

Авторска справка за приносния характер на трудовете

на гл. ас. д-р Светослав Стойчев Иванов

I. Реализиране на квантови алгоритми

Публикации A1, A7, A13, A16, B1

Квантовите алгоритми се базират на физични явления като квантова суперпозиция и квантова сплетеност. Благодарение на квантовата суперпозиция е налице вроден изчислителен паралелизъм, поради което се очаква, че при успешна физична реализация квантовите алгоритми ще решават някои изчислителни задачи *съществено* по-бързо от съответните класически алгоритми. Гореизброените публикации имат принос към някои от най-разпространените квантови алгоритми като квантовата трансформация на Фурие и квантовото търсене.

Квантовата трансформация на Фурие е значима, тъй като играе централна роля за множеството основни квантови алгоритми, които са експоненциално по-бързи от класическите си аналози. Приноси в квантовата трансформация на Фурие имат публикации [A1] и [B1]. Публикация [A1] предлага техника за изпълнение на 8-мерната трансформация на Фурие върху система от три кубита чрез йони в уловка с магнитен градиент, управлявани от микровълново поле. Магнитният градиент създава (многокубитно) взаимодействие между всички йони. Реализацията използва единствено еднокубитни гейтове и свободна еволюция, като свободната еволюция има две предимства. Първо, тя се реализира физически просто чрез изчакване определено време (докато действа многокубитно взаимодействие). Второ, сложната многокубитна логика, която тя реализира, обхващаща всички кубити, а не само два наведнъж, както прави стандартният метод. И понеже се използва едновременното взаимодействие между трите йони, изпълнението на алгоритъма е трикратно по-бързо спрямо стандартния метод. Техниката е успешно реализирана експериментално в същата работа.

Публикация [B1] предлага нов теоретичен метод за реализация на трансформацията на Фурие, който отново се базира на еднокубитни гейтове и свободна еволюция. Същественото предимство на тази работа е, че, базирайки се на едновременното взаимодействие между всички кубити, се постига квадратично ускорение в изпълнението на алгоритъма: вместо $O(N^2)$ стъпки се изискват $O(N)$, където N е броят на кубитите (йоните).

Публикация [A7], [A13] и [A16] предлагат схеми за реализиране на алгоритъма за квантово търсене. В [A7] се демонстрира как може да се изпълни алгоритъмът в система от кудити – квантови системи с много нива, аналози на кубитите. Предимството е, че за изпълнение на една и съща задача са необходими значително по-малко кудити отколкото кубити. Други схеми с кудити се базират на сложната трансформация на Фурие върху кудита. Вместо нея нашата схема използва произволна физична операция, която създава равна суперпозиция между състоянията на кудита. Тази операция може да се изпълни в *една* физична стъпка.

В работи [A13] и [A16] се разглежда търсене чрез йони в уловка. Отново схемите са значително по-прости от предишните, тъй като отражението спрямо средния елемент, основна логическа операция в алгоритъма, възниква естествено в йонната уловка: то се постига чрез един лазерен импулс, адресиращ всички йони. В предишните работи се налага използването на допълнителни гейтове, приложени върху всеки кубит, което увеличава броя физически стъпки за изпълнение на алгоритъма и намаля неговата

надеждност. Работи [A13] и [A16] позволяват също да се изпълни детерминистичен вариант на квантовото търсене чрез промяна на честотата на лазерния импулс, адресиращ всички йони. В работа [A13] броят на логическите състояния, сред които се извършва търсене, расте линейно с броя йони, а в работа [A16] расте експоненциално.

II. Реализиране на квантови гейтове

Публикации A2, A3, A10

Квантовите гейтове са логическите стъпки, които изграждат квантовите алгоритми, и като такива те играят съществена роля в квантовата информация и квантовите изчисления. Двукубитните гейтове, изпълняващи логически операции върху два кубита, са базисни за квантовите алгоритми, тъй като всеки алгоритъм може да бъде конструиран чрез тяхното комбиниране с еднокубитни гейтове. Квантовото изчисление обаче зависи силно от прецизността на физичната реализация на двукубитните гейтове. Реализирането на прецизни гейтове с непрецизни взаимодействия е трудна задача, на която е посветена публикация [A2]. В тази работа се конструират *композитни* гейтове – това са поредици от идентични на целевия гейт (но непрецизни) двукубитни гейтове, разделени с еднокубитни фазови гейтове. Чрез подходящ избор на фазовите гейтове грешката в композицията се компенсира до определен порядък. Демонстрира се как да се компенсира грешката в единичен гейт до 6-ти порядък, като се дава метод за конструиране и на по-прецизни гейтове. Демонстрира се също и имплементация на композичните двукубитни гейтове в йонни уловки, където се компенсират едновременно грешки в площта на импулса и в честотата на лазерното поле.

Гейтовете на Тофоли и на Фредкин са трикубитни гейтове. Подобно на двукубитните гейтове, тези също са базисни за квантовото изчисление не само защото с тях може да се синтезира всеки квантов алгоритъм, но и защото с тяхна помощ се извършва корекция на квантовата грешка. Публикация [A3] разработва схеми за физична реализация на тези гейтове с минимален брой физични взаимодействия – почти двойно по-малко спрямо стандартните схеми. Предложените схеми използват глобално адресиране на кубитите за многокубитните логически операции, което значително опростява физичната реализация и увеличава прецизността на гейтовете. Предлага се и схема за реализация на тези гейтове в системи, където всеки кубит може да взаимодейства само с най-близкостоящите (nearest-neighbour interaction). Подобни взаимодействия са характерни например за системи от свръхпроводящи кубити. За разлика от други схеми, предложената не използва помощни кубити или помощни състояния.

Публикация [A10] предлага техника за създаване на произволен многокубитен НЕ-гейт (C^N -NOT gate) в йонни уловки. Този гейт прилага логическата операция НЕ върху избран целеви кубит, ако останалите N кубита са в логическо състояние 1. В същността си предложеният метод използва поредица от линеен брой лазерни импулси, приложени върху целевия кубит, като по този начин се постига деструктивна интерференция на нежеланите преходи в системата. За сравнение стандартният метод за конструиране на този гейт използва помощни кубити или помощни състояния и огромен брой едно- и двукубитни гейтове. Многокубитният НЕ-гейт е важен за алгоритъма за квантово търсене и за реализирането на квантов random walk.

III. Създаване на квантови състояния

Публикации A5, A12

Създаването на сплетени квантови състояния има редица физични приложения например в квантовата телепортация, квантовата криптография, квантовата метрология и различни квантови алгоритми. От практически интерес е създаването на сплетени състояния с произволна размерност, тъй като при високи размерности превъзходството на квантовите приложения над класическите расте.

Публикация [A5] е посветена на създаването на състояния на Дике от произволни размерности в йонни уловки чрез лазерни импулси. Състоянията на Дике са важни например защото те са неподатливи към колективно дефазирание, което е доминиращият източник на декохерентност в редица квантови системи. Също така с помощта на състоянията на Дике могат да се получават различни класове от други сплетени квантови състояния. Предимството на развития в публикация [A5] метод спрямо предишните методи е, че създава състояния на Дике с произволна размерност. Също така методът използва глобално адресиране на кубитите, т.е. не се нуждае от индивидуален контрол на отделни кубити. Освен това броят физични стъпки расте линейно с броя кубити, т.е. логаритмично спрямо размерността на състоянията. Използвани са композитни импулси – поредица от лазерни импулси с определена площ и фаза. Поради простотата и ефикасността си, тази техника се радва на огромна популярност в експерименталната физика.

Публикация [A12] предлага метод за получаване на сплетени състояния в системи от два атома в кухни чрез лазерно охлаждане. Три лазерни полета са настроени така, че всички основни състояния освен целевото състояние се възбуждат резонансно. Така целевото състояние е стационарно за приложеното взаимодействие. Предложеният метод има предимства пред други методи, защото той е нечувствителен по отношение на флуктуации в параметрите на взаимодействие като лазерната честота, интензивността на лазера, времето за взаимодействие, началното състояние на системата. Също така не е необходим индивидуален контрол над отделните атоми. В сравнение с други схеми за получаване на сплетени състояния чрез охлаждане, предложената схема предвижда по-висока прецизност за същите експериментални параметри.

IV. Контрол над прости квантови системи

Публикации A11, A15, A17, A18

Селективното манипулиране на близко разположени квантови системи (напр. атоми и йони), е от съществена важност за различни области от физиката, например за квантовите компютри, където скалируемостта е невъзможна без индивидуалния контрол над голям брой близко разположени йони в уловка, атоми в оптична решетка и др. Често доминиращата експериментална грешка се дължи именно на нежеланата манипулация на съседни на целевата квантови системи. Публикация [A11] предлага метод за индивидуално манипулиране на атоми или йони в уловка с висока прецизност чрез употребата на композитни поредици от лазерни импулси. За целта са изведени нови теснолентови (narrowband) и правоъгълни (passband) импулси. Теснолентовите импулси възбуждат единствено система (напр. йон), която има точно определена позиция в пространството, докато правоъгълните импулси в допълнение подобряват надеждността на манипулациите над целевия йон, като елиминират грешки от лошо калибриран или флукуиращ интензитет на лазерното поле или нестабилност в насочването на

лазерния сноп. Предишните композитни импулси са неподходящи за индивидуално манипулиране поради наличието на крила (sidebands) в профилите на възбуждане или са много чувствителни към вариации в площта на импулса.

Свърхкъсите фемтосекундни лазерни импулси са значими за физиката, защото разкриват нови хоризонти както за фундаментални изследвания, така и за приложения в индустрията. Селективното възбуждане на предзададени квантови състояния чрез фемтосекундните лазерни импулси е изключително важно за кохерентния квантов контрол. Селективността обаче е възпрепятствана от широкия спектрален диапазон, характерен за тези импулси. Публикация [A15] развива схема за *селективно* възбуждане на определени атомни състояния на натрия чрез интензивен фемтосекунден лазерен импулс. Селективността се постига чрез вариране само на един контролен параметър на импулса – скоростта на изменение на честотата (chirp), което се постига чрез модулиране на фазата на импулса. Различни състояния могат да бъдат селективно възбудени за различни стойности на този параметър. Техниката е демонстрирана експериментално в същата публикация.

Публикации [A17] и [A18] разработват модели на кохерентен контрол на прости квантови системи, например атоми, йони, вкл. спин-1/2 частици. Работа [A17] разглежда приближен модел, описващ система от три нива с линейно изменящи се с времето енергии и импулсно взаимодействие. Използван е моделът на Ландау-Зенер. Демонстрирано е много точно съвпадение на модела с числените резултати. Резултатите от тази работа са от интерес за описание на динамиката на електронни енергетически състояния в алкални атоми или на динамиката на преходите между трите магнитни поднива на ниво с пълнен ъглов момент $J = 1$ на атом в магнетооптична уловка.

Моделът на Ландау-Зенер е най-популярният метод за пресмятане на вероятности за преход между две взаимодействащи си неизродени състояния, чиито енергии се пресичат във времето. Такава система може да се срещне във всяка област от квантовата физика. В работа [A18] е изведено точно решение за *изродения* модел на Ландау-Зенер. Пример за подобна система са магнитни поднива на две атомни нива с определени стойности на пълните ъглови моменти J .

V. Квантово симулиране на многочастични спин-бозонни и спин-спин модели

Публикации A6, A14

Представените публикации разглеждат симулацията на многочастични квантови модели чрез йони в линейна уловка на Паул. Симулацията се базира на единния математически формализъм, който описва модели от различни области на физиката. Например с помощта на йони в уловка на Паул, които лесно могат да се контролират експериментално, може да бъде изследван квантовият модел на Изинг от физика на твърдото тяло. Така сложни системи, при които дори и численият анализ е невъзможен, могат да бъдат експериментално изследвани.

Публикация [A6] изследва колективния модел на Ян-Телер в йонен кристал, където система от няколко спина взаимодейства с една вибрационна мода. Моделът е решен точно в термодинамична граница. Показано е, че квантовият фазов преход е съпроводен със спонтанно нарушаване на $U(1)$ симетрията, при което системата колективно променя равновесните си положения, както и ориентацията на спиновете.

Моделът на Джейнс-Къминг-Хъбард (JCH) описва квантов фазов преход между фаза на Мот и суперфлуидна фаза в система от атоми и фотони в резонатори, свързани с оптични нишки. В първата фаза фотоните са локализирани в резонаторите, а във втората фаза те са споделени между отделните резонатори. Точното интегриране на модела на JCH е невъзможно. Публикация [A14] предлага квантова симулация на този модел в линеен йонен кристал, където фотоните биват заместени с фонони. Взаимодействието между спиновете може да се контролира както по големина така и по знак, посредством интензитета и честотата на лазерното поле. Предложена е и експериментална схема за изследване на модела на JCH. Първото експериментално демонстриране на този модел е направено в Phys. Rev. Lett. 111, 160501 (2013), следвайки теоретичната публикация [A14].

VI. Композитни поляризационни ретардери и поляризационни филтри

Публикации A4, A8, A9, B2

Поради многобройните си приложения поляризационните ретардери (вълнови пластини) и поляризационните филтри са интересни за оптиката от десетилетия. Съществена роля играят широколентовите (ахроматични) и теснолентовите ретардери. Широколентовите са слабо чувствителни към дължината на вълната, а теснолентовите действат по обратния начин. Например широколентов $\lambda/2$ ретардер внася фазова разлика π между два ортогонални вектора на поляризация за цял диапазон дължини на вълната около централната дължина на вълната λ , докато теснолентовият ретардер прави същото единствено за много тесен диапазон около централната дължина на вълната.

Публикация [A9] е теоретична и предлага систематичен метод за конструиране на широколентови $\lambda/2$ и $\lambda/4$ ретардери, които действат в произволно широк диапазон около централната дължина на вълната. Освен спрямо дължината на вълната, ретардерите са нечувствителни и към други параметри, като температурата и дължината на ретардера, както и към ъгъла на падане на светлинния лъч. Работи се по аналогия с композитните импулси: широколентовият ретардер е композитен ретардер, който се състои от поредица от единични ретардери, чиито оптични оси са завъртени на определени изчислени ъгли. Поляризацията може да се манипулира просто чрез промяна на тези ъгли. Превъзходството на предложения метод спрямо предишните композитни методи е, че работи със значително по-малък брой единични ретардери от комерсиалните като постига същата ефективност.

Освен широколентови публикация [A8] и [B2] предлагат и теснолентови ретардери и поляризационни филтри. Типът на композитния ретардер или филтър се определя единствено от ъглите между главните оси, т.е. чрез промяна на ъглите широколентов ретардер (филтър) може да премине в теснолентов и обратно. Получените ретардери и филтри са експериментално демонстрирани.

В публикация [A4] експериментално е демонстрирано как с комбинирането на единични ретардери може да се създаде композитен теснолентов филтър, чиято дължина на вълната на максимална пропускливост може е различна от тази на единичните ретардери. Демонстрирано е как чрез промяна на ъглите между оптичните оси може да се настройва дължината на вълната.

Експерименти от всичките четири публикации могат да бъдат проведени със стандартно лабораторно оборудване.