



ШЕВЧЕНКО

Сергій Миколайович — доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу надпровідних та мезоскопічних структур Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України

КВАНТОВИЙ КОМП'ЮТЕР: СТАН ПРОБЛЕМИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 8 грудня 2021 року

У доповіді проаналізовано сучасний стан проблеми, пов'язаної зі створенням квантового комп'ютера як реально працюючого приладу, яку світова наукова спільнота визначає як одне з найважливіших фундаментальних завдань фізики у ХХІ ст. Наголошено, що в основі роботи квантового комп'ютера лежать результати фундаментальних досліджень у галузі квантової фізики. Сьогодні у світі активно розробляють квантові технології, які, як очікується, будуть впроваджені вже в найближчому майбутньому і забезпечать проривні результати в багатьох сферах суспільного життя: від криптографії до моделювання масштабних систем, опису та передбачення перебігу надскладних процесів тощо. Розглянуто внесок українських учених у вивчення квантових систем, розвиток квантових технологій та вирішення фізичних проблем, що виникають при реалізаціях елементів квантового комп'ютера.

Добрий день, шановні колеги!

У своїй доповіді я хотів би розповісти про квантовий комп'ютер з точки зору фізика-теоретика. Щоб пояснити, чому квантові обчислення з кубітами є важливою науковою і технічною проблемою, варто нагадати, що у 2012 р. Нобелівську премію з фізики отримали Серж Арош і Девід Вайнленд «за проривні експериментальні методики, які дозволяють вимірювати і маніпулювати індивідуальними квантовими системами». Тоді у пресрелізі Нобелівського комітету було сказано, що «новаторські методи, запропоновані лауреатами, дозволили зробити перші кроки на шляху до створення надшвидкого комп'ютера нового типу, який ґрунтується на законах квантової фізики», і висловлено думку, що ми зараз перебуваємо на межі нової комп'ютерної революції. В цьому контексті ще говорять про другу квантову революцію, оскільки нинішній рівень технологій є результатом і наслідком першої квантової революції, яка розпочалася в першій половині минулого століття, коли вчені пізнали закони і особливості квантового світу та описали його об'єкти, а інженери запропонували технології та пристрої,

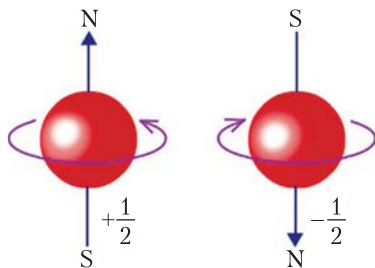
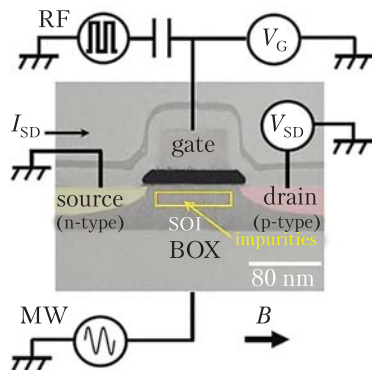


Рис. 1. Спіновий кубіт

Рис. 2. Реальна система, в якій роль спінового кубіта відіграє стан електрона на домішці в польовому транзисторі [1]



принцип дії яких оснований на керуванні колективними квантовими явищами на макро-рівні.

«Можливо, квантовий комп'ютер, — йдеться далі у пресрелізі Нобелівського комітету, — так само радикально змінить наше повсякденне життя в цьому столітті, як у попередньому столітті це зробив класичний комп'ютер». Тобто в основі реалізації цього очікуваного квантового прогресу лежать результати фундаментальних досліджень у галузі квантової фізики. Саме вони є підґрунтям для розуміння роботи квантового комп'ютера та запорукою прискорення революції квантових обчислень.

Відтоді минуло дев'ять років, і сьогодні квантові комп'ютери — це вже не гіпотетичні, а цілком реальні, майже комерційні прилади. Отже, обговоримо детальніше це важливе сучасне поняття — «квантовий комп'ютер».

Квантові технології загалом і квантові комп'ютери зокрема ґрунтуються на суперпозиційних станах. Щоб зрозуміти, про що саме йдеться, звернімося до основоположного для інформатики поняття «біт» як одиниці ви-

мірювання кількості інформації. У звичному нам «макросвіті» біт може набувати значення 0 або 1.

Однак 40 років тому, в 1981 р., Річард Фейнман, один з творців квантової електродинаміки і лауреат Нобелівської премії з фізики 1965 р., висловив думку, що «природа не є класичною, і якщо ми хочемо моделювати природу, ми повинні робити це квантово-механічно». Як прийнято вважати, з цього моменту і починають свій відлік квантові технології.

Розглядаючи квантові технології, ми потрапляємо до так званого квантового світу, в якому одиницею інформації є квантовий біт, або кубіт. Кубітом може бути в принципі будь-яка квантова система з двома станами або з двома рівнями. Проте дуже важливо, що така система може перебувати в станах «0» та «1» одночасно. Ми описуємо такий стан системи за допомогою хвильової функції:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

яка кількісно вказує, що система (кубіт) з певною ймовірністю, визначеною коефіцієнтами α і β , перебуває в стані «0» і в стані «1» відповідно. Однак ще раз підкреслюю, що, на відміну від макросвіту, у квантовому світі система знаходиться *одночасно* в цих двох станах.

З одного боку, як я вже сказав, майже будь-яка дворівнева система може бути кубітом, але з іншого боку, різні реалізації мають свої переваги й недоліки. Тому сьогодні вивчають найрізноманітніші фізичні реалізації кубітів. Йдеться і про мікроскопічні системи, такі як іони в електромагнітних пастках, поляризаційні стани фотонів у резонаторі, спіни електронів, ядер тощо, і про системи, які складаються з великого числа частинок, з характерним розміром порядку мікрометрів, тобто системи, що мають мезоскопічні (проміжні) і навіть макроскопічні масштаби, наприклад електронні стани в квантових точках, заряд або фаза в надпровідникових структурах та ін.

Наведу два важливі приклади, на яких більш детально поясню особливості практичних реалізацій кубітів.

По-перше, це спіновий кубіт, тобто кубіт, який можна реалізувати на основі спіну елек-

трона. Спін — це власний момент імпульсу елементарної частинки, і постійне магнітне поле задає дві його поляризації, тобто спрямовує спін по полю чи проти поля (рис. 1). Це і є логічні «0» та «1». Змінне магнітне поле перевертає спін. Наприклад, поворот з «0» в «1» — це виконання логічної операції «НІ» (NOT). Звичайно ж, реальні системи є більш складними, ніж описана вище схема. Для ілюстрації на рис. 2 наведено систему на основі напівпровідників, яку ми вивчаємо спільно з японськими дослідниками з науково-дослідного інституту RIKEN. У цій структурі роль спінового кубіта відіграє стан електрона на домішці в польовому транзисторі.

Другий приклад — це найбільш поширені на сьогодні кубіти на основі надпровідників. Їх ще називають джозефсонівськими кубітами, оскільки вони реалізуються на основі ефекту Джозефсона, який полягає в протіканні надпровідного струму через тунельний (джозефсонівський) контакт, що складається з двох надпровідників, просторово розділених тонким шаром діелектрика або ненадпровідникового металу. Це явище названо на честь британського фізика Браяна Джозефсона, який у 1962 р. передбачив його теоретично, а після експериментального підтвердження отримав Нобелівську премію з фізики за 1973 р.

Принагідно хочу наголосити, що традиційно в нашому Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України проводяться дослідження в цьому напрямі, оскільки ефект Джозефсона є дуже важливим для фізики надпровідності. І ми пишаємося тим, що в 1964 р. нестационарний ефект Джозефсона було безпосередньо спостережено співробітниками ФТІНТу І.К. Янсоном, В.М. Свистуновим та І.М. Дмитренком.

Один з видів таких кубітів — потоковий (рис. 3) являє собою кільце з контактами, яке пронизує контролюючий магнітний потік. Зверніть увагу, що струм у кільці може текти за годинниковою стрілкою (стан 1) чи проти годинникової стрілки (стан 0) і, що особливо важливо для такого мезоскопічного об'єкта, перебувати в суперпозиції цих двох станів.

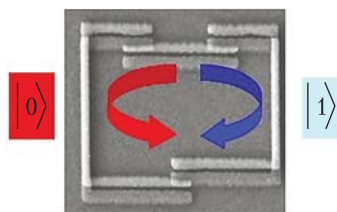


Рис. 3. Потоковий кубіт [2]

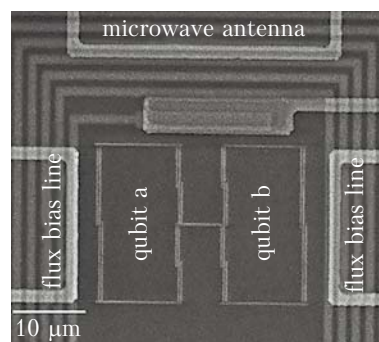


Рис. 4. Система з двох пов'язаних кубітів [3]

Приблизно 20 років тому, на межі тисячоліть, це було надійно показано в експерименті. Однак, крім ефекту Джозефсона, для реалізації таких кубітів потрібні дуже низькі, менші, ніж у космічному просторі, температури — близько 20 мК.

На рис. 4 наведено реальну систему, яку ми досліджували разом з нашими німецькими колегами з Інституту фотонних технологій у м. Єна і яка складається з двох пов'язаних один з одним кубітів, під'єднаних до мікроелектронних пристроїв, що контролюють і зчитують їхній стан.

Квантові комп'ютери можуть вирішувати деякі завдання набагато швидше, ніж сучасні, навіть найпотужніші, звичайні комп'ютери. Цю їх особливість називають квантовою перевагою, і в її основі лежать такі фундаментальні принципи, як суперпозиція та заплутаність станів. Повернімося до суперпозиційного стану одного кубіту. Його графічно зображено на рис. 5. Дві стрілки показують базисні стани «0» і «1» на полюсах сфери, а суперпозиційний стан — це будь-яка точка на сфері, яка задається коефіцієнтами хвильової функції. Тобто у

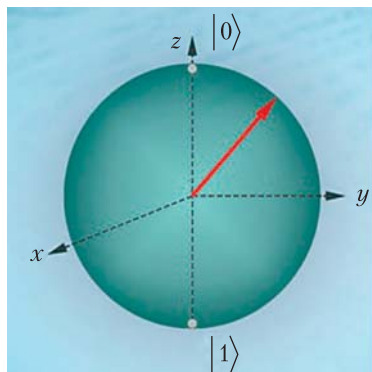


Рис. 5. Сфера Блоха, що зображує суперпозиційний стан кубіта

суперпозиції ми маємо нескінченну множину станів на сфері замість лише двох можливостей для класичного біта. Це і є сенс принципу квантової переваги.

Щоб розібратися в квантовій заплутаності, порівняємо ситуації на прикладі двох класичних та двох квантових бітів. У класичному коді з двох бітів можна утворити чотири комбінації: 00, 01, 10, 11. До речі, ці коди задають перші чотири числа — від нуля до трьох. Квантовий стан двох кубітів описується суперпозицією всіх можливих станів, і така квантова система, як кажуть, перебуває в заплутаному стані, тобто в усіх цих чотирьох станах одночасно.

Квантова система описується чотирма комплексними числами. Тому для емуляції двох кубітів потрібно набагато більше бітів (якщо одне комплексне число займає 64 біти, то для двох кубітів знадобиться $64 \cdot 2^2$ бітів). Для N кубітів є 2^N можливих станів та 2^N комплексних чисел, а це означає, що для емуляції N кубітів потрібно експоненціально (!) більше бітів.

Сучасні квантові комп'ютери можуть мати кілька десятків пов'язаних кубітів у заплутаному стані. Якщо кубітів, скажімо, 50, то обчислювальний простір має 2^{50} станів, що приблизно дорівнює 10^{15} , або 1 петабайт. Оскільки квантовий комп'ютер може працювати зі всіма цими станами одночасно (це називається квантовий паралелізм), то 50 кубітів можуть працювати з 1 петабайтом інформації. Для порівняння: пам'ять наших найкращих комп'ютерів становить 1 терабайт (10^{12} байтів), тобто в тисячу разів менша. А ось 70 кубітів можуть

мати 10^{21} станів — 1 зетабайт, що за порядком відповідає обсягу всієї цифрової інформації на Землі, а отже, квантовий комп'ютер, який використовує всі 2^{70} станів, може виконувати обчислення, які в принципі неможливо виконати в інший спосіб.

Два роки тому, в 2019 р., науковці з компанії «Гугл» вперше наочно продемонстрували квантову перевагу [5]. Дослідники вивчали систему з 53 надпровідникових кубітів. Вони назвали свій кубітний процесор Sycamore (Платан). У проведеному ними тесті Платан за 200 секунд виконав певне математичне завдання, на яке одному з найпотужніших сучасних класичних суперкомп'ютерів* знадобилося б 10 тис. років, а для виконання того самого експерименту на сервері Google Cloud — 50 трлн годин, або 5,7 млрд років.

У 2020 р. подібний експеримент провели дослідники з Китайського університету науки і технологій, які використовували квантовий 76-кубітний комп'ютер на фотонах — Jiuzhang (Цзючжан), названий на честь давньокитайського математичного тексту «Математика в дев'яти книгах». Цей квантовий комп'ютер вдруге продемонстрував квантову перевагу, виконавши за 200 секунд певну математичну процедуру, на що найшвидшому класичному комп'ютеру знадобилося б 1 млрд років [6].

Отже, ми бачимо, що число пов'язаних кубітів є одним з найважливіших кількісних показників прогресу в галузі квантових обчислень. Цей прогрес можна продемонструвати на прикладі проєкту компанії IBM — Quantum Experience (квантовий досвід). В IBM налічується вже 40 працюючих квантових машин на основі надпровідникових кубітів. Важливо, що при цьому компанія відкрила вільний доступ до своїх квантових комп'ютерів для всіх охочих, і зараз уже зареєстровано 325 тис. користувачів.

*Йдеться про суперкомп'ютер Summit, запущений у США у 2018 р., який характеризується розрахунковою потужністю 200 тис. трлн операцій за секунду і складається з 4608 обчислювальних серверів, на кожному з яких встановлено два 22-ядерні процесори IBM Power9, а вбудована пам'ять сягає 10 петабайтів.

У таблиці наведено дані, які ілюструють щорічне зростання кількості кубітів у квантовому процесорі та їх зростання, заплановане на найближчу перспективу. Як бачимо, кількість кубітів збільшується майже вдвічі за рік, що нагадує класичний закон Мура, згідно з яким потужність комп'ютерів подвоюється щодва роки.

З огляду на такий стрімкий розвиток квантових процесорів природно постає запитання: чи замінить квантовий комп'ютер класичний? Фахівці провідних компаній світу, які вивчають потенційні можливості квантових комп'ютерів, на сьогодні вважають, що у середньостроковій перспективі квантові комп'ютери будуть досить спеціалізованими пристроями, призначеними для високопродуктивних обчислень. У певному сенсі подібно до того, як інші квантові прилади — лазери — не замінили всі джерела світла.

Потенційні задачі для квантових комп'ютерів, тобто ті задачі, які квантовий комп'ютер може вирішувати більш ефективно, ніж класичний, умовно можна поділити на три групи:

1) моделювання квантових об'єктів, або симуляція, — опис квантових систем, простіше кажучи, те, про що, як я згадував на початку доповіді, говорив Річард Фейнман; подібні завдання постають у фізиці твердого тіла, матеріалознавстві, хімії, при розробленні нових ліків тощо, і тут квантові комп'ютери можуть дати значну економію енергоресурсів;

2) задачі оптимізації, пов'язані з обробкою великих масивів даних (big data) і важливі для забезпечення комп'ютерного пошуку, застосувань у галузі логістики, транспорту та ін.;

3) задачі шифрування/дешифрування інформації, пов'язані з розкладанням великих чисел на прості множники; ці завдання важливі для гарантування безпеки передачі інформації.

Очевидно, що такі надзвичайні можливості квантових комп'ютерів стимулюють інтерес до них, що зумовлює підтримку відповідних досліджень з боку різних фінансових інститутів, особливо у Сполучених Штатах Америки та Китаї. У Європі, наприклад, започатковано програму European Quantum Flagship (Європейський квантовий флагман), яка старту-

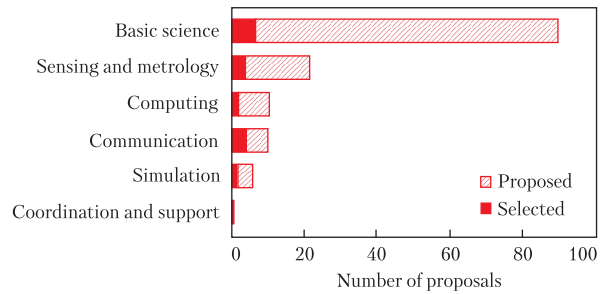


Рис. 6. Розподіл грантів за напрямками у європейській програмі European Quantum Flagship [7]

Зростання числа кубітів у квантових процесорах ІВМ по роках

Роки	Процесор і число кубітів
2019	Falcon (Сокіл) — 27
2020	Hummingbird (Колібрі) — 65
2021	Eagle (Орел) — 127
2022	Osprey (Скопа) — 433
2023	Condor (Кондор) — 1121
Потім	1 млн і більше

вала у 2018 р. і в якій задіяно більш як 5 тис. науковців. На цю програму, розраховану на 10 років, планується витратити понад 1 млрд євро. На рис. 6 наведено дуже показову діаграму зі статті про розподіл грантів у рамках цієї програми [7], з якої стає зрозумілим, які саме дослідження сьогодні пов'язують з розвитком квантових технологій. Перше місце посідають фундаментальні дослідження, оскільки в цій галузі отримання нових знань є ключовим фактором, потім — метрологія, комп'ютерні науки, комунікації та ін. Отже, проблема квантових комп'ютерів та квантових обчислень — це одна з гілок на великому дереві квантових технологій.

Українські науковці також роблять внесок у вирішення фізичних проблем створення та вдосконалення елементів квантового комп'ютера. Наскільки мені відомо, останніми роками дослідження в галузі квантових технологій проводять такі наукові групи:

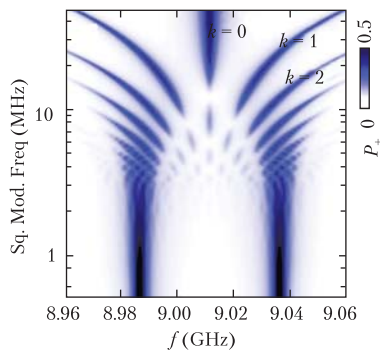


Рис. 7. Заселеність верхнього рівня спінового кубіта, як функція параметрів, що контролюють його стан [1]

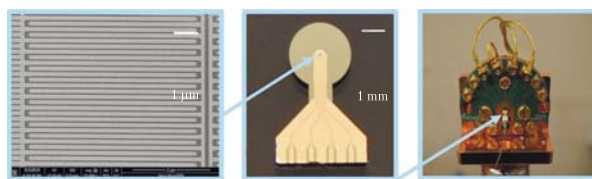


Рис. 8. Надпровідникові детектори одиничних фотонів

• Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України — Л.А. Пастур, О.М. Омелянчук, С.М. Шевченко та ін. вивчають твердотільні кубіти, заплутані стани;

• Інститут фізики НАН України — Л.П. Яценко, А.М. Негрійко, А.А. Чумак та ін. займаються динамікою квантових систем, квантовими логічними операціями, квантовою метрологією;

• Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України — група А.О. Семєнова працює в галузі квантових комунікацій, неуніверсальних квантових обчислень, квантової оптики;

• Київський національний університет імені Тараса Шевченка — І.П. Пінкевич, І.М. Дмитрук створили освітньо-наукову програму «Квантові комп'ютери, обчислення та інформація»;

• Київський академічний університет — під керівництвом О.А. Кордюка започатковано Центр квантових матеріалів та технологій, у якому вивчають надпровідникові матеріали для реалізації кубітів і готують висококваліфіковані кадри;

• Інститут математики НАН України — В.Л. Островський, Ю.С. Самойленко, Д.Ю. Якименко та ін. створюють алгебраїчні структури для квантових протоколів;

• Львівський національний університет імені Івана Франка — група В.М. Ткачука займається симуляціями на квантовому комп'ютері; в університеті діє освітньо-наукова програма «Квантові комп'ютери та квантове програмування».

Наведу лише три конкретні приклади розвитку цих досліджень у нашому Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України.

Перший напрям наших досліджень — це інтерферометрія Ландау—Зінера—Штюкельберга—Майорани. Витоки його сягають далекого 1932-го року, коли ці молоді науковці вивчали переходи у дворівневих системах (кубітах за сучасною термінологією). Якщо таку дворівневу систему почати збуджувати, тобто змінювати її параметри, можуть відбуватися переходи між її станами, відомі сьогодні як переходи ЛЗШМ. Якщо такий перехід відбувається двічі або періодично, ця еволюція приводить до квантової інтерференції. На рис. 7 наведено приклад результату такої інтерференції — залежність заселеності стану кубіта від контролюючих параметрів. На початку доповіді я згадував про важливість індивідуального контролю квантових систем, і це одна з таких можливостей. Тому ми продовжуємо розвивати цей ключовий інструмент характеристики та контролю за квантовими системами [8].

Другий напрям пов'язаний з надпровідниковими детекторами одиничних фотонів (рис. 8). Річ у тім, що квантова перевага, крім власне переваги, породжує і певні загрози. Через небачену раніше потужність квантових обчислень потенційно вразливими стають традиційні криптографічні алгоритми та пов'язаний з ними захист даних [9]. Тому одним з пріоритетних завдань є гарантування інформаційної безпеки держави та створення надійного захисту інформаційних мереж. Такий захист може забезпечити квантова криптографія, яка на відміну від традиційної, що оперує матема-

тичними методами шифрування, сфокусована на суто фізичних явищах, що виникають при передачі інформації за допомогою квантово-механічних об'єктів.

У 2018 р. швейцарська фірма ID Quantique продемонструвала квантову криптографію з передачею квантового ключа по оптоволокну на рекордні 421 км [10]. Це стало можливим завдяки використанню вискоелективних однофотонних детекторів на основі ультратонких надпровідних плівок молибден–кремній. Уперше у світі такі MoSi-детектори було розроблено за участю співробітників ФТІНТу. Створені вискоелективні детектори на основі ультратонких (3–6 нм) наноструктурованих (ширина смужки 100 нм) плівок аморфного надпровідника MoSi для реєстрації фотонів з довжиною хвилі 1550 нм можуть бути, зокрема, вбудовані в інтегрально-оптичні хвилеводи. В таких інтегрованих детекторах досягнуто квантової ефективності детектування фотонів на чипі, що становить 73 % за низького рівня темнових відліків (<10/с) [11–13].

Слід зауважити, що надпровідникові однофотонні детектори є дуже важливими елементами для таких застосувань, як фотонні квантові комп'ютери та системи квантової криптографії. А тому наші розробки зі створення одного зі складників фізичної реалізації квантово-криптографічних пристроїв уможливають появу вітчизняних захищених квантово-криптографічних ліній.

Третій напрям — це надпровідні квантові метаматеріали. Звичайний матеріал складається з атомів, але атом — природний елемент, яким практично неможливо керувати. Метаматеріал складається з так званих метаатомів — штучно виготовлених елементів у вигляді мікросхем. Маніпулювати ними дуже легко. У наших дослідженнях [14–16] роль метаатомів відіграють надпровідникові кільця з контактами Джозефсона — так звані ВЧ-НКВІДи. На рис. 9 наведено візуалізацію електромагнітних збуджень у масиві магнітноз'язаних кілець ВЧ-НКВІДів, що формують метаповерхню.

Ми й надалі плануємо досліджувати динаміку кубітів та квантові кореляції в мезо- і ма-

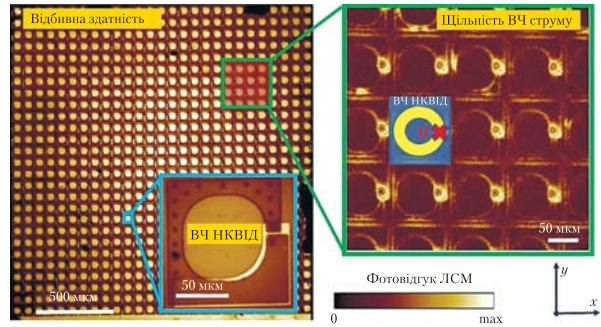


Рис. 9. Візуалізація електромагнітних збуджень у масиві магнітноз'язаних кілець ВЧ-НКВІДів [14]



Рис. 10. 50-кубітний квантовий комп'ютер IBM Q, який компанія представила у 2018 р. на виставці електроніки CES-2018 в Лас-Вегасі

кросистемах, шукати нові матеріали для однофотонних детекторів, вивчати кубіти та метаматеріали із джозефсонівськими структурами.

Хотів би підкреслити, що ці та інші квантові дослідження є надзвичайно важливими для розвитку фундаментальної науки на найсучаснішому рівні, підготовки наукових кадрів у галузі квантових технологій, а також для національної безпеки нашої держави у сфері використання новітніх інформаційних технологій і створення надійного захисту інформаційних мереж.

Однак необхідно запорукою успішного проведення подальших досліджень за цими напрямками є наявність власного виробництва скраплених азоту, гелію та водню, за допомо-

гою яких забезпечується охолодження об'єктів при дослідженні їх фізичних властивостей за низьких та наднизьких температур. Наразі Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України виробляє скраплений гелій за допомогою зріджувального устаткування, яке було введено в експлуатацію ще в 60-х роках ХХ ст. і сьогодні конче потребує заміни на сучасну кріогенну апаратуру. І насамперед нашим експериментаторам необхідні зріджувач азоту та рефрижератори.

Отже, можна тезисно сформулювати висновки:

- квантові комп'ютери (на рис. 10 наведено зовнішній вигляд одного з них) можуть вирішувати завдання, недоступні для класичних;
- квантові технології основані на фундаментальних принципах квантової механіки (суперпозиція, заплутування);
- є різні фізичні реалізації кубітів — від мікро- до макроскопічних;
- квантові технології — це локомотив розвитку сучасних квантових наук;
- в Україні є наукові та освітні напрацювання і досягнення світового рівня.

Дякую за увагу!

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Ono K., Shevchenko S.N., Mori T., Moriyama S., Nori F. Quantum interferometry with a g-factor-tunable spin qubit. *Phys. Rev. Lett.* 2019. **122**: 207703. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.207703>
2. Omelyanchuk A.N., Ilyichev E.V., Shevchenko S.N. *Quantum coherent phenomena in Josephson qubits*. Kyiv: Naukova Dumka, 2013 (in Russian). http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/publisher/monographiya_2013.pdf [Омельяничук А.Н., Ильичев Е.В., Шевченко С.Н. *Квантовые когерентные явления в джозефсоновских кубитах*. Киев: Наукова думка, 2013.]
3. Izmalkov A., van der Ploeg S.H.W., Shevchenko S.N., Grajcar M., Il'ichev E., Hübner U., Omelyanchouk A.N., Meyer H.-G. Consistency of Ground State and Spectroscopic Measurements on Flux Qubits. *Phys. Rev. Lett.* 2008. **101**: 017003. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.017003>
4. Shevchenko S.N. *Mesoscopic Physics meets Quantum Engineering*. World Scientific, Singapore, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1142/11310>
5. Arute F., Arya K., Babbush R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*. 2019. **574**: 505–510. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
6. Zhong H.-S., Wang H., Deng Y.-H. et al. Quantum computational advantage using photons. *Science*. 2020. **370**(6523): 1460–1463. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abe8770>
7. Castelvechhi D. Quantum projects get cash. *Nature*. 2018. **563**: 14–15. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07216-0>
8. Shevchenko S.N., Ashhab S., Nori F. Landau-Zener-Stueckelberg interferometry. *Physics Reports*. 2010. **492**(1): 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.03.002>
9. Grimes R.A. *Cryptography apocalypse: preparing for the day when quantum computing breaks today's crypto*. John Wiley & Sons, 2019.
10. Boaron A., Boso G., Rusca D., Vulliez C., Autebert C., Caloz M., Perrenoud M., Gras G., Bussièrès F., Li M.-J., Nolan D., Martin A., Zbinden H. Secure Quantum Key Distribution over 421 km of Optical Fiber. *Phys. Rev. Lett.* 2018. **121**(19): 190502. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.190502>
11. Dobrovolskiy O.V., Bezv V.M., Mikhailov M.Y., Yuzepovich O.I., Shklovskij V.A., Vovk R.V., Tsindlekht M.I., Sachser R., Huth M. Microwave emission from superconducting vortices in Mo/Si superlattices. *Nat. Commun.* 2018. **9**: 4927. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07256-0>
12. Häußler M., Mikhailov M.Yu., Wolff M.A., Schuck C. Amorphous superconducting nanowire single-photon detectors integrated with nanophotonic waveguides. *APL Photonics*. 2020. **5**(7): 076106. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0004677>
13. Korneeva Y.P., Mikhailov M.Yu., Pershin Yu.P., Manova N.N., Divochiy A.V., Vakhtomin Yu.B., Korneev A.A., Smirnov K.V., Sivakov A.G., Devizenko A.Yu., Goltsman G.N. Superconducting single-photon detector made of MoSi film. *Supercond. Sci. Technol.* 2014. **27**(9): 095012. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/9/095012>

14. Zhuravel A.P., Bae S., Lukashenko A.V., Averkin A.S., Ustinov A.V., Anlage S.M. Imaging collective behavior in an rf-SQUID metamaterial tuned by DC and RF magnetic fields. *Appl. Phys. Lett.* 2019. **114**(8): 082601. DOI: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5064658>
15. Wang H., Zhuravel A.P., Indrajeet S., Taketani B.G., Hutchings M.D., Hao Y., Rouxinol F., Wilhelm F.K., LaHaye M.D., Ustinov A.V., Plourde B.L.T. Mode structure in superconducting metamaterial transmission-line resonators. *Phys. Rev. Appl.* 2019. **11**(5): 054062. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054062>
16. Leha A.A., Zhuravel A.P., Karpov A., Lukashenko A.V., Ustinov A.V. Phase-resolved visualization of radio-frequency standing waves in superconducting spiral resonator for metamaterial applications. *Fiz. Nizk. Temp.* 2022. **48**(2): 119–128. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0009288>

Sergey N. Shevchenko

B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-0365>

QUANTUM COMPUTER: THE STATE OF THE PROBLEM IN THE WORLD AND IN UKRAINE

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, December 8, 2021

The report analyzes the current state of the problem of creating a quantum computer as a real working device, which the world scientific community identifies as one of the most important fundamental tasks of physics in the XXI century. It is emphasized that the work of the quantum computer is based on the results of basic research in the field of quantum physics. Today, the world is actively developing quantum technologies, which are expected to be implemented in the near future and provide breakthrough results in many areas of public life: from cryptography to modeling large-scale systems, description and prediction of complex processes and more. The contribution of Ukrainian scientists to the study of quantum systems, the development of quantum technologies and the solution of physical problems that arise in the implementation of elements of the quantum computer is considered.

Keywords: quantum computer, quantum technologies, spin qubit, flow qubit, superconducting single photon detectors, quantum metamaterials.