

УДК 535.14

Л.П. ЯЦЕНКО

Інститут фізики Національної академії наук України
пр. Науки, 46, Київ, 03028, Україна**ЕКСПЕРИМЕНТИ З ОКРЕМИМИ
ФОТОНАМИ Й АТОМАМИ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ
ТА КВАНТОВОЇ ОПТИКИ**

Нобелівську премію з фізики 2012 року було присуджено Сержу Арошу і Девіду Вайнленду за роботи в галузі квантової оптики з формулюванням «за революційні експериментальні методи, що дозволили вимірювати окремі квантові системи та маніпулювати ними». Розроблення цих «революційних експериментальних методів», яке тривало впродовж кількох десятиліть, дає можливість спостерігати такі фундаментальні квантові явища, як народження і смерть фотона, квантову запутаність, квантові стрибки, квантову телепортацію, реалізувати квантові логічні операції з одиночними іонами, і, нарешті, перейти до практичного втілення ідеї квантового комп'ютера та керування процесами у квантових системах.

Ключові слова: квантові системи, квантовий комп'ютер, Нобелівська премія, Арош, Вайнленд.

**ЛАУРЕАТИ НОБЕЛІВСЬКОЇ ПРЕМІЇ
З ФІЗИКИ 2012 РОКУ**

Серж Арош (Serge Haroche) народився 11 вересня 1944 р. у м. Касабланка в Марокко. Його батько, Альбер Арош, був адвокатом і походив із родини євреїв-сефардів. Мати, Валентина Арош (Рубльова), родом з Одеси, – учителька. Коли майбутньому нобелівському лауреату виповнилося 12 років, Марокко проголосило незалежність, і вся родина переїхала до Франції. У 1963–1967 рр. Серж вивчав фізику у Вищій нормальній школі (*фр.* École normale supérieure) та на факультеті наук Паризького університету. З 1967 по 1971 р. С. Арош працював над дисертацією на здобуття ступеня доктора філософії під науковим керівництвом майбутнього нобелівського лауреата з фізики (1997)

Клода Коен-Таннуджі (Claude Cohen-Tannoudji). У цій роботі під назвою «Теоретичні та експериментальні дослідження фізичних властивостей атомів, що взаємодіють з радіочастотними фотонами» він вивчав ефекти оптичної накачки в лужних атомах і вперше використав формалізм так званих «одягнених» атомів [1]. Цікаво, що результати дисертації стали важливою складовою частиною «революційних експериментальних методів», розроблених С. Арошем зі співробітниками для неруйнівного детектування фотонів за допомогою лужних атомів (рубідію), збуджених у високоенергетичні рідбергівські стани.

Значущим етапом у науковій кар'єрі Сержа Ароша виявилися два роки (1972–1973), які він провів у Стенфордському університеті на позиції постдока в лабораторії ще одного майбутнього нобелівського лауреата з фізики (1981) Артура Шавлова (Arthur

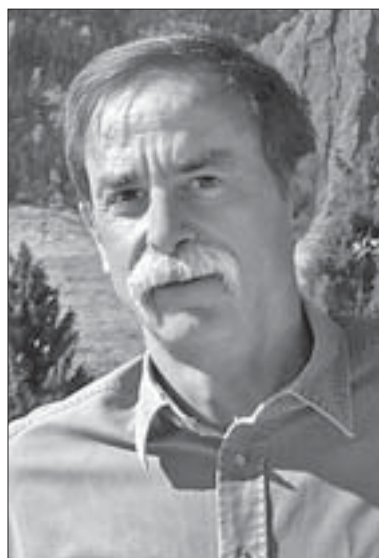
Schawlow). Там він за допомогою лазерів на барвниках досліджував еволюцію в часі одного з основоположних явищ квантової механіки — суперпозиції квантових станів [2].

Упродовж 1974–2012 рр. С. Арош проводив свої дослідження у Вищій нормальній школі, де згуртував потужну команду з давніх колег, постдоків, аспірантів і студентів. З 2012 р. Серж Арош — директор Колеж де Франс (*фр.* Collège de France), одного з найпрестижніших вищих навчальних закладів Франції. До речі, посада професора цього закладу вважається вершиною наукової кар'єри у Франції.

Девід Вайнленд (David J. Wineland) усього на півроку старший за свого французького колегу. Він народився 24 лютого 1944 р. у містечку Вауватоа поблизу Мілуокі — столиці штату Вісконсин. Після його народження сім'я деякий час жила в Денвері, а згодом, коли Девіду було три роки, переїхала до Сакраменто (штат Каліфорнія). У 1961 р. Д. Вайнленд закінчив школу Енсіна, розташовану в Сакраменто, а в 1965 р. в Каліфорнійському університеті в Берклі здобув ступінь бакалавра. З 1966 р. він працював над дисертацією на здобуття PhD у Гарвардському університеті під керівництвом видатного вченого Нормана Рамсі (Norman Ramsey), нобелівського лауреата з фізики (1989). Дисертацію, яку Д. Вайнленд захистив у 1970 р., було присвячено мазерам на атомарному дейтерії, частота якого, завдяки прецизійному контролю параметрів мазера та створенню довгоживучих квантових суперпозицій надтонких станів, відтворювалася з точністю до $5 \cdot 10^{-12}$ [3]. Після цього Д. Вайнленд працював у групі Ганса Георга Демельта (Hans Georg Dehmelt) у Вашингтонському університеті й зробив значний внесок у розроблення електромагнітних пасток для окремих електронів та іонів, за що Г. Демельту було присуджено Нобелівську премію (1989). Починаючи з 1975 р., уже понад 37 років, Д. Вайнленд працює в Національному бюро стандартів, нині Національний інститут стандартів і технології (NIST), в Боулдері (штат Колорадо).



Серж АРОШ (Serge HAROCHE)



Девід ВАЙНЛЕНД (David WINELAND)

Можна бачити, що життєві шляхи нобелівських лауреатів 2012 р. дуже подібні: вони майже ровесники, їхніми вчителями були видатні фізики, нобелівські лауреати різних років, приблизно водночас вони захистили докторські дисертації, понад 35 років незмінно працювали у своїх лабораторіях,

близько 25 років тому розпочали свої проекти з дослідження окремих фотонів за допомогою атомів (Серж Арош) та окремих атомів (іонів) за допомогою фотонів (Девід Вайнленд) і, нарешті, їхні шляхи перетнулися, коли їх разом було удостоєно Нобелівської премії 2012 року.

ЕКСКУРС В ІСТОРІЮ РОЗВИТКУ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

Нобелівська премія Сержа Ароша і Девіда Вайнленда є продовженням низки Нобелівських премій ХХ ст., що відзначають віхи становлення квантової фізики, яка є основою сучасної науки.

На кінець ХІХ ст. завдяки зусиллям Ньютона, Максвелла, Фарадея та багатьох інших видатних учених фізику вважали фактично завершеною класичною наукою. У квітні 1900 р. у публічній лекції в Королівському інституті Великої Британії (Royal Institution of Great Britain) на тему «Хмари з дев'ятого століття над динамічною теорією тепла» сер Вільям Томсон (лорд Кельвін), один із найвідоміших на той час фізиків світу, зазначив, що грандіозну будівлю фізики вже зведено, залишилися тільки дрібні оздоблювальні штрихи [4]. Щоправда, він зауважив, що на безхмарному небосхилі фізики помітні дві невеликі хмаринки, дві проблеми, які не знайшли поки що пояснення з позицій класичної фізики. Однак ці проблеми здавалися тоді тимчасовими і скороминущими. Йшлося про те, що, по-перше, класична фізика не могла пояснити досліди Майкельсона, які не виявили впливу руху Землі на швидкість світла, і, по-друге, що результати експериментів з дослідження особливостей спектра випромінювання нагрітих тіл суперечили висновкам аналізу, який ґрунтувався на класичній фізиці.

Як тепер добре відомо, лорд Кельвін помилявся. З цих двох хмаринок пролилася злива, що докорінно змінила фізику. Для розв'язання першої проблеми Альберт Ейнштейн створив теорію відносності, яка на сьогодні є основою фізики на макроскопіч-

ному рівні, у масштабах Всесвіту, галактик та на швидкостях, близьких до швидкості світла. Друга проблема, так звана проблема спектра випромінювання чорного тіла, також спричинила зміну фундаментальних поглядів на природу, але на мікроскопічному рівні, у масштабі окремих атомів і молекул. Без цього не можна було пояснити, чому нагрітий до певної температури шматок заліза стає червоним, а не яскраво-фіолетовим, як це мало б бути в рамках старої доброї класичної фізики.

Перший крок до вирішення проблеми чорного тіла зробив на самому початку минулого століття німецький фізик Макс Планк, припустивши, що енергія світла може змінюватися не неперервно, а дискретними, хоч і надзвичайно малими, порціями — квантами. Для мінімально можливої зміни енергії, ΔE , Планк написав одну з двох найвідоміших коротких формул фізики: $\Delta E = h\nu$, де ν — частота світла, а h — знаменитий квант дії, або стала Планка. Це припущення, яке жодним чином не могло бути обґрунтоване в класичному підході, дало змогу Планку отримати правильну формулу для розподілу енергії у спектрі випромінювання чорного тіла.

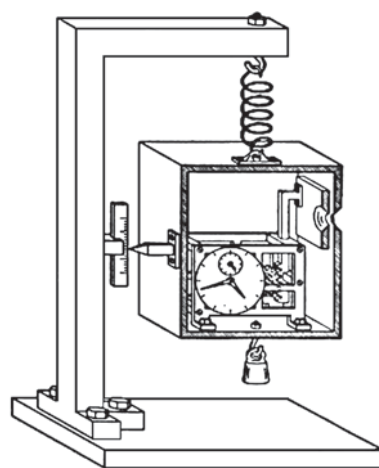
Квантова гіпотеза німецького вченого, глибоку суть якої було усвідомлено науковою спільнотою набагато пізніше, стала початком розвитку квантової фізики. Її основи суперечать усякому здоровому глузду пересічної людини. Упродовж наступних 30 років побудову сучасної квантової фізики було завершено, завдяки роботам Ейнштейна, Планка, Бора, де Бройля, Гейзенберга, Шрединґера, Ландау, які в різний час здобули визнання у вигляді Нобелівської премії з фізики, а також завдяки дослідженням десятків інших учених, яким хоч і не пощастило отримати найвище визнання, проте вони зробили свій значний внесок у становлення цієї науки.

В основу квантової фізики покладено квантову механіку, що описує рух і взаємодію мікрочастинок — електронів, атомів і молекул. Згідно з принципами квантової

механіки, ці частинки в різних умовах можуть виявляти властивості як частинки, так і хвилі. Поведінка квантових систем з погляду повсякденної інтуїції виглядає дуже дивною і не піддається розумінню з точки зору здорового глузду: неможливо одночасно виміряти координату і швидкість частинки; не існує визначеної траєкторії частинки; частинка може перебувати водночас у різних місцях і ми можемо знати лише ймовірність того, що під час вимірювання її можна знайти в заданому місці; як передбачив Планк, внутрішня енергія атома чи молекули може змінюватися тільки дискретно і т.д. Однак квантова механіка — це математично обґрунтована теорія, всі передбачення якої до цього часу блискуче узгоджуються з експериментом. Більше того, в повсякденному житті використовують величезну кількість різних приладів (від мобільних телефонів до лазерів), які діють виключно завдяки виконанню законів квантової механіки.

Квантові властивості виявляє також і світло. Класичну оптику сьогодні замінює квантова оптика, яка розглядає світло як квантовий об'єкт, що складається з квантів — фотонів. Сучасне поняття фотонів суттєво відрізняється від перших квантів Планка і Ейнштейна, і все ж можна вважати, що світло складається з елементарних частинок — фотонів, які в певних умовах виявляють властивості частинки, а в інших — хвилі. В цьому сенсі фотони близькі за властивостями до електронів і атомів, проте між ними існує істотна відмінність, оскільки вільний фотон завжди рухається зі швидкістю світла і його маса спокою дорівнює нулю.

Більшість експериментів з перевірки квантових законів мали справу з величезною (макроскопічною) кількістю атомів чи фотонів. У цьому разі з погляду здорового глузду квантові явища в основному більш зрозумілі, хоча й у цьому випадку вони можуть виявлятися на макроскопічному рівні, наприклад надпровідність, надплинність та ін. Однак дивна квантова по-



«Фотонна коробка» для збереження фотона. На думку Ейнштейна, такий уявний експеримент доводить порушення співвідношення невизначеності між енергією та часом: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ [5]

ведінка окремого атома чи фотона при цьому не спостерігається завдяки усередненню за гігантською кількістю атомів.

Однак іще на етапі становлення квантової механіки в знаменитих дискусіях Бора і Ейнштейна широко застосовували так званий уявний експеримент з окремим атомом чи електроном. Очікувані результати таких експериментів повністю суперечили повсякденному досвіду, й Ейнштейн використовував їх для підтримки своєї тези про те, що «Бог не грає в кості». Ці експерименти були уявними, оскільки тоді ніхто навіть гадки не мав, що досліди з окремим атомом чи фотоном дійсно можна провести, настільки складними вони здавалися.

Проте з розвитком експериментальної техніки, і насамперед з появою лазерів, надпровідної технології та сучасних комп'ютерів, подібні експерименти перейшли з розряду принципово неможливих до можливих у принципі. Зацікавленість у дослідженнях з окремими одиночними квантовими об'єктами зумовлена не лише природним для фізиків прагненням перевірити свої фундаментальні уявлення про фізичну реальність, продемонструвавши парадоксальні квантові ефекти, а й, як не дивно,

незвичайними можливостями практичного використання суто квантових ефектів.

Найвідомішим можливим практичним використанням квантових ефектів у окремих атомах є створення квантового комп'ютера. Головна ідея полягає в тому, що замість стандартного для класичного комп'ютера базового поняття «біт» (тобто мікропристрою, що може перебувати у двох станах, які відповідають значенням 0 і 1) використовують поняття «кубіт» (квантового об'єкта, який може бути водночас у так званій квантовій суперпозиції станів 0 і 1). Квантові обчислення зводяться до маніпулювання та вимірювання квантових станів окремих кубітів і дають змогу кардинально прискорити розв'язання деяких задач. Найпривабливішою для практичного застосування виглядає можливість факторизувати великі числа (тобто розкласти їх на множники) за дуже короткий час. Наприклад, для того щоб знайти множники 1000-значного числа за допомогою класичного комп'ютера, знадобиться час, більший за час існування Всесвіту, тоді як квантовий комп'ютер зможе розв'язати цю задачу за кілька секунд. Такі перспективи зумовлюють практичний інтерес до квантових комп'ютерів, оскільки неможливість факторизації великих чисел є основою сучасних методів криптографії.

Принципово важливим під час дослідження квантової поведінки окремих фотонів або атомів є забезпечення *неруйнівної* взаємодії квантового об'єкта з вимірювальним приладом, яким для досліджуваного фотона може бути атом, а для досліджуваного атома — фотон. Як зазначив у своїй нобелівській лекції Серж Арош, реєстрація окремої квантової частинки була можливою ще за часів Шредінгера, проте, як той влучно зауважив, це була «посмертна» фізика, що повністю руйнувала об'єкт дослідження. Можливо, саме розроблення неруйнівної методики вимірювань дозволило отримати результати нобелівського рівня, особливо коли йдеться про маніпулювання окремими фотонами.

КЕРОВАНІ ФОТОНИ В КОРОБЦІ: ВІД КВАНТІВ ДО КЛАСИКИ

Отже, понад 20 років тому в Нормальній школі в Парижі 40-річний професор Серж Арош разом зі своїми молодшими колегами Мішелем Брюном (M. Brune) і Жаном-Марі Раймоном (J.-M. Raimond), які захистили докторські дисертації під його керівництвом, розпочали довгостроковий проект фундаментальних досліджень у галузі резонаторної квантової електродинаміки (cavity quantum electrodynamics), яка дає нам змогу стати свідками взаємодії між світлом і матерією на найбільш фундаментальному рівні. Метою проекту було створення неруйнівного детектора одиночних фотонів і дуже якісної коробки (резонатора), в якій фотони могли б залишатися живими впродовж достатньо тривалого часу.

Ідею методу неруйнівного детектування N фотонів у мікрохвильовому резонаторі було запропоновано в 1990 р. у роботі [6]. В основу методу покладено ефект світлового зсуву, тобто дуже малої зміни частоти переходів атома між збудженими рідбергівськими станами під час взаємодії атома з нерезонансним світлом, передбачений К. Коен-Таннуджі ще в 1961 р. [7]. Величина цього зсуву пропорційна числу фотонів N у резонаторі. В результаті, якщо створити дипольний момент в атомі перед взаємодією з фотоном резонатора, то після взаємодії фаза дипольного моменту змінюється на величину, пропорційну N , яка може досягати порядку π . Таку значну зміну фази дипольного моменту можна зареєструвати, а отже, отримати інформацію про число фотонів у резонаторі без їх руйнування.

Уперше метод було реалізовано в 1999 р. у дослідженні [8], де вдалося побачити фотон кілька разів упродовж усього кількох мікросекунд. Проте для здійснення запланованих експериментів з окремими фотонами цей час був занадто короткий — потрібно, щоб час життя фотонів був у десятки тисяч разів довший. Для цього необхідно було значною мірою вдосконалити пастку для фотонів, що й було зроблено, але знадо-

билося на це 7 років наполегливої праці. Нарешті, в лабораторії у Вищій нормальній школі було створено найнадійнішу у світі пастку для фотона — резонатор, сформований двома дзеркалами, відбиваючись від яких фотон може «жити» впродовж 130 мс, що в масштабах мікросвіту становить вічність. За цей час фотон проходить загалом близько 40 тис. км, відбиваючись від дзеркал 1,5 млрд разів, і при цьому залишається в резонаторі. Це найдовше у світі захоплення фотона [9] стало можливим завдяки використанню новітніх технологій виготовлення дзеркал та охолодженню всієї установки до температур, близьких до температури абсолютного нуля, коли металева ніобієва плівка, що формує поверхню дзеркала, стає надпровідною і припиняє поглинати світло.

Використовуючи такий резонатор, С. Арошу зі співробітниками вдалося, починаючи з 2007 р., провести низку вражаючих експериментів.

У роботі [10] вперше спостерігали народження, життя і смерть одного фотона. Було показано, що фотон у порожньому до цього резонаторі виникає миттєво (на мілісекундній шкалі часу) в результаті так званого квантового стрибка, живе в резонаторі якийсь час, тривалість якого є випадковою величиною із середнім значенням 0,13 с, і зникає також унаслідок квантового стрибка.

Процес квантового вимірювання і колапсу хвильової функції було наочно продемонстровано в експериментах, описаних у [11]. Початковий когерентний стан із середнім числом фотонів 2,4 після взаємодії з великою кількістю пробних атомів колапсував до фоківського стану, номер якого визначався випадково.

У реальному часі було продемонстровано [12], як відбувається руйнування квантової суперпозиції двох макроскопічних станів — так звана «проблема kota Шредінгера». При цьому як класичний об'єкт — кіт, що, за Шредінгером, може бути одночасно і живим, і мертвим, — використовували мікрохвильове класичне випромінювання, яке інжектували в резонатор. Час життя квантової



Серж Арош разом з Ігорем Доценком, вихованцем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, налаштовують найдосконаліший у світі резонатор (фото з сайту www.nobelprize.org)

когерентності двох класичних об'єктів, визначений за виглядом реконструйованої функції Вігнера системи, становив приблизно 30 мс, що значно менше від часу життя фотона в резонаторі. Величина зменшення часу життя квантової когерентності визначається ступенем класичності двох об'єктів, що складають квантову суперпозицію (кіт Шредінгера), і зі збільшенням розміру об'єктів час життя когерентності дуже швидко прямує до нуля.

Квантовий ефект Зенона, який полягає в зупиненні еволюції квантової системи, якщо за нею неперервно спостерігати, було експериментально продемонстровано в роботі [13].

У статті [14] описано серію нещодавно проведених експериментів з вивчення квантового зворотного зв'язку (quantum feedback). Проблема стабілізації стану квантової системи за допомогою зворотного зв'язку значно ускладнюється тим, що, згідно з принципами квантової механіки, процес вимірювання змінює стан системи, тому тільки неруйнівні спостереження дають принципову можливість реалізації методу.

ІОНИ В ПАСТЦІ: ВІД СТАНДАРТУ ЧАСТОТИ ДО КВАНТОВОГО КОМП'ЮТЕРА

Якщо Серж Арош вивчав окремі фотони за допомогою атомів, то інший лауреат,

Девід Вайнленд, досліджував окремі атоми з використанням фотонів. Для роботи з окремим атомом його, як і фотон, потрібно впіймати в пастку. Д. Вайнленд застосовував для цього електромагнітні пастки, які дають змогу достатньо довго утримувати заряджену частинку. Такі пастки були відомі ще з середини 70-х років із праць В. Поля та Г. Демельта, лауреатів Нобелівської премії за це відкриття. Важливою особливістю атомів (чи іонів) є їхній тепловий рух, який майже повністю маскує квантові ефекти в захоплених пасткою атомах та істотно обмежує час життя атома в пастці. Для того, щоб ефективно маніпулювати окремими іонами в пастці, потрібно було розробити методи їх охолодження практично до абсолютного нуля.

У 1975 р. постдок у лабораторії Г. Демельта Девід Вайнленд запропонував ідею так званого охолодження в боковій смужі (side-band cooling), суть якої полягає в можливості поглинання захопленим у пастку атомом фотонів з енергією, меншою від енергії збудженого стану на енергію кванта механічного коливання атома в пастці, і в подальшому випромінюванні фотона з енергією, що дорівнює енергії збудженого стану [15]. Різниця енергій поглинутого і перевипроміненого квантів черпається з енергії теплового руху атома, і в разі забезпечення циклічності процесу відбуватиметься швидке охолодження атома.



Девід Вайнленд працює з пасткою для одиночного іона (фото з сайту www.nobelprize.org)

Уже в 1978 р., через три роки після переходу в Національне бюро стандартів у Боулдері, Д. Вайнленд зі співробітниками експериментально продемонстрував цю методику, охолодивши до 50 К за допомогою майже резонансного неперервного лазера ансамбль іонів магнію, захоплених пасткою Пенінга [16]. Цікаво, що робота [17] наукової групи під керівництвом німецького фізика П. Тощека, в якій було реалізовано охолодження захоплених іонів барію, надійшла до редакції журналу на один день раніше, ніж стаття Д. Вайнленда.

Подальші зусилля було спрямовано на здійснення контрольованого захоплення й охолодження одиночного іона в пастці. У 1981 р. це було продемонстровано на прикладі іона магнію, охолодженого до 50 мК [18]. Починаючи з 1981 р., майбутній нобелівський лауреат зосередив свої зусилля переважно в двох напрямках. Перший — створення нового покоління атомних годинників (стандартів частоти) на основі захоплених одиночних іонів. Лазерне охолодження іона майже до абсолютного нуля дає змогу зменшити фактично до нуля зсув частоти, зумовлений лінійним ефектом Доплера, що був до цього часу основною проблемою атомних стандартів частоти; при цьому відсутня взаємодія з іншими атомами та забезпечена майже нескінчена взаємодія з лазерним полем. Тому такі стандарти частоти мали на кілька порядків кращі потенціальні характеристики порівняно з наявними тоді цезієвими стандартами частоти. За 30 років у цьому напрямі було досягнуто вражаючих результатів: створено найточніші на сьогодні атомні годинники на основі іонів алюмінію та ртуті з відносною точністю відтворюваності частоти квантового переходу $2 \cdot 10^{-17}$ [19].

Водночас зі створенням стандартів частоти Д. Вайнленд розробляв другий напрям — проводив експерименти з вивчення квантових ефектів під час взаємодії лазерного випромінювання з окремими квантовими об'єктами — іонами, захопленими в пастці. В 1986 р. майже одночасно три гру-

пи дослідників [20–22] експериментально спостерігали квантові стрибки в атомах. Ці роботи довели, що переходи між квантовими станами атомів відбуваються фактично миттєво, як і передбачає квантова механіка. В експерименті такі стрибки виявлялися як різкі зміни інтенсивності флуоресценції одиночного іона при зміні його квантового стану. Наступним важливим етапом стало спостереження квантування руху іона ртуті в пастці [23] і в подальшому охолодження цього іона до основного коливального стану [24].

У середині 90-х років було розпочато роботи з практичної реалізації ідеї квантових обчислень, поштовхом до яких стала теоретична публікація [25] Дж. Цирака (J.I. Cirac) і П. Цоллера (P. Zoller) з пропозицією створити основний елемент квантового комп'ютера — квантовий венти́ль (quantum gate) — на основі іонів, захоплених пасткою. Одразу після появи цієї статті Д. Вайнленд зі співробітниками, використовуючи іон, охолоджений практично до абсолютного нуля, експериментально продемонстрував квантовий венти́ль, що виконує логічну операцію CNOT [26]. Фактично ця робота наочно показала, що квантовий комп'ютер не є тільки математичною абстракцією, але й може бути створений реально.

Після цього в лабораторії Д. Вайнленда було проведено десятки важливих для квантової інформатики досліджень. Зокрема, в 1998 р. вперше було продемонстровано детерміністичну квантову заплутаність станів двох іонів [27], наявність якої є однією з головних умов реалізації квантового комп'ютера. У 2000 р. здійснено першу демонстрацію квантової заплутаності чотирьох іонів, яка довела принципову можливість масштабування квантових обчислень з іонами на відносно велике число квантових венти́лів, що необхідно для практичного створення квантового комп'ютера. У 2004 р. вперше продемонстровано квантову телепортацію інформації між масивними частинками [28], яку можна використати для ефективного перерозподілу інформації в масштабованому

квантовому комп'ютері. У 2009 р. було створено програмований двокубітний квантовий процесор [29].

ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ

Дослідження, відзначені Нобелівською премією з фізики 2012 року, — яскравий приклад фундаментальних робіт, що не мають прямого практичного застосування в найближчому майбутньому, але які є принциповими для розвитку світової науки. У своєму першому телефонному інтерв'ю (див. www.nobelprize.org), одразу після звістки про отримання Нобелівської премії, на запитання про можливе практичне значення досягнутих результатів Серж Арош відповів:

«Якщо ви запитаєте мене, які можуть бути практичні застосування наших результатів, я сказав би вам, що не знаю. Проте я хотів би просто сказати, що такі застосування без сумніву будуть. Тільки не ясно, чи будуть вони важливими для широкої громадськості, чи такими, що допоможуть поліпшити деякі пристрої, які використовуватимуться вченими. Наприклад, якщо взяти роботу Девіда Вайнленда, то частина його досліджень присвячена розвитку атомних годинників, і завдяки розробленій ним методиці роботи з окремими частинками він створив годинники, що мають фантастичну точність. І цю точність можна використати для розроблення способів виявлення дуже малих ефектів, зокрема таких, як невеликі гравітаційні зсуви. Це лише одне з можливих застосувань. У своїх дослідженнях я також використовую атомні годинники, але в зовсім іншому контексті. Я використовую годинники, які настільки чутливі до світла, що їх можна застосувати для виявлення одиночних фотонів. Отже, знову ж, є певний зв'язок між його роботою і моєю. Однак яка буде практична користь від того, що ми в змозі виявити фотони, не руйнуючи їх, я не знаю. Я сподіваюся, що буде знайдено якісь застосування, але не можу сказати, які саме».

Девід Вайнленд у подібному інтерв'ю був більш оптимістичним стосовно практичного використання їхніх результатів, особливо в плані створення квантового комп'ютера:

«Слід сказати, що потрібно пройти ще довгий шлях, перш ніж ми матимемо роботоздатний квантовий комп'ютер. Проте більшість із нас відчують, що, хоча ще дуже далеко до реалізації такого комп'ютера, в остаточному підсумку це станеться».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Haroche S.* Etude théorique et expérimentale des propriétés physiques d'atomes en interaction avec des photons de radiofréquence (thèse d'état) // *Ann. Phys.* — 1971. — V. 6. — P. 189–327.
2. *Haroche S., Paisner J., Schawlow A.L.* Hyperfine quantum beats observed in Cs vapor under pulsed dye laser excitation // *Phys. Rev. Lett.* — 1973. — V. 30 — P. 948.
3. *Wineland D.J., Ramsey N.F.* Atomic Deuterium Maser // *Phys. Rev. A.* — 1972. — V. 5. — P. 821–837.
4. *Lord Kelvin* Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light // *Phil. Mag.* — 1901. — S. 6, V. 2. — P. 1.
5. *Bohr N.* Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics // *Albert Einstein. Philosopher-Scientist* / ed. P.A. Schilpp. — Evanston: Library of Living Philosophers, 1949. — P. 200–241.
6. *Brune M., Haroche S., Lefèvre-Seguin V. et al.* Quantum nondemolition measurement of small photon number by Rydberg atom phase sensitive detection // *Phys. Rev. Lett.* — 1990. — V. 65. — P. 976.
7. *Cohen-Tannoudji C.* Observation d'un déplacement de raie de résonance magnétique causé par l'excitation optique // *C.R. Acad. Sci.* — 1961. — V. 252. — P. 394.
8. *Nogues G., Rauschenbeutel A., Osnaghi S. et al.* Seeing a single photon without destroying it // *Nature.* — 1999. — V. 400. — P. 239.
9. *Kuhr S., Gleyzes S., Guerlin C. et al.* Ultrahigh finesse Fabry–Perot superconducting resonator // *Appl. Phys. Lett.* — 2007. — V. 90. — P. 164101.
10. *Gleyzes S., Kuhr S., Guerlin C. et al.* Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity // *Nature.* — 2007. — V. 446. — P. 297.
11. *Guerlin C., Bernu J., Deléglise S. et al.* Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting // *Nature.* — 2007. — V. 448. — P. 889.
12. *Deléglise S., Dotsenko I., Sayrin C. et al.* Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence // *Nature.* — V. 455. — P. 510.
13. *Bernu J., Deléglise S., Sayrin C. et al.* Freezing a coherent field growth in a cavity by quantum Zeno effect // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — V. 101. — P. 180402.
14. *Sayrin C., Dotsenko I., Zhou X. et al.* Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states // *Nature.* — 2011. — V. 477. — P. 73.
15. *Wineland D.J., Dehmelt H.* Proposed $10^{14} D\nu < \nu$ Laser Fluorescence Spectroscopy on Ti^+ Mono-Ion Oscillator III (side band cooling) // *Bull. Am. Phys. Soc.* — 1975. — V. 20. — P. 637.
16. *Wineland D.J., Drullinger R.E., Walls F.L.* Radiation-Pressure Cooling of Bound Resonant Absorbers // *Phys. Rev. Lett.* — 1978. — V. 40. — P. 1639–1642.
17. *Neuhauser W., Hohenstatt M., Toschek P., Dehmelt H.* Optical-Sideband Cooling of Visible Atom Cloud Confined in Parabolic Well // *Phys. Rev. Lett.* — 1978. — V. 41. — P. 233–236.
18. *Wineland D.J., Itano W.M.* Spectroscopy of a single Mg^+ ion // *Phys. Rev. Lett. A.* — 1981. — V. 82, N 2. — P. 75–78.
19. *Lorini L., Ashby N., Bruschi A. et al.* Recent atomic clock comparisons at NIST // *Eur. Phys. J.* — 2008. — V. 163. — P. 19–35.
20. *Nagourney W., Sandberg J., Dehmelt H.* Shelved optical electron amplifier: Observation of quantum jumps // *Phys. Rev. Lett.* — 1986. — V. 56. — P. 2797.
21. *Sauter Th., Neuhauser W., Blatt R., Toschek P.E.* Observation of Quantum Jumps // *Phys. Rev. Lett.* — 1986. — V. 57. — P. 1696.
22. *Bergquist J.C., Hulet R.G., Itano W.M., Wineland D.J.* Observation of Quantum Jumps in a Single Atom // *Phys. Rev. Lett.* — 1986. — V. 57. — P. 1699.
23. *Bergquist J.C., Itano W.M., Wineland D.J.* Recoilless optical absorption and Doppler sidebands of a single trapped ion // *Phys. Rev.* — 1987. — V. A36. — P. 428.
24. *Diedrich F., Bergquist J.C., Itano W.M., Wineland D.J.* Laser Cooling to the Zero-Point Energy of Motion // *Phys. Rev. Lett.* — 1989. — V. 62. — P. 403.
25. *Cirac J.I., Zoller P.* Quantum Computations with Cold Trapped Ions // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — V. 74, N 20. — P. 4091–4094.
26. *Monroe C., Meekhof D.M., King B.E. et al.* Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — V. 75. — P. 4714–4717.
27. *Turchette Q.A., Wood C.S., King B.E. et al.* Deterministic entanglement of two ions // *Phys. Rev. Lett.* — 1998. — V. 81. — P. 3631.
28. *Barrett M.D., Chiaverini J., Schaetz T. et al.* Deterministic quantum teleportation of atomic qubits // *Nature.* — 2004. — V. 429. — P. 737–739.
29. *Hanneke D., Home J.P., Jost J.D. et al.* Realization of a programmable two-qubit quantum processor // *Nature Physics.* — 2009. — doi: 10.1038/nphys1453.

Стаття надійшла 18.01.2013 р.

Л.П. Яценко

Институт физики
Национальной академии наук Украины
пр. Науки, 46, Киев, 03028, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОТДЕЛЬНЫМИ
ФОТОНАМИ И АТОМАМИ ПОДТВЕРЖДАЮТ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ
МЕХАНИКИ И КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Нобелевская премия по физике 2012 года была присуждена Сержу Арошу и Давиду Вайнленду за работы в области квантовой оптики с формулировкой «за революционные экспериментальные методы, позволившие измерить отдельные квантовые системы и манипулировать ими». Разработка этих «революционных экспериментальных методов», продолжавшаяся в течение нескольких десятилетий, дает возможность наблюдать такие фундаментальные квантовые явления, как рождение и смерть фотона, квантовую запутанность, квантовые скачки, квантовую телепортацию, реализовать квантовые логические операции с одиночными ионами и, наконец, перейти к практическому воплощению идеи квантового компьютера и управления процессами в квантовых системах.

Ключевые слова: квантовые системы, квантовый компьютер, Нобелевская премия, Арош, Вайнленд.

L.P. Yatsenko

Institute of Physics
of National Academy of Sciences of Ukraine
46 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

EXPERIMENTS WITH INDIVIDUAL
PHOTONS AND ATOMS CONFIRM
THE FUNDAMENTALS OF QUANTUM
MECHANICS AND QUANTUM OPTICS

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland for their research in the field of quantum optics with formulation «for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems». The «ground-breaking experimental methods» development, which lasted for several decades, made it possible to observe such fundamental quantum phenomena as birth and death of a single photon, quantum entanglement, quantum jumps, quantum teleportation, to realize quantum gates with single ions and, finally, to start the practical realization of the quantum computer idea and the control of the processes in quantum systems.

Keywords: quantum systems, quantum computer, Nobel Prize, Haroche, Wineland.