

Відгук  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Івахненка Олега Володимировича**  
«Динаміка неадіабатичних переходів в квантових  
та класичних дворівневих системах»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань  
10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

Дисертаційна робота О.В. Івахненка присвячена дослідженню динаміки квантових та класичних дворівневих систем, що мають широке коло фізичних реалізацій, зокрема, у мікроскопічних та мезоскопічних структурах. Вивчення ефектів, що пов'язані з еволюцією заселеності квантових станів у таких системах є важливим напрямком сучасних досліджень у фізиці конденсованого стану, квантовому контролі та квантовій оптиці. Розвиток даних галузей за минулі роки відкриває нові перспективи для квантових обчислень, квантових комунікацій, фундаментальних досліджень, створення надчутливих приладів і сенсорів тощо. Системи та явища, що вивчаються в дисертації, важливі для вдосконалення структурних елементів квантових комп'ютерів, які планується застосовувати для вивчення більш складних квантових систем багатьох частинок і покращення їх фізичних характеристик. Також дослідження мають потенціал для створення нових мезоскопічних електромеханічних пристроїв, таких як мем'ємність або наноструктурні електромеханічні резонатори. Таким чином, тема дисертаційної роботи О.В. Івахненка є безсумнівно **актуальною**. Варто відзначити, що дисертантом зроблено належну апробацію результатів на наукових семінарах, школах і міжнародних конференціях світового рівня.

**Актуальність** досліджень дисертаційної роботи О.В. Івахненка 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 з сімох основних розділів. Розглянемо основні результати у відповідній послідовності.

У **першому розділі** надано огляд фізичних реалізацій дворівневих систем і розглянуто проблему Ландау-Зінера-Штукельберга-Майорани (ЛЗШМ) з деталізацією відповідних шляхів її вирішення відповідно до піонерських праць чотирьох видатних вчених.

У **другому розділі** вивчено одиночний перехід ЛЗШМ і розглянуто динаміку та час одноразового переходу в різних базисах. Отримано аналітичні вирази та

проведено числові розрахунки в рамках методу матриці еволюції. Наведено новий спосіб збудження ЛЗШМ зі збереженням імовірності, отримано більш точну формулу для середньої за часом ймовірності збудження в діабатичному базисі в рамках адіабатично-імпульсної моделі.

**Третій розділ** присвячено багаторазовим переходам ЛЗШМ і порівнянню двох підходів: адіабатично-імпульсної моделі та наближення хвилі, що обертається. Отримано більш просту формулу для оцінки часу перехідних процесів при одноразовому проходженні ЛЗШМ вивчено способи покращення відносного часу розрахунку інтерферограм для наближення хвилі, що обертається.

У **четвертому розділі** продемонстровано, як адіабатично-імпульсна модель може використовуватись для реалізації однокубітних гейтів. Завдяки швидкості та точності застосованої моделі стає можливим легко розрахувати параметри, необхідні для реалізації швидких та точних гейтів ЛЗШМ.

**П'ятий розділ** присвячено дослідженню надпровідного кубіту в напівнескінченній лінії передач, що закінчується дзеркалом. Показано, що однією з переваг такого атомно-дзеркального розташування є можливість ефективно маніпулювати властивостями поглинання дворівневого атома, забезпечуючи новий спосіб маніпулювання квантовими системами.

У **шостому розділі** досліджено класичний аналог квантової дворівневої системи — систему двох слабко зв'язаних класичних осциляторів. Вперше продемонстровано класичні аналоги ефектів нещодавно вивчених для кубітів — інтерферометрію ЛЗШМ і модуляцію з фіксацією та усередненням за рухом.

У **сьомому розділі** вивчено особливості наскрізного переходу зігнутих графенових мембран з метою використання вигнутої мембрани як пластини конденсатора з пам'яттю (мем'ємності). Отримано вирази для порогових сил перемикання та рівняння і відповідної напруги, які підтверджуються результатами чисельного моделювання, розрахунками молекулярної динаміки та теорії функціоналу густини.

Таким чином, в дисертаційній роботі О.В. Івахненка шляхом дослідження низки теоретичних моделей і відповідного розв'язання рівнянь динаміки квантових та класичних дворівневих систем, **отримано ряд нових цікавих результатів та розвинено сучасні методи теоретичного дослідження. Дисертація повністю відповідає спеціальності 01.04.02 — «теоретична фізика».**

На мою думку, до **найбільш цікавих наукових результатів**, що отримані у дисертації, можна віднести теоретичний аналіз квантово-класичної аналогії на прикладі системи двох слабко зв'язаних класичних осциляторів. Зокрема, послідовно показано, що для такої дворівневої системи рівняння руху формально збігаються або з рівнянням Шредінгера або з рівнянням Блоха у випадках, коли релаксацією можна знехтувати, або її необхідно враховувати, відповідно. Це означає, що динамічні явища дворівневої класичної системи можуть бути

безпосередньо описані вже вивченими для квантових дворівневих систем, і навпаки. Слід зазначити, що різноманітні механічні резонатори, які достатньо добре підходять для аналогового моделювання, з'явилися відносно недавно. З іншого боку, останнім часом спостерігається також значний інтерес до квантових систем з сильним збудженням і проводяться відповідні експерименти. Це означає, що досліджені класичні аналоги ефектів для кубітів: інтерферометрія Ландау-Зінера-Штукельберга-Майорани, модуляція з фіксацією та усереднення за рухом можуть бути підтверджені в сучасних експериментах. 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 системи, в яких відбуваються переходи ЛЗШМ, 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 фізики та теоретичної фізики. В 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 О.В. Івахненка фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Інститут фізики НАН України (м. Київ), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна (м. Харків), Львівський національний університет ім. І. Франка (м. Львів), Інститут фізики конденсованих систем (м. Львів).

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

- 1) На мій погляд, у дисертаційній роботі недостатньо розгорнуто надано відповіді на наступні пов'язані між собою питання. Наскільки сильно нелінійність в збуджувальному сигналі впливає на ймовірність переходу Ландау-Зінера-Штукельберга-Майорани? Чому для методу матриць еволюції, що може застосовуватись до широкого спектру сигналів для опису перехідного процесу використовується формули для лінійного збудження? Наскільки гарно адіабатично-імпульсна модель застосовна для гармонійного збудження?
- 2) У розділі 3 на малюнку 3.5 (і) у кривих для визначення дефазування присутньо багато шуму. Чи означає це, що при виборі різних відтинків перерізу буде отримано різні коефіцієнти дефазування?
- 3) У наближенні хвилі, що обертається, зокрема, в формулі 3.41 вводиться розвинення в ряд Фур'є, але для чисельних розрахунків потрібно брати обмежену кількість мод та нехтувати всіма іншими. Чим обумовлений вибір кількості мод в наближенні хвилі, що обертається в розділі 3.2? Для якої кількості мод побудовані інтерферограми на рис. 3.4?

4) Хоча результати розділу 6 відзначено мною як одні з найцікавіших, було би важливим зазначити в цьому розділі принципову відмінність квантових систем від класичних, яка не може бути відтворена на класичних системах. З наведених результатів можна зробити висновок, зокрема, що навіть динаміка зміни заселеності рівнів від часу збігається.

Однак 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 у 4 статтях у відомих міжнародних виданнях. При цьому, очевидно, що значний внесок в 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 О.В. Івахненка є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: досліджено динаміку квантових та класичних дворівневих систем, що мають широке коло фізичних реалізацій, зокрема, у мікроскопічних і мезоскопічних структурах, наведено важливі передбачення для поточних і майбутніх експериментів у таких системах.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значимість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертаційна робота «Динаміка неадіабатичних переходів в квантових та класичних дворівневих системах» повністю задовольняє вимогам, що ставляться до дисертацій доктора філософії МОН України, а її автор, Олег Володимирович Івахненко, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник,

провідний науковий співробітник

відділу статистичної фізики і квантової теорії поля

Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера

ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»



Андрій СОТНІКОВ

Підпис А.Г. Сотнікова ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар ІТФ ННЦ ХФТІ

кандидат фіз.-мат. наук



Артур КІРДІН