

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Карпова Дениса Сергійовича**

**«Особливості електродинаміки мезоскопічної системи надпровідних квантових бітів, що взаємодіють з резонатором»,**

яка представлена на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.02 – «теоретична фізика»**

Головна мета дисертаційної роботи Карпова Д.С. полягає у теоретичному описі транспортних властивостей гібридної системи на основі кубіту та резонатору. Кубітом називають квантову систему, яка може застосовуватися для реалізації елементарної ланки квантового регістру. На сьогодні активно розвивається напрямок надпровідних квантових бітів на основі контактів Джозефсона. Такі кубіти створюються методами сучасної літографії, що забезпечують гарну масштабованість та гнучкість необхідних систем. До цього часу багатьма дослідницькими групами проводилось вивчення електродинаміки надпровідних квантових бітів, що взаємодіють з резонатором, але розглядались, як правило, системи без врахування температури. У дисертаційній роботі Карпова Д.С. вперше враховано вплив скінченної температури на систему кубіт-резонатор та наведено спосіб детектування реальної температури кубіта в експерименті. Теоретичне дослідження властивостей таких структур на сьогодні вбачається дуже **актуальним** в фізиці конденсованого стану. По-перше, це зумовлено інтересом з точки зору фундаментальних досліджень в рамках розвитку квантово-механічної парадигми та теорії квантової інформації. Джозефсонівські кубіти є нелінійними квантовими об'єктами, які у випадку взаємодії з резонатором істотно впливають на коефіцієнт проходження сигналу. Цей ефект може мати практичне застосування при створенні приладів на основі квантових об'єктів.

Слід зазначити, що **актуальність** досліджень Карпова Д.С. підтверджується також тим, що вони виконані в рамках наукових державних програм, які виконувались у відділі надпровідних і мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України і є складовою частиною наступних проектів: «Експериментальні та теоретичні дослідження квантових когерентних явищ в нових типах надпровідників та надпровідних структур» (номер державної реєстрації 0112U002640, термін виконання 2012 – 2016 рр.); «Квантові ефекти в системах з кубітами на основі однозонних та багатозонних надпровідників» (номер державної реєстрації 0114U005155, термін виконання 2013-2014 рр.); «Надпровідні і мезоскопічні

мікроструктури та прилади сучасної квантової електроніки на їх основі» (номер державної реєстрації 0117U002291, термін виконання 2017-2021 р.).

Дисертація Карпова Д.С. складається з чотирьох розділів, перший з яких становить собою огляд літератури за темою дисертації, а у трьох останніх викладено оригінальні результати.

**У першому розділі** проведено огляд літератури, що присвячений найбільш важливим роботам інших авторів, тісно пов'язаними з питаннями, розглянутими в дисертації. **У другому розділі** наведені основні рівняння, які використовувались для опису транспортних властивостей електромагнітних сигналів через структуру з мезоскопічними елементами типу кубіт, копланарний резонатор та хвилевід. Розв'язана узагальнена форма Марківського рівняння (рівняння Ліндблада) з врахуванням дисипації і декогеренції кубіта, що взаємодіє з двома модами резонатора. Така ж система, але у двох різних наближеннях, розглянута **в третьому розділі**, де встановлено, що скінченна температура істотно впливає на амплітуду коефіцієнта проходження сигналу, та показано, що врахування наступних кореляторів у рівняннях Максвелла-Блоха дозволяють покращити теоретичний опис експериментальної системи. **У четвертому розділі** дисертації представлено теоретичний опис взаємодії кубітів з фотонним сигналом в одновимірному хвилеводі. Важливо відзначити, що в загальному виді даний підхід дозволяє враховувати неідентичність кубітів і будь-яке їхнє розташування у хвилеводі. Схожа ідея була запропонована для опису розповсюдження фотонів у зв'язаному оптичному резонаторі. Цей підхід засновано на рішенні проблеми розсіювання і знаходженні коефіцієнтів поширення фотонів через хвилевід з кубітами. Вирази для коефіцієнтів проходження і відбиття знайдено за допомогою побудови матриці розсіювання, ґрунтуючись на проєкційному формалізмі і методі неермітового гамільтоніану. Розглянуто систему, у якій кожний кубіт поміщений у фотонний резонатор. Це фізично обмежує число мод, з якими він може взаємодіяти й, тим самим, підвищує час життя кубіта у квантовому стані. При цьому самі резонатори обмінюються фотоном безпосередньо із хвилеводом, здійснюючи тим самим непрямий зв'язок кубіта із хвилеводом.

**Обґрунтованість та достовірність** результатів роботи Карпова Д.С. не викликає сумнівів. Вона базується на тому, що всі розрахунки проведено добре апробованими методами теоретичної фізики. Низка одержаних результатів є точними або асимптотично точними розв'язками відповідних нелінійних рівнянь. Отримані дисертантом аналітичні результати і висновки теорії порівнювались і підтверджувались результатами чисельних

розрахунків. Вони доповнюють і розширюють існуючі уявлення про особливості електродинаміки надпровідних квантових бітів, що взаємодіють з резонатором. Це обумовлює **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів.

**Практичне значення одержаних результатів** пов'язано, по-перше, з запропонованим новим методом для розв'язання задач відбиття та проходження у системі кубіт-резонатор-хвилевід. По-друге, розглянуті структури мають потенціальне застосування в рамках квантової теорії інформації та розвитку ідей створення квантового процесору.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Карпова Д.С. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України: Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна МОН України, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (м. Харків), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (м. Київ), Інститут фізики НАН України (м. Київ), Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України (м. Київ).

Дисертаційна робота містить багато нових результатів і справляє гарне враження. Найбільш цікавим у дисертаційній роботі мені здається наведене порівняння двох наближень для опису електродинаміки кубітів, що взаємодіють з резонатором. Також привертає увагу запропонований метод розв'язку задачі розсіювання фотону у хвилеводі, зв'язаного з кубіт-резонатором. Важливо, що дисертант не тільки запропонував, а й продемонструвала цей метод для розрахунку коефіцієнтів проходження і відбиття фотону у такій системі. Окрім того, у дисертаційній роботі продемонстровано, що можливе отримання достатньої величини посилення сигналу «одягненим» кубітом при оптимізації його параметрів. Цей результат здається мені перспективним для можливих застосувань. Загалом робота викладена акуратно. При розв'язанні та аналізі задачі дисертант використовує як аналітичні, так і чисельні методи. Наведено достатню кількість рисунків, які представляють отримані результати.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1. У четвертому розділі наводиться розрахунок величини заплутаності кубітів у системі хвилевід-резонатор-кубіт. Було б бажано провести детальний аналіз залежності заплутаності від частоти фотону, що влітає у систему.
2. У другому розділі описано «одягання» кубіту високоамплітудним сигналом третьої гармоніки резонатора. Було б доречним навести пояснення, чому обрана саме ця, а не якась більш висока гармоніка.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертації Карпова Д.С. Основні результати дисертації викладено у 5 статтях в провідних фахових іноземних і вітчизняних наукових журналах та у 1 статті в працях міжнародної конференції. Зміст автореферату вірно відбиває основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертація Д.С. Карпова є закінченою науковою роботою, в ній вирішено важливу наукову задачу, яка має істотне значення для теоретичної фізики конденсованого стану. Враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація задовольняє усім вимогам МОН України, які ставляться до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам 9, 11 та 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, а автор дисертації, Карпов Денис Сергійович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент –  
член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач відділу теоретичної фізики  
Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О.Я. Усикова НАН України

В.О. Ямпольський

Підпис завідувача відділу ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України Ямпольського В.О. засвідчую.

Заступник директора  
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук



Ю.Ф. Логвінов