КВАНТ — ГЕНІЯЛЬНА ЗДОГАДКА ЧИ "ВИМУШЕНИЙ" КРОК? *

І. О. Вакарчук
Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра теоретичної фізики,
вул. Драгоманова, 12, Львів, 79005, Україна

(Отримано 20 лютого 2001)

Проаналізовано ориґінальні праці Макса Планка, присвячені проблемі спектрального розподілу енерґії випромінювання абсолютно чорного тіла. Хронологічно відтворено його евристичні міркування та логічні кроки, які 100 років тому привели до відкриття квантової природи нашого Світу. Подано короткий історичний нарис подальшого розвитку гіпотези квантів, створення квантової механіки та відзначено теперішні можливості глибшого розуміння природи хвильової функції.

Ключові слова: "чорне" випромінювання, квант, стала Планка, ψ-ренесанс.

PACS number(s): 01.60.+g

Макс Карл Ернст Людвіґ Планк

I.

14 грудня 1900 року є днем народження квантової фізики.

Саме в цей день на засіданні Німецького фізичного товариства професор теоретичної фізики Берлінського університету Макс Планк (1858–1947) представив результати своєї праці з доведення на основі мікроскопічного підходу формули для спектральної густини енерґії випромінювання абсолютно чорного тіла та ввів фундаментальну фізичну константу — елементарний квант дії h.

Відкриття Планком елементарного кванта дії — це одне з найбільших відкриттів, які людина зробила за свою історію. Його глибокий вплив на творення іншого — квантового світосприйняття порівняний з відкриттям Коперника. Після Ньютона, теорія якого усталила наш світогляд, ми були горді, що один із нас досягнув меж людського розуму, і це стало предметом нашого постійного захоплення. З відкриттям квантової механіки людина зрозуміла, що вона знову не в центрі Всесвіту. Ми відчули межу наших можливостей логічно збагнути те, що відбувається в мікросвіті. Досі, мабуть, багато хто з нас почуває дискомфорт від того, що не може збагнути тієї логіки, яка є на атомному мікроскопічному рівні, тобто квантової логіки. Якщо у класичній логіці ще від Арістотеля було лише "так" чи "ні", то квантова вводить таке поняття, як імовірність, щобільше, не саму ймовірність, а амплітуду ймовірности, що є принципово важливим. Якщо була б просто ймовірність, то ми могли б собі дати раду з цим, наша уява спрацювала б. Наука відрізняється від інших видів діяльности людини тим, що дає стовідсоткові передбачення. Хоч ми не можемо збагнути все, що є в мікросвіті, не хочемо змиритись і сьогодні з тим, що наша класична уява неспроможна осягнути те, що твориться на атомному рівні, проте ми вміємо розраховувати, обчислювати й передбачати, а отже здатні й далі творити науку.

II.

За декілька років перед своїм відкриттям М. Планк зацікавився проблемою випромінювання абсолютно чорного тіла. Починаючи з лютого 1897 року, він часто виступав на засіданнях Німецького фізичного товариства з доповідями про необоротні процеси випромінювання: 4 лютого 1897 р., 8 липня 1897 р., 16 грудня 1897 р., 7 липня 1898 р., 18 травня 1899 р. За цими доповідями опублікована його праця "Про необоротні процеси випромінювання" (Ann. Phys. **1**, 69 (1900)). У чому саме полягала проблема? Завдання формулюється просто: потрібно було знайти розподіл за частотами ν енерґії рівноважного електромагнетного випромінювання тіла, нагрітого до температури T. Моделлю такої рівноважної системи є замкнена порожнина, стінки якої мають сталу температуру T, таку ж температуру має й випромінювання, що є всередині. Для того щоб спостерігати це випромінювання, потрібно зробити невеличкий отвір у стінці порожнини, через який воно буде виходити. Зовнішнє випромінювання, що падає на отвір, не відбивається, а проходить усередину і залишається там, тобто стовідсотково поглинається. А оскільки абсолютно поглинаючу поверхню називаємо чорною, то й випромінювання, що виходить через цей отвір, називають "чорним" або випромінюванням абсолютно чорного тіла.

У розв'язанні цієї проблеми було зроблено декілька важливих кроків. Ґустав Кірхгоф (1824–1887) вивів закони, названі його іменем. Він показав, що енерґія E рівноважного випромінювання абсолютно чорного тіла є універсальною функцією температури T. Йозеф Стефан (1835–1893) емпірично, а Людвіґ Больцман теоретично довели, що густина енерґії, тобто E/V (V — об'єм нашої системи), пропорційна четвертому степеню температури. Зібрану з усіх частот повну густину енерґії можна записати так:

$$\frac{E}{V} = \int_0^\infty u_\nu(T)\, d\nu, \tag{1}$$

де величину $u_\nu(T)$ називають спектральною густиною енерґії. Саме її і потрібно було знайти.

Вільгельм Він (1864–1928) за допомогою ориґінального уявного експеременту з дослідження зміни спектра випромінювання, яке відбивається від рухомого дзеркала, показав (1893), що спектральна густина енерґії, поділена на ν^3, є функцією відношення ν/T. Цей так званий закон зміщення Віна є точним. Назва пішла від того, що максимум $u_\nu(T)$ маємо в деякій точці $\nu/T = \text{const}$, із підвищенням температури він зміщується на частотній шкалі до більших значень ν. Пізніше, 1896 року, на основі молекулярно-кінетичної теорії В. Він з "напівсерйозних" міркувань запропонував явний вигляд спектральної густини енерґії теплового випромінювання [1]:

$$u_\nu(T) = \text{const}\, \nu^3 e^{-a\nu/T}. \tag{2}$$

За словами лорда Джона Релея (1842—1919), "*це було не доведення, а не більше ніж здогадка*".

III.

М. Планк почав свої дослідження цієї проблеми з моделювання випромінювання абсолютно чорного тіла сукупністю гармонічних осциляторів (резонаторів), коли

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U, \tag{3}$$

де U — енерґія окремо взятого осцилятора, c — швидкість світла, і доведення формули Віна на основі введення поняття електромагнетної ентропії, яку він визначив так:

$$S = -\frac{U}{a\nu} \ln \frac{U}{eb\nu}, \tag{4}$$

де a і b — дві універсальні сталі, e — основа натуральних логарифмів.

М. Планк узагалі любив, так би мовити, "ентропійну мову". Із цим поняттям пов'язані його перші кроки в науці. Він досліджував ентропію як термодинамічну функцію й у своїй докторській дисертації, ефект від якої, за словами Планка, дорівнював нулеві. Це пов'язано з тим, що поняття ентропії було новим і не дуже зрозумілим. Однак виявилось, що саме завдяки поняттю ентропії дорога до відкриття точної формули для спектральної густини енерґії абсолютно чорного тіла була найпростішою.

М. Планк увів гіпотезу про електромагнетну ентропію, а саме: у зв'язку з тим, що поле випромінювання є накладанням коливань із різними нереґулярно змінними (випадковими) фазами, можна говорити про певний безлад, а отже, про ентропію й температуру. З основного рівняння термодинаміки випливає, що при сталому об'ємі похідна

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} \tag{5}$$

і з формули (4) для ентропії та виразу (3) знаходимо закон В. Віна (2). Мабуть, можна говорити, що М. Планк насправді спочатку відтворив вираз для ентропії (4) з формули В. Віна, а потім його обґрунтовував.

Планк уважав, що формула В. Віна (2) є точною. Наведемо його слова: "*Звідси, на мою думку, потрібно зробити висновок, що дане визначення ентропії випромінювання, а тим самим і закон розподілу енерґії Віна, є неминучим наслідком застосування принципу росту ентропії до електромагнетної теорії випромінювання, і тому межі застосовности цього закону, якщо вони взагалі існують, збігаються з межами застосовности другого закону термодинаміки. Зрозуміло, що, завдяки всьому тут висловленому, широка експериментальна перевірка цього закону набуває принципового інтересу.*"

Друга похідна від ентропії (4) за енерґією має дуже простий вигляд:

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{1}{a\nu U}. \tag{6}$$

М. Планк звернув на це увагу ще й тому, що обернена величина, узята зі знаком "мінус", має прозорий фізичний зміст: вона дорівнює теплоємності, помноженій на квадрат температури. Саме тому М. Планк працював із другою похідною від ентропії:

"*Я використовую другу похідну від S за U, оскільки ця величина має просте фізичне тлумачення.*"

На засіданні Німецького фізичного товариства 3 листопада 1899 р. Отто Люммер (1860–1925) і Ернст Прінґсгайм (1859–1917) подали результати вимірювань у ділянці більших довжин хвиль ($\nu \to 0$), які суперечили формулі В. Віна для густини енерґії теплового випромінювання. Широка експериментальна перевірка цього закону набула принципового значення для розуміння природи теплового випромінювання.

У п'ятницю 19 жовтня 1900 року на засіданні Німецького фізичного товариства Ф. Курльбаум повідомив про результати виконананого разом з Г. Рубенсом вимірювання енерґії випромінювання на ділянці дуже великих довжин хвиль. Ці експериментальні результати заперечили справедливість формули Віна (2):

$$u_\nu(T) \sim T \text{ при } \nu \to 0. \tag{7}$$

Після повідомлення Ф. Курльбаума на цьому ж засіданні виступив М. Планк, який, використавши ці експериментальні результати, запропонував свою формулу для спектральної густини енерґії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла. З його спогадів: “*Тому що мені цей результат став відомим завдяки усному повідомленню авторів [2] уже за декілька днів до засідання, то в мене був час ще перед засіданням використати їхні висновки в моєму методі та обчислити ентропію*”.

Отже, оскільки при $\nu \to 0$, як випливає з (7) та (3),

$$U = CT, \tag{8}$$

де C — стала величина, то з (5) маємо, що

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{C}{U^2}. \tag{9}$$

М. Планк вирішив об'єднати однією простою інтерполяційною формулою два граничних випадки для високих (6) і для низьких частот (9) в одну формулу:

$$\left(\frac{d^2S}{dU^2}\right)^{-1} = a\nu U - \frac{U^2}{C}. \tag{10}$$

Це, як кажуть, перше, що приходить до голови. Воістину все геніяльне — просте. Справді, звідси для $\nu \to 0$ маємо залежність (9), а для великих частот другий доданок стає несуттєвим, і ми повертаємось до формули (6), яку дає закон В. Віна.

Елементарне інтеґрування в (10) з урахуванням виразу (5) і (3) дає знамениту формулу Планка для спектральної густини енерґії:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi b\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{a\nu/T} - 1}, \tag{11}$$

тут стала $b = Ca$. Наведемо слова М. Планка з доповіді 19 жовтня 1900 року: “*Ця формула, наскільки я знаю, відповідає експериментальним даним, які опубліковані дотепер... Тому я вважаю за можливе звернути Вашу увагу на наведену нову формулу, котра, як на мене, є найпростішою (окрім формули Віна) з погляду електромагнетної теорії випромінювання.*”

Як бачимо, фактично ця формула справді вгадана. Це була інтерполяційна формула, одна з багатьох існуючих на ту пору і одна з найпростіших, що добре описувала експериментальну залежність спектральної густини енерґії випромінювання абсолютно чорного тіла від частоти, яку М. Планк навів у своїй доповіді Німецькому фізичному товариству. Макс Планк настільки повірив у свою формулу, що вирішив довести її з мікроскопічних міркувань.

IV.

Працюючи впродовж майже двох місяців, М. Планк зазначав: “*Увесь процес був суцільним відчаєм, тому що теоретичні інтерпретації мали бути знайдені будь-яким коштом, хоч би як важко це не було.*”

М. Планк знову пішов “ентропійною дорогою” і вирішив винайти з мікроскопічних міркувань вираз для ентропії, що відповідає його інтерполяційній формулі (10),

$$S = \frac{b}{a}\left[\left(1 + \frac{U}{b\nu}\right)\ln\left(1 + \frac{U}{b\nu}\right) - \frac{U}{b\nu}\ln\frac{U}{b\nu}\right], \tag{12}$$

яка для $\nu \to \infty$ переходить у вираз (4). Для цього він використав ідею Больцмана про пропорційність ентропії логарифмові від кількости W можливих мікроскопічних станів термодинамічної системи:

$$S = k_B \ln W, \tag{13}$$

де k_B — стала Больцмана, яку фактично й увів М. Планк цим співвідношенням.

Мабуть, ця ідея Больцмана та наближена формула для ентропії (4), яку можна записати ще й так:

$$S = -\frac{b}{a}\ln\left(\frac{U}{eb\nu}\right)^{U/b\nu} \tag{14}$$

і яка є сильно подібною до формули Стірлінґа для логарифма від факторіяла деякого великого числа N,

$$\ln N! = \ln\left(\frac{N}{e}\right)^N, \qquad N \gg 1 \tag{15}$$

і навели М. Планка на думку “сконструювати з факторіялів” величину W так, щоб отримати точний вираз для ентропії (12), що врешті-решт уже вимушено привело його до ідеї дискретности енерґії електромагнетного випромінювання. Це й було темою доповіді, яку виголосив М. Планк у п'ятницю 14 грудня 1900 року на засіданні Німецького фізичного товариства.

Отже, моделюємо електромагнетне поле сукупністю N резонаторів. Нехай U — це середнє за часом значення енерґії одного резонатора або, що веде до того ж самого, середнє значення енерґій (в один і той самий час) великої кількости N однакових резонаторів. Повна енерґія

$$U_N = NU, \tag{16}$$

повна ентропія

$$S_N = NS. \tag{17}$$

Далі, за М. Планком: "*U_N потрібно уявляти собі не у вигляді неперервної величини, а у вигляді дискретної, що складається з цілого числа рівних частин*

$$U_N = p\varepsilon, \tag{18}$$

p — ціле, взагалі кажучи, велике число; ε потрібно визначити."

Тепер величина W — це кількість способів розподілення p елементів по N резонаторах. Як модель можна розглянути p кульок у N ящиках і підрахувати кількість різних способів їхнього розподілу, тобто кількість різних перестановок між собою p кульок і $(N-1)$-єї стінки. Усіх перестановок є $[(N-1)+p]!$. Однак $p!$ перестановок p кульок у ящику, як і $(N-1)!$ перестановок стінок між ящиками, нічого нового не дають, тому кількість різних перестановок

$$W = \frac{[(N-1)+p]!}{(N-1)!\,p\,!}. \tag{19}$$

Використовуючи формулу Стірлінґа для факторіялів у цьому виразі, коли $N \to \infty$, $p \to \infty$, легко знаходимо з (13) та (19) ентропію

$$S = k_B \left[\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right], \tag{20}$$

зіставлення якої з виразом для ентропії (12), знайденої шляхом інтеґрування із "вгаданої" формули (10), дає

$$\frac{U}{\varepsilon} = \frac{U}{b\nu}, \tag{21}$$

$$k_B = \frac{b}{a} \tag{22}$$

і отже, з перепозначенням $b = h$, елемент (квант) енерґії електромагнетного випромінювання

$$\varepsilon = h\nu \tag{23}$$

— знаменита формула Планка, яку так само, як і айнштайнівську $E = mc^2$, знає "будь-хто" [3].

V.

Як видно, шлях М. Планка до свого відкриття складається і з геніяльних здогадок, і з вимушених кроків. Щасливий вибір ентропійного підходу до розв'язання проблеми абсолютно чорного тіла, далі використання саме другої похідної від ентропії, яка виявилась дуже простою на вигляд, щаслива здогадка її інтерполяції з використанням формули Віна та експериментальних вимірів при низьких частотах, сміливість у використанні формули Больцмана для ентропії з геніяльною здогадкою "факторіяльного" моделювання кількости станів і вже справді вимушені кроки до дискретности енерґії електромагнетного випромінювання — такий шлях Макса Планка до свого фундаментального відкриття елементарного кванта дії.

Для М. Планка це були вимушені кроки. Він не раз намагався "вигнати" цю дискретність із своєї формули. Учений вклав у це дуже багато праці, особливо до 1912 року. Він хотів якось увести цей квант у рамки класичної теорії, але константа h виявляла свою впертість. І справді, йому коштувало величезних зусиль, щоби якось зробити світ неперервним. Але нічого з цього не вийшло. Уже і після того, як було відкрито рівняння Шредингера, М. Планк намагався звести його до класичного вигляду:

"*Я намагався негайно "прилаштувати" елементарний квант дії в рамки класичної теорії. Але попри всі зусилля ця константа виявляла свою впертість. Мої марні зусилля "вкласти" цей елементарний квант дії у класичну теорію тривали впродовж багатьох років і коштували мені величезних зусиль.*"

Цікаво, що, як бачимо з (22), фундаментальна константа $a = h/k_B$ була присутня вже в наближеній формулі В. Віна (2). Якщо константа Больцмана k_B є лише масштабним множником між енерґетичними одиницями і градусами, то константа h зв'язує енерґію частинок із частотою відповідних коливних процесів, тобто дає нерозривний зв'язок у явищах мікросвіту між хвилями й частинками.

Нова теорія вимагала підтверджень. На підставі своєї формули і використовуючи експериментальні дані про теплове випромінювання, М. Планк знайшов з високою на ту пору точністю майже в 4% величину елементарного електричного заряду. Він визначив з експериментальних вимірювань сталу Больцмана k_B, з газової сталої $R = k_B N_A$ — число Авоґадро N_A , а з числа Фарадея $F = eN_A$ — величину елементарного заряду e. Так гіпотеза про кванти знайшла своє перше підтвердження!

Далі гіпотеза квантів крок за кроком охоплювала все нові й нові явища.

VI.

1905 року А. Айнштайн (1879–1955), який працював тоді експертом у патентному бюро в Берні, використав гіпотезу Планка до пояснення фотоефекту. Важливо зазначити, в цій праці було чітко вказано на те, що квантування енерґії світла відбувається не тільки в актах поглинання та випромінювання світла чорним тілом, а й що квантові властивості притаманні світлу як такому. 1907 року він застосував гіпотезу квантів також до опису коливань атомів твердого тіла й пояснення низькотемпературної поведінки теплоємности. Недолік цієї теорії в якій вважається, що всі атоми коливаються з однією частотою, пізніше виправили Петер Дебай (1884–1966), Макс Борн (1882–1970) і Теодор Карман (1881–1963), розглядаючи, на відміну від А. Айнштайна, коливання атомів як систему зв'язаних осциляторів з частотами, розподіленими від нульового значення до деякого максимального (частота Дебая). Це дало чудове узгодження з дослідом і пояснило кубічну залежність теплоємности від температури в низькотемпературній ділянці.

1913 року Нільс Бор (1885–1962), який працював у Манчестерському університеті в Ернеста Резерфорда (1871–1937), застосував квантову гіпотезу до моделі атома Е. Резерфорда й побудував квантову теорію атома, сформулювавши свої знамениті постулати, які знає кожен школяр. Умови квантування, які сформульовав Н. Бор, 1916 року узагальнив Арнольд Зоммерфельд (1868–1951) на системи з декількома ступенями вільности, і вони відомі тепер як умови квантування Бора–Зоммерфельда. Цей етап розвитку квантової фізики тепер називають “старою” квантовою механікою. Вона зустрілася з труднощами, які не в змозі була перебороти: не могла пояснити спектральні закономірності багатоелектронних атомів і навіть найпростішого з них — атома гелію; залишались без пояснень інтенсивності спектральних ліній атомів. Відчувалось, що потрібна нова квантова теорія, і вже з цих позицій Н. Бор сформулював принцип відповідности, згідно з яким у границі великих, макроскопічних траєкторій частинок квантова механіка повинна переходити у класичну механіку. Цей принцип був ключем до “вгадування” квантових формул.

VII.

Новий етап розвитку квантової фізики почався 1924 року, коли Луї де Бройль (1892–1987) висунув свою дивну гіпотезу про зіставлення з кожною частинкою хвилі, довжина якої λ, пов'язана з імпульсом частинки p, $\lambda = h/p$. Ервін Шредінґер (1887–1961) з Цюрихського університету, готуючи до семінару інформацію про праці де Бройля, переклав ці ідеї на “зручну” математичну мову і винайшов своє знамените рівняння (1926), відкривши так звану хвильову квантову механіку. А ще перед цим із зовсім інших позицій Вернер Гайзенберґ (1901–1976), відштовхуючись від ідеї квантових переходів Бора, увів, замість класичних неперервних величин, величини, що мають два індекси (початкового й кінцевого станів атома), винайшов для них рівняння, у які входить стала Планка h, і створив матричну квантову механіку (1925). З'ясувалось, що це були не дві різні механіки, а лише її дві різні математичні мови. Створення квантової механіки завершилось відкриттям релятивістського рівняння для електрона Полем Діраком (1902–1984), ориґінальним математичним трюком добування кореня квадратного з суми квадратів (1928).

Створення кількома молодими вченими нової квантової теорії, а фактично нової фізики, за такий короткий час (1925–1928) є феноменом, який не має прецеденту в історії науки.

Отже, за ці три–чотири роки була побудована теорія, що змінила наше світосприйнятя не лише на рівні фундаментальної науки, але й навколишній “побутовий” світ, який ми спостерігаємо.

Ми й сьогодні не можемо логічно зрозуміти, що таке амплітуда ймовірности. Таке трактування хвильової ψ-функції де Бройля–Шредінґера запропонував 1926 року М. Борн. Наша логіка є класичною, вона не допускає того, що ми називаємо дифракцією електронів, й на цьому є багато парадоксів: парадокс де Бройля, парадокс із живомертвим котом Шредінґера, парадокс Айнштайна–Подольського–Розена (1935), які були предметом відомих дискусій — “двобою” Н. Бора й А. Айнштайна. Хід цих дискусій щодо ймовірнісної інтерпретації хвильової функції цікаво проілюструвати словами цих великих учених. А. Айнштайн: “*Господь Бог не грає в кості*”. Н. Бор у відповідь: “*Не наша журба — приписувати Богу, як Йому слід керувати цим світом*”.

Пізніший період розвитку квантової теорії можна назвати “калькуляційним”. Тисячі наукових праць були присвячені дослідженню різноманітних фізичних явищ із розрахунком на основі фундаментальних рівнянь квантової механіки фізичних величин, що характеризують ядра, атоми, молекули та їх сукупності в газоподібному, рідкому і твердому станах. Жодного разу квантова гіпотеза М. Планка не зазнала невдач.

Але час від часу фізики поверталися до змісту основної величини квантової механіки — хвильової функції. 1942 року американський фізик-теоретик Річард Фейнман (1918–1988) сформулював ще один варіянт квантової механіки через таке поняття, як інтеґрали за шляхами від амплітуди ймовірности, вигляд якої він постулював, на підставі ідеї П. Дірака. Цей підхід не дає нових результатів, але знову повертає нас до нібито класичного підрахунку ймовірности переходу квантової частинки з однієї точки простору в іншу за всіма можливими її класичними траєкторіями. Насправді ж використовується знову поняття амплітуди ймовірности, а її вигляд вибирається так, щоб забезпечити перехід до рівняння Шредінґера.

Отже, маємо ще одну, може, якоюсь мірою несподівану, математичну мову квантової механіки, яка збагачує наше розуміння того, що відбувається в мікросвіті.

Сьогодні ми спостерігаємо період, який можна назвати "ψ-ренесансом", тобто вчені знову повернулись до намагань зрозуміти, що таке хвильова функція, майстерно "перекидаючи" мікроскопічні явища на природні для нас макроскопічні масштаби. Теперішні інструментальні можливості дають змогу досліджувати експериментально такі тонкі явища, як згадані "живомертвий кіт Шредінґера" та парадокс Айнштайна–Подольського–Розена, завдяки якому винайшли спочатку теоретично, а потім експериментально так зване явище квантової телепортації. Знову виникло обговорення питання про включення свідомости спостерігача у квантову теорію вимірювань. У фолькльорі фізиків з'явилися такі поняття, як квантова криптографія та квантові комп'ютери, принцип дії яких ґрунтується на незбагненних властивостях ψ-функції і можливості яких є також ще незбагненними.

Завершуємо нашу розповідь про дивний світ квантів з усвідомленням того, що саме зв'язок таємничого механізму геніяльних здогадок та вимушених кроків, які диктуються грою нашого розуму — логікою дає змогу пізнавати навколишність у всій її Красі й Гармонії.

---

* Лекція прочитана 14 грудня 2000 року з нагоди 100-річчя відкриття сталої Планка на спільному науковому семінарі фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка, Семінару "Філософія науки" та Фізичної комісії Наукового товариства імені Шевченка. Вона була також виголошена 14 листопада 2000 року на Науковій сесії Відділення фізики і астрономії НАН України та 15 листопада 2000 року на Науковому семінарі фізичного факультету Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка. Повний текст лекції опублікований у журналі "Світ фізики" № 4(12), 2000.

[1] 1911 року за відкриття законів теплового випромінювання В. Віна нагороджено Нобелівською премією.

[2] Генрих Рубенс (1865–1922) був близьким товаришем Макса Планка, який дуже високо цінував свою співпрацю з ним: "*Без участи Рубенса формулювання закону випромінювання, а тим самим і обґрунтування квантової теорії, можливо, пішло б зовсім іншим шляхом, і навіть не в Німеччині.*"

[3] За відкриття кванта дії h М. Планка нагороджено Нобелівською премією 1918 року.

[4] Макс Планк, *Избранные труды* (Наука, Москва, 1975).

[5] І. О. Вакарчук, *Квантова механіка* (Львівський державний університет ім. І. Франка, Львів, 1998).

IS A QUANTUM A GREAT GUESSWORK OR A "FORCED" STEP?

I. O. Vakarchuk
Ivan Franko National University of Lviv, Chair of Theoretical Physics
12 Drahomanov Str., Lviv, UA–79005, Ukraine

The original works of Max Planck devoted to the problem of spectral distribution of black body radiation are analyzed. The heuristic ideas and logical steps which 100 years ago led to the discovery of the quantum nature of the World are reproduced in chronological order. Further development of the quantum hypothesis and establishment of quantum mechanics are given in a retrospective sketch. The present-day possibilities of a deeper understanding of the nature of wave function are also mentioned.