

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертацію Андрія Романовича Кузьмака
«Задача про брахістохрону в класичній і квантовій механіці»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика

Досягнення технологій досліджень мікрооб'єктів та конструювання мікроприладів в останні десятиліття призвели до створення пристройів і методик, що дозволяють оперувати окремими мікрочастинками, які виявляють квантові властивості. Потреба в побудові теоретичного опису таких систем спричинила появу нової області в квантовій механіці, яку називають квантовою інформатикою. Отримані в ній результати обіцяють суттєвий поступ в обробці і передачі інформації, що є особливо актуальним в наш час. Головним функціональним елементом пристройів, що могли б здійснювати перетворення і передавання інформації, є квантовий біт, тобто, дворівнева квантова система, станами якої можна легко керувати зовнішніми впливами, при цьому всі її стани повинні зберігати високий ступінь когерентності на протязі часу, необхідного для здійснення всіх операцій. Виконання квантових обчислень вимагає побудови квантового реєстру — набору з десятків тисяч (чи мільйонів) квантових бітів, які можуть попарно взаємодіяти, що необхідно для реалізації двоквабітових вентилів. Декогеренція та недосконалість квантових вентилів призводять до виникнення квантових похибок. Теоретично доведено, що поодинокі похибки з ймовірністю меншою однієї мільйонної можуть бути усунені використанням відповідних квантових кодів, а це дозволяє проведення безпомилкових квантових обчислень. Встановлено, що час когерентності квантового реєстра зменшується експоненційно з кількістю квантових бітів, тому питання мінімізації часу виконання окремого квантового вентиля, а також і всієї їхньої послідовності (для реалізації певного алгоритму) є дуже актуальну задачею. На даний час розглядається декілька фізичних систем як кандидатів на формування квантових бітів, зокрема, це фотони з різною поляризацією, іони в пастці Пауля, гіпотетичні аніони, системи з надпровідникових елементів а, також, частинки зі спіном $1/2$, що входять до складу великих органічних молекул в рідких розчинах чи утворюють кристалічну гратку твердих тіл. Саме деяким аспектам побудови квантових вентилів та їхньої часової оптимізації для спінових моделей і присвячено основну частину розглядуваної дисертації.

Дана дисертаційна робота, викладена на 150 сторінках, складається із вступу, шести розділів, висновків і списку використаної літератури із 181 посиланням.

У Вступі обґрутовано актуальність проведених досліджень, показано їхній зв'язок з тематикою наукових робіт фізичного факультету ЛНУ ім. Івана Франка, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, коротко викладено зміст дисертації, вияснено новизну і практичне значення отриманих у ній результатів, розкрито особистий внесок здобувача, приведено перелік конференцій та семінарів, на яких було апробовано результати дослідження.

Брахістохона — це крива, яка описує траєкторію в реальному просторі між двома точками з найкоротшим часом проходження частинки, поміщеної в зовнішнє поле, в рамках формалізму класичної (некvantової) механіки. Традиційно історію про брахістохрону починають із роботи Й.Бернулі 1696 року, хоча іще в 1638 році Г.Галілей запропонував вираз для брахістохрони, правда, помилковий. В **першому розділі** дисертації приведено огляд літератури, присвяченої різним варіантам задачі про брахістохрону в однорідних і неоднорідних зовнішніх полях в рамках нерелятивістської та релятивістської механік.

Очевидно, що кривої, аналогічної класичній брахістохроні, в квантовій механіці існувати не може. Тут подібна задача формулюється інакше: знайти гамільтоніан, який переводить фізичну систему із заданого початкового стану в заданий кінцевий стан за найкоротший проміжок часу. Історія цієї задачі, яка розпочинається десь у 2006 році, також детально викладена у першому розділі.

В **другому розділі** дисертації розглядається задача про брахістохрону частинки в гравітаційному полі, заданому метрикою Шварцшильда. Отримано диференційні рівняння брахістохрони для спостерігачів, розташованих вздовж неї та для віддалених спостерігачів, чисельними методами знайдено розв'язки цих рівнянь і обчислено час проходження брахістохрони у кількох простих випадках. Питання про побудову і врахування в'язі для здійснення руху по брахістохроні не розглядалося. Отримані результати є новими і мають академічний характер.

Основною моделлю, яку автор досліджує в 3-5 розділах, є система двох спінів $s=1/2$ в зовнішньому магнітному полі з різним набором параметрів взаємодії між спінами та з полем.

В **третьому розділі** вибрана модель має відмінні від нуля xx , yy , zz , xu , uy компоненти взаємодії та ненульові взаємодії із зовнішнім полем. Еволюція цієї моделі відбувається в двох ізольованих підпросторах її станів з паралельними і антипаралельними спінами. В кожному з підпросторів автор знаходить співвідношення між параметрами гамільтоніана, які призводять до мінімального часу еволюції системи з певного вибраного стану в довільний стан цього ж підпростору. Знову ж таки, вибираючи параметри, автор будує деякі квантові вентилі, які виконуються за мінімальний час. У всіх отриманих наборах параметрів гамільтоніана зовнішні поля, що діють на спіни, рівні нулю. Деякі з отриманих наборів виглядають нефізично. На мою думку, це свідчить, що отримані результати дають нижню часову межу виконання розглядуваних операцій, фізично реалістичніші гамільтоніани будуть виконувати

ті ж операції за більший час. Всі отримані гамільтоніани є унітарно еквівалентні до гамільтоніанів, отриманих в роботі A.Carlini at al. (2007) для відповідних квантових вентилів. Еволюцію початкових станів, які мають складові в обох підпросторах автор не розглядає.

Ця ж модель із ізотропною взаємодією (xx , yy , zz компоненти рівні між собою, а xz та yz компоненти рівні нулю) вивчається у **четвертому розділі**. Запропоновано такий алгоритм створення довільного стану цієї системи: починаючи із початкового стану з антипаралельними спінами за визначений проміжок часу система еволюціонує під дією міжспінових взаємодій, потім діють миттєвим імпульсом магнітного поля одночасно, але з різним напрямом, на кожен спін. Таким способом систему можна перевести в довільний стан оскільки процедура вносить достатню кількість параметрів. Вектор цього стану має вигляд розкладу Шмідта. Однак цю процедуру неможливо реалізувати експериментально, тому автор пропонує спрощену процедуру, аналогічну запропонованій в попередньому розділі, яка дозволяє приготувати довільний стан в підпросторі антипаралельних спінів. Використовуючи експериментальні дані обчислено параметри даного оператора для домішкового атома фосфору в гратці кремнію. Наприкінці розділу графічно показано часову залежність ступеня подібності реалізації квантового вентиля певного виду при застосуванні описаної процедури.

Розгляд цієї ж моделі продовжено в **п'ятому розділі**. Тут, зокрема, встановлено, що многовид, на якому відбувається еволюція системи є тором. Виходячи з означення віддалі між станами Фубіні-Стаді отримано метрику цього многовиду, яка, зрозуміло є метрикою тору. Знайдено криві постійної заплутаності для різних початкових станів системи.

В **шостому розділі** досліджено еволюцію спіну $s=1$ в постійному магнітному полі. Встановлено, що вона відбувається на двох многовидах, які є сферами різного радіуса. Отримано метрику цих многовидів. Ці результати узагальнено на спін величини $s>1$. Знайдено, що еволюція таких спінів відбувається на $s+1$ многовиді для цілих спінів і $s+1/2$ многовиді для півцілих спінів. Всі ці многовиди є сферами, радіус яких залежить від величини спіну і його проекції на вісь z .

Більшість результатів роботи є новими або суттєвими узагальненнями відомих.

Разом з тим до роботи є певні зауваження:

1. Деяким формулюванням бракує точності і чіткості, наприклад "... обчислені рівняння брахістохрони ..." (стор. 46), "... умови з (3.32) дозволяють згенерувати логічний оператор (3.31) за мінімальний час..." (стор. 65), "Генерування цього унітарного оператора відбувається вздовж геодезичної на підпросторі ..." (стор. 68), помилково названо оператор NOT оператором SWAP (стор. 68) і т.п. У Висновках до кожного розділу насправді перелічено його основні результати.

2. Бракує порівнянь з результатами інших авторів.

3. Частинка зі спіном $s=1/2$ формує квантовий біт в зовнішньому магнітному полі, тому квантові вентилі слід конструювати і мінімізувати час їхнього виконання з врахуванням цього факту.

Однак ці зауваження не знижують загальної високої оцінки дисертації і, зокрема, достовірності одержаних результатів та висновків, які забезпечується використанням добре апробованих, а також сучасних математичних методів, якістю публікацій

Дисертант проявив свою високу наукову ерудицію, вміння розв'язувати складні та актуальні наукові задачі. Теоретичне значення і практична цінність основних положень, результатів і висновків дисертаційної роботи не викликають сумніву.

Автореферат дисертації достатньо повно і правильно передає її зміст.

Всі положення, результати і висновки дисертаційної роботи повністю відображені у наведених у роботі наукових статтях і тезах, які опубліковано у виданнях, що входять в переліки, затверджені ВАК України.

Вважаю, що дисертаційна робота Кузьмака Андрія Романовича «Задача про брахістохрону в класичній і квантовій механіці» є грунтовним та оригінальним дослідженням і задовільняє вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а Кузьмак Андрій Романович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Ст.н.сп.

Інституту фізики конденсованих систем НАН України
к.ф.-м.н.

– Т.Є.Крохмальський

