

РЕЦЕНЗИЯ **на дисертация**

**за придобиване на образователна и научна степен "доктор" в
професионално направление 4.1 Физически науки, съгласно процедурата за
защита във Физически факултет (ФЗФ) на Софийския университет "Св.
Климент Охридски" (СУ).**

Рецензията е подготвена от доц. д-р Петър Александров Иванов, СУ "Св. Климент Охридски", Факултет по физика, в качеството му на член на научното жури съгласно Заповед РД 38-272/03.06.2024 г. на Ректора на Софийския университет.

Тема на дисертацията: "Прецизни методи за томография на квантови процеси".

Автор на дисертацията: Станчо Георгиев Станчев

Информация за кандидата:

Станчо Г. Станчев е завършил магистърска степен по Електротехника в Техническия университет на Варна през периода 1994-1999 г. В периода 2002-2008 г. е работил като сервизен техник и проектант на електрически инсталации в индустриални предприятия. В периода 2008-2020 г. е бил технически организатор на ветроенергийни проекти в индустрията. От 2020 г. е докторант в групата на проф. Н. Витанов.

Общо описание на научните постижения на кандидата:

Квантовата информатика е една от най-бързо развиващите се области на съвременната физика, която е едновременно фундаментална и изключително практическа. Квантовият компютър е аналог на класическия компютър, който се подчинява на законите на квантовата физика. Основен елемент на квантовия компютър е кюбитът, система с две състояния, която носи квантова информация. Промяната на състоянието на кюбита се извършва чрез прилагане на квантов гейт, който е фундаментален елемент в квантовите вериги и алгоритми. Квантовият процес отразява точността на квантовите гейтове и квантовите вериги.

Дисертацията на Станчо Г. Станчев е посветена на разработването на техники за квантова томография за характеризиране на точността на единични кюбитни и гвукюбитни квантови гейтове. В дисертацията е представен нов мулти-процесен квантов томографски метод, който по-точно определя точността на квантовите гейтове в сравнение със съществуващите методи. Експерименталната демонстрация на предложената томографска техника използва квантови процесори на IBM. Друг основен резултат от тезата е разработката на методи за усилване и

измерване на кохерентни грешки на единични кюбитни гейтове, чрез прилагане на повтарящи се взаимодействия.

Общ преглед на работата по дисертацията

Глава Втора изследва основните принципи в квантовата информационна теория. Въз основа на фундаменталните правила в квантовата механика, е представен модел за обработка на квантова информация, който включва: (1) подготовка на началното състояние. (2) Времево развитие на квантовото състояние. (3) Измерване на вероятностите на системата да бъде в дадено състояние. Квантовото развитие се представя чрез унитарни оператори (гейтове), които играят ключова роля в съвременните квантови технологии. Гейтовете могат да бъдат еднокюбитни, които действат върху един кюбит, като гейт на Адамар, фазов гейт и др., или многокюбитни, които действат върху повече от един кюбит. Пример за такива гейтове са CNOT гейт, CPHASE гейт, SWAP гейт и други. От голямо значение в квантовата информация е характеризацията на точността на квантовия гейт, т.е. колко близо експериментално реализираният гейт е до целевия гейт. Квантовата томография цели да определи всеки от елементите на матрицата на квантовия гейт и така да измери неговата точност. Очевидно, квантовите системи не са напълно изолирани поради взаимодействия с околната среда. Втората глава изследва основните принципи и уравнения на отворените квантови системи. Състоянията на такива системи се описват с матрицата на плътността, а развитието във времето с помощта на уравнението на Линдблад и операторите на Краус. Квантовата еволюция обикновено се представя чрез напълно положителна и следосъхраняваща карта (CPTP карта). Важно е да се отбележи, че представянето чрез операторите на Краус не е единственото, има и други CPTP представяния на процесите, като тези на Стайнспринг и Чой-Ямиолковски, Паули трансфер матрица (PTM) и други. В настоящата дисертация основно се използва PTM репрезентацията, която може да бъде изразена чрез операторите на Краус и базисните оператори на Паули. PTM репрезентацията е в така нареченото пространство на Хилберт-Шмид (размерност d^2). В тази репрезентация, индексът на смесване на матрицата на процеса се представя като супероператор, който трансформира началното състояние в ново състояние. Ако имаме поредица от процеси, тогава целият процес се представя като матричен продукт на индивидуалните процеси, което е важен аспект на PTM репрезентацията. Таблица 2.1 от дисертацията представя връзката между различните CPTP представяния, което се осъществява чрез оператори за трансформация на базиса.

Трета глава на дисертацията е посветена на квантова томография на състояния. Първо, разглежда се томография на кюбитни състояния. Плътностната матрица може да бъде представена в базис, зададен от матриците на Паули. Коефициентите в репрезентацията са средните

стойности на Паули матриците в даденото състояние. Измерванията обикновено се извършват в Z базис (изчислителен базис). Ако искаме да направим измерване в X или Y базис, се налага допълнително въртене (доверени операции), което трансформира кюбитното състояние в Z базис, така че измерването в Z базис дава информация за състоянията в X и Y базис. Стандартната квантова процесна томография (SQPT) се базира на следните стъпки: Системата се подготвя в определено състояние, което се счита за точно. Втората стъпка е прилагането на неизвестния процес (гейт) върху d^2 ортонормирани състояния. В последния етап се извършват d^2 проективни измервания. Предполага се, че гейтовете за подготовка и измерване на състоянието (SPAM гейтове) са известни и точни. Експериментите се повтарят много пъти, за да се съберат достатъчно статистически данни. В крайна сметка, вероятностите, които се отчитат d^2 пъти, са директно свързани с неизвестния процес и подготвителните състояния. Веднъж щом вероятностите са измерени, неизвестният процес се реконструира чрез линейна инверсия. Като последна стъпка се използва оценка на максималната вероятност (Maximum Likelihood Estimation), за да се намери физическият процес, съответстващ на матрицата PTM.

Диамантена норма и процесно инфиделити се използват като индикатори за грешката на измерения процес спрямо идеалния процес. Стандартната томография SQPT разчита на точността на измервателните (SPAM) гейтове и информацията от четенето, които като цяло може да бъдат неточни, довеждайки до систематични грешки. Когато се извършват множество сканирания на същия процес, различните резултати с разпределение близо до Гаусовата крива се анализират. Дисертацията представя симулация с 50 томографски сканирания, при които диамантният стандарт е използван като индикатор за грешка. Отклонението на средната стойност от точната стойност се нарича неточност, докато ширината на Гаусовото разпределение се нарича непрецизност, която намалява с увеличаването на статистиката (броя шотовете).

Четвърта глава на дисертацията е преломна и се базира на третата публикация на докторанта. Представен е методът Многопроцесна Квантова Томография (MQPT), който е базиран на повтарящи се приложения на квантови гейтове. Това води до трансформация на грешките от единични квантови процеси в мулти-гейтови процеси, които след това се измерват с висока точност и прецизност чрез SQPT. Същността на метода включва измерване на PTM на мултипроцеса с използване на стандартна квантова томография, след което се прави последваща обработка за получаване на PTM на единичния процес. В дисертацията е използвана симулация на квантова машина на IBM с използване на IBM_QASM_SIMULATOR. Разликата между реалния процес и идеалния (целевия) е дефинирана чрез матрицата на грешките. Целта на

многопроцесната квантова томография е да измери нормата на грешката, която е индикатор за точността на процеса, като също така се фокусира върху отделните елементи на матрицата на грешките. MQPT включва първоначален етап, в който се прилагат N последователни процеси. Целта е да се увеличи грешката на гейта и по този начин да се подобри точността и прецизността на получения процес. В дисертацията са предложени два подхода: (1) итеративен метод и (2) линейна апроксимация.

В итеративния подход, той представлява цикъл, в който всяка итерация коригира матрицата на грешките. Дисертацията демонстрира ефективността на метода за едночастични и двучастични гейтове с използване на симулация на IBM Quantum IBMQ_SIMULATOR.

Линейният подход се прилага за инволютивни гейтове и за произволни целеви гейтове. Същността на метода се свежда до уравнение на Силвестър за матрицата на грешките, което позволява да се намери единичният процес. Експериментално MQPT е демонстрирано на CNOT гейт, който е базов гейт на процесора IBMQ_MANILA. Резултатите от MQPT се сравняват с тези, получени от SQPT. Извършени са 10 сканирания с 4000 шота и за двете SQPT и MQPT. Проведено е сравнение между различните методи за томография на основата на данни за калибриране от IBM, които определят средната грешка на CNOT гейта като измервателна референция. Резултатите показват, че SQPT преувеличава грешките, докато и двата метода на MQPT дават значително по-ниски стойности, което е важно предимство на предложените методи.

Пета глава на дисертацията изследва кохерентното взаимодействие на квантови системи с поредица от импулси. Разглежданите квантови системи притежават симетрии на Вигнер-Майорана (WM) и Морис-Шор (MS). Тези симетрии позволяват дадена мултинивова система да бъде редуцирана до двунивов проблем. Хамилтонианът на система с WM симетрия има тридиагонална форма, при което матричните елементи трябва да изпълняват определени условия. Трансформацията на Морис-Шор позволява система, състояща се от две свързани множества от дегенерирани нива, да бъде трансформирана в множество от независими двунивови системи и множество от тъмни състояния. Изискването за MS трансформацията е, че всички Раби честоти имат еднаква времева зависимост и еднакви разлики в честотите (детюнинги). Унитарният пропагатор за двунивова система може да бъде изразен с параметрите на Кейли-Клайн. След извършване на обратната трансформация се получава израз за единичния пропагатор на оригиналната система. В дисертацията са намерени изрази за единичния пропагатор, когато има N итерации на взаимодействието, описано от Хамилтониана с WM или MS симетрия. Тези аналитични изрази са основният резултат в тази глава.

Шеста глава на дисертацията е посветена на характеризацията на високопрецизни Раманови кюбитни гейтове. Раманова система е три-нивова система, където две основни метастабилни нива взаимодействат с трето

ниво, което в повечето случаи е краткотрайно ниво. В случая, когато Раби честотите имат еднаква време-зависимост, Рамановата системата може да бъде редуцирана до ефективна система с две нива и едно тъмно състояние. В този случай може да се намери израз за единичния пропагатор в оригиналния базис. При определени условия динамиката на системата може да бъде ограничена само до две основни нива, които формират кубит. В този случай, единичният пропагатор е единичен кубитен гейт. Целта на тази глава е да разработи томографски метод за определяне на кохерентните грешки на гейтове в Раман-свързани кубити. Основната идея е да се използва конструктивна интерференция, създадена от повторни взаимодействия, което води до увеличаване на грешките. Тези стойности могат да бъдат измерени, от които могат да бъдат определени грешките на отделни гейтове. Този метод се базира на връзката между N-процесните параметри на Кейли-Клайн и единичните параметри на Кейли-Клайн (съответно). Разглеждат се гейтнинг грешка (грешка в честотата) и импулсната грешка (грешка в площта на импулса). Параметрите на Кейли-Клайн са изразени чрез три параметъра, които характеризират кохерентните грешки в гейта. Накрая се предлага техника за определяне на грешките в гейта. Първо се разглежда моделът на Раби. В близко-резонансно приближение се предлага поредица от измервания, които определят грешките в Раман кубитния гейт. Томографската техника също се разглежда за други модели с време-зависими Раби честоти.

Последната седма глава представя заключението на дисертационната работа.

Публикации и значимост на резултатите

Дисертацията се базира на три научни публикации в списания с импакт фактор. Естеството на първоначалните работи и техният брой напълно удовлетворяват изискванията на Физически факултет на Софийския университет "Св. Климент Охридски" за получаване на научната степен "доктор".

Критични забележки

Дисертацията е написана на много добър английски език и представянето на резултатите е ясно. Преди всяка глава има кратко въведение и накрая са представени заключенията. Основната ми забележка е, че някои части от въведението биха могли да бъдат съкратени. Също така, за удобство на читателя, би било добре да се представи IBM квантовият кубит с повече подробности.

Имам следните въпроси към докторанта, свързани с дисертацията:

1. В тезата се споменава, че средната грешка на IBM квантовия CNOT гейт е 6×10^{-3} . Как е измерена тази стойност?

2. Как се извършва четенето на IBM квантовата информация? В тезата се споменава, че това е един от източниците на грешка. Как може да бъде намалена тази грешка?
3. Къде може да се наблюдава реална квантова система с повече от три нива, която притежава симетрия на Вигнер-Майорана?

Лични впечатления за кандидатата

Познавам лично Станчо Г. Станчев откакто започна като докторант в групата на проф. Николай Витанов. Моите лични впечатления са за изключително мотивиран учен, който работи с желание и вдъхновение в областта на квантовата информация. Представената дисертационна работа показва, че Станчо Г. Станчев наистина е проникнал дълбоко в тази бързо развиваща се област.

Заключение

След като се запознах с представената дисертация, Автореферата и другите материали, потвърждавам, че научните постижения отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и на Правилника за прилагането му, както и на съответните регулации на СУ "Св. Климент Охридски" за придобиване на образователна и научна степен "доктор". По-специално, кандидатът отговаря на минималните национални изисквания в професионалното направление и не е открито плагиатство в дисертацията, както и в представения Авторски Автореферат.

ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на изложеното по-горе, препоръчвам на научното жури да присъди образователната и началната научна степен "доктор" в професионално направление 4.1 Физически науки; Физика на атомите и молекулите на Станчо Георгиев Станчев.

29.08.2024

Подготвил рецензията: доц. д-р Петър Иванов