

СТАНОВИЩЕ

относно дисертационния труд

за присъждане на образователната и научна степен „Доктор“ по Физически науки

във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“

Становището е от: проф. Стефан Герен (Университет на Бургундия Франш-Конте, Дижон, Франция)

Тема на дисертацията: **„Ефекти на формата на импулса върху динамиката на кубита и отвъд – изследване на квантовия контрол в процесори на IBM Quantum“**

Автор на дисертацията: **Иво С. Михов**

27.09.2025 г., Дижон (Франция)

Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Настоящата дисертация е посветена на квантовия контрол и по-специално на ефектите от формата на импулса върху динамиката на кубита с важни приложения в квантовите технологии и подлежащата спектроскопия, по-конкретно мощностно свръхразширение, мощностно свиване и калибриране на кубити. Ефектите от формата на импулса са сравнително умерено проучени в литературата, докато значението им нараства заради множеството им потенциални приложения в областта на квантовите технологии. Това изследване следователно е навременно. Ефектите, показани теоретично и числено, са демонстрирани експериментално на квантовия компютър на IBM по много убедителен начин.

Подробните оригинални приноси са по-специално: количествен сравнителен анализ на пет често използвани форми на импулси, които подобряват точността на експерименталното калибриране на резонанса, първото експериментално наблюдение на мощностно свиване, теоретичното предложение и експерименталната демонстрация на нов ефект на свръхразширяване, както и идентифицирането и експерименталната верификация на концепцията за изовероятност.

Резултатът за мощностното стесняване беше публикуван наскоро в високорейтингово списание, Physical Review Letters. Други две разработки са публикувани в Physical Review A, списание с висока репутация, а още две са в процес на подаване (и вече могат да бъдат намерени на платформата arXiv).

Резултатите са представени на множество международни конференции, школи и уъркшопи (постери и устни доклади).

Ръкописът е организиран по следния начин:

Глава 2 представя обзор на последните нововъведения на решими (точно или приблизително) задвижвани модели с две нива с тяхната реализация на квантовия компютър на IBM.

Глава 3 предоставя някои техники за решаване на уравнението на Шрьодингер с времева зависимост (точни, адиабатни и суперadiaбатни) и теорията на свръхпроводниковите кубити. Тези две глави подготвят следващите глави, които съдържат оригиналните резултати на дисертацията.

Кратката глава 4 описва формите на импулсите и хардуерните параметри на квантовите процесори на IBM, които се използват в следващите глави. Въведен е основният аргумент: при резонанс вероятността за преход не се влияе от формата на импулса, но ефектите стават съществени, когато се разглеждат отклонения от резонанса.

В глава 5 динамиката под влиянието на различни импулси се изучава теоретично чрез точни резултати от литературата и приближения. Решение е изведено, когато импулсите имат начални и финални (крайни) асимптотични рамена, които са линейни във времето. Все пак части от подобни изследвания съществуват в литературата [Phys. Rev. A 70, 043402 (2004)] и новостта на резултатите не е обяснена. След това подробно е представена реализацията на тези импулси на квантовия компютър на IBM. Изследването е разделено на анализ на два типа импулси: (i) „обичайни“, обикновено импулси с безкрайна основа, които могат да се третират по DDP метода и за които може да се тества известната хипотеза на Розен–Зинер, и (ii) крайни импулси с линеен наклон. Наблюдавани са леки разминавания между експерименталните реализации и теоретичните/числените резултати. Те са приписани на нелинейността на параметъра за амплитуда в Qiskit спрямо честотата на Раби и възможното изтичане към по-високи нива.

Глава 6 разглежда ефектите на мощностното свиване и свръхразширение. Мощностното свиване се появява, когато Лоренцова форма е отсечена при големи времена. Даден е коефициентът на скалиране на такова стесняване. Мощностното свръхразширение се анализира чрез квадратични и импулсни форми с четна степен в експонентата, наричани импулси с променящ се облик.

Глава 7 разглежда въпроса за модели на равна вероятност с времезависими фази (докато предходната глава използва константен детюнинг) по подхода на Делос–Торсън. По-специално, фазата на честотата на Раби се използва, за да се генерира ефективен времезависим детюнинг, тъй като последното не е директно достъпно на квантовия компютър на IBM.

Глава 8 завършва работата с обобщение на ключовите резултати и ограниченията (системи с по-висока размерност – двукубитни системи, системи със специфични експериментални ограничения, наличие на шум и декохерентност).

Критични бележки, въпроси и препоръки

Докторската дисертация е написана на много добър английски; тя е сравнително добре организирана и представена. Мога да забележа, че много кратката глава 4 със сигурност би могла

да се слее с друга. Обзорът на най-модерните методи в задвижваните системи с две нива показва солидните познания на автора по темата. Има обаче някои линкове в изложението с липсващи цитати в библиографията, най-вече в бързоразвиваща се област на оптималния контрол (виж по-долу). Моето мнение е, че това изследване с много аналитични резултати (демонстрирани на квантовия компютър на IBM) много добре допълва техниките на оптимален контрол, които често (но не винаги) водят до изцяло числено извеждане на импулсни форми.

Дисертацията е довела до три публикувани рецензирани статии с много високо качество (Physical Review Letters и Physical Review A), а още две са достъпни на платформата arXiv. Иво С. Михов е първи автор на всички тези статии, което признава неговия значителен принос. Тези публикации демонстрират високото качество на дисертацията. Освен това кандидатът е представил голям брой изяви (устни презентации и постери) на международни конференции, свързани с неговата докторска работа.

Имам следните въпроси, които да бъдат адресирани по време на защитата:

- Изместването, въведено в долната част на стр. 3, е посочено като фазов шум, докато изглежда като шум в честотата на Раби.
- Предложеният в раздел 5.2 метод изглежда подобен на този, развит в Phys. Rev. A 70, 043402 (2004). По отношение на крайния импулс с линейни асимптоти, защо е разгледан само линеен наклон? Какво бихме очаквали при полиномиални или експоненциални асимптоти?
- Изтичането към по-високи нива (от двете кубитни състояния) е споменато (стр. 70–71) и вероятно идентифицирано чрез асиметрия на пейзажа на възбуждане. Знаем, че такова изтичане е неизбежно в свръхпроводниковите системи и трябва да се проявява при силно възбуждане с бързи превключвания. Било ли е това изтичане по-ясно характеризирано на компютъра на IBM? Има ли начин то да бъде ясно идентифицирано с инструментите на Qiskit?
- В заключението на глава 6 е споменато приложение на мощностното свръхразширение като начин за възбуждане на нерезонансен преход. Това изглежда подобно на техники, които подобряват устойчивостта спрямо детюнинга чрез широколентови импулси (в контекста на мощностното разширение). Такива техники включват използването на композитни импулси. Тук предимството би било, че се използват форми на импулса вместо последователност от композитни импулси. Да се отбележи също, че това е разгледано и чрез оптимален контрол [виж напр. Phys. Rev. A 109, 062613 (2024), раздел 7], където оптимално формиран импулс има широколентов профил на възбуждане. Това следва да бъде коментирано.
- Как подходът на Делос–Торсън се обобщава към системи с по-висока размерност (системи с N нива)?

Имам следните допълнителни коментари:

- На стр. 19 е посочено: „изглежда, че фазовата модулация не само предоставя алтернатива на времезависим детюнинг, но и подобрява устойчивостта и точността на контрола“.

Въпреки това подобряване на устойчивостта чрез времезависим детюнинг или чрез еквивалентна фазова модулация е показано именно в Phys. Rev. Lett. 125, 250403 (2020), където специфичен осцилиращ детюнинг с константна амплитуда на честотата на Раби води до оптимална устойчивост, определена чрез оптимален контрол. Това следва да бъде включено и коментирано.

По-общо, развиващите се техники на оптимален контрол за квантов контрол не са споменати и цитирани в ръкописа, въпреки че тези техники често водят до форми на импулси [виж напр. Quentin Ansel, Etienne Dionis, Floriane Arrouas, Bruno Peaudecerf, Stéphane Guérin, David Guéry-Odelin и Dominique Sugny, Introduction to Theoretical and Experimental aspects of Quantum Optimal Control, J. Phys. B 57, 133001 (2024).] Те следователно са силно свързани с настоящото изследване.

- На стр. 24, раздел 3.3: свръхadiaбатните базиси имат дълга история, която не се ограничава до Ref. [176], например: M. V. Berry, Proc. R. Soc. London A 429, 61 (1990); A. Joye и С.-Е. Pfister, J. Math. Phys. 34, 454 (1993); K. Drese и M. Holthaus, Eur. Phys. J. D 3, 73 (1998). Това следва да се добави.
- На стр. 39 дадените цитати относно формулата DDP са непълни. Обобщената формула DDP е показана за пръв път в A. Joye, H. Kuntz и Ch-Ed. Pfister, Ann. Phys. 208, 299 (1991) и A. Joye, G. Miletти и Ch-Ed. Pfister, Phys. Rev. A 44, 4280 (1991). Това следва да се спомене. На стр. 41, Ref. [26] изглежда непълна.

Заклучения

Убеден съм, че теоретичните резултати и демонстрациите на квантовия компютър на IBM, представени в дисертацията, ще имат силно въздействие в областта на квантовата информация, тъй като ефектите от формата на импулса ще имат отражение върху широк спектър системи (кюдит, платформи, контрол и др.).

Дисертацията, авторефератът и качеството на научните публикации, представени от г-н Иво Михов, отговарят на изискванията на Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. Следователно подкрепям присъждането на образователната и научна степен „Доктор“.

Проф. Стефан Герен

[подпис]