

## **ТРЕТІЙ ПРОФЕСОР КАВЕНДІШСЬКОЇ ЛАБОРАТОРІЇ**

*Джозефу Джону Томсону – автору відкриття електрона, творцю однієї з перших моделей атома, засновнику Кавендішської школи фізиків присвячується дана робота.*

*Joseph John Thomson – author of the discovery of the electron, the creator of one of the first models of the atom, the founder of the Cavendish School of physicists devoted to this work.*

«Атом – не остання межа ділення матерії. Ми можемо рухатися далі – до корпускули» – такий висновок зробив англійський фізик Джозеф Джон Томсон (1856–1940), вивчаючи проходження струму через розріджені гази [1]. Історичне повідомлення про доведений факт існування електрона – елементарної частинки у складі атома – учений зробив 115 років тому – 29 квітня 1897 року в Королівському інституті Великобританії. Важливе відкриття визначило лінію розвитку науки в ХХ столітті.

Вивчаючи курс шкільної чи загальної фізики, ми далеко недооцінюємо заслуги Томсона, згадуючи його єдиний раз, як автора першої недосконалої моделі атома. Насправді ж внесок Дж. Дж. Томсона у розвиток фізики вражає: експериментальне відкриття 1897 р. електрона, відмічене Нобелівською премією з фізики (1906 р.); одна з перших моделей атома, до складу якої вперше були включені електрони (1903 р.); перші експериментальні доведення існування ізотопів (1912 р.); створення великої наукової школи фізиків багато з яких стали видатними ученими. Незважаючи на все це у свідомості багатьох людей – як фізиків, так і просто тих, хто цікавиться історією науки,

– ім'я цього ученого часто затьмарюється іменами багатьох інших відомих фізиків минулого століття. Ось чому представляється важливим не лише згадати про наукову спадщину Дж. Дж. Томсона, але і спробувати оцінити значення цієї спадщини для сучасності та виробити рекомендації щодо ширшого використання у навчальному процесі.

Щоб повною мірою зрозуміти досягнення Дж. Дж. Томсона коротко проаналізуємо стан фізичної науки того часу стосовно ідей та спроб досліджувати структуру матерії. Ще 1749 р. В. Дж. Франклін (1706–1790) висказав ідею, що «електрична матерія складається з часток у край малих, оскільки вони можуть пронизувати звичайні речовини, такі щільні, як метал, з такою легкістю і свободою, що не зазнають помітного опору» [2]. Отже, припущення про існування частинок, що є носіями електричного заряду, висловлювалися ще в XVIII ст.. Першу спробу побудови електродинаміки, ґрунтованої на уявленні про зернисту будову «електричного флюїда» зробив в 40-і р.р. XIX ст. німецький фізик В. Е. Вебер (1804–1891), який вважав ці частинки невагомими та іменував їх «електричними масами» [3]. У електродинаміці Дж. К. Максвелла (1831–1879), що розроблялася переважно в 60-ті р.р. XIX ст. про подібного роду частинки не згадується: в ній панує польовий підхід і електрика трактується переміщенням в провідниках деякої нестискуваної рідини [4]. Спробу привнести ідею дискретності електричних зарядів до електродинаміки Максвелла зробив уперше в 1878 р. Г. А. Лоренц (1853–1928). Так, в роботі «Електромагнітна теорія Максвелла і її додаток до рухомих тіл» Лоренц писав: «Досить буде допустити, що усі матеріальні тіла містять безліч маленьких часток, заряджених позитивно або негативно, і що усі електричні явища викликаються зміщенням цих часток. Згідно з цією уявою електричний заряд обумовлений надлишком частинок одного певного знаку, а електричний струм обумовлений потоком цих частинок» [3].

Особливо слід зазначити дослідження, що торкалися особливостей електричних явищ в розріджених газах. У 70-ті р.р. німецький фізик Е. Гольдштейн (1850–1930) ввів у фізику поняття катодних променів і припустивши, що за своєю природою вони аналогічні світлу з тією лише різницею, що світло випромінюється тілом в усіх напрямках, а катодні промені випускаються лише перпендикулярно поверхні катода, але обидва процеси за природою відносяться до хвильових. Досліди Гольдштейна у кінці 70-х рр. XIX ст. у вдосконаленому вигляді повторив видатний англійський фізик У. Дж. Крукс (1832–1919), ввівши в газорозрядну трубку радіометр, ним же сконструйований [4]. Крукс виявив обертання радіометра під дією катодних променів, з чого зробив висновок, що ці промені переносять енергію й імпульс. Помістивши в трубку на шляху катодних променів металеве перехрестя, Крукс виявив його тінь на флуоресцентному склі трубки і дійшов висновку, що катодні промені поширюються прямолінійно. Він же дослідним шляхом переконався в тому, що ці промені можна відхиляти в ту або в іншу сторону магнітом. Промені він іменував деяким четвертим або «ультрагазоподібним» станом речовини, або «променистою матерією», що має корпускулярну природу. «При вивченні цього четвертого стану речовини створюється представлення, що ми маємо нарешті у своєму розпорядженні остаточні частинки, які ми можемо з повною підставою вважати такими, що лежать в основі фізики Всесвіту» [4]. У 1886 р. Е. Гольдштейн вперше експериментально виявляє протони у вигляді позитивно заряджених променів в розрядній трубці.

Корпускулярній концепції природи катодних променів протистояла вже згадувана хвильова концепція. Крукс вважав, що катодні промені є молекулами залишкового газу, що міститься в газорозрядній трубці; зіткнувшись з катодом, вони отримують від нього негативний заряд і відштовхуються від катода. Але тоді вони повинні відхилятися електричним полем. Досліди ж, які проводив німецький фізик Г. Р. Герц (1857–1894), показали, що електричним полем вони не відхиляються [2]. У 1892 р. Герц дослідним

шляхом переконався в тому, що катодні промені можуть проходити крізь тонкі алюмінієві пластинки. Але якщо це так, то незрозуміло, яким чином наелектризовані молекули можуть проходити крізь метал? З іншого боку, магнітне поле на світлові хвилі не діє, а досліди Крукса показували, що це поле діє на катодні промені. Таким чином, на початку 90-х рр. XIX ст. виникла проблема, яка потребувала розв'язання – що є катодні промені – хвилі чи частинки матерії?

1880 р. Томсон закінчує університет, і вже на початку 90-х р.р. XIX ст. з'являються його перші наукові роботи, присвячені розвитку електродинаміки Максвелла. Так, розглядаючи задачу про рух зарядженої кулі, Томсон дійшов висновку про збільшення уявної маси заряду за рахунок енергії електростатичного поля, і це виведення отримало свій подальший розвиток на початку XX ст. в спеціальній теорії відносності, зокрема, в роботах Ж. А. Пуанкаре (1854–1912). У 1884 р., у віці 28 років, Дж. Дж. Томсона обирають професором фізики кафедри експериментальної фізики і призначають директором Кавендішської лабораторії Кембріджського університету. Томсон став третім професором славнозвісної лабораторії, змінивши на цьому посту Дж. У. Релея (1842–1919). Через рік Томсон захищає дисертацію під назвою «Про деякі додатки принципів динаміки до фізичних явищ», про яку згодом Г. Герц напише: «Автор розвиває тут наслідки динаміки, які разом з ньютонівськими законами руху мають у своїй основі нові, не виражені чітко передумови. Я міг би долучитися до цього трактату; фактично ж моє власне дослідження вже значно просунулося, перш ніж я познайомився з цим трактатом» [1].

1895 р. Ж. Б. Перрен (1870–1942) досліджуючи катодні промені приходить висновку, що вони несуть негативний заряд, відхиляються магнітним полем, і висуває припущення, що це – потік частинок. Проте, така гіпотеза знаходить різку критику прибічників хвильової концепції. Дж. Дж. Томсоном в дослідях 1897 р. вдосконалює катодну трубку і переконливо доводить, що катодні промені – це дійсно негативно заряджені частинки. Крім цього, Томсон у своїх дослідях зумів зробити те, що не вдалося зробити Герцу: він зумів добитися відхилення катодних променів електричним полем (у дослідях Герца все псувала провідність залишкового газу в трубці, що виникала під дією катодних променів). Далі Томсон детально досліджує ці частинки та, описує їх рух законами механіки. В електростатичному полі вони повинні поводитися так само, як поведуться тіла, що падають, поблизу поверхні Землі. Якщо, позитивно заряджена частинка опиняється в просторі між двома горизонтальними пластинами, верхня з яких заряджена позитивно, а нижня негативно, то ця частинка відштовхуватиметься від верхньої пластини і притягуватиметься до нижньої, тобто буде рухатися з прискоренням вниз. Якщо ця частинка влітає в простір між цими пластинами зі швидкістю, спрямованою паралельно площині пластин, то вона наблизатиметься до нижньої пластини параболічною траєкторією, тобто буде рухатися так само, як падає на поверхню Землі камінь, кинутий зі швидкістю, спрямованою паралельно земній поверхні. Якщо ж в просторі між пластинами існує ще і магнітне поле, то на досліджувану заряджену частку діятиме сила Лоренца, і за її напрямком можна судити про знак заряду, а по-друге, електрична і магнітна сили можуть компенсувати одна одну, якщо виявляться спрямованими в протилежні сторони. Електрична сила обчислюється добутком заряду частинки на напруженість електричного поля –  $qE$ , а магнітна сила – як добуток цього заряду на швидкість частинки й на індукцію магнітного поля (за умови що кут між векторами швидкості й індукції складає  $90^\circ$ ) –  $qvB$ . Тоді отримуємо  $qE = qvB$ , тобто  $E = vB$ . Звідси відразу видно, що швидкість руху зарядженої частинки обчислюється, як відношення напруженості електричного поля  $E$  до індукції магнітного поля  $B$ . Проте відомо, що сила Лоренца надає зарядженій частинці доцентрового

прискорення  $v^2/r$ ; тоді  $\frac{mv^2}{r} = qvB$  й можна знайти значення питомого заряду частинки, тобто відношення заряду до маси частинки:  $m = \frac{q}{Br} = \frac{E}{B^2 r}$  [5].

З цього результату видно, що: 1) питомий заряд досліджуваної частинки залежить від індукції магнітного поля і від напруженості електричного поля (тобто від різниці потенціалів між пластинами); 2) питомий заряд частинки не залежить від хімічних властивостей залишкового газу в трубці, від геометричної форми трубки, від матеріалу, з якого виготовлені електроди, від швидкості катодних променів, ні від яких інших фізичних параметрів; 3) катодні промені не є іонами залишкового газу, що вилітають з катода, як вважав Крукс, але все таки це частинки; 4) Томсон доводить, що питомий заряд частинок є константою, тому йдеться про однакові частинки.

Слід відзначити й високу точність його експерименту: ним одержано результат

$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг, тоді як сучасне значення питомого заряду електрона приймається  $(1,76 \pm 0,002) \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Виходячи з отриманого значення питомого заряду, можна було спробувати оцінити масу частинок. До часу проведення дослідів вже було відоме значення питомого заряду іона водню. Термін «електрон» на той час також існував, його ввів в ужиток 1891 р. ірландський фізик і математик Дж. Стоней (1826-1911) для позначення електричного заряду одновалентного іона при електролізі, а після досліджень Томсона цей термін був перенесений на відкриті ним частинки. І якщо припустити, що заряд і маса електрона так чи інакше пов'язані з відповідними значеннями для іона водню, то були можливі два варіанти:

1) маса електрона дорівнює масі йона водню, – тоді заряд електрона має бути більшим, ніж заряд іона водню, в  $10^3$  разів. Проте дослідження німецького фізика Ф. Е. Ленарда (1862–1947) показали нереальність подібного припущення. Ним було встановлено, що середня довжина вільного пробігу частинок, що утворюють катодні промені, складає в повітрі 0,5 см, тоді як для іона водню – менше, ніж  $10^{-5}$  см. А це значить, що маса відкритих частинок має бути малою;

2) заряд частинки дорівнює заряду йона водню, але у такому разі маса цієї частинки має бути менше маси йона водню в  $10^3$  разів. На цьому варіанті й зупинився Томсон.

Все ж було б краще якимось чином безпосередньо виміряти або заряд електрона, або його масу. Вирішенню проблеми допомогла наступна обставина. У тому ж 1897 р., коли Томсон ставив свої досліди з вивчення катодних променів, його учень Ч. Вільсон (1869–1959) встановив, що в повітрі, пересиченому водяними парами, кожен іон стає центром конденсації пари: іон притягує до себе крапельки пари, і починається утворення крапель води, які ростуть до тих пір, поки не стануть видимими. Томсон скористався відкриттям свого учня так. Припустимо, що в іонізованому газі є деяка кількість іонів, що мають однаковий заряд, і ці йони рухаються з відомою швидкістю. Швидке розширення газу призводить до його перенасичення, і кожен іон стає центром конденсації. Сила струму дорівнює добутку кількості йонів на заряд кожного йона і на його швидкість. Сила струму може бути виміряна, швидкість руху іонів теж, і якщо якось визначити число частинок, то можна знайти і заряд однієї частинки. Для цього вимірювалася маса водяної пари, що сконденсувалася, та маса окремої краплі. Остання знаходилася таким чином. Розглядалося падіння крапель в повітрі. Швидкість падіння краплі під дією сили тяжіння знаходилася за формулою Стокса

$$v = \frac{2}{9} (\rho_{\text{краплі}} - \rho_{\text{повітря}}) \frac{r^2}{\mu} g$$
, де  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості середовища, в якому падає

крапля, тобто повітря. Знаючи цю швидкість, можна знайти радіус краплі  $r$  та її об'єм, вважаючи краплю сферичною. А добуток  $\rho V = m$  дає масу однієї краплі. Розділивши загальну масу сконденсованої рідини на масу однієї краплі, знайдемо їх кількість, яка дорівнює кількості йонів газу, і через яку знаходиться заряд одного йона. Як середнє великого числа вимірювань Томсон отримав для шуканого заряду значення  $1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл, що цілком задовільно узгоджувалося із вже відомим у той час зарядом йона водню.

Даний метод був вдосконалений Вільсоном в 1899 р. Над негативно зарядженою краплею розташовувалася позитивно заряджена пластина, яка своїм притяганням урівноважувала силу тяжіння, що діяла на краплю. З цієї умови можна було знайти заряд конденсованої краплі. Томсон показав, що заряд іонізованої молекули дійсно дорівнює заряду електрона, з'являється незалежно від способу йонізації речовини і завжди виявляється рівним заряду одновалентного йона при електролізі. Підставивши ж значення цього заряду у вираз для питомого заряду електрона, можна знайти масу останнього. Ця маса виявляється менше маси йона водню приблизно в 1800 разів. Нагадаємо, що нині значення цих фундаментальних постійних: заряд електрона дорівнює  $1,601 \cdot 10^{-19}$  Кл; маса електрона  $9,08 \cdot 10^{-31}$  кг, що менше маси атома водню приблизно в 1840 разів.

У зв'язку з дослідженнями Томсоном властивостей і природи катодних променів доцільно також згадати про його вклад в дослідження природи фотоефекту. У механізмі цього явища у той час ясності не було – ні в роботах А.Г.Столетова (померлого в травні 1896 р., тобто до відкриття електрона), ні в роботах європейських фізиків – А. Рігі, В. Гальвакса, – а тим більше в дослідженнях Г. Герца, який помер ще в 1894 р.. Томсон в 1899 р., досліджуючи фотоефект за експериментальною методикою, схожою з методикою дослідження властивостей катодних променів, встановив наступне. Якщо вважати, що фотострум є потоком негативно заряджених частинок, то можна теоретично розрахувати рух частинки, що утворює цей струм, одночасно діючи на неї електричним і магнітним полями. Експерименти Томсона підтвердили: струм між двома протилежно зарядженими пластинами при освітленні катода ультрафіолетовими променями є потоком негативно заряджених частинок. Вимірювання заряду цих частинок, проведені за тією ж методикою, за якою раніше Томсон вимірював заряд йонів, дали середнє значення заряду, за порядком величини близьким до значення заряду частинок, що утворюють катодні промені. Звідси Томсон зробив висновок, що в обох випадках слід говорити про частинки однієї і тієї ж природи, тобто про електрони.

Перша модель атома, запропонована Томсоном, базувалася на дослідах американського фізика А. Майєра з плаваючими магнітами [4]. Але вже в 1899 р. Томсон видозмінив свою модель, припустивши, що нейтральний атом містить велику кількість електронів, негативний заряд яких компенсується позитивним електричним зарядом, рівним сумі негативних зарядів електронів. У 1903 р. Томсон припустив, що електрони обертаються і повинні породжувати еліптично поляризовані світлові хвилі, а в 1904 р. – розглянув проблему механічної стійкості атомної структури, встановивши, що: 1) електрони в атомі повинні швидко обертатися і швидкість цього обертання не може бути менша за деяку граничну; 2) якщо число електронів в атомі більше восьми, то електрони повинні розташовуватися декількома кільцями, і число електронів в кожному кільці повинне рости із зростанням радіусу кільця; 3) для радіоактивних атомів швидкість електронів внаслідок радіоактивного випромінювання повинна поступово убувати, і на деякій межі убубання повинні відбуватися «вибухи», що призводять до утворення нової атомної структури.

Попри всі недоліки, модель Томсона цінна в плані постановки проблеми: 1) зв'язку кількості електронів і їх розподілу з масою атома; 2) природи і розподілу в атомі



позитивного заряду, що компенсує загальний негативний електронний заряд; 3) розподілу маси атома. Ці проблеми вирішувалися в процесі подальшого розвитку фізики ХХ ст., і їх рішення у результаті привело до сучасних уявлень про будову атома.

Сама думка про те, що атоми одного і того ж хімічного елементу можуть мати різні атомні маси, виникла задовго до того, як Томсон почав займатися «ізотопною проблемою». Цю думку в 1882 р. висловлював основоположник органічної хімії А. М. Бутлеров (1828–1886) і дещо пізніше У. Крукс (1886). Перші радіоактивні ізотопи отримав в 1906 р. американський хімік і одночасно фізик Б. Болтвуд (1870–1927) – два ізотопи торію з різними періодами напіврозпаду. Сам термін «ізоотоп» ввів Ф. Содді (1877–1956) після того, як ним були сформульовані правила зміщення для радіоактивного розпаду.

У 1919 р. учень і асистент Томсона – Ф. У. Астон (1877–1945) побудував перший мас-спектрограф, за допомогою якого дослідним шляхом довів наявність ізотопів у хлорі й ртуті. У мас-спектрографі застосовується саме томсонівський метод відхилення заряджених частинок під дією двох полів, електричного і магнітного, проте в приладі Астона застосовувалося фотографування розділених потоків іонів з різними атомними масами, а крім того, використовувалося відхилення зарядженої частинки в електричному і магнітному полях – в одній і тій же площині, але в протилежних напрямках.

Думається, варто відзначити, що учнями Дж. Дж. Томсона є такі видатні фізики ХХ ст., як Е. Резерфорд, Ч. Вільсон, Ч. Баркла, О. Річардсон, Г. Брег, які в різні роки були відзначені Нобелівськими преміями з фізики (Резерфорд – з хімії). Особливо відмітимо його сина – Джордж Паджет Томсон був удостоєний в 1937 р. Нобелівської премії за експериментальне доведення хвилевої природи електронів.

Дж. Дж. Томсон – геніальний вчений, ще на початку ХХ ст. висунув гіпотезу про складну будову електрона та безмежність наукового пізнання. В книзі «Очарування фізики в тому, що в ній немає жорстких границь, що кожне відкриття не є межею, а тільки алеєю, що веде в країну, ще не досліджену, і скільки б не існувала наука, завжди буде величезна кількість невирішених проблем, і фізикам нічого боятись стати безробітними» [5]. Саме таким Томсона ми повинні доносити учням та студентам.

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Жизнь науки./ Под ред. Капицы С.П. – М.: Наука, 1973. – 592 с.
2. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. - М.: Наука, 1981. – 288 с.
3. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики с начала XIX к середине XX вв. – М.: Наука, 1979. – 321 с.
4. Льюис М. История физики. – М.: Мир, 1970. – 464 с.
5. Кудрявцев С. П. Д. Д. Томсон. Люди науки – М.: Просвещение, 1986. – 80 с.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Царенко Олег Миколайович** – кандидат технічних наук, професор кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

*Наукові інтереси:* методологічні дослідження навчального процесу, інноваційні педагогічні технології навчання.