



СЕМЕНОВ

Андрій Олександрович — член-кореспондент НАН України, провідний науковий співробітник, керівник групи квантової оптики та квантової інформації Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

КВАНТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В УКРАЇНІ: РОЗВИТОК І ЗАСТОСУВАННЯ

**Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 2 липня 2025 року**

Доповідь присвячено проблемам розвитку квантових технологій в Україні. Квантові обчислення, квантове моделювання, квантові комунікації, сенсорики і метрологія є одними з ключових напрямів розвитку глобальної інноваційної економіки. Потенційний вплив таких технологій на всі сфери людської діяльності настільки значний, що його нерідко називають другою квантовою революцією. Технологічні прориви в галузі квантових технологій неможливі без ґрунтовних фундаментальних досліджень.

Шановний пане президенте!

Шановні члени Президії!

Шановні колеги!

Сто років тому, в 1925 р., до редакції німецького журналу «Zeitschrift für Physik» надійшов рукопис молодого науковця Вернера Гайзенберга «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen» (Про квантово-теоретичне переосмислення кінематичних та механічних співвідношень). Ця стаття стала знаковим етапом у розвитку сучасної науки, оскільки в ній Гайзенберг уперше запропонував теорію, абсолютно відмінну від класичної, яка пояснювала поведінку речовини на атомному рівні. Незабаром вийшли статті Ервіна Шредінгера та Макса Борна, в яких, поряд із роботою Гайзенберга, було закладено основи квантової фізики.

Отже, ми сьогодні відзначаємо 100-річний ювілей квантової фізики.

Поява квантової теорії не лише привела до революційних змін у фундаментальній науці, а й зумовила появу переважної більшості технологій ХХ ст. Навіть у цьому залі дуже складно кудись спрямувати погляд, щоб не побачити щось, пов'язане з квантовими технологіями. Проте ці технології стосуються відносно великих об'єктів, які мають колективні квантові властивості завдяки окремим частинкам, з яких вони складаються. І це стало основою того, що можна назвати квантовою революцією.

Сьогоднішня експериментальна фізика пропонує значно більше — можливість маніпуляції окремими частинками, наприклад одним атомом чи одним фотоном. Більше того, ми навчилися групувати ці поодинокі об'єкти у великі структури так, щоб можна було їх контролювати і використовувати для вирішення певних практичних завдань. Це дало квантовій фізиці друге дихання і вже зараз приводить до технологічного прориву, який ми називаємо другою квантовою революцією.

Сьогодні провідні країни світу вкладають у розвиток квантових технологій мільярдні інвестиції, сподіваючись, що квантове майбутнє докорінно змінить наше життя.

На рисунку наведено схему, яка ілюструє парадигму розвитку квантових технологій у рамках ініціативи Європейського Союзу Quantum Flagship. Як бачимо, в основі лежить фундаментальна наука. Далі можна виокремити чотири квантові технології: квантові обчислення, квантові комунікації, квантове моделювання та квантову сенсоріку і метрологію.

Сьогодні ми коротко розглянемо кожну з цих технологій, технологічний вплив, який можна від них очікувати, а також обговоримо стан їх розвитку в Україні.

Почнімо з **фундаментальної науки**. Поява квантової фізики стала досить серйозним викликом для нашого розуміння Світу. Наведу лише один приклад. Сьогодні ми, фізики-теоретики, звично оперуємо таким поняттям, як від'ємна ймовірність (або квазіймовірність). Проте пояснити цей математичний прояв властивостей квантових систем із звичайною для нас інтуїцією ми не можемо. А це поняття є необхідним для розуміння таких фундаментальних явищ, як порушення локального реалізму, оптична неklasичність тощо. Загалом у розвитку сучасних квантових технологій значну роль відіграють такі напрями, як фундаментальна квантова наука, квантова оптика, схемна квантова електродинаміка, фізика надпровідності, фізика твердого тіла (топологічні ізолятори, кольорові центри в діамантах тощо), фізика холодних та рідбергерівських атомів, а також інші галузі експериментальних і теоретичних



Парадигма розвитку квантових технологій у рамках ініціативи Європейського Союзу Quantum Flagship (див. <https://qt.eu/>)

досліджень. Про важливість фундаментальних досліджень у квантовій фізиці свідчить той факт, що результати з квантової оптики двічі, у 2005 та 2012 р., було відзначено Нобелівською премією з фізики, а у 2022 р. Нобелівську премію з фізики присуджено за експериментальне підтвердження того, що квантові системи можуть порушувати одну з базових моделей, на яких ґрунтуються інтуїтивні уявлення класичної фізики, — модель локального реалізму.

Розвиток квантової фізики та її теоретичного апарату значною мірою вплинув і на інші галузі знань, причому не лише на очевидно дотичні наукові напрями в математиці та комп'ютерних науках (особливо на дискретну математику, криптографію, функціональний аналіз, теорію статистичного оцінювання), а й на астрономію та біологію, запропонувавши їм нові інструменти для відтворення зображень, на філософію, стимулюючи її до узагальненого осмислення засад квантового світу, змінення поглядів на природу реальності, пошуку взаємозв'язку між матерією та свідомістю, і навіть, як не дивно, на економічну науку.

Розглянемо тепер першу квантову технологію у списку Quantum Flagship — **квантове моделювання** (quantum simulation). На початку 80-х років минулого століття професор Річард Фейнман сформулював проблему. Він показав, що моделювання на класичному комп'ютері навіть найпростіших квантових систем (наприклад, молекули кофеїну, з яким більшість із нас має справу щодня) потребує гігантських обчислювальних ресурсів, унаслідок чого таку

задачу в принципі неможливо розв'язати на класичних комп'ютерах. Фейнман висунув ідею, що квантову систему з багатьох частинок можна змодельовати за допомогою іншої квантової системи, яку ми можемо добре контролювати та маніпулювати нею, — квантового комп'ютера. Так зародився напрям квантового моделювання, тобто використання спеціальних квантових симуляторів для вивчення складних квантових систем, властивості яких неможливо передбачити на класичних комп'ютерах.

Реалізації квантових симуляторів сьогодні досліджують на багатьох платформах, зокрема на рідбергерівських атомах, фотонних системах тощо. Квантове моделювання активно розвивається в Європейському Союзі, і досягнення в цьому напрямі обіцяють справжню революцію не лише в хімії та фармацевтиці, а й у створенні нових матеріалів із заздалегідь заданими властивостями.

Другий напрям квантових технологій — це **квантові обчислення**. Насамперед ідеться про квантові комп'ютери. І тут можна виокремити три основні шляхи розвитку:

- 1) створення універсальних квантових комп'ютерів, стійких до помилок;
- 2) створення квантових комп'ютерів найближчого майбутнього;
- 3) створення спеціалізованих квантових комп'ютерів.

Найбільш амбітною метою є створення універсального, стійкого до помилок квантового комп'ютера. Її досягнення потенційно може привести до проривів у фундаментальних і прикладних дослідженнях і значною мірою вплинути практично на всі сфери суспільного життя. Особливу увагу привертає сьогодні можливість інтеграції універсальних квантових комп'ютерів із системами штучного інтелекту, що може сприяти появі нових, досі не передбачуваних технологій. Втім, складно сказати, коли такі комп'ютери стануть доступними. За найоптимістичнішими оцінками, це може відбутися вже за 2—5 років, але найбільш песимістичні прогнози застерігають, що створення таких квантових пристроїв може виявитися принципово неможливим. Особисто

я не вірю в жоден із цих полярних прогнозів, оскільки проблема дійсно досить складна, щоб вирішити її за кілька років, але водночас немає і фундаментальних причин для того, щоб створення квантових комп'ютерів було неможливим.

Чому ж так складно зробити універсальний квантовий комп'ютер? Річ у тім, що квантові стани кубітів (квантові аналоги бітів) дуже чутливі до впливів навколишнього середовища (теплові шуми, вібрації, електромагнітні поля тощо), що призводить до зникнення квантових властивостей та появи помилок в обчисленнях. Для вирішення цієї проблеми, з одного боку, намагаються якомога краще ізолювати систему, а з іншого — розробляють методи квантового коригування помилок. У цих методах замість одного кубіта використовують кілька, що дозволяє виявити та виправити помилки. Зрозуміло, такий підхід призводить до збільшення самого комп'ютера, адже для розв'язання більшості задач кубітів має бути багато — понад мільйон. Отже, досягнення стійкості до помилок є ключовою віхою на шляху до створення реальних квантових комп'ютерів.

Проте сьогодні ми вже маємо невеликі квантові комп'ютери — так звані квантові комп'ютери найближчого майбутнього. Їх розробляють як великі корпорації, зокрема Google, IBM, Microsoft, Intel, Amazon, так і численні дослідницькі групи та стартапи. Попри значний рівень шуму, такі комп'ютери все ж можуть розв'язувати окремі задачі, і з ними вже сьогодні можна працювати.

Ще одним відгалуженням цього напрямку є так звані неуніверсальні квантові комп'ютери. Це пристрої, які можна створити, спираючись на наявні сьогодні технології. Вони призначені для розв'язання лише якоїсь конкретної задачі або обмеженого класу подібних задач. Прикладом таких задач може бути гаусівська бозонна вибірка — генерація специфічної вибірки випадкових чисел, яку не можна згенерувати на класичному пристрої.

Слід зазначити, що сьогодні в квантовій інженерії є думка, що доцільно перейти від концепції квантової переваги (розв'язання за-

дач, принципово недоступних для класичних комп'ютерів) до ідеї квантової вигоди, тобто розв'язання задач, які формально можуть бути вирішені за допомогою класичних комп'ютерів, але зі значно більшими порівняно з квантовими пристроями фінансовими і часовими ресурсами. Зокрема, в Україні в цьому напрямі активно працює стартап Haiqu. Ця компанія використовує класичні алгоритми і створює на їх основі проміжне програмне забезпечення, яке дозволяє значно підвищити продуктивність квантових обчислень, тобто реалізує власне принцип квантової вигоди. Один із співзасновників Haiqu Микола Максименко, на мою думку, є яскравим взірцем успішного інноватора, який вдало поєднує в своїй діяльності фундаментальні та прикладні дослідження.

Третім напрямом квантових технологій є **квантові комунікації**. У ЗМІ час від часу з'являються повідомлення про наближення квантового апокаліпсису, або так званого Дня Q. Це станеться, коли один із гравців створить квантовий комп'ютер, здатний зламати більшість відомих класичних систем шифрування інформації. Як наслідок, під загрозою опиняться багато вже звичних нам елементів сучасного життя — від електронної пошти і анонімних текстових повідомлень у месенджерах до банківських і криптовалютних рахунків та систем критичної інфраструктури.

Класична криптографія — це технологія, якою ми користуємося щоразу, коли здійснюємо ті чи інші операції в Інтернеті, або, якщо говорити дуже спрощено, коли нам потрібно передати повідомлення від точки А до точки В так, щоб третя сторона не могла втрутитися в цей процес. Для цього слід згенерувати так званий ключ — довге випадкове число, потім з його допомогою зашифрувати наше повідомлення, передати його в точку В і розшифрувати з використанням того самого ключа (симетрична криптографія). Однак, якщо йдеться про банк або інтернет-магазин, тобто коли потрібно передати ключі багатьом респондентам, постають проблеми розповсюдження ключа та автентифікації іншої сторони. Побойовання виникають щодо здатності квантового

комп'ютера зламати один з основних елементів технології захищеного зв'язку — розповсюдження криптографічного ключа. І хоча універсальні квантові комп'ютери ще не створено, фахівці з кіберзахисту вважають цю небезпеку реальною.

Крім того, частина конфіденційної інформації, що передається зашифрованими каналами, залишається актуальною протягом тривалого часу. Зацікавлені сторони можуть збирати ці дані і зберігати їх, сподіваючись на можливість розшифрувати в майбутньому, коли стануть доступними відповідні квантові засоби. Така стратегія здобула назву «зберігай зараз — розшифруй пізніше» (save now, decrypt later).

Квантова фізика пропонує технологію, яка може вирішити цю проблему, — квантове розповсюдження криптографічного ключа. При цьому носієм інформації є квантове оптичне випромінювання, а захищеність даних гарантується фундаментальними законами квантової фізики. Однак, попри привабливість цієї технології, вона має певні недоліки. По-перше, технологія квантового розповсюдження ключа потребує складної інфраструктури; по-друге, її важко реалізувати на мобільних пристроях; по-третє, є деякі проблеми з розробленням протоколів сертифікації.

Альтернативою може стати так звана постквантова криптографія. Ця технологія пропонує спеціальні алгоритми для класичних комп'ютерів, які забезпечать стійкість до квантових атак. Головною перевагою постквантової криптографії є можливість її застосування на вже наявній інфраструктурі та на стандартному обладнанні. Водночас, хоча поки невідомі квантові алгоритми, здатні ефективно зламати постквантові схеми, математичного доведення принципової їх неможливості немає. Отже, гіпотетично загроза атаки на таку систему в майбутньому залишається.

І останній напрям квантових технологій — **квантова сенсорика і метрологія**. Слід зазначити, що на сьогодні це найуспішніша квантова технологія, оскільки вже зараз вона має комерційне застосування. В її основі лежить узагальнення класичної теорії статистичного

оцінювання параметрів з метою встановлення фундаментальних квантових меж точності оцінок параметрів, що характеризують стан фізичної системи.

Що таке оцінка параметрів стану, поясню на простому прикладі. Коли ми щось фотографуємо, CCD-матриця в нашому телефоні здійснює квантове вимірювання, тобто реєструє інтенсивність світла, або, інакше кажучи, число фотонів у кожній окремій точці. Уявіть собі, що є два точкові джерела фотонів і ви хочете визначити відстань між ними. Процедура такого визначення за даними вимірювання і являє собою оцінку параметра стану, у нашому випадку — відстані між точковими джерелами світла. Якщо ви перебуваєте дуже далеко від них, ви не матимете можливості це зробити, оскільки джерела зіллються в одну точку. Пів століття тому лорд Релей показав, що для того, щоб подолати цю межу, необхідно мати велику апертуру — телефона не вистачить, потрібен дуже великий об'єктив. Проте виявилось, що межа Релея не є фундаментальною, і як було показано в 2016 р. у роботі Манкей Цанга із Сінгапуру, її можна подолати, якщо певним чином організувати вимірювання. Це дозволяє розрізняти здалека досить близькі джерела.

Технології квантової метрології та сенсорики є актуальними як для військових, так і для цивільних потреб. Насамперед вони стосуються надчіткого відтворення зображень, але є і інші застосування, наприклад квантові гравіметри та акселерометри на основі холодних атомів, які дають змогу з надзвичайною точністю вимірювати прискорення вільного падіння та власного руху. Це відкриває можливості для виявлення прихованих об'єктів на землі, під землею і під водою, а також для реалізації безсупутникової навігації.

А який же стан справ з розвитком квантових технологій в Україні? Якщо коротко, то не дуже гарний, а точніше — критично незадовільний. Ми маємо три основні центри, де розвиваються відповідні дослідження і технології: Львів, Київ та Харків.

Квантовий кластер у Львові. Це насамперед Львівський національний університет

імені Івана Франка, де розробляють стійкі до шуму квантові алгоритми для квантових комп'ютерів найближчого майбутнього (наукові керівники — професор Володимир Ткачук і член-кореспондент НАН України Христина Гнатенко).

В Інституті фізики конденсованих систем НАН України вивчають багаточастинкові системи та квантові кореляції в них (відділ квантової статистики під керівництвом доктора фізико-математичних наук Олега Держка).

У Львові також активно розвиваються дві високотехнологічні компанії — компанія Soft-Serve, яка займається дослідженнями в галузі квантового машинного навчання, консалтингом та освітніми ініціативами у сфері квантових технологій, і вже згаданий стартап Haiqu Ukraine, який вдало поєднає фундаментальні дослідження з прикладними розробками, успішно залучаючи інвестиції на зовнішньому ринку; причому їхні продукти вже мають комерційне застосування.

Квантова спільнота Києва. В Інституті фізики НАН України є значні напрацювання у сфері квантової гравіметрії, однофотонних джерел випромінювання, яскравого неklasичного світла та взаємодії квантового випромінювання з речовиною (відділ квантової та когерентної оптики під керівництвом академіка НАН України Леоніда Яценка та відділ лазерної спектроскопії під керівництвом члена-кореспондента НАН України Анатолія Негрійка).

В Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України ми досліджуємо поширення квантового світла в турбулентній атмосфері, займаємося схемною квантовою електродинамікою, розвиваємо теорію реалістичного фотодетектування, вивчаємо неklasичне світло як ресурс і розв'язуємо деякі задачі квантової метрології (група квантової оптики та квантової інформації під керівництвом члена-кореспондента НАН України Андрія Семенова).

У Державній науковій установі «Київський академічний університет» досліджують матеріали для квантових технологій, мікрохвильові однофотонні детектори, квантову сенсорику, квантову біоінформатику, а також читають

спецкурси з квантових технологій, організують наукові школи для студентів з України та інших країн (наукові керівники — академік НАН України Олександр Кордюк, професор Михайло Білоголовський та доцент Данило Якименко).

В Інституті математики НАН України виконують роботи з квантових обчислень та квантової теорії ігор (відділ функціонального аналізу під керівництвом професора Василя Островського).

У Державному університеті «Київський авіаційний інститут» група під керівництвом професора Сергія Гнатюка займається практичною квантовою криптографією. Вони закупили відповідне обладнання, тестують його, а також розробляють алгоритми постквантової криптографії.

Квантова наука в Харкові. У Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України досліджують однофотонні детектори, займаються схемною квантовою електродинамікою та твердотільними квантовими системами (відділ надпровідних та мезоскопічних структур під керівництвом професора Сергія Шевченка).

В Інституті теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» проводять теоретичні дослідження багаточастинкових систем з метою квантового моделювання та квантового контролю (група під керівництвом члена-кореспондента НАН України Андрія Сотнікова).

У Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна відкрито бакалаврську програму з новітніх квантових технологій.

Отже, розвиток квантових технологій обіцяє прориви в багатьох галузях науки і техніки. Це військова справа, медицина та фармацевтика,

кібербезпека, підвищення ефективності наукових досліджень, матеріалознавство, прогнозування клімату, моделювання біологічних систем, оптимізація управління ризиками, логістика та багато інших застосувань.

В Україні на сьогодні є невелика кількість наукових груп, які займаються теоретичними дослідженнями у сфері квантових технологій, що дозволяє нам підтримувати базовий (але далеко не достатній) рівень компетентності. За кількістю фахівців і тематичним охопленням ми помітно поступаємося навіть нашим найближчим сусідам.

Проте найбільшою проблемою є тотальне відставання України в експериментальних дослідженнях. І такий стан справ становить серйозну загрозу національній безпеці, оскільки навіть у разі закупівлі сучасного обладнання відсутність достатньої кількості кваліфікованих інженерних і технічних кадрів унеможливає його ефективне використання.

Що ж можна зробити? На мою думку, без залучення іноземних фахівців ми вже не можемо обійтися. Маємо критично проаналізувати, які саме напрями досліджень є перспективними і становлять для нас пріоритет. Слід виокремити дослідження, в яких ми найбільш успішні, і з них можна починати, — це квантова оптика, квантова метрологія, створення квантових гравіметрів, акселерометрів, однофотонних детекторів. І вже зараз потрібно будувати відповідну інфраструктуру, розширювати співпрацю з інноваційними компаніями, докласти всіх зусиль до інтеграції в Європейський дослідницький простір.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Andrii O. Semenov

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5104-6445>

QUANTUM TECHNOLOGIES IN UKRAINE: DEVELOPMENT AND APPLICATION

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

The report is devoted to the problems of development of quantum technologies in Ukraine. Quantum computing, quantum modeling, quantum communications, quantum sensors and metrology are some of the key development areas of the global innovation economy. The potential impact of such technologies on all spheres of human activity is so significant that it is often referred to as the second quantum revolution. Technological breakthrough in the field of quantum technologies is impossible without thorough fundamental research.

Cite this article: Semenov A.O. Quantum technologies in Ukraine: development and application (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, July 2, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (9): 50—56. <https://doi.org/10.15407/visn2025.09.050>