Нобеловата награда за физика от 2025 година, изкуственият атом и пътят към квантовите компютри

Стефан Плачков

В началото на октомври миналата година Кралската шведска академия на науките обяви Джон Кларк (John Clarke), Мишел Деворе (Michel Devoret) и Джон Мартинис (John Martinis) за носители на Нобеловата награда за физика от 2025 година. Най-престижната награда в света на науката удостоява тримата учени *„за откриването на макроскопичното квантово-механично тунелиране и квантуването на енергията в електрическа верига“*. Или, както Мишел Деворе казва на сравнително разбираем език, „за откриването на *изкуствен атом* с размери, видими с просто око“. А защо този „изкуствен атом“ се оказва необходим за технологията на квантовите компютри? Това откритие заслужава ли наистина такова признание?

Отговорът е положителен поради две основни причини. Първата е чисто научна: тримата лауреати потвърждават, че странните закони на квантовата механика (някои от тях ще видим по-надолу) може да са валидни не само за елементарни частици и отделни атоми, но и за макроскопични тела. В продължение на десетки години се считаше, че квантовата механика е точна теория, но само по отношение на атома, на неговото ядро и на елементарните частици. Във всекидневния свят, достъпен за всички нас, законите на класическата механика си оставаха неоспорвани. В две статии, публикувани през 1985 г., тримата учени доказаха, че при температура близка до абсолютната нула квантовата физика може да обхване не само една, две или евентуално няколко частици, а милиарди трилиона електрони едновременно, тоест – става валидна и за макроско-

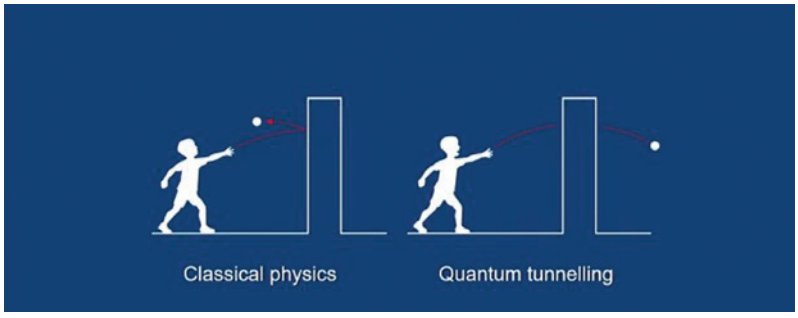


Лауреатите на Нобелова награда по физика за 2025 г.
От ляво надясно: Джон Кларк, Мишел Деворе и Джон Мартинис

пични тела, които могат да бъдат сравнително лесно експериментално манипулирани.

Втората причина за широкия отзвук на новото доказателство е, че такъв макроскопичен атом, „на който могат да се запоят жици", както фигуративно се изразява Джон Мартинис, позволява развитието на една от най-новите и най-обещаващи технологии днес – тази на *квантовите компютри*. Идеята за квантов компютър се обсъжда за първи път през 80-те години на миналия век, а първият прототип е построен в края на 90-те години. В последното десетилетие световно известни фирми, като например IBM и Google, инвестират стотици милиони долари в научни изследвания, насочени към реализацията на квантов компютър. Двама от нобеловите лауреати, Деворе и Мартинис, дълги години сътрудничат с подразделението на Google за разработка на квантова изчислителна техника, известно като Google Quantum AI. През 2022 година Мартинис създава Qolab – нова стартъп фирма за квантови изчисления с цел разработване на свръхпроводящи квантови компютри с широкомащабно приложение.

В първата част от съобщението на Нобеловия комитет се цитира „макроскопичното квантово-механично тунелиране". Квантовото тунелиране е едно от удивителните последствия на квантовото поведение на частиците. В класическата физика, ако една частица се сблъска с бариера, чиято енергия е по-висока от нейната, тя просто отскача обратно. По същия начин една топка за тенис не може да надхвърли висока стена, ако кинетичната ѝ енергия е недостатъчна. В квантовата реалност една частица, даже и с недостатъчна енергия, може да „пробие" и да премине от другата страна, сякаш използва невидим тунел в бариерата. Такъв ефект е възможен за отделни частици или атоми само в микроскопични мащаби, където „царят законите на квантовата физика". Във всекидневния свят тунелирането може само да се появи като кадър от филмите за Хари Потър: с билет за влак, който потегля от коловоз 9¾, главният герой се засилва и успешно стига до него през стената между коловози



Сравнение между класическа и квантова механика. Според класическата физика топката винаги отскача от стената. Според квантовата механика тя може да премине от другата страна като през невидим квантов тунел. Кредит: Кралска шведска академия на науките

9 и 10 като през невидим тунел. Лауреатите на Нобелова премия правят подобно свръхестествено тунелиране реалност, ако не за самия Хари Потър, то поне за своя изкуствен атом с размери на обикновена монета!

Научното обяснение за квантовото тунелиране произтича от два от основните принципи на квантовата механика, несъществуващи в класическата физика. Първият от тях е така нареченият *корпускулярно-вълнов дуализъм*. Според този принцип елементарните частици не са само микроскопични твърди топки, както името „частица" предполага. В микроскопичния квантов свят те имат двойствена природа, тоест те са едновременно и частици, и вълни. Този на пръв поглед странен и противоречив принцип е предмет на дълги научни спорове и обсъждания в началото на миналия век, до окончателното формулиране на квантовата механика през 1927 година. Според него свойствата както на частица, така и на вълна винаги съществуват едновременно, като резултатът от всеки конкретен експеримент зависи само от едното от тях.

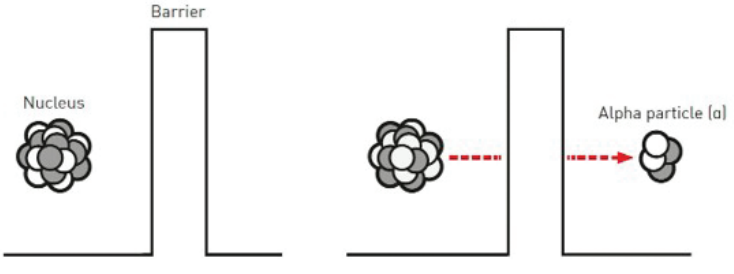
Вследствие на корпускулярно-вълновия дуализъм всяка елементарна частица е математически определена като вълна от така наречената вълнова функция. Вълновата функция дава информация за вероятната локализация на частицата и как тази вероятност се променя с времето. Според друг основен принцип на квантовата механика, така наречения *принцип на суперпозиция*, частицата заема едновременно всички възможни позиции. Преди конкретно премерване, всяка една позиция е възможна. Благодарение на вълновата функция вероятността частицата да приеме някоя от всичките възможни позиции е предварително позната.

Принципът на суперпозиция води до коренна разлика между класическата физика и квантовата механика. Според класическата физика позицията, както и траекторията на една топка за тенис, са точно определени във всеки момент. Класическата физика е *детерминистична* – ако познаваме скоростта и посоката на една обикновена топка, ние предварително знаем къде и кога тя ще докосне земята. Квантовата механика от своя страна борави с вероятности, изчислени на базата на вълновата функция. За една квантова топка знаем само, че тя ще падне някъде, но не знаем къде

точно. Можем само да изчислим съответните вероятности. Особено свойство на вълновата функция е, че тя не се анулира рязко пред бариера с познати височина и дебелина – тя прониква в нея, след което бързо (математиците казват експоненциално) отслабва, но без да изчезне напълно. Оттук следва, че вероятността квантовата „менис топка" да премине през стената не е нула, а има малка, но положителна стойност.

През 1928 година квантовото тунелиране носи един от триумфите на новата и все още загадъчна квантова механика. За първи път тя предлага пълно математическо обяснение за мистериозното дотогава алфа-разпадане на радиоактивните ядра. Запитвали ли сте се защо и по какъв странен механизъм някои елементи се оказват радиоактивни? В ядрото на тежък атом алфа-частицата (която е всъщност ядро на хелий с два положително натоварени протона и два неутрона) е „заключена" зад потенциална бариера, създадена от силното ядрено взаимодействие и кулоновата (електрическа) сила. Типична стойност на енергията на алфа-частицата в тежки ядра е 5 МеВ (Милион електрон-Волта, мярка за енергия във физиката), докато потенциалната бариера е „висока" близо шест пъти повече, около 30 МеВ. Според класическата физика алфа-частицата би трябвало да остане завинаги заключена в ядрото. Но нейната вълнова функция показва, че вероятността тя да се появи извън ядрото, макар и малка, не е кръгла нула. Вълновата функция дава обяснение защо радиоактивните елементи се разпадат – всеки атом от веществото има шанс да тунелира, но не можем да предскажем кога точно. Разбира се, вероятността за тунелиране зависи както от енергията на частицата, така и от характеристиките на бариерата. Поради тази причина периодите на разпад на радиоактивните елементи са изключително различни, от нищожни части на секундата до стотици хиляди години.

В продължение на половин век квантовото тунелиране се приема за валидно само за микроскопичния свят, тоест света на атомите, ядрата, електроните и елементарните частици въобще. Чак в началото на 80-те години от миналия век въпросът за квантово тунелиране през тела с милиарди частици (макроскопични тела) става предмет на научни изследвания, благодарение на сър



Спонтанен радиоактивен разпад на тежко ядро. Кинетичната енергия на алфа-частицата е няколко пъти по-малка от енергията, необходима тя да преодолее бариерата. Благодарение на квантовото тунелиране радиоактивен разпад е възможен. Кредит: Кралска шведска академия на науките

Антони Легет (Anthony Leggett, р. 1938, носител на Нобелова награда от 2003 г.). По негово предложение и след продължителен интерес към темата, тримата лауреати на Нобеловата премия от 2025 г. успяват да постигнат тунелиране на тяло с размери до сантиметър, тоест тяло, видимо с просто око! Но на какво се дължи техният успех?

За да може едно тяло с макроскопични размери да премине през стена като през невидим тунел са необходими специални условия и подходяща апаратура. Успехът на тримата лауреати се основава и на още няколко други блестящи постижения на науката, направени през втората половина на XX век.

Първото специално условие е изключително ниска температура, близка до абсолютната нула (минус 273 градуса). Такива ниски температури означават че атомите почти спират да се движат. Съответно свойствата на някои материали рязко се променят. Така например електрическото съпротивление не само намалява – то напълно изчезва; електрически ток може да тече с години и с векове наред без да губи енергия под формата на топлина, както в проводник на стайна температура. Тази странна *свръхпроводимост* е открита съвсем случайно през 1911 г. от холандския физик Хайке Камерлинг-Онес (Heike Kamerlingh Onnes, 1850 – 1926, получил Нобелова награда през 1913 г.). Това новооткрито и изненадващо състояние на материята остава мистериозна загадка за близо половин век: нима е възможно електрическото съпротивление да изчезне напълно? Обяснението е намерено чак през 1957 г. от Джон Бардийн, Леон Купър и Джон Шрифър (John Bardeen, Leon Cooper, John Schrieffer). С блестящ математически труд тримата физици доказват, че свойството на свръхпроводимост следва от законите на квантовата механика!



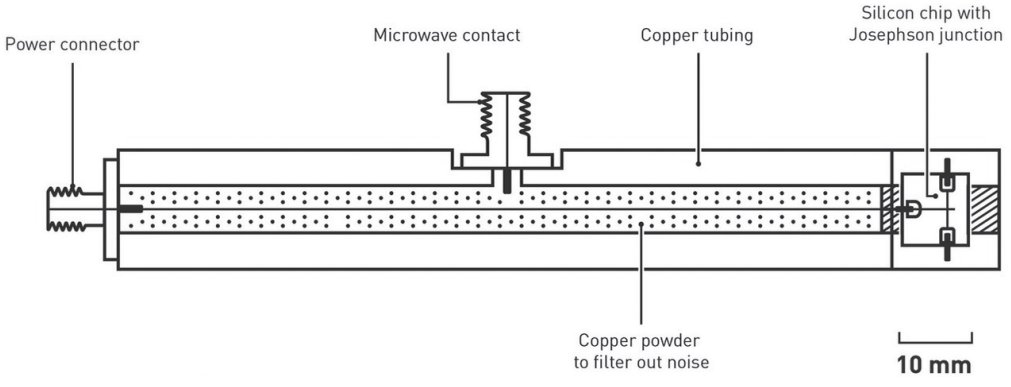
Проф. Стефан Плачков следва „Физика и Математика“ в Париж, където защитава докторска дисертация по ядрена физика. Работи към ускорителя на електрони във Френския център по ядрени изследвания. Участва в експерименти, проведени на ускорителя на частици към Масачузетския технологичен институт, на протонния суперсинхротрон в ЦЕРН и на новопостроения ускорител на електрони към Националната лаборатория Джеферсън в САЩ. В последните 15 години работи по теми, свързани със свойствата на композитните нуклони и интерпретацията им с елементарните кварки. Автор е на 190 научни публикации.

За представеното цялостно обяснение, наречено по инициалите на имената им Теория BCS, тримата физици са удостоени с Нобеловата награда за 1972 г. Накратко, теорията BCS обяснява свръхпроводимостта като агрегатно състояние от *Куперови двойки* (Cooper pairs, по името на Леон Купер) електрони. При температури, близки до нулата, вместо да се отблъскват за-

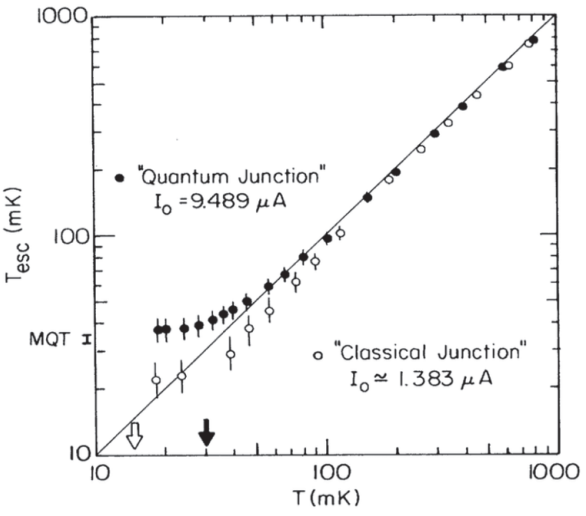
ради еднаквия им електрически товар, електроните се привличат индиректно чрез взаимодействие с кристалната решетка на материала. Свързването им два по два позволява на всички Куперови двойки в тялото да се движат и да реагират по един и същ начин. В тези условия на свръхпроводимост всички тези двойки следват законите на квантовата механика. По тази причина милиони и милиарди двойки би трябвало да реагират като единен квантов обект, описан с една единствена вълнова функция. В това се изразява и оригиналната идея на сър Антони Легет, която Кларк, Деворе и Мартинис решават да проверят.

За да реализират своя експеримент, тримата лауреати от 2025 г. използват друго забележително квантово устройство, така наречения *Преход на Джоузефсон*. Този *преход* представлява макроскопична (с размери около сантиметър) електронна структура, състояща се от два свръхпроводника (при температура близка до абсолютната нула), разделени от тънък слой изолатор (бариера). На базата на квантовата механика през 1962 г. младият тогава докторант (само на 22 г.), британският физик Брайън Джоузефсон (Brian Josephson), оформя математическите зависимости за тока и напрежението в структурата. За това негово откритие Джоузефсон е удостоен с Нобелова награда за 1973 г. Любопитно е, че след наградата Джоузефсон се увлича от езотерични идеи като например връзка между съзнание и материя, синтез между науката и източния мистицизъм, телепатия, интелигентност на природата, парапсихология и т.н. Джоузефсоновият преход обаче остава валиден в науката.

Според класическата физика изолаторът създава пречка и ток не би трябвало да преминава. Благодарение на квантовите закони Куперовите двойки не се държат като отделни частици, а като една гигантска „вълна" от милиарди електрони, описана като отделен атом, с една единствена квантова вълнова функция. В първата от техните две ключови статии Кларк, Деворе и Мартинис доказват безспорно, че „вълната" не спира до изолатора, а „протича" като през тунел през него и, разбира



Опростена схема на апаратурата, използвана от тримата нобелови лауреати. Самият преход на Джоузефсон, с размер 10 мм, се намира в десния край на схемата. Кредит: конференция на Джон Мартинис пред Кралската шведска академия на науките



Първото доказателство за квантовата същност на милиардите електрони от Джоузефсоновия преход. При температура под 30 милиКелвин (черната стрелка на хоризонталната ос) черните точки (квантов ефект) напълно се разделят от белите точки (липса на квантов ефект). Кредит: оригинална публикация на авторите в списанието Physical Review Letters

се, достига другия свръхпроводник. Следователно, точно като при един елементарен атом, милиардите електрони заедно се подчиняват на законите на квантовата механика.

Последната част от цитата на Кралската шведска академия отбелязва „квантуването на енергията в електрическа верига". Квантуването на енергията е свойство на отделните атоми – всеки атом има свои енергийни нива. Втора статия на тримата лауреати доказва, че енергията на милиардите електрони заедно е също *квантувана* – с други думи, точно като при един атом, Джоузефсоновият преход не само се подчинява на квантовата физика; той има и свои енергийни нива. Но тримата учени отиват още по-далече: използвайки микровълни, те успяват да стимулират квантови прескачания между новооткритите енергийни нива. Енергийните нива на изкуствения им атом стават управляеми!

Преходът на Джоузефсон има и друго ключово свойство, което го прави извънредно полезен: той може да бъде включен в електрическа верига. Това означава, че за първи път атом, макар и изкуствен, става елемент от електрическа верига. Откритието на Кларк, Деворе и Мартинис не е само предмет на абстрактна физика; то има почти незабавни практически приложения! Кои са те?

Благодарение на всички тези свойства преходът се превръща в *нелинеен индуктор*, чието състояние зависи от тока, протичащ през него. Управляван чрез микровълнови импулси, той може да бъде или в състояние 0 или в състояние 1. Тези две възможни състояния са познати на всички: това е един стандартен бит, основен елемент за всички компютри, от най-простия до най-мощния. Състоянията 0 или 1 се контролират от не по-малко известните на всички транзистори.

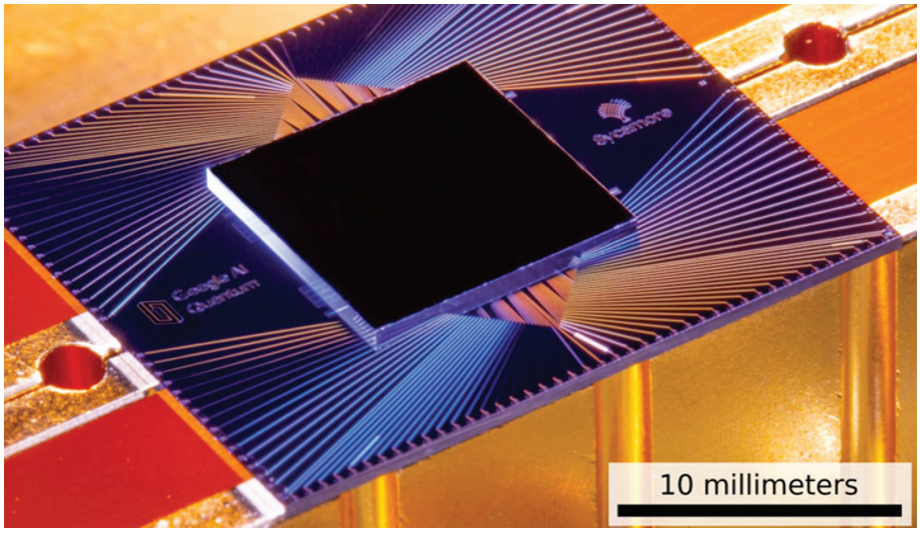
Но тримата лауреати доказаха, че Джоузефсоновият преход позволява нещо повече: както всяка квантова система, той също може да приеме и квантова *суперпозиция* – тоест необикновено състояние, валидно само в квантовия свят, което съчетава едновременно състоянието 0 и състоянието 1. Противно на класическата физика двете състояния съществуват заедно, като всяко от тях има своята вероятност да бъде реализирано, например вероятност от 30% за състоянието 0 и вероятност от 70% за състоянието 1. Специалистите знаят, че вероятностите се определят

от квадратите на амплитудите на вълновата функция. Следователно, докато не бъде измерена, системата няма определена стойност, а се намира в състояние на квантова суперпозиция.

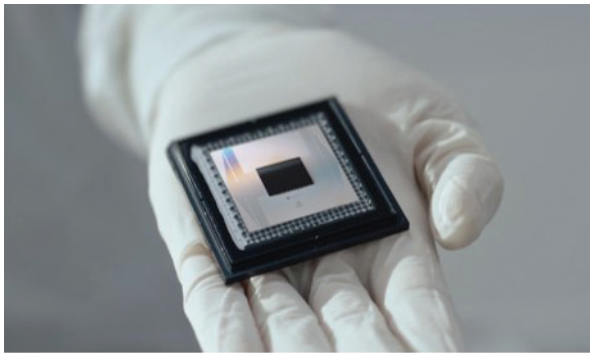
След като изкуственият атом може да бъде в състояние 0, в състояние 1 или в тяхна квантова суперпозиция, той изпълнява всички изисквания за реализацията на квантов бит или *кубит* – основен градивен елемент за квантови изчисления. За разлика от абстрактните понятия на квантовата механика, тук кубитът се превръща в конкретен физически обект, който може да бъде манипулиран, управляван и измерван чрез стандартни електрически и микровълнови техники. Именно тези характеристики правят откритието на Кларк, Деворе и Мартинис решаваща стъпка към практическото изграждане на квантови компютри.

Квантовият компютър представлява система от множество такива кубити, свързани помежду си в електрическа верига и подложени на строго контролиран външен сигнал. Два или повече кубита могат да бъдат квантово заплетени, така че състоянието на всеки от тях да няма самостоятелен смисъл, а да бъде определено само в контекста на цялата система. Точно тези свойства нямат аналог в класическата физика. В този смисъл квантовият компютър не обработва информацията последователно като класическия, а манипулира едновременно цялото квантово състояние на системата.

Оттук идва и голямото предимство на квантовия спрямо класическия компютър. С увеличаване на броя на кубитите нараства бързо и размерността на квантовото състояние. Така например, система от 4 кубита позволява едно-



Процесорът, наречен Sycamore, с който през 2019 г. компанията Google Quantum AI претендира за първо в света квантово превъзходство. Процесорът съдържа 54 кубита (в центъра), като всеки един от тях е свързан с четири съседни кубита. Компанията IBM оспорва това постижение. Кредит: Конференция на Джон Мартинис пред Кралската шведска академия на науките



Квантовият процесор Willow на Google Quantum AI от 2025 г.. Процесорът разполага със 105 кубита. Кредит: https://blog.google/

временно описание на 2^4 = 16 квантови състояния, които участват паралелно в изчислителния процес. Система от 10 кубита позволява 1000 едновременни изчисления, а от 20 кубита – един милион изчисления. Само няколко десетки кубита са необходими, за да може квантовият компютър да надхвърли възможностите на всеки класически компютър. Преди малко повече от десетилетие се изчисляваше, че квантов компютър с едва 50 или 60 кубита би надминал най-мощния стандартен компютър днес. Тази идея доведе до понятието *квантово превъзходство* – моментът, в който квантов компютър решава конкретна задача, която за класически компютър е практически нерешима в разумен времеви мащаб.

Първата експериментална демонстрация за квантово превъзходство е реализирана от фирмата Google Quantum AI през 2019 година с процесора Sycamore, съдържащ 53 свръхпроводящи кубити, базирани на Джоузефсоновия преход – директни наследници на изкуствения атом, отличен с Нобеловата награда по физика през 2025 г. Това първо съобщение обаче остана непотвърдено и даже бе критикувано като прекалено оптимистично.

През август 2025 година, отново Google Quantum AI, заедно със сътрудници от няколко престижни университета, публикува нови внушителни резултати, получени от техния последен квантов процесор, внедрен в края на 2024 г. и наречен Willow. Този път е постигнато истинско и неоспорвано квантово превъзходство. Google Quantum AI представи не само резултатите, но и самия квантов алгоритъм, който може да бъде проверен от всеки конкурентен квантов компютър. Процесорът Willow разполага със 105 кубита, два пъти повече от тези в Sycamore. Това не е просто двойно увеличение – в квантовия свят всеки добавен кубит удвоява два пъти изчислителния капацитет. Два кубита умножават капацитета четири пъти, три – осем пъти. Оставям читателят сам да изчисли увеличението на изчислителния капацитет спрямо Sycamore благодарение на допълнителните 52 кубита. Според авторите, Willow е решил за 5 минути сложна задача, която, зададена на най-бързия компютър в света и работещ според най-добрите известни класически алгоритми, би отнела време, надхвърлящо многократно възрастта на Вселената!

Въпреки тези внушителни стъпки напред, квантовите компютри са все още в етап на развитие. Тяхното внедряване изисква големи и сложни хладилни апаратури за достигане на изключително ниски температури. Необходимо е кубитите да са напълно изолирани от околната среда. Минимални взаимодействия с външни елементи – топлина, вибрации, електромагнитни вълни, лъчи, погубват мигновено ценната квантова информация. Времето,



Впечатляващата охладителна система на квантовия процесор Willow. Да припомним, че свойството на свръхпроводимост е оперативно само при температури от няколко стотни от градуса над абсолютната нула
Кредит: https://blog.google/

през което един кубит успява да запази квантовите си способности, наречено време на кохерентност, или по-кратко кохерентност, е все още прекалено кратко и представлява едно основно ограничение. Второ съществено ограничение идва от броя на възможните грешки: докато един нормален бит работи на практика без да греши, един кубит е прекалено деликатен и лесно може да промени квантовото си състояние. Поправяне на тези грешки е неотменна част от развитието на тази нова технология, но изисква комплексна допълнителна електроника, както и сложни коригиращи алгоритми.

Въпреки всички тези трудности, основното заключение е, че платформата на свръхпроводящи изкуствени атоми остава една от най-успешните и най-бързо развиващи се между няколкото възможни технологии на кубити. Откритието на макроскопично квантово поведение от Кларк, Деворе и Мартинис е върхово постижение в съвременната наука, което полага конкретна основа за съвършенно нов тип мощна изчислителна техника – квантовия компютър. ■