для однорівневої квантової точки в моделі Андерсона та при наявності зовнішнього магнітного поля в рамках наближення Хаббарда та наближення широкої зони; 3) обчислено стаціонарний та залежний від часу релаксаційний струм, що протікає через квантову точку при прикладанні до контактів імпульсу зовнішнього потенціалу та імпульсу зовнішнього магнітного поля, оцінено період затухання сигналу; 4) проведено порівняння наближення Хаббарда з наближеннями NCA та inchworm QMC; 5) отримано функції Гріна для T-подібної системи із двох квантових точок, що взаємодіють між собою, в рамках неперехресного наближення (NCA) та наближення широкої зони.

У роботах [1,4-5] : 1) в рамках термодинамічного підходу для системи релятивістських пі-мезонів із потенціалом взаємодії подібним до потенціалу Скірма та масою $m = 140 \text{ MeV}$ отримано розв'язки самоузгоджених рівнянь для густини частинок в залежності від температури; 2) отримано залежність температури початку Бозе-конденсації T_c від параметру взаємодії k для системи із нульовим ізоспіном; 3) отримано значення температури виходу з конденсатної фази T_2 для системи з нульовим та ненульовим значенням ізоспіну, показано що дана температура слабо залежить від параметру взаємодії k ; 4) обчислено термодинамічні величини системи, такі як густина енергії та теплоємність, та показано, що фазовий перехід в точці T_c є фазовим переходом першого роду, а фазовий перехід в точці T_2 є фазовим переходом другого роду.

Основні результати дисертації викладені у 5 роботах у наукових журналах:

[1] Д.Анчишкін, І.Мішустін, О.Сташко, Д.Журавель, Х.Штокер, Бозе-Ейнштейнівська Конденсація У Системі Взаємодіючих Бозонів При Скінченних Температурах, Укр. фіз. журн. **64**, № 12, ст. 1110-1116 (2019).

[2] D. Zhuravel, D. Anchishkin, R. Hayn, P. Lombardo, St. Schäfer, Non-equilibrium electronic transport through a quantum dot with strong Coulomb repulsion in the presence of a magnetic field, J. Phys.: Condens. Matter. **32**, No. 16, p.165601 (2020).

[3] Pierre Lombardo, Roland Hayn, Denis Zhuravel, and Steffen Schäfer, Kondo-assisted switching between three conduction states in capacitively coupled quantum dots, Phys, Rev. Research **2**, 033387 (2020).

[4] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, Relativistic Selfinteracting Particle-Antiparticle System of Bosons, Journal of Physics and Electronics **28** (2), pp. 3-18 (2020).

[5] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, Phase diagram of the selfinteracting particle-antiparticle boson system, Journal of Physics and Electronics **29** (1), pp. 5-14 (2021).

Апробація результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідались на наступних семінарах та конференціях:

- [1] D. Zhuravel, D. Anchishkin, R. Hayn and S. Schafer, “Nonequilibrium transport of electrons with strong correlations through a quantum dot in the magnetic field”: доповідь на семінарі в Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence, Aix-Marseille Université, Univ. de Toulon, December 15, 2016, Marseille, France.
- [2] D. Zhuravel, D. Anchishkin, R. Hayn and S. Schafer, “Nonequilibrium transport of electrons with strong correlations through a quantum dot in the magnetic field”: VIII Young Scientists Conference Problems of Theoretical Physics, December 12-14, 2017, Kyiv, Ukraine.
- [3] D. Anchishkin, I. Mishustin, O. Stashko, D. Zhuravel, H. Stoecker, “Finite-Temperature Bose-Einstein Condensation in Interacting Boson System”, BGL-2019: Non-Euclidean, Non-Commutative Geometry and Quantum Physics, May 19-24, 2019.
- [4] Журавель Д.В., “Нерівноважні властивості квантових точок”, доповідь на семінарі КАУ (керівник Семенова А.О), Київ, ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, 12.10. 2020 р.
- [5] Журавель Д.В., “Бозе-Ейнштейнівська конденсація в системі взаємодіючих бозонів при скінченних температурах”, доповідь на семінарі КАУ (керівник Семенова А.О., Київ, ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, 19.10. 2020 р.
- [6] Журавель Д.В., “Нерівноважні властивості квантових точок”, семінар відділу теорії ядра та квантової теорії поля, Київ, ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, 29.10.2020 р.
- [7] D. Zhuravel, D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, V. Karpenko, Selfinteracting Particle-Antiparticle System of Bosons: the Bose-Einstein Condensation as a Second-Order Phase Transition, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Kyiv, February 16, 2021.
- [8] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, Phase transitions in relativistic meson systems, 22nd Zimanyi School - Winter Workshop on Heavy Ion Physics, Budapest, Hungary, December 5-9, 2022.
- [9] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, Phase transitions in a system of self-interacting particle-antiparticle, XIII Conference of Young Scientists "Problems of Theoretical Physics", Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Kyiv, Ukraine, December 21, 2022.

Характеристика особистості здобувача

Журавель Д. В. у 2016 р. закінчив кафедру теоретичної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка та отримав ступінь магістра за спеціальністю «Загальна фізика». З 2016 по 2020 рік – навчався в аспірантурі Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

з відривом від виробництва за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. Після закінчення аспірантури Журавля Д.В. було зараховано на посаду провідного інженера відділу Теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. З 2020 р. і по теперішній час Журавель Д. В. працює в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, основним науковим напрямком діяльності є дослідження квантових систем із сильною взаємодією з використанням теоретико-польових підходів та дослідження властивостей релятивістських бозонних систем при ненульових температурах.

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Журавля Деніса Віталійовича “Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля”.
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Журавля Д.В. відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.**
3. Рекомендувати дисертацію Журавля Д.В. “Нерівноважний електронний транспорт в системі квантових точок та властивості бозонних систем при ненульових температурах в моделі середнього поля” до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія
4. Рекомендувати вченій раді Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Назаренко Андрій Володимирович, доктор фіз.-мат. наук, професор.

Рецензенти:

Гусинін Валерій Павлович, доктор фіз.-мат. наук, професор, чл.-кор. НАН України, завідувач відділу теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

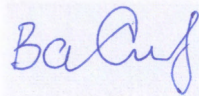
Брижик Лариса Свиридівна, доктор фіз.-мат. наук, професор.

Офіційні опоненти:

Слюсаренко Юрій Вікторович, доктор фіз.-мат. наук, професор, академік НАН України.

Скалозуб Володимир Васильович, доктор фіз.-мат. наук, професор, академік АН вищої освіти України, завідувач кафедри теоретичної фізики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Головуючий на засіданні –
доктор фіз.-мат. наук,
провідний науковий співробітник
Інститут теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова НАН України,
відділ теорії ядра
і квантової теорії поля



Віктор ВАСИЛЕВСЬКИЙ