

Момент вічності: атом «знайомить» нас із фотоном



Леонід ЯЦЕНКО,
директор Інституту фізики
Національної академії наук України,
член-кореспондент НАН України

Шведська королівська академія наук 9 жовтня 2012 року оголосила, що за роботи в галузі квантової оптики Нобелівською премією з фізики нагороджено Сержа Ароша та Девіда Вайнленда з формулюванням «за революційні експериментальні методи, що дають змогу вимірювати та маніпулювати окремими квантовими системами». Передовсім представимо нових володарів Нобелівської премії з фізики.

Серж **АРОШ** (Serge Haroche) народився 11 вересня 1944 року в Касабланці (Марокко). Його батько Альбер Арош, адвокат, походив з родини євреїв-сефардів. Мати Валентина Арош (у дівоцтві Рубльова, родом з Одеси) вчителювала. Марокко проголосило незалежність, коли майбутньому нобелівському лауреату було 12 років, і його родина переїхала до Франції. У 1963–1967 роках Серж вивчав фізику у Вищій нормальній школі та на факультеті наук Паризького університету. 1971 року захистив дисертацію на здобуття PhD. Його науковим керівником був майбутній нобелівський лауреат з фізики Клод Коен-Таннуджі. Нині Арош – директор Колеж де Франс, одного з найпрестижніших вищих навчальних закладів країни. Обійняти посаду професора в ньому означає досягти вершини наукової кар'єри у Франції.

Девід **ВАЙНЛЕНД** (David J. Wineland), одноліток французького колеги, народився 24 лютого 1944 року в американському містечку Вауватоа, що поблизу Мілуокі (штат Вісконсин). Коли Девіду було три роки, сім'я переїхала до Сакраменто (штат Каліфорнія). 1961 року закінчив школу Енсіна в Сакраменто. Через чотири роки в Каліфорнійському університеті в Берклі здобув ступінь бакалавра, а 1970-го в Гарвардському університеті – ступінь PhD. Його дисертацію присвячено мазерам на атомарному дейтерії. Після цього Вайнленд працював у групі Ганса Георга Демельта у Вашингтонському університеті й зробив істотний внесок у роботи, за які Демельту 1989 року присудили Нобелівську премію. Уже понад 37 років Вайнленд працює в Національному бюро стандартів (нині інститут NIST у Боулдері, штат Колорадо).

Щоб краще зрозуміти, за що Сержа Ароша та Девіда Вайнленда удостоєно найвищої відзнаки у фізиці,

зробімо невеликий екскурс в історію розвитку квантової фізики. Наприкінці XIX століття завдяки зусиллям Ньютона, Максвелла, Фарадея та багатьох інших видатних учених фізика вважалася практично завершеною класичною наукою. На засіданні Лондонського королівського товариства напередодні 1900 року сер Вільям Томсон, один із найвідоміших на той час фізиків світу, у виступі зазначив, що грандіозна будівля фізики вже зведена, залишилося додати лише дрібні оздоблювальні штрихи. Щоправда, за його словами, на безхмарному небосхилі фізики залишаються дві невеликі хмаринки, дві проблеми, які не знайшли поки що пояснення з позицій класичної фізики... Але ці проблеми здавалися тоді тимчасовими, скоро минулими. Ішлося про те, що класична фізика не могла пояснити, по-перше, досліди Майкельсона, які не показали впливу руху Землі на швидкість світла, і, по-друге, результати експериментів з дослідження особливостей спектра випромінювання нагрітих тіл.

Сер Томсон помилився. З цих двох хмаринок пролилася злива, яка докорінно змінила фізику. Для розв'язання першої проблеми Альберт Ейнштейн створив теорію відносності, яка на сьогодні є основою фізики на макроскопічному рівні, у масштабах галактик, Всесвіту та на швидкостях, близьких до швидкості світла.

А друга, так звана проблема спектра випромінювання чорного тіла, також спричинила зміну фундаментальних поглядів на природу, але на мікроскопічному рівні (йдеться про атоми й молекули), без чого не можна, наприклад, пояснити, чому нагрітий до певної температури шматок заліза стає червоним, а не яскраво-фіолетовим, як це мало бути за канонами класичної фізики.

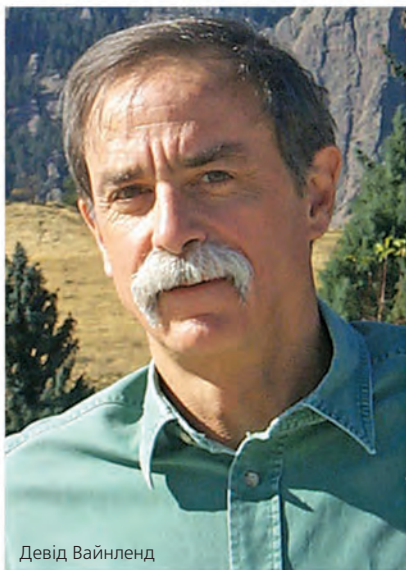
Перший крок до розв'язання проблеми чорного тіла зробив на початку минулого століття німецький фізик Макс Планк, який припустив, що енергія світла може змінюватися не неперервно, а дискретними, хоч і надзвичайно малими, порціями – квантами. Для мінімально можливої зміни ΔE енергії Планк написав одну з двох найвідоміших коротких формул фізики $\Delta E = h\nu$, де ν є частотою світла, а h – знаменитий квант дії (або стала Планка). Це припущення, яке жодним чином не можна було обґрунтувати з допомогою класичного підходу, дало змогу Планку отримати правильну формулу для розподілу енергії в спектрі випромінювання чорного тіла.

Ця квантова гіпотеза німецького вченого, глибоку суть якої наукова спільнота зрозуміла набагато пізніше, стала початком розвитку квантової фізики, основи якої суперечать будь-яким уявленням пересічної людини. За наступні тридцять років завдяки роботам Ейнштейна, Бора, де Бройля, Гейзенберга, Шредингера, Ландау, котрих у різні роки було удостоєно Нобелівської премії з фізики (як і згадані вже Планк та Томсон), а також роботам десятків інших учених, внесок яких теж вагомий, хоч і не відзначений премією, було завершено побудову сучасної квантової фізики.

В її основі лежить квантова механіка, яка описує рух і взаємодію мікрочастинок: електронів, атомів і молекул. Згідно з квантовою механікою в різних умовах вони можуть проявляти властивості як власне частинки, так і хвилі. Властивості квантових систем, що здаються дуже дивними, геть не сприймаються повсякденною інтуїцією. Їх не можна осягнути з позиції здорового глузду: неможливо одночасно виміряти координату й швидкість частинки; не існує визначеної траєкторії частинки; частинка може водночас перебува-



Серж Арош



Девід Вайнленд

ти в різних місцях, і є лише ймовірність того, що в разі вимірювання її можна знайти в заданому місці; внутрішня енергія атома чи молекули може змінюватися, як передбачив Планк, тільки дискретно тощо. Однак квантова механіка – це математично обґрунтована теорія, всі передбачення якої досі однозначно підтверджуються експериментом. Більше того, у повсякденному житті ми використовуємо величезну кількість різних приладів (від мобільних телефонів до лазерів), що діють виключно завдяки знанню й дотриманню законів квантової механіки.

Квантові властивості проявляє також і світло. Класичну оптику нині замінює квантова, котра розглядає світло як квантовий об'єкт, що складається з квантів – фотонів. У сучасному розумінні це поняття істотно відрізняється від перших квантів Планка та Ейнштейна, та все ж можна вважати, що світло складається з елементарних частинок – фотонів, які в певних умовах проявляють властивості частинки, а в інших – хвилі. У цьому сенсі фотони близькі за властивостями до електронів та атомів, проте є велика різниця, бо вільний фотон завжди рухається зі швидкістю світла і його маса спокою дорівнює нулю.

Більшість експериментів з перевірки квантових законів стосувалися величезної (макроскопічної) кількості атомів або фотонів. У цьому разі квантові явища здебільшого проявляються в певною мірою зрозумілому вигляді з позиції «здорового глузду», хоча й тут існують квантові явища, які проявляються на макроскопічному рівні (надпровідність, надплинність та інші). Однак дивна квантова поведінка окремого атома чи фотона при цьому не помітна завдяки усередненню по гігантській кількості атомів.

Але ще під час становлення квантової механіки в знаменитих дискусіях Бора та Ейнштейна широко використовувався так званий уявний експеримент з окремим атомом чи електроном. Очікувані результати таких експериментів повністю суперечили повсякденному

досвіду й використовувалися Ейнштейном для підтримки його тези про те, що «Бог не грає в кості». Уявними ці експерименти були тому, що в той час ніхто навіть і подумати не міг, що такі експерименти з окремим атомом чи фотонном можуть бути справді виконані, настільки складними вони видавалися.

Однак з розвитком експериментальної техніки, і насамперед з появою п'ятдесят років тому лазерів, такі експерименти перейшли з розряду принципово неможливих до можливих у принципі. Зацікавленість у експериментах з окремими одиночними квантовими об'єктами зумовлена не лише притаманним фізикам прагненням перевірити свої фундаментальні уявлення про фізичну реальність демонстрацією парадоксальних квантових ефектів, а й, хоч як це дивно, незвичайними можливостями практичного застосування суто квантових ефектів.

Найвідоміше з можливих практичне використання квантових ефектів в окремих атомах – створення квантового комп'ютера. Головна ідея полягає в заміні стандартного для класичного комп'ютера базового поняття біт (тобто мікропристрою, що може перебувати в двох станах, які відповідають значенням 0 та 1) поняттям кубіт (квантового об'єкта, який може бути одночасно в так званій квантовій суперпозиції станів 0 та 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 видається можливість факторизувати великі числа (тобто розкласти число на множники) за дуже короткий час. Наприклад, для того, щоб знайти множники 1000-значного числа за допомогою класичного комп'ютера, треба мати більше часу, ніж проіснував Усесвіт, тоді як квантовий комп'ютер зможе розв'язати таку задачу за кілька секунд.

Свої дослідження Серж Арош розпочав наприкінці 80-х років минулого століття, коли з колегами висунув і об-

ґрунтував ідею спостереження окремих фотонів і дослідження їхніх властивостей за допомогою окремих атомів. За цей час у лабораторії Вищої нормальної школи було створено найнадійнішу в світі пастку для фотона – резонатор, сформований двома дзеркалами, відбиваючись від яких фотон може прожити тисячну частку секунди. Це, можна сказати, вічність в умовах мікросвіту. Таке найтриваліше у світі захоплення фотона стало можливим завдяки використанню новітніх технологій виготовлення дзеркал та охолодженню всієї установки до температур, близьких до температури абсолютного нуля, коли металева ніобева плівка, що формує дзеркальну поверхню, стає надпровідною й перестає поглинати світло.

Реалізувавши ідею неруйнівних вимірювань за допомогою реєстрації зміни фази квантового стану в момент перетину резонатора атомами рубідію, Арош зі співробітниками починаючи з 2007 року провів низку вражаючих експериментів. Спостерігаючи народження, життя і смерть одного фотона, вони наочно показали процес квантового вимірювання й колапсу хвильової функції.

Провисокий престиж науки у Франції свідчить, зокрема, реакція на рішення Нобелівського комітету президента країни Франсуа Олланда, який запросив на офіційний обід нового нобеліанта. Цікаво, що на цьому заході був присутній молодий колега Сержа Ароша українець Ігор Доценко – випускник фізичного факультету Київського національного університету. Він підготував дисертацію в університеті Бонна з маніпулювання окремими атомами і продовжив свою плідну наукову діяльність саме в лабораторії Сержа Ароша, зробивши значний внесок у досягнення видатних наукових результатів.

Якщо Арош вивчав окремі фотони з допомогою атомів, то інший лауреат премії – Девід Вайнленд вивчав окремі атоми, використовуючи фотони. Для цього атом теж потрібно піймати в пастку. Вайнленд застосовував електромагнітні пастки, які дають змогу достатньо довго утримувати заряджену частинку. Він довів техніку роботи із зарядженими атомами (іонами) до найвищого рівня досконалості завдяки розробленій ним методиці лазерного охолодження захоплення у пастку іонів майже до температури абсолютного нуля. Ця методика дозволила йому створити найточніші на сьогодні атомні годинники на основі іонів алюмінію та ртуті, він експериментально довів принципові можливості реалізації ідеї квантового комп'ютера з використанням захоплених у пастці іонів як кубітів.

Результати робіт Ароша і Вайнленда експериментально підтверджують фундаментальні основи квантової теорії, започаткованої Планком і Ейнштейном. Маючи нині насамперед фундаментальне значення, вони можуть знайти в майбутньому і важливе практичне застосування.