



ДОЛБИН

Олександр Вітольдович — доктор фізико-математичних наук, професор, виконувач обов'язків директора Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ АСПЕКТИ КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 2 квітня 2025 року

У доповіді наголошено, що квантові технології та квантова інженерія є одними з ключових напрямів розвитку сучасної науки і техніки, особливо зважаючи на потенційно революційні їх застосування в оборонній сфері, медицині, а також у цифровій економіці. Зазначено, що подальший розвиток квантових технологій неможливий без фундаментальних досліджень у галузі фізики низьких температур. Наведено низку вагомих результатів за цим напрямом, отриманих науковцями Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України у співпраці з іншими профільними академічними установами та університетами України.

Добрий день, шановні колеги!

Дякую за можливість привернути вашу увагу до деяких важливих аспектів сучасних квантових технологій у галузі фізики низьких температур.

Квантові технології вже радикально змінили сучасний світ і невинно продовжують змінювати його далі. В основі цих перетворень лежить залучення до технологічного базису фундаментальних явищ квантового характеру. Такі технології мають кардинально вплинути на всі аспекти функціонування суспільства, насамперед на його обороноздатність і безпеку. Найбільш активно вони розвиваються зараз у таких галузях, як квантові обчислення, квантова інженерія, квантова криптографія.

Квантові комп'ютери значно перевершують класичні за швидкодією, обчислення з їхнім використанням на кілька порядків більш ефективні, ніж звичайні комп'ютерні обчислення, тому в разі застосування спеціальних алгоритмів вони можуть призвести до зламу наявних криптографічних систем. З іншого боку, застосування квантових обчислень для моделювання може зумовити прорив у медицині та фармацевтиці, значно прискорити розроблення нових лікарських препаратів, по-

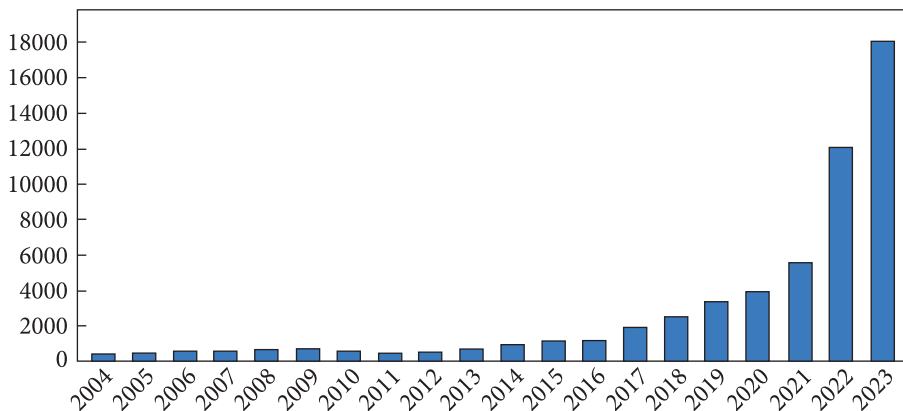


Рис. 1. Світова динаміка щорічної кількості зареєстрованих патентів у галузі квантового комп'ютингу, квантової криптографії і квантових сенсорів у 2004—2023 рр.

глибити дослідження ДНК з метою створення індивідуальних персоніфікованих ліків. Створення надчутливих квантових датчиків сприяє розбудові медичної діагностики, а також має численні безпекові застосування. Алгоритми квантової оптимізації у фінансах та логістиці можуть допомогти досягти більшої прибутковості за менших витрат і ризиків. І це вже не кажучи про використання квантових обчислень для розвитку штучного інтелекту та машинного навчання — прорив у цій сфері відкриває величезні можливості, але водночас може супроводжуватися й значними ризиками.

Слід зазначити, що квантові технології є критично важливими для кожної держави, і якщо ми хочемо їх мати, нам, безумовно, потрібно їх розвивати.

Стрімкий розвиток квантових технологій у світі добре ілюструє динаміка зростання кількості патентів у галузі квантового комп'ютингу, квантової криптографії, квантових сенсорів (рис. 1). На сьогодні визнаними лідерами за цими напрямками є Сполучені Штати Америки, Китай, Канада, Японія. Звернімо увагу, що в галузі квантової криптографії Китай навіть випереджає США, тобто зараз, зважаючи на прогрес квантового комп'ютингу у Сполучених Штатах, Китай активно інвестує у квантовий захист. В ЄС діє європейська ініціатива Quantum Technologies Flagship, мета якої полягає в тому, щоб до 2030 р. Євросоюз зайняв провідні позиції у світі в галузі квантових технологій. Зазначимо також, що 2025 рік проголошено

Міжнародним роком квантової науки і технологій під егідою ЮНЕСКО.

Коротко торкнемося питання природи переваг квантових обчислень та їхньої залежності від низьких температур.

Такі переваги ґрунтуються насамперед на двох визначеннях з квантової фізики: це *квантова суперпозиція* і *квантова запутаність*. Квантова суперпозиція — властивість системи перебувати в кількох станах одночасно, а квантова запутаність — це квантове явище, пов'язане з тим, що квантові стани двох або більшої кількості об'єктів є взаємозалежними, незважаючи на відстань між ними. На відміну від традиційних комп'ютерів, які складаються зі звичайних бітів, що приймають значення 0 або 1, квантові комп'ютери містять квантові біти, або кубіти, які перебувають у стані квантової суперпозиції, тобто можуть одночасно приймати значення і 0, і 1, а отже, можуть зберігати 2^n станів одночасно, тоді як звичайний комп'ютер зберігає одночасно тільки n станів. Крім того, кубіти поєднані один з одним квантовою запутаністю, тобто вони перебувають у когерентному стані.

Звісно, для використання переваг таких систем необхідна спеціальна математика, і її було створено навіть раніше, ніж фізично реалізовано квантові комп'ютери. Все це дає квантовим комп'ютерам так звану квантову перевагу в розв'язанні деяких специфічних задач. Це означає, що вони можуть у скінченний строк знайти розв'язок задачі, для розв'язання якої

звичайному суперкомп'ютеру знадобилися б сотні і навіть тисячі років.

Однак квантові комп'ютери мають і значні обмеження. Насамперед квантові біти необхідно підтримувати в когерентному стані. Це можливо лише в умовах наднизьких температур, оскільки будь-які теплові флуктуації руйнують когерентні стани. Саме тому всі сучасні квантові комп'ютери являють собою потужні кріогенні системи і функціонують за наднизьких температур. Наприклад, квантовий комп'ютер фірми IBM працює за температури 10—15 мК. Крім того, переважна більшість фізичних реалізацій квантових бітів (кубітів) взагалі існують тільки за наднизьких температур. Будь-яка втрата когерентності й теплові флуктуації неминуче призводять до помилок у роботі квантового комп'ютера. Звісно, є спеціальні алгоритми виявлення та корекції помилок, але на це витрачається певна частина потужностей квантового комп'ютера, а тому було б добре звести такі помилки до мінімуму. І, на рещті, колись-таки квантовий комп'ютер видаватиме на виході цілком класичний результат, але для цього потрібно навчитися зчитувати інформацію з квантових бітів, тобто вони повинні перейти у класичний стан, а потім знову повернутися в стан суперпозиції. І цей процес має бути контрольованим.

Чи можемо ми знайти рішення зазначених проблем безпосередньо в Україні? Навряд чи в нинішніх умовах і за теперішньої ресурсної бази нам вдасться побудувати квантовий комп'ютер у Харкові чи Києві. Проте ми можемо долучитися до міжнародного процесу розвитку цієї галузі, реалізувати власну елементну базу, створити свої пристрої, засновані на квантових ефектах. Подібні дослідження в Україні зараз проводять колективи Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (ФТІНТ), Інституту фізики НАН України, Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київського академічного університету, Львівського національного університету імені Івана Франка та деяких інших установ.

Зокрема, незважаючи на величезні труднощі останнього часу, ФТІНТ не лише зберіг значний науковий потенціал, а й за деякими напрямками зміг досягти істотного прогресу. Минулого року в нашому інституті за підтримки НАН України та міжнародної дослідницької програми IMPRESS-U було створено Харківський квантовий центр, який має на меті побудову та розвиток осередку вітчизняних квантових низькотемпературних технологій на Харківщині, поглиблення міжнародного партнерства в цій сфері, а також поширення знань у галузі квантових явищ і квантових технологій серед наукової молоді та в освітньому процесі.

Серед основних досягнень нашої діяльності можна відзначити такі.

1. Елементи для квантових розрахунків. У ФТІНТі побудовано концепцію створення елементів для квантових розрахунків — топологічних кубітів та кубітів, основаних на магнітних іонах [1]. Топологічні кубіти є більш стабільними, вони можуть довше перебувати в когерентному стані. Це зменшує потребу в складних схемах виправлення помилок, що потенційно сприятиме можливості масштабування квантових комп'ютерів і забезпечить більшу стабільність їхньої роботи. Прикладом таких топологічних систем є алюмоборати — сполуки, в яких завдяки особливостям структури атоми рідкісноземельних елементів є матрично ізольованими. Такі кубіти, незважаючи на складність їх одержання, є перспективними, оскільки в умовах низьких температур вони дають можливість керувати процесами когеренції/декогеренції квантових станів, а також посилювати або послаблювати взаємодію між кубітами під дією зовнішніх факторів (електричного поля або стиснення). Як наслідок, у топологічних кубітах квантові стани можуть зберігатися довше, ніж у звичайних.

Про актуальність цієї тематики свідчать гарячі дискусії, що точаться сьогодні навколо квантового процесора Majorana 1, розробленого корпорацією Microsoft і представленого в лютому 2025 р. Як заявлено, цей чип побудовано саме на топологічних кубітах.

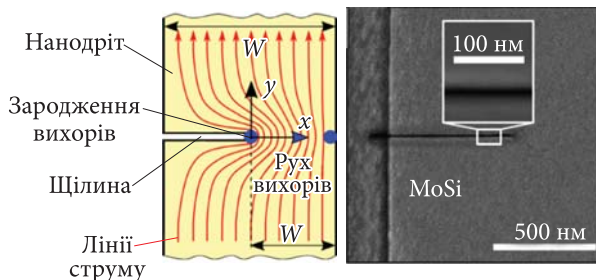


Рис. 2. Надпровідний нанодротяний однофотонний детектор (SNSPD), розроблений у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України

2. Квантова інженерія. Звісно, було б добре, якби кубіти могли самі підтримувати себе в когерентному стані або самі себе охолоджувати. Науковці нашого інституту в рамках діяльності Харківського квантового центру розвинули теорію, яка передбачає, що в одновимірній спіновій системі під зовнішнім впливом (це може бути механічне розтягування/стиснення або електричне поле) відбувається процес, подібний до фазового перетворення, що супроводжується зміною ентропії системи і поглинанням тепла [2]. Таким чином у цій ланцюгово-спіновій системі має проявлятися величезний еластокалоричний ефект. Однак це передбачене теорією проривне явище поки що не підтверджено експериментально.

3. Квантова криптографія. Стрімкий розвиток квантового комп'ютингу ставить під сумнів захищеність звичайних систем передачі даних. Зважаючи на це, запропоновано засоби захищеного зв'язку, які не можна зламати з використанням класичних алгоритмів. Насамперед ідеться про квантові лінії зв'язку, які для передачі інформації між двома учасниками (відправником і отримувачем) використовують квантову суперпозицію.

Відправник генерує фотони в когерентному заплутаному стані, кодує їх за допомогою спеціальних протоколів і надсилає отримувачу по лініях зв'язку. Отримувач приймає їх за допомогою квантового детектора, який реєструє окремі фотони. Якщо зломисник захоче перехопити фотони, він змінить їхній стан, і отримувач зможе виявити втручання, оскільки побачить відхилення від очікуваних квантових станів.

Отримувач зможе виявити втручання, оскільки побачить відхилення від очікуваних квантових станів.

Євросоюз, виконуючи ініціативу European Quantum Communication Infrastructure, планує до 2030 р. впровадити систему квантових захищених ліній, яка охопить усі країни спільноти.

Закономірно постає запитання: чи можемо ми побудувати такі квантові лінії зв'язку в Україні? Так, безумовно можемо, але для цього потрібні елементи квантової криптографії, до яких, зокрема, належить надпровідний нанорозмірний однофотонний детектор. Про цю систему хотів би розповісти дещо детальніше, оскільки її було створено саме у Харкові. Ця система (рис. 2) призначена для дослідження процесів взаємодії квантів випромінювання або магнітного поля з мезоскопічними структурами, тобто з надпровідними аморфними чи неупорядкованими текстурованими тонкими плівками.

У нашому інституті опрацьовано технологічні аспекти осадження двокомпонентних надпровідних плівок сполуки MoSi у широкому діапазоні концентрацій [3—5]. Такі плівки утворюються при напорошенні з двох окремих плазмових джерел у вакуумному середовищі. Гомогенізацію плівок здійснюють при осадженні пари на підкладку. Такий підхід дозволяє отримувати плівки в нанометровому діапазоні товщин. Температура надпровідного переходу дуже залежить від складу і структури плівки. Ми дослідили як фізичні властивості таких аморфних і нанокристалічних плівок, так і вплив розмірних та структурних змін на надпровідний стан. Також було досліджено проникнення магнітного поля в плівку й утворення та рух магнітних вихорів, або вихорів Абрикосова, в таких тонких плівках.

4. Надпровідні квантові інтерференційні структури. Звичайно, загальна картина низькотемпературних квантових пристроїв була б неповною без згадки про надпровідні квантові інтерференційні структури (superconducting quantum interference device — SQUID), які являють собою надпровідний контур з одним або кількома джозефсонівськими (тунельними)

контактами. Такий пристрій може бути як надчутливим датчиком магнітного поля, що фіксує зміни магнітного поля в один квант, так і поточковим кубітом — реалізацією квантового пристрою, в якому струм перебуває в суперпозиції двох станів: прямого і зворотного напрямків. Нещодавно у ФТІНТі з використанням електричного пробоя наношарів електролітичних оксидів ніобію між анодом Nb і катодом InSn було виготовлено такі пристрої з мінімальною індуктивністю — це означає, що вони можуть з максимальною чутливістю працювати на надвисоких частотах [6]. Керувати станом такого пристрою можна, прикладаючи зовнішнє магнітне поле. До речі, надпровідні магнітні екрани для таких комірок квантового комп'ютера також виготовлено саме в нашому інституті.

Для реалізації зазначених низькотемпературних квантових технологій потрібні низькі температури, а для їх отримання у свою чергу необхідні рідини-охолоджувачі — рідкий азот і гелій. Кріогенне обладнання ФТІНТу для одержання цих рідин було пошкоджено під час бомбардувань Харкова ще в березні-квітні 2022 р. Завдяки Президії НАН України ми отримали гроші на ремонт кріогенератора — установки для скраплення азоту, і наразі він уже перебуває в Нідерландах, де фірма-виробник цього обладнання здійснює його ремонт і модернізацію. Крім того, ми виграли європейський грант на фінансування інфраструктурного проекту з розгортання Центру колективного користування кріогенними рідинами імені Л.В. Шубнікова, який планується оснастити відремонтованим азотним скраплювачем та новим сучасним скраплювачем гелію. Цей центр забезпечуватиме кріогенними рідинами не лише Харківський квантовий центр і лабораторії ФТІНТу (до речі, дві з них є об'єктами, що становлять національне надбання України), а й інші академічні, освітні та медичні установи Харкова. Втім, побудова і діяльність центру потребують подальшої організаційної підтримки з боку Академії.

Нарешті, я запрошую всіх присутніх долучатися до регулярної роботи нашого Харківського квантового семінару. Цей семінар було започатковано в жовтні 2023 р. за ініціативою співробітників Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» та Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна як платформу для реального обміну досвідом і спілкування харківських вчених та наукової молоді з найвидатнішими вченими в галузі квантових явищ і технологій (лекції вже прочитали Майкл Беррі, Джон Пердью, Франко Норі) та представниками провідних лабораторій світу (Google Quantum AI, University of Cambridge та ін.).

Отже, на сьогодні в Україні, зокрема у ФТІНТі, є значний науковий і технічний потенціал для створення й поширення квантових технологій у найбільш критичних напрямках, таких як квантова криптографія і квантова інженерія. Безумовно, реалізація таких масштабних заходів потребує кооперації наукових установ і високотехнологічних підприємств як в Україні, так і за кордоном. Зокрема, пропонується зосередитися на створенні захищеної квантової лінії зв'язку як критично важливої з точки зору обороноздатності та безпеки держави. Реалізацію цього проекту можна було б здійснити в рамках, наприклад, цільової програми НАН України, до виконання якої залучити кілька академічних установ (квантові джерела — Інститут фізики; квантові реєстратори — ФТІНТ, кодування — Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова), а координаційні функції покласти на створену минулого року Координаційну раду з квантових технологій. Крім того, проведення таких масштабних досліджень потребує радикального оновлення парку низькотемпературного обладнання.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. Мележик*

REFERENCES

1. Mikitik G.P., Sharlai Y.V. Low-frequency quantum oscillations in LaRhIn_5 : Dirac point or nodal line? *Nature Communications*. 2023. **14**: 2060. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37692-6>
2. Zvyagin A.A., Slavin V.V. Giant caloric effects in spin-chain materials. *Physical Review B*. 2024. **109**(21): 214438. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.109.214438>
3. Turutanov O.G., Korolev A.M., Shnyrkov V.I., Shapovalov A.P., Baránek M., Kern S., Lyakhno V.Yu., Neilinger P., Gracjar M. Design of deeply cooled ultra-low dissipation amplifier and measuring cell for quantum measurements with a microwave single-photon counter. *Low Temperature Physics*. 2024. **50**(1): 82—88. <https://doi.org/10.1063/10.0023896>
4. Shnyrkov V.I., Shapovalov A.P., Lyakhno V.Yu., Dumik A.O., Kalenyuk A.A., Febvre P. An RF SQUID readout for a flux qubit-based microwave single photon counter. *Superconductor Science and Technology*. 2023. **36**: 035005. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/acb10e>
5. Bevz V.M., Mikhailov M.Yu., Budinska B., Lamb-Camarena S., Shpilinska S.O., Chumak A.V., Urbanek M., Arndt M., Lang W., Dobrovolskiy O.V. Vortex counting and velocimetry for slitted superconducting thin strips. *Physical Review Applied*. 2023. **19**: 034098. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.19.034098>
6. Bondarenko S.I., Krevsun A.V., Koverya V.P. Features of nanocontact formed using point electrical breakdown of a niobium oxide nanolayer. *Low Temperature Physics*. 2024. **50**(4): 350—358. <https://doi.org/10.1063/10.0025302>

Alexander V. Dolbin

*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8631-5051>

LOW-TEMPERATURE ASPECTS OF QUANTUM TECHNOLOGIES:
STATE AND PROSPECTS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 2, 2025

The report emphasizes that quantum technologies and quantum engineering are one of the key areas of development of modern science and technology, especially considering their potentially revolutionary applications in the defense sector, medicine, and also in the digital economy. It is noted that the further development of quantum technologies is impossible without fundamental research in the field of low-temperature physics. A number of significant results in this area, obtained by scientists of the B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine in cooperation with other specialized academic institutions and universities of Ukraine, are presented.

Cite this article: Dolbin A.V. Low-temperature aspects of quantum technologies: state and prospects of innovative development (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 2, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (7): 49—54. <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.049>