

РІШЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ ПРО ПРИСУДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ДОКТОРА ФІЛОСОФІЇ

Спеціалізована вчена рада ДФ 64.175.017 Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків, прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» на підставі прилюдного захисту дисертації «Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем» 24 грудня 2024 року.

Рижов Артем Ігорович, 1995 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2018 році фізико-технічний факультет Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали». Закінчив навчання в аспірантурі Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України 31 жовтня 2024 р. Успішно виконав освітньо-наукову програму підготовки доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Дисертаційну роботу виконано у відділі надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу надпровідних та мезоскопічних структур ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, **Шевченко Сергій Миколайович**.

Здобувач має 13 наукових публікації за темою дисертації, з них 3 статті у міжнародних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science), що належать до квартилю Q1 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank:

1. S. N. Shevchenko, **A. I. Ryzhov**, and Franco Nori, “Low-frequency

- spectroscopy for quantum multilevel systems”, Physical Review B, 98, 195434 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevB.98.195434 (Scopus, кuartиль Q1).
2. **A. I. Ryzhov**, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, Franco Nori, “Alternative fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions”, Physical Review Research, 6, 033340 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.033340 (Scopus, кuartиль Q1).
 3. O. A. Ilinskaya, **A. I. Ryzhov**, and S. N. Shevchenko, “Flux qubit based detector of microwave photons”, Physical Review B, 110, 155414 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevB.110.155414 (Scopus, кuartиль Q1).

У дискусії взяли участь голова і всі члени спеціалізованої вченої ради:

1. Опонент **Сотніков Андрій Геннадійович**, доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» дав позитивний відгук із зауваженнями:

- 1) У другому розділі рисунок 2.7 свідчить про те, що добротність однокубітних квантових логічних операцій на основі перетинів Ландау-Зінера-Штjюкельберга-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-Штjюкельберга-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 операції. 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).

Перелічені зауваження не носять принципового характеру і не впливають істотно на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи.

2. Оponent **Майзеліс Захар Олександрович**, доктор фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України надав позитивний відгук із наступними зауваженнями:

1) У другому розділі дисертації для реалізації операцій iSWAP, CNOT чисельно розв’язуються рівняння 2.82, 2.94, відповідно. Вважаю, що було б доцільно додати опис чисельних пакетів та інструментів, які використовувались для чисельного розв’язку цих рівнянь. Неясно, чи наведені рішення для значень параметрів збуджуючого сигналу є єдиними. Якщо ні, то було б раціонально вказати, за якими критеріями проводився відбір з існуючих рішень цих систем.

2) У другому розділі при розгляді двокубітних операцій був розглянутий гамільтоніан двох кубітів з XY-, ZZ-, JJ- типами взаємодії. Однак не було наведено прикладів систем кубітів з цими типами зв’язку між кубітами.

3) У другому розділі було б доцільно більш детально розкрити обмеження максимальної швидкості однокубітних квантових логічних операцій, реалізованих за допомогою збуджуючого сигналу з одним та двома перетинами області квазіперетину рівнів енергій кубіта.

Однак, слід вказати, що зазначені зауваження жодним чином не впливають на якість отриманих результатів і позитивну оцінку дисертаційної роботи.

3. Рецензент **Колесніченко Юрій Олексійович**, доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник відділу мікроконтактної спектроскопії Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України надав позитивну рецензію із зауваженнями:

1) У розділі 2 реалізації квантових логічних операцій розглядаються лише для моделей ізольованого кубіта та системи двох пов'язаних кубітів, ізольованих від навколишнього середовища. Було б корисно зазначити на що і як буде впливати факт наявності інших кубітів та навколишнього середовища при використанні результатів цього розділу до квантових систем із багатьма кубітами та зв'язком із навколишнім середовищем.

2) У розділі 3 збуджуючий сигнал має високочастотну «одягаючу» компонентну та низькочастотну спектроскопічну компоненту. З тексту не зовсім зрозуміло, чи можливо було б спостерігати інтерференційну картину на рис. 3.5, якщо збуджуючий сигнал мав би тільки низькочастотну спектроскопічну компоненту.

3) У розділі 4 автор використовує наближену адіабатично-імпульсну модель та формалізм рівнянь балансу для опису динаміки багаторівневих систем. Було б корисно більш детально дізнатись за яких умов ці наближені методи можуть використовуватись: для яких типів квантових систем, для квантових систем з якою характерною структурою енергетичних рівнів, для яких типів динамік.

Однак, зазначені зауваження жодним чином не впливають на позитивну оцінку роботи.

4. Рецензент **Константинов Олександр Михайлович**, кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник відділу теоретичної фізики Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України надав позитивну рецензію із зауваженнями:

1) У третьому та четвертому розділах роботи чітко прослідковується зв'язок між теорією та експериментом, який їй відповідає. Натомість в другому розділі не зовсім зрозуміло, на яких конкретних фізичних об'єктах можна було б спостерігати описані сценарії реалізації тих чи інших квантових логічних операцій.

2) Також, на мою думку, доцільно було б навести більше подробиць з числових розрахунків основних рівнянь, як-от рівняння фон Неймана з другого розділу тощо.

Разом з цим слід зауважити, що вказані вище зауваження можна сприймати радше як побажання, які не впливають на загальну високу позитивну оцінку роботи.

5. Голова ради **Славін Віктор Валерійович**, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу теоретичної фізики Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України дав позитивну оцінку роботі, без зауважень.

Загальна оцінка роботи і висновок.

Дисертація Рижова Артема Ігоровича на тему «Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем» є актуальним завершеним науковим

дослідженням.

Дисертація присвячена дослідженню квантових дворівневих та багаторівневих систем та розробці нових підходів до опису та контролю таких систем з використанням інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани (ЛЗШМ), рівняння Ліндблада, рівнянь балансу, адіабатично-імпульсної моделі. Результати даної роботи мають одночасно фундаментальне значення для розвитку розуміння динаміки складних квантових систем, і прикладне значення для розробки та створення нових пристроїв у сфері квантових технологій та квантових обчислень.

Під час виконання цієї роботи було отримано ряд важливих результатів. У дисертації було розглянуто альтернативну парадигму реалізації квантових логічних операцій на основі переходів ЛЗШМ при збудженні системи нерезонансним сигналом з великою амплітудою. Було досліджено динаміку дворівневих та багаторівневих квантових систем під впливом зовнішнього нерезонансного збудження, продемонстровано, як параметри зовнішнього керуючого сигналу, необхідні для реалізації певної квантової логічної операції, можуть бути знайдені за допомогою застосування адіабатично-імпульсної моделі. Було описано гамільтоніан кубіта та системи двох пов'язаних кубітів, теоретично продемонстровані реалізації однокубітних квантових логічних операцій X , Y , Адамара, фазової операції за допомогою класичного підходу з використанням резонансного збуджуючого сигналу, що призводить до осциляцій Рабі, та з використанням досліджуваного нерезонансного сигналу, що призводить до переходів ЛЗШМ. Були порівняні швидкість та теоретична точність квантових логічних операції, отриманих кожним з підходів. Було досліджено метод збільшення швидкості виконання квантових логічних операцій за допомогою збільшення кількості переходів ЛЗШМ, та розраховані відповідні швидкості та теоретичні похибки реалізацій квантових логічних операцій. Розглянутий альтернативний метод реалізації квантових логічних операцій було узагальнено для багаторівневих квантових систем. Зокрема, були теоретично продемонстровані реалізації двокубітних

операції iSWAP і CNOT, та надані деякі деталі для реалізації інших двокубітних операцій. Запропонований альтернативний підхід після доповнення експериментальними методиками можуть бути застосовані для контролю квантових систем в експериментах та виконання квантових логічних операцій на певних типах квантових комп'ютерів.

У іншій частині дисертації було продемонстровано, як експериментальна інтерферометрія ЛЗШМ може використовуватись для визначення параметрів (тобто спектроскопії) квантових багаторівневих систем, а значить, в результаті, і для контролю режимів динаміки цих систем. Було розглянуто кремнієву подвійну квантову точку (ПКТ) із долинно-орбітальними ступенями свободи. Було розглянуто як зовнішній сигнал з подвійним збудженням дозволяє розглядати змінені енергетичні рівні. Цей процес називається одяганням та зводить чотирирівневу квантову систему до дворівневої. Для отриманої дворівневої квантової системи були застосовані формули інтерферометрії ЛЗШМ та теоретично побудована інтерферограма ЛЗШМ. Вона добре узгоджується з експериментально отриманою інтерферограмою ЛЗШМ. Отримані арфо-подібні інтерференційні смуги було обговорено та проаналізовано. Було обговорено, як форма та характеристики інтерференційних смуг з експериментальних інтерферограм ЛЗШМ можуть бути використані для визначення деяких параметрів ПКТ, що розглядається.

Окрім того, у дисертації теоретично вивчається сильно збуджувана дисипативна чотирирівнева ПКТ. На її експериментальній інтерферограмі ЛЗШМ спостерігаються одночасно чотири режими збудження в різних областях параметрів збуджуючого сигналу. У дисертації було отримано гамільтоніан ПКТ. За допомогою вирішення рівняння Ліндблада була змодельована та проаналізована динаміка (ймовірності заселеностей станів системи як функція часу) у всіх чотирьох режимах збудження.

Також у дисертації було продемонстровано, як адіабатично-імпульсна модель у поєднанні із формалізмом рівнянь балансу у деяких випадках можуть бути використані для розрахунку динаміки квантових багаторівневих

систем з енергетичною релаксацією та переходами ЛЗШМ. Це було продемонстровано на прикладі моделювання динаміки етапу перезаряджання детектора мікрохвильових фотонів на основі потокового кубіта. Отримана динаміка узгоджується із точними результатами, отриманими за допомогою чисельного розв'язку рівняння Ліндблада. Продемонстрований наближений підхід може використовуватись лише для деяких простих типів динамік, але при цьому не потребує повної інформації про гамільтоніан системи та є простішим у порівнянні з підходом розв'язання рівняння Ліндблада.

Результати досліджень, наведені у дисертаційній роботі та опубліковані у наукових статтях, належать автору. Робота виконана з дотриманням усіх вимог академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. За кількістю і рівнем публікацій, апробацією на міжнародних конференціях дисертаційна робота відповідає вимогам «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 12.01.2022 р. № 44 зі змінами.

Рада вважає, що дисертація Рижова Артема Ігоровича на тему «Застосування інтерферометрії Ландау-Зінера-Штюкельберга-Майорани для контролю динаміки квантових систем», що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» є завершеним самостійним науковим дослідженням, сукупність результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 10 «Природничі науки», а за актуальністю, науковою новизною і практичною цінністю відповідає вимогам чинного законодавства України, «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23.03.2016 р. № 261 зі змінами та «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 12.01.2022 р. № 44 зі змінами від 21.03.2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507, а здобувач Рижов Артем Ігорович заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Результати відкритого голосування:

- «За» - 5 членів ради,
- «Проти» - 0 членів ради,
- «Утримались» - 0 членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ДФ 64.175.017 присуджує Рижову Артему Ігоровичу ступінь доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Голова разової
спеціалізованої вченої ради,
доктор фіз.-мат. наук



Віктор СЛАВІН

