

Макар че е постигнат огромен напредък в изчислителните методи и във физиката, има задачи, които е почти невъзможно да бъдат решени на класически компютър.

Финансирането от Агенцията за национална сигурност и Министерството на отбраната на САЩ поддържаха известно ниво на работата в областта на квантовите компютри, но резултатите бяха спорадични.

Не следях достатъчно задълбочено новините за надпреварата в тази сфера между САЩ, Китай и Европа, защото знаех, че квантовите компютри страдат от един основен проблем – „квантовия шум“, и докато не бъде решен, за никаква стабилност на изчисленията не можеше да се говори.

Ускорението на процеса дойде едва през последните 10 години, когато технологични концерни като IBM, Google и Microsoft направиха значителни инвестиции в квантовите изчисления. Те издигнаха тази сфера на завидно ниво и стимулираха по безпрецедентен начин глобалната надпревара за квантово господство – със сериозен акцент върху националната сигурност и киберсигурността.

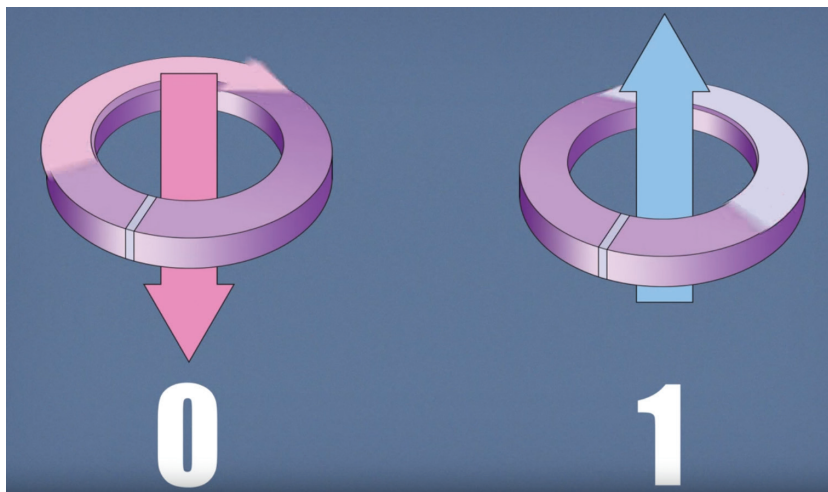
Тогавя в надпреварата се включиха няколко европейски екипа със задача да създадат европейския квантов компютър. Предположенията ми като журналист бяха, че първоначалният импулс е дошъл от „Бригадата“.

Магията на кюбитите и необятната сила на квантовия компютър

В какво се крие тайнствената суперсила на квантовия компютър? В конвенционалния всички изчисления се основават на аритметически и логически операции с битове. Транзисторите в компютъра могат да бъдат в състояние 1 или 0, тоест „включен“ или „изключен“. В термините на компютърната логика това състояние се нарича бит и това е най-малката единица информация. Физически битът може да бъде в процесора, в оперативната памет, в магнитния диск, но същността е една и съща: винаги може да се определи дали стойността

му е нула или единица. Ключовата дума тук е „винаги да се определи“.

За разлика от конвенционалния, в квантовия компютър има кюбити вместо битове. Носителите на кюбитите са квантови частици, например електроните. Присъщо тяхно свойство е квантовото „въртене“ (спин). Електронът може да се върти „нагоре“ или „надолу“ по протежение на координатната ос z . А кюбитът, породен от него, има стойност $|0\rangle$ („надолу“) или $|1\rangle$ („нагоре“).



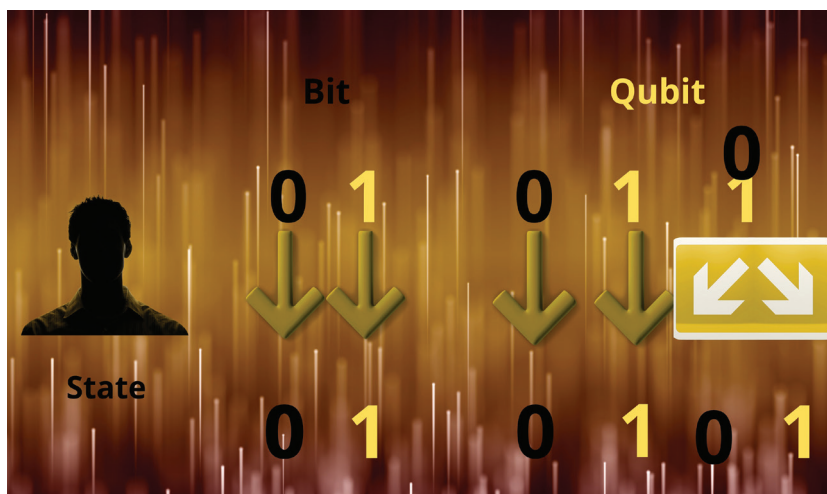
Кюбитът има стойност 0 или 1

Когато през 1935 г. лауреатът на Нобелова награда Ервин Шрьодингер лансира своя мисловен експеримент, наречен „Котката на Шрьодингер“, той със същата убеденост можеше да говори и за квантовите битове: „В затворена кутия е поставена котка. В кутията има механизъм, който се състои от радиоактивно ядро и съд с отровен газ. Параметрите на експеримента са така подбрани, че вероятността за един час ядрото да се разпадне е 50%. Ако ядрото се разпадне, механизмът се задейства, отваря се съдът с отровен газ и котката умира.“

Според квантовата механика, ако върху ядрото не се провежда наблюдение, състоянието му се описва като суперпо-

зиция (смесване) на двете състояния – разпаднало се ядро и неразпаднало се ядро. Следователно котката може да е жива и мъртва едновременно. Естествено, ако кутията бъде отворена, експериментаторът ще види едно от двете състояния – „ядрото се е разпаднало, котката е мъртва“ или „ядрото не се е разпаднало, котката е жива“.

Сега да се върнем отново на квантовия бит (кюбит), който може да бъде в състояние нула, единица и едновременно в двете състояния, тоест в суперпозиция на 0 и 1.



Илюстрация на бит и суперпозиция

Горната фигура илюстрира суперпозицията. Ако транзисторът е в състояние нула, ще измерим нула, а ако е в състояние единица, ще измерим единица.

Кюбитът също може да застане в състоянията нула и единица. Тогава, точно както при бита, ще видим съответно 0 и 1. Ако обаче кюбитът е в състояние на суперпозиция, той едновременно ще бъде $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Ако решим да видим в какво състояние е кюбит, който е в суперпозиция, той мигновено и произволно „колабира“ или в състояние 0, или в състояние 1.

Това е фундаменталната разлика между бит и кюбит.

Друга особеност на кюбитите е зависимостта на стойността

им от измерването. Това означава, че програмистът няма как да знае предварително стойността на кубита, докато не го измери, а самият факт на измерване влияе на стойността на кубита. Да, звучи странно, но това е характеристика на квантовите частици и както казва Ричард Файнман, едва ли има човек, който напълно разбира квантовата механика.

Част от сложността се дължи на още една особеност. В основата на квантовите изчисления е квантовото заплитане или квантовото взаимодействие. Ако имаме редица от N -кубита, то всеки от тях влияе на всички останали и респективно всички на него. Следователно не само всеки кубит може да бъде в състояние на суперпозиция, но системата като цяло може да бъде в суперпозиция. Тя включва всички комбинации от двете състояния нула и единица на N -те кубита. Възможните състояния са 2^N .

От това 2^N следва, че квантов компютър само с 30 кубита би имал 1 073 741 824 състояния. А ако е с 300, ще притежава приблизително същия брой възможни състояния, колкото е общият брой на атомите във Вселената.

Всяко състояние може да се съхранява и да обработва информацията едновременно с всички останали. Но това съвсем не е всичко. Увеличаването на броя на кубитите плюс квантовото заплитане позволява на квантовите компютри да решават някои задачи много, много по-бързо от суперкомпютрите. Високата им производителност е резултат от това, че паралелно и едновременно вървят милиони изчислителни процеси.

Тези твърдения са верни, ако кубитите винаги генерират едни и същи състояния. Това се нарича кохерентност. На практика обаче това не е така. Причината е, че при нормална температура електронът може да бъде в произволна точка, която лежи на сферата на Блох (Bloch Sphere). *Вижте Quantum States And The Bloch Sphere. (PIXABAY)*

Фактът, че електронът може едновременно да се намира в произволен брой точки на повърхността на сферата, води до пълен хаос. Но и тук има решение. Възможно е те да се фиксират, като се охладят до $-273,15$ градуса (абсолютната нула). Тогава той би могъл да застане само в състояние $|0\rangle$ или $|1\rangle$ или и в двете едновременно.

„От термодинамиката следва, че при тази температура трябва да спре движението на гравитните частици на веществото – обяснява проф. Кристел Микелсен от центъра в Юлих. – Всичко замръзва. В действителност топлинното им движение достига своя минимум, макар че то никога не спира напълно заради принципа на неопределеност на Хайзенберг. Те вибрират около „замръзналото“ си състояние. И още нещо. За да се достигне до нулева вибрация, е необходимо да се разполага с безкрайна енергия, а такава няма.“

В момента най-добрите криостати поддържат температура -273,05 градуса. И въпреки че тази температура е по-висока само с 0,1 градус над абсолютната нула, електронът се колебае около полюсите на сферата на Блох и в резултат на това се появява малък квантов шум.

Суперпозицията е много чувствително и нестабилно състояние.

Нейното поддържане е толкова трудно, колкото да накараш молив да балансира на върха си. В идеалния случай, при липса на вятър и вибрации, перфектно балансираният молив трябва да остане изправен. В реалния свят обаче моливът пада при всеки малък полъх на вятъра. С други думи, най-малките външни въздействия, като леко повишаване на температурата или някаква вибрация, унищожават суперпозицията.

Поддържането на подреденост или на кохерентност на състоянията на квантово сплетените кубити е още по-трудно. Те взаимно си влияят и най-малкото смущение на околната среда разбърква колективното им състояние. Те губят суперпозицията си и квантовият компютър вече не смята, а „налучква“ решенията.

Много интересни неща могат да се научат за кубитите и квантовите компютри от лекцията на проф. Лео Кауенховен („Can we make quantum technology work?“, Leo Kouwenhoven | TEDxAmsterdam, публикувана в YouTube).

Години наред се инвестират милиони в разработването на квантовите компютри, но тяхната екстремна чувствителност към влиянието на околната среда е основната пречка пред екипите на IBM, Google и Microsoft да успеят да създадат устойчиви машини.

Точността на квантовите изчисления трябва да бъде от порядъка на 99,999999%, което гарантира минимална грешка в решението, и тогава може да приемем, че изчисленията са достатъчно точни. За съжаление, днес точността варира в диапазона от 99,9 до 99,99%. Естествено е, че при толкова ниска точност процентът на грешките ще бъде висок.

Едно от предимствата на квантовия компютър на IBM е именно квантовото смекчаване на грешките. Макар да звучи парадоксално, но изследователите от IBM контролирано увеличиха шума в своята квантова верига, за да получат още по-шумни, по-малко точни отговори и след това екстраполираха „връщане назад“, за да открият отговора, който компютърът би получил, ако нямаше шум.

Тази техника разчита на доброто разбиране на шума, който засяга квантовите вериги, както и на предсказването как той влияе на решението.

Тук обаче настъпва друго усложнение. Изчисленията, които използват един набор от кубити, могат да въведат случайни грешки в други, неучастващи кубити. Екипът на IBM се надява да използва допълнителни кубити за „наблюдение“ на грешките, за да може по този начин да ги коригира. Една доста трудна за разбиране процедура и затова ще прескочим нейното описание. Всеки, който се интересува повече по този въпрос, може да прочете статията [Quantum error correction below the surface code threshold; Google Quantum AI and Collaborators; Nature; 09.12.2024](#)

В Европа също се правят опити да се разработи мощен универсален квантов компютър.

Тук учените се ръководят от професора по приложна физика проф. Лео Кауенховен, който е научен ръководител на института за квантови изследвания, създаден от TU Delft и националната организация за приложни науки и технологии на Холандия (TNO).

Всичко започва с програмата Quantum Delta NL в Нидерландия, която получава 615 милиона евро от Националния фонд за растеж.

На 18 май 2020 г. министър Ингрид ван Енгелсховен и ко-

мисар Мария Габриел официално откриха Quantum Inspire – първата публична платформа за квантови изчисления в Европа. Тя е фокусирана основно върху обучението и разработването на приложения, така че повече хора да могат да използват квантовия компютър.

Процесорът на квантовия Quantum Inspire е съставен от многообещаващите полупроводникови „спин кюбити“. Електронният спин кюбит е направен със същата технология като класическия транзистор, което го прави подходящ за масово производство.

Паралелно с това се развива още един сюжет извън Европа.

Канадската компания D-Wave успя да намали фазовите шумове до ниво, при което с вероятност, близка до единицата, решенията са повтарят с висока точност. Как стана това? Неочаквано за мнозина фирмата избра различен подход и той определено бе далеч от това, което се смяташе за правилно дотогава.

Компютърът D-Wave е т.нар. адиабатен компютър, който работи на принципа на квантовото „отгряване“. Това е квантов изчислителен метод, използван за намиране на оптимално решение на сложни проблеми, като се използват специфични за квантовата физика състояния като квантово тунелиране, заплитане и суперпозиция.

Адиабатното отгряване е заимствано от металургията. За да се намалят дефекти в кристалната решетка на желязото, температурата му се повишава почти до топене и се кове. Деформациите в решетката намаляват и атомите образуват по-силни връзки помежду си. Те се стабилизират чрез бавното охлаждане на метала и този процес се нарича „отгряване“. Ако решетката не е подредена и металът още има дефекти и вътрешни напрежения, процесът се повтаря. Той приключва, когато в решетката практически няма дефекти и вътрешната енергия, акумулирана в метала, е минимална. Достигнали сме минимума.

Историята на метода на отгряването започва през 1953 г.

Проф. Николас Метрополис разработва алгоритъм за определяне на равновесното състояние на физическа система с много степени на свобода при зададена температура. През

1983 г. Скот Къркпатрик показва как този алгоритъм може да се използва не само за моделиране на физически системи, но и за решаването на някои класове оптимизационни задачи.

Голямото преимущество на метода е, че се „измъква“ от „капани“ и локални минимума при търсенето на глобалния минимум. Когато попадне в тях, към параметрите на функцията, която е достигнала локален минимум, се добавя случаен шум. Това се нарича *увеличаване на температурата*. Колкото по-висока е температурата, толкова повече се отдалечаваме от локалния минимум и процесът на оптимизация продължава в ново, случайно избрано направление.

По-късно проф. Лестър Ингбер доказва, че методът на отгряването е най-ефективният за случайно търсене на оптималното решение на голям клас задачи.

Има и други алгоритми за оптимизация.

„Представете си планина с много долини. Задачата е да намерим най-дълбоката – казва проф. Марков. – Предполагаме, че един наблюдател е в някоя долина. Той се засилва, скача над долината, оглежда се наоколо и се приземява в по-ниска долина. Отново отскача от нея и търси още по-ниска долина и така нататък, докато се приземи в най-ниската.

За да се намери най-ниската долина на планината, се опитваме да я разделим на няколко сегмента по координатната ос Z . Във всеки сегмент минимумът се търси от един наблюдател. Всички заедно обхващат цялата планина.

И така, класически изчислителни алгоритми за търсене на оптимум действат като наблюдател, който прескача близките върхове, за да достигне до по-ниска долина. Когато върховете са твърде високи и между тях има дълбоки долини, той може да остане в някоя от тях. За да излезе, трябва да се приложи външна сила.

Квантовото отгряване използва подобен, но малко по-различен подход.

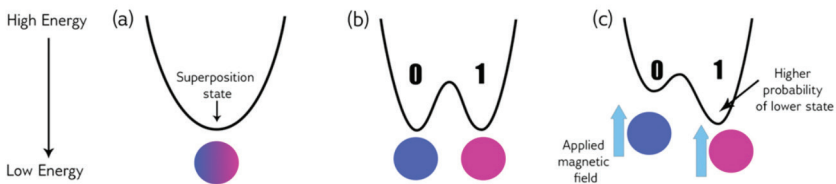
Наблюдателят се заменя с подскачаща квантова топка. Квантовото свойство на суперпозицията по същество позволява на топката да се „размножи“ на хиляди копия и така да бъде навсякъде едновременно. След време „копията“ на топката се

съсредоточават в относително ниски долини и някои от тях могат да преминат в още по-ниски, като се „промушат“ (чрез квантово тунелиране) през бариерите, които ги разделят. Например, ако електронът е в потенциална яма, която е отделена с бариера от друга яма с по-ниска енергия, той се превръща от частица във вълна и се „промушва“ под бариерата. По принцип електроните лесно я преминават, когато бариерата е с дебелина от 1 до 3 нанометра. По-тежките частици, като протоните, преминават през бариера, не по-дебела от 0,1 нанометър. За да се изчисли „прозрачността“ на потенциалната бариера, трябва да се реши уравнението на Шрьодингер при условие за непрекъснатост на вълновата функция и нейната първа производна.“

На практика D-Wave поставя група кубити в някакво начално енергийно състояние и алгоритъмът променя нейните състояния от по-висока към по-ниска енергия. Когато веригата от кубити достигне състоянието с минимална енергия, D-Wave може да го „прочете“ и да представи търсения резултат.

Физиката на този процес нагледно е показана в диаграмата на промяната на енергията.

А сега ще дадем и пример за квантовата оптимизация. Един човек трябва да посети N -търговски точки. Всичките възможни маршрути са $(N-1)!$ ($N-1$ факториал). За 10 точки това са 362



В началото има само една долина (a) с един минимум. Когато започва процесът на квантовото отгряване, бариерата се повдига и се образува двойна потенциална яма – известен ефект от квантовата механика (b). Тук ниската точка на лявата долина съответства на състояние $|0\rangle$ („надолу“), а ниската точка на дясната долина съответства на състояние $|1\rangle$ („нагоре“).

В края на отгряването кубитът се озовава в долината с най-ниския потенциал.

880 възможни маршрута, а за 20 – 121 645 100 408 832 000. Търси се най-късият маршрут, респективно с най-малки разходи.

По време на ковид епидемията фирмата Ocado решаваше задачата за намиране на оптимален маршрут по няколко пъти на ден. В Лондон има големи складове с хиляди стоки, включително хранителни продукти. Хората си поръчваха доставка за къщи и в рамките на 72 часа я получаваха. Случвало се е на ден да бъдат обработвани над 100 – 150 хиляди поръчки.

Най-напред адресите са били групирани по райони. Те се свързват помежду си по въздушен път, тоест като точки на картата на Лондон. След това се решава задачата за определяне на маршрута с най-малки разходи, което е „задачата на търговския пътник“.

Ако точките за посещение са били над 20, поради големия брой комбинации са търсени маршрути с минимални разходи. Но колко минимални? Няма отговор.

Реалният маршрут между два съседни адреса се изчислява от автомобилните GPS навигатори, в които е бил зареден „оптималният“ маршрут.

След пандемията on-line търговията продължи да се разраства. В изследване, публикувано в Bloomberg, броят на покупателите расте в геометрична прогресия и все още няма насищане.

В големите европейски и американски градове се обособяват транспортни фирми, които доставят стоките на граждани. За тях оптимизирането на маршрутите и намаляването на разходите е от съществено значение.

Задачата да се намери маршрут с най-малки транспортни разходи е еквивалентна на тази да се открие състоянието с минимална енергия на верига от свързани кубити.

Това налага да обясним какво е квантово свързване. Всъщност това е ефект в квантовата механика, при който две или повече квантови системи са свързани така, че промяна на квантовите състояния в една от системите ще предизвика мигновена промяна на квантовите състояния във всички свързани системи. Това е подобно на квантовото заплитане, но докато

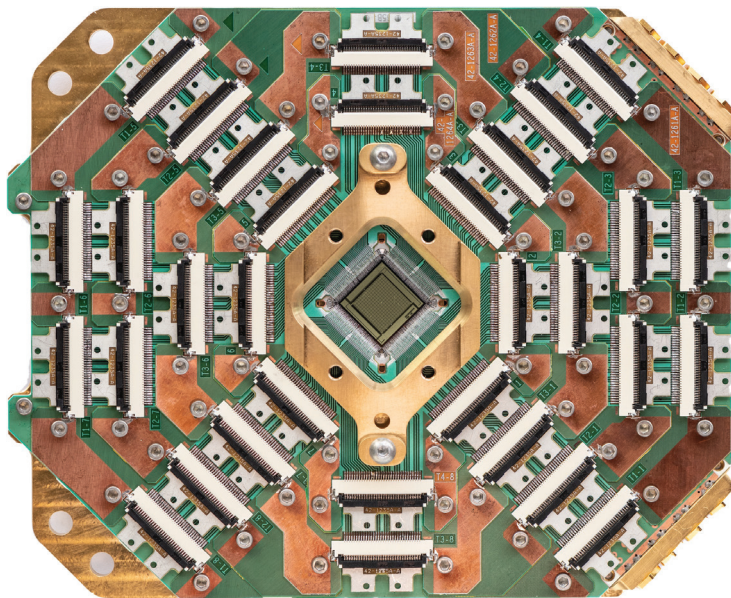
квантовото заплитане може да се осъществи на големи разстояния, квантовото свързване е ограничено до квантови мащаби.

Като се използват магнитни полета, приложени към кубитите, разстоянието между всеки град се добавя към алгоритъма като енергиен параметър. Поради квантовото свързване всеки кубит влияе на състоянието на другите кубити и всяко решение поражда ново колективно състояние.

Квантовият генератор, който управлява отгряването, довежда състоянието на свързаните кубити до най-ниското ниво на енергия и това е оптималното решение.

Алгоритъмът за определяне на оптималния маршрут на D-Wave е публикуван в Solving the Traveling Salesman Problem on the D-Wave Quantum Computer, Siddharth Jain, Frontier in Physics, 12 November 2021, Sec. Quantum Engineering and Technology.

Квантовото отгряване и тунелният ефект са обяснени популярно във видеолекцията Walking Through Walls and Quantum Annealing в YouTube.



Свързвателният квантов процесор на D-Wave Advantage