

О.І. Проскура

До 100-літнього ювілею гіпотези А.Ейнштейна про світлові кванти

Подано ейнштейнівську гіпотезу світлових квантів та інтерпретацію ним зовнішнього фотоелектричного ефекту. Коротко розглянуто історію експериментальних досліджень та передумови, які були необхідні для обґрунтування гіпотези світлових квантів.

Працю А.Ейнштейна, в якій він розвинув ідеї Планка про квантування енергії осцилятора, зареєстровано в редакції журналу 18.03.1905 р. [1]. У ній він висловив гіпотезу світлових квантів і подав інтерпретацію зовнішнього фотоелектричного ефекту. Цей фундаментальний результат А.Ейнштейна відіграв неабияку роль у розвитку квантової теорії і був відзначений Шведською академією наук 1922 року Нобелівською премією — за відкриття закону фотоелектричного ефекту (при цьому за кадром, правда, залишилася його спеціальна і загальна теорія відносності).

Розглянемо історичні витoki першої публікації Ейнштейна, частково її зміст та експериментальне підтвердження квантової теорії фотоелектричного ефекту. Проблема взаємодії світла з речовиною є фундаментальною науковою проблемою. Саме завдяки дослідженням теплового випромінювання тіл виникла квантова теорія, яка стала базою сучасної науки. Наприкінці XIX ст. науковий інтерес до теплового випромінювання було зумовлено впровадженням ламп розжарення і потребою в світлових стандартах. Дослідники Фізико-технічного інституту та Вищої технічної школи в Берліні розробили модель абсолютно чорного тіла, виміряли розподіл енергії його теплового ви-

промінювання переважно в довгохвильовій області спектра та порівняли результати дослідів з відомими законами випромінювання. Так, О.Люммер і Е.Прінгсгайм описали систематичні розходження між їх експериментальними даними у видимій та інфрачервоній областях спектру і теоретичним законом теплового випромінювання Віна. Подібні розходження в далекій інфрачервоній області встановлено також Г.Рубенсом, Ф.Курльбаумом та Ф.Пашеном.

З експериментальними даними добре узгоджувалася формула, яку 19.10.1900 р. для спектру теплового випромінювання на засіданні Німецького фізичного товариства представив М.Планк і яка для довгохвильового діапазону відповідала відомому законові випромінювання Віна. На засіданні М.Планк виступив після Ф.Курльбаума, з чийми даними формула Планка добре корелювала. Наступного дня М.Планка відвідав Г.Рубенс, який повідомив про узгодження його дослідних результатів з формулою. Ця формула одержала назву закону Планка для теплового випромінювання.

Пізніше М.Планк для доведення формули запровадив нову сталу h (стала Планка), яка згодом була названа елементарним квантом дії. Елементарний квант дії h пов'язує енергію ϵ мікрочастинки з відповідною

частотою ν хвильового процесу, яким може описуватись її рух: $\epsilon = h\nu$. Про відкриття Планком елементарного кванта дії переходим в Берліні нагадує пам'ятна дошка на стіні Університету імені О.Гумбольдта, де М.Планк викладав у 1889—1928 роках.

Доведення формули розподілу енергії в спектрі випромінювання нагрітого абсолютно чорного тіла і пояснення нової константи М.Планк запропонував на засіданні Німецького фізичного товариства у своїй доповіді 14.12.1900 р. Від цього дня і веде свій початок квантова теорія. М.Планк при доведенні формули поклав, що осцилятор чорного випромінювача може характеризуватися тільки певними порціями енергії ϵ , або квантами, чим здійснено відхід від принципу класичної фізики про неперервність фізичних величин і заявлено про їх дискретність.

А.Ейнштейн припустив 1905 року, що квантуються світло та поле випромінювання, і використав це для інтерпретації закономірностей фотоефекту.

Вважається, що зовнішній фотоефект відкрив Г.Герц 1887 р. при дослідженні електричних коливань в колі з повітряним розрядником. Він помітив дію електричного розряду на відстані на розряд в іншому розряднику. Ця дія виявлялась у збільшенні величини міжелектродної відстані, при якій міг виникати електричний пробій повітряного проміжку в розряднику. Результати дослідів Г.Герц виклав у статті [2]. Він встановив, що найбільш чутливою до носія дії, який підлягав законам геометричної оптики, була область розрядника поблизу електрода з негативним потенціалом. Г.Герц дійшов висновку, що здатність впливати на електричний розряд мали ультрафіолетові промені.

Прості умови для демонстрації і якісного вивчення явища знайшов В.Гальвакс. Його дослід від 27.11.1887 р. вважається основоположним. У ньому на цинкову платівку, приєднану до електроскопа із золотими листочками, скеровувалось крізь гіпсове віконце відфільтроване випромінювання дугової лампи. При опроміненні негативно зарядженої платівки кут розходження між листочками електроскопа зменшувався. Це свідчило, що внаслідок опромінення платівка втрачала негативний електростатичний заряд. В.Гальвакс здійснив перші спроби спектральних вимірювань і показав, що цинкова платівка виявилась чутливою до ультрафіолетового випромінювання дуги і зовсім не реагувала на її інфрачервоне випромінювання [3].

Перші дослідники зовнішнього фотоефекту намагались з'ясувати, якого знаку потенціал необхідно подавати на чутливий до опромінення електрод, щоб виявити фотоефект, та з яким за знаком електричного заряду він пов'язаний. У Німеччині Е.Відеман і Г.Еберт відразу після публікації Герца виявили, що для одержання фотоефекту необхідно опромінювати електрод з негативним потенціалом [4]. Умова про фоточутливість матеріалу катода підтверджувались при використанні різноманітних методик.

Одним з перших до досліджень фотоефекту долучився італієць А.Рігі, який вже в першій публікації використав поняття "фотоелемент". Фотокомірка Рігі являла собою близько розміщені й паралельні металеву сітку та суцільний металевий диск, який опромінювався крізь сітку. Комірка Рігі вмикалась за схемою контролю різниці потенціалів між електродами.

О.Г. Столетов в лютому 1888 р. незалежно від А.Рігі прийшов до конструкції фотоелементу у вигляді суцільного диску та сітки і розробив оригінальну методику вимірювання сили електроструму через комірку [5]. О.Г. Столетов сформулював перший закон фотоелектричного ефекту: сила фотоструму прямо пропорційна інтенсивності світла [6], а також встановив пряму пропорційну залежність сили фотоструму від величини освітлюваної поверхні фотокатода, показав наявність фотоструму насичення та малу інерційність зовнішнього фотоелементу. Метод Столетова використали 1888 року Ю.Ельстер і Г.Гейтель для порівняльних досліджень спектральних чутливостей фотокатодів з лужних металів [7]. Вони розробили сучасну конструкцію фотоелементу зі скляною сферичною оболонкою і віконцем, що пропускало світло на катод.

Важливу роль в дослідженні зовнішнього фотоелементу відіграли праці Ф.Ленарда, який дослідив і використав його для одержання катодних променів. Він розробив експериментальну методику визначення початкової швидкості фотоелектронів. Ф.Ленард встановив, що їх початкова швидкість набувала різних значень залежно від матеріалу тіла при однакових “сортах світла”, залежала від довжини хвилі світла і не залежала від його інтенсивності.

Ф.Ленард незалежно від Дж.Дж.Томсона дійшов висновку, що потік носіїв фотоструму поводить себе аналогічно до катодних променів. Сперш він встановив, що при освітленні фотокатода при фотоелектричному процесі звільнення з нього електричного заряду здійснюється відокремлюваними матеріальними частинками і не супроводжується розпиленням матеріалу фотокатода

[8]. У вакуумній лампі Ленарда частинки рухалися від фотокатода до анода і після проходження отвору в екрані створювали промінь. Промінь можна було відхиляти дією поля і змінювати траєкторію частинок, щоб порівняти їх властивості з властивостями носіїв катодних променів. Ф.Ленард довів також, що відповідальні за зовнішній фотоелектричний ефект частинки прискорюються в повздовжньому електричному полі так само, як і частинки катодних променів. Це означало, що частинки, які виходили з тіла при його освітленні і ставали носіями електрики при фотоелектричному ефекті, мали таку саму природу, що й частинки катодних променів [9].

У досліді Ленарда електрично нейтральний алюмінієвий електрод внаслідок УФ-опромінювання набував позитивного потенціалу 2,1 В. Після цього з нього припинявся відтік у вакуум електричного заряду. Ф.Ленард пояснив це явище припущенням, що фотоелектричні частинки гальмуються в електричному полі електрода і повертаються до нього.

У наступній праці 1902 р. Ленард висловив гіпотезу, що поглинуте тілом світло мало б відокремлювати від атомів електрони, а швидкість вивільненого з атома електрона мала б залежати від того стану, в якому атом перебував при резонансній дії світла на атом [10]. При цьому Ф.Ленард встановив, що величина звільненого за одиницю часу електричного заряду є пропорційною до інтенсивності світла.

Пояснюючи механізм фотоелектричного ефекту в цілому, він припускав, що оскільки початкова швидкість вивільнених частинок (електронів) не залежить від інтенсивності освітлення, то поглинуте тілом світло при зовнішньому фотоелектричному ефекті відіграє тільки ту роль, що переводить їх з атомів

до стану такого руху, що вони можуть вилетіти з тіла. Якщо ж тіло перебуває при цьому під електричною напругою, то в зовнішньому електричному полі поза тілом ці частинки або прискорюються в русі від тіла, яке має негативний потенціал, або гальмуються і повертаються назад до тіла, якщо воно має позитивний потенціал.

Експериментальні результати Ф.Ленарда разом з твердженнями В.Гальвакса і О.Г.Столетова про те, що фотоелектрична дія обов'язково вимагає поглинання світла матеріалом фотокатода, давали можливість перейти від якісної інтерпретації явища до його кількісної теорії. Однак в межах класичної електромагнітної теорії світла природа ефекту не знаходила свого пояснення. Воно прийшло разом з гіпотезою світлових квантів А.Ейнштейна, який одержав алгебраїчні вирази структурованості світла. За цим висновком світло являє собою потік частинок — світлових квантів з енергією $\epsilon = h\nu$. Цей результат був протилежним до вже усталеної електромагнітної теорії світла. На час опублікування він не мав жодного фізичного виправдання, крім того, що за допомогою гіпотези світлових квантів А.Ейнштейн зумів пояснити такі фізичні явища, як правило Стокса для люмінесценції, іонізацію УФ-опромінюванням і особливо фотоелектричний ефект.

На відміну від Ф.Ленарда А.Ейнштейн припустив, що після проникнення світлових квантів у приповерхневий шар тіла їх енергія хоча б частково перетворюється в кінетичну енергію електронів. При цьому за А.Ейнштейном найпростіше уявляти, що світловий квант повністю віддає свою енергію одному електрону, хоча не виключена і передача елек-

троні частини енергії світлового кванта. Всередині тіла електрон, який набув кінетичну енергію, втрачає її частину при наближенні до поверхні тіла. Крім того, припускалось, що кожний електрон при виході з тіла має виконати певну характерну для тіла роботу A виходу електрона з речовини. Якщо безпосередньо близькі до поверхні тіла електрони залишають тіло в напрямку, нормальному до його поверхні, то їх початкова швидкість v за межами тіла буде максимальною. Тоді згідно із законом збереження енергії максимальна кінетична енергія вивільненого фотоелектрона з масою m дорівнює

$$mv^2/2 = h\nu - A$$

(рівняння А.Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту).

У сучасників А.Ейнштейна виникали певні труднощі в сприйнятті його гіпотези світлових квантів (фотонів). Вони були пов'язані перш за все з тим, що попередні експериментальні підстави навряд чи були достатніми для кількісної перевірки запропонованих теоретичних висновків. Експерименти Ленарда давали тільки якісне свідчення про залежність енергії фотоелектронів від частоти світла. Тому експериментатори намагались перевірити передбачення А.Ейнштейна. Їм довелось долати значні труднощі та почасти скептичне ставлення до ейнштейнської гіпотези. Минуло десятиліття, поки пояснення фотоелектричного ефекту А.Ейнштейном дістало переконливе експериментальне підтвердження.

Автор щиро вдячний професору Берлінського технічного університету М.Ахіллесу, професору Інституту М.Планка з Берліну Д.Гоффману та пану Г. Нойфельду (Берлін) за консультації та постійну підтримку.

1. *Einstein A.* Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // Ann. Phys. — 1905. — Bd.17, vierte Folge, sechstes Heft. — S.132—148.
2. *Hertz H.* Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung // Ann. Phys. u. Chem. — 1887. — Bd.31. — S.983—1000.
3. *Hallwachs W.* Über den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper // Ann. Phys. u. Chem. — 1888. — Bd.33. — S.301—312.
4. *Wiedemann E. u. Ebert H.* Über den Einfluss des Lichtes auf die elektrischen Entladungen // Wied. Ann. — 1888. — Bd.33. — S.241—264.
5. *Столетов А.Г.* Избранные сочинения. — М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1950.
6. *Stoletow A.* Sur les phénomènes actino-électriques // C.R. — 1889. — Vol.108. — P.1241—1243.
7. *Elster J., Geitel H.* Lichtelektrische Versuche // Wied. Ann. — 1892. — Bd.46. — S.281—291.
8. *Lenard P., Wolf M.* Zerstäuben der Körper durch ultraviolettes Licht // Wied. Ann. — 1889. — Bd.37. — S.443—456.
9. *Lenard P.* Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht // Ann. Phys. — 1900. — Bd.2. — S.359—375.
10. *Lenard P.* Über die lichtelektrische Wirkung // Ann. Phys. — 1902. — Bd.8. — S.149—198.

Одержано 27.07.2004

А.И. Проскура

К 100-лєтнему юбилею гипотезы А.Эйнштейна о световых квантах

Показаны эйнштейновская гипотеза световых квантов и интерпретация ним внешнего фотоэлектрического эффекта. Коротко рассмотрены история экспериментальных исследований и предпосылки, которые были необходимы для обоснования гипотезы световых квантов.

О.Ю. Колтачихіна

Альберт Эйнштейн — засновник релятивістської космології і сучасний погляд на Всесвіт

Висвітлено історію створення А.Ейнштейном релятивістської теорії гравітації, започаткування космології як науки завдяки його працям. Характеризуються сучасні моделі й сценарії розвитку Всесвіту, уявлення про його структуру, що базуються на теоріях Ейнштейна й розвивають їх.

Альберта Эйнштейна по праву можна назвати одним із творців сучасної фізики, роботи якого докорінно змінили уявлення про простір, час та матерію. Він зробив значний внесок у такі галузі, як статистична та квантова фізика, теорія гравітації, створив спеціальну та загальну теорію відносності, започаткував розвиток космології як науки.

2005 р. знаменує столітній ювілей праці “До електродинаміки тіл, що рухаються” [1], в якій було запропоновано спеціальну теорію відносності. Дана теорія, переглянувши основні положення фізики Ньютона, узагальнила класичні закони руху на випадок швидкостей порядку світлових. Це привело до встановлення нового погляду на природу і запо-

© О.Ю.Колтачихіна, 2005