

Відгук

офіційного опонента

провідного наукового співробітника відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», доктора фізико-математичних наук, старшого дослідника

Сотнікова Андрія Геннадійовича

на дисертаційну роботу

Рижова Артема Ігоровича

«Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»
(галузь знань 10 – «Природничі науки»)

Дисертаційна робота А.І. Рижова присвячена дослідженню квантових дворівневих і багаторівневих систем, а також розробці теоретичних підходів з опису та керування такими системами. Зокрема, увагу зосереджено на методах опису квантових систем за допомогою рівняння Ліндблада, інтерферометрії Ландау-Зінера-Штյюкельберга-Майорани, адіабатично-імпульсної моделі та рівнянь балансу. Запропоновані в дисертаційній роботі методи реалізації квантових логічних операцій можуть бути застосовані на певних типах квантових комп'ютерів. Метод застосування адіабатично-імпульсної моделі з формалізмом рівнянь балансу може використовуватись за певних умов у квантових системах для спрощення розрахунків порівняно з рівнянням Ліндблада. Підхід з опису динаміки подвійної квантової точки за допомогою розв'язання рівняння Ліндблада може бути використаний для опису відкритих квантових багаторівневих систем, що наразі є активним полем досліджень у провідних дослідницьких установах світу. Таким чином, тема дисертаційної роботи А.І. Рижова є беззаперечно **актуальною**. Варто відзначити, що дисертантом виконано належну апробацію результатів на міжнародних конференціях і симпозіумах світового рівня.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи А.І. Рижова підтверджується також тим, що вони є складовою частиною низки дослідницьких проєктів, які виконувались у рамках держбюджетних тем і міжнародних програм в Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, а також в лабораторії теоретичної квантової фізики, Інституту фізико-хімічних досліджень (RIKEN), Японія.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків і списку літератури. Розглянемо результати основних розділів у відповідній послідовності.

У **першому розділі** наведено огляд фізичних особливостей квантових багаторівневих систем. Зокрема, окреслено проблеми опису, контролю стану та особливостей спектроскопії для таких систем. Сформульовано рівняння Ліндблада для опису багаторівневих систем з енергетичною релаксацією і дефазуванням, проведено опис та розглянуто принцип роботи детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта.

У **другому розділі** досліджено динаміку одно- та двокубітних систем під дією зовнішнього збудження за допомогою чисельного розв'язання відповідного рівняння Ліувілля-фон Неймана. Показано, як адіабатично-імпульсна модель може бути застосована для опису реалізації однокубітних та двокубітних квантових логічних операцій. Проаналізовано та визначено межі застосовності теоретичного підходу на основі адіабатично-імпульсної моделі.

Третій розділ присвячено низькочастотній спектроскопії для квантових багаторівневих систем. Продемонстровано, як багаторівневу систему можна звести до дворівневої, застосувавши резонансний збуджуваний сигнал. У такому випадку два одягнених рівні несуть інформацію про початкову багаторівневу систему, таким чином, властивості таких інтерферометричних ліній можуть бути використані для визначення параметрів багаторівневої системи (спектроскопії).

У **четвертому розділі** виведено гамільтоніан подвійної квантової точки та обчислено енергетичні рівні такої системи. Проведено чисельне моделювання динаміки системи за допомогою розв'язання рівняння Ліндблада і проаналізовано динаміку основних режимів збудження. Було продемонстровано як використовувати адіабатично-імпульсну модель та формалізм рівнянь балансу для моделювання динаміки етапу перезарядження детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта.

Таким чином, у дисертаційній роботі А.І. Рижова шляхом розвинення та використання методів опису квантових систем і відповідного розв'язання рівнянь динаміки, **отримано ряд нових важливих результатів та розвинено сучасні методи теоретичного дослідження. Дисертація повністю відповідає спеціальності 104 – «Фізика та астрономія».**

На мою думку, до **найбільш цікавих наукових результатів**, що отримані у дисертації, можна віднести теоретичний аналіз режимів роботи подвійної квантової точки, що наведений у розділі 4. Для цього дисертантом послідовно виведено гамільтоніан системи та обчислено власні значення енергій. Далі сформульовано рівняння Ліндблада та наведено вирази для коефіцієнтів релаксації. Це дало змогу детально проаналізувати всі чотири основні режими динаміки системи: багатопрохідний режим, режим подвійного проходження, однопрохідний режим (або режим шатлінгу із заплутаними станами) та некогерентний режим. Слід зазначити, що параметри системи були обрані відповідно до експериментальних реалізацій, що дає змогу безпосередньо

порівнювати теоретичні передбачення з експериментальними вимірюваннями. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розвинуті методи мають практичне значення**. У цілому, дослідження дисертаційної роботи доповнюють і розширюють наявні уявлення про квантові дворівневі та багаторівневі системи, в яких відбуваються переходи Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани, і, зокрема, про їх унікальні динамічні властивості, що підтверджує також **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних добре апробованих методів математичної та теоретичної фізики. У рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими.

Окрім організацій, у яких проводились семінари дисертанта за темою дисертації, вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи А.І. Рижова фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Київський академічний університет, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Львівський національний університет імені І. Франка, Інститут фізики конденсованих систем (м. Львів).

За змістом дисертації можна зробити такі **зауваження**:

- 1) У другому розділі рисунок 2.7 свідчить про те, що добротність однокубітних квантових логічних операцій на основі перетинів Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани є набагато кращою за добротність логічних операцій на основі осциляцій Рабі. Було б корисно також дізнатися, чи можна очікувати таке ж саме покращення добротності за умови експериментальної реалізації квантових логічних операцій на основі таких перетинів у порівнянні з операціями на основі осциляцій Рабі.
- 2) У другому розділі в описі реалізації однокубітних квантових логічних операцій на основі перетинів Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани за допомогою збуджувального сигналу з багатьма перетинами в зонах квазіперетину рівнів сигнал з великою кількістю перетинів дуже схожий на збуджувальний сигнал у класичному підході Рабі. Корисно було б дізнатись або мати детальне порівняння, чи такий сигнал має якісь відмінності від аналогічного сигналу в підході Рабі.
- 3) У другому розділі розглянуто низку двокубітних операцій. Є добре відомим той факт, що для так званого універсального набору квантових логічних операцій достатньо однокубітних операцій та однієї двокубітної операції. Таким чином, не зовсім зрозуміло, для чого потрібно детально розглядати інші двокубітні операції та чи можна виразити їх у термінах однокубітних операцій і однієї двокубітної операції “контрольованого ні” (CNOT).

Хотів би, однак, зазначити, що перелічені зауваження не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація добре структурована і написана належною для роботи науковою мовою. Основні результати опубліковано, зокрема, у 3 статтях у провідних

наукових виданнях з найвищим квантилем Q1. При цьому, очевидно, що значний внесок у роботу належить особисто дисертанту. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація А.І. Рижова є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: досліджено динаміку квантових дворівневих і багаторівневих систем, що мають широке коло фізичних реалізацій, а також розроблено ефективні теоретичні підходи з опису та керування такими системами.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значущість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертаційна робота «Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем» повністю задовольняє вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами, а її автор, Артем Ігорович Рижов, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» (галузь знань 10 – «Природничі науки»).

Офіційний опонент


доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник,

провідний науковий співробітник

відділу статистичної фізики та квантової теорії поля

Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

 Андрій СОТНІКОВ

Підпис А.Г. Сотнікова ЗАСВІДЧУЮ

Т.в.о. директора ІТФ ННЦ ХФТІ

кандидат фіз.-мат. наук





Леонід ДАВИДОВ