

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»**

Дисертаційна робота Д.С. Карпова присвячена теоретичному опису системи надпровідних квантових бітів, що взаємодіють з резонатором. Розглядається кубіт на основі контактів Джозефсона, який розміщений у компланарному резонаторі, і взаємодіє з класичним і квантовим сигналами, що проходять крізь резонатор. Також досліджено вплив різних параметрів як самого кубіту, так і, власне, резонатора на амплітуду вихідного сигналу. Кубіти, а саме надпровідні кубіти, представляють собою перспективний об'єкт дослідження, в першу чергу, завдяки відпрацьованій технології створення та відтворення зразків. В роботі дослідженні особливості взаємодії двомодового резонатора та кубіту з урахуванням скінченної температури, які можуть бути корисними для подальшого теоретичного та експериментального дослідження квантових бітів. Описані електромагнітні процеси важливі для можливих застосувань в області розвитку фундаментальних основ квантової механіки в цілому та ідей квантового приладобудування з практичної точки зору. Таким чином, тема дисертаційної роботи Д.С. Карпова є безсумнівно **актуальною**.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи Карпова Д.С. підтверджується також тим, що вони є складовою частиною наступних проектів, які виконувались в відділі надпровідних і мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України:

- «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, 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.);

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів.

Перший розділ містить прекрасно написаний огляд літератури та послідовне виведення основних рівнянь для опису електродинаміки системи кубіт-резонатор, які в наступних трьох розділах розв'язуються і аналізуються.

У **другому розділі** автор дисертації теоретично описує збудження і поширення електромагнітних сигналів через систему, яка складається з кубіта та резонатора. Цей розділ присвячений опису кубіта, що взаємодіє із двома електромагнітними сигналами: високоамплітудним сигналом та слабким

(пробним) сигналом. Така взаємодія лежить в основі, так званої, двосигнальної спектроскопії або пробної спектроскопії кубіта. Досліджено взаємодію кубіта із сигналом великої амплітуди, в порівнянні із втратами резонатора, і другим, пробним, слабким сигналом, відповідний по амплітуді до втрат резонатора. Пробний сигнал дозволяє реконструювати одягнені стани кубіта. У розділі детально вивчено ефект збільшення або послаблення амплітуди вихідного сигналу і запропонована ідея застосування даного ефекту на практиці для реальних систем. Було розглянуто, як посилення і загасання вхідного сигналу залежать від параметрів системи (добротність резонатора, амплітуда сильного сигналу, часу релаксації та інше). Така система може бути корисною для застосувань.

Третій розділ присвячено опису системи кубіт-резонатор у дисперсному та резонансному режимах при різних наближеннях. Розглядається наближення для рівнянь Максвелла-Блоха (напівквантове і квазікласичне) для системи кубіт-резонатор. Спочатку були здобуті спрощені аналітичні формули для коефіцієнтів проходження у квазікласичному наближенні, яке не враховує корелятори виду $\langle AB \rangle$, де A та B атомні або фотонні оператори. Квазікласичне наближення дозволяє описувати більшість квантово-механічних ефектів, пов'язаних з проходженням сигналів через одягнений кубіт. Проте цього наближення може бути недостатньо. Із цієї причини були враховані наступні корелятори для опису кубіт-резонаторних систем. У напівквантовому наближенні врахування кореляторів виду $\langle AB \rangle$ призводить до збільшення системи рівнянь Максвелла-Блоха. Така система є більш повною та дозволяє описувати експериментальні вимірювання також кількісно.

У **четвертому розділі** представлена метод теоретичного опису взаємодії кубітів з фотонним сигналом в одномірному хвилеводі. Важливо відзначити, що в загальному виді даний підхід дозволяє враховувати неідентичність кубітів і довільне їхнє розташування у хвилеводі. Схожа ідея була запропонована для опису розповсюдження фотонів у зв'язаному оптичному резонаторі. Запропонований підхід базується на рішенні задачі розсіювання і знаходженні коефіцієнтів поширення фотонів через хвилевід з кубітами. Вирази для коефіцієнтів проходження і відбиття знаходяться за допомогою побудови матриці розсіювання, ґрунтуючись на проекційному формалізмі і методі неермітового гамільтоніана.

Таким чином, в дисертаційній роботі шляхом аналітичного і чисельного розв'язання рівняння Ліндблада та системи рівнянь Максвелла-Блоха здобуто низка **нових** цікавих результатів. Зокрема показано, що у випадку взаємодії кубіта з високоамплітудним і слабоамплітудним сигналами можливе посилення або ослаблення вихідного сигналу. Доведено, що відмінна від абсолютного нуля температура системи призводить до зменшення абсолютного значення коефіцієнту проходження. Доведено, що врахування в рівняннях Максвелла-Блоха кореляторів взаємодії квантових полів кубіта та резонатора суттєво збільшує точність теоретичного опису реальної системи. Встановлено, що коефіцієнт проходження сигналу через резонатор несе в собі інформацію щодо температурного стану кубіта.

Обґрунтованість та достовірність здобутих у дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних надійно апробованих методів теоретичної фізики конденсованого стану, а також підтверджується ретельно зробленими викладками, наведеними у тексті. В рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими. Аналітичні результати доповнюються і підтверджуються чисельними розрахунками.

Практичне значення одержаних результатів в першу чергу пов'язано з можливим застосуванням системи кубіт-резонатор для створення посилювача або атенюатора на основі такої системи. Розрахунки впливу реальної температури кубіту та резонатора на коефіцієнт проходження, приведені у дисертації, можуть бути корисними для з'ясування температури експериментальної системи. Показано, що врахування двокорреляторної поправки в рівняннях Максвелла-Блоха для опису еволюції системи кубіта-резонатора суттєвим чином деталізує фізичні процеси у системі, що може пояснити дані низки експериментальних досліджень.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Карпова Д.С. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як 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).

По змісту дисертації можна зробити такі зауваження:

- 1) Важливим аспектом роботи мало б стати порівняння теоретичних результатів з результатами експериментальних вимірів. Однак у оригінальних розділах роботи надані лише посилання на статті, в яких містяться відповідні експериментальні графіки.
- 2) У третьому розділі йдеться про відмінність між квазікласичними та напівквантовими рівняннями Максвелла-Блоха у стаціонарному випадку, та наведено їх розв'язки та відповідний графік для зсуву резонансної частоти у кубіт-резонаторній системі. При цьому в тексті не обговорюється які саме доданки у напівквантовому наближенні визначають таку відмінність.

Однак зазначені зауваження не впливають на здобуті автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація прекрасно структурована і написана гарною науковою мовою. Основні результати опубліковані в 5 статтях і 1 стаття - в працях міжнародної конференції, серед яких роботи у таких відомих профільних журналах як «Physical Review B», «Physical Review Applied» і «Фізика низьких температур». Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи й автореферат повністю відображають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача.

Дисертація Д.С. Карпова є закінченою науковою роботою, в ній вирішено важливу наукову задачу, яка має істотне значення для теоретичної фізики конденсованого стану, а саме: виявлено особливості взаємодії штучних дворівневих систем на базі надпровідних квантових бітів з електромагнітним полем резонатора у випадках класичного та квантового сигналу. Враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація задовольняє 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,
доктор фізико-математичних наук,
завідувач кафедри теоретичної ядерної фізики та
вищої математики імені О. І. Ахієзера
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна,
професор



В.Д. Ходусов

