

§ 36. ДОСЛІД Е. РЕЗЕРФОРДА. ПОСТУЛАТИ Н. БОРА. ЕНЕРГЕТИЧНІ РІВНІ АТОМА



30 квітня 1897 р. на засіданні Лондонського королівського товариства англійський фізик Джозеф Джон Томсон (1856–1940) доповів про експериментальне підтвердження існування субатомних частинок, а саме електронів, гіпотеза про існування яких була висунута фізиками за 40 років до цього. Дата доповіді Томсона вважається «днем народження» електрона. Можна сказати, що саме в цей день фізики остаточно переконалися в тому, що атом має складну будову. Тож яку будову має атом?

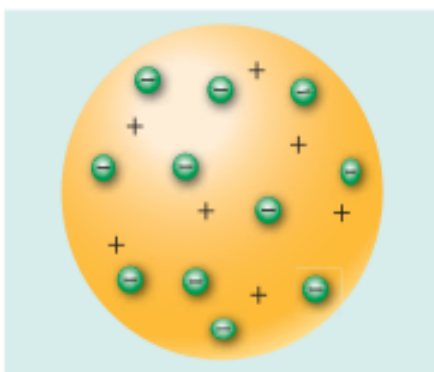


Рис. 36.1. Модель атома Томсона («пудинг із родзинками»)

1 Як з'явилась ядерна модель атома

Саме Дж. Томсон у 1903 р. запропонував одну з перших моделей будови атома. Він припустив, що атом має форму кулі, по всьому об'єму якої рівномірно розподілений позитивний заряд, а негативно заряджені електрони вкраплені в кулю (рис. 36.1); сумарний заряд електронів дорівнює заряду кулі, тому атом є електрично нейтральним.

? Як ви вважаєте, чому модель атома, запропонована Дж. Томсоном, отримала назву «пудинг із родзинками»?

Подальший прогрес у дослідженнях внутрішньої структури атома пов'язаний з ім'ям англійського фізика *Ернеста Резерфорда* (1871–1937). У дослідях, проведених під його керівництвом у 1908–1911 рр., вивчалася розсіювання α -частинок ядрами Аурому.

Для дослідів учені використали α -радіоактивну речовину, яку розташували у свинцевому контейнері з вузьким отвором. Пучок α -частинок із контейнера спрямовувався на тонку золоту фольгу, а далі потрапляв в екран, покритий шаром кристалів цинк сульфід (рис. 36.2). Якщо в такий екран влучала α -частинка, то в місці її влучання відбувався слабкий спалах світла. Учені спостерігали спалахи за допомогою мікроскопа та реєстрували місця влучання α -частинок в екран.

У результаті дослідів було виявлено:
1) переважна більшість α -частинок проходить

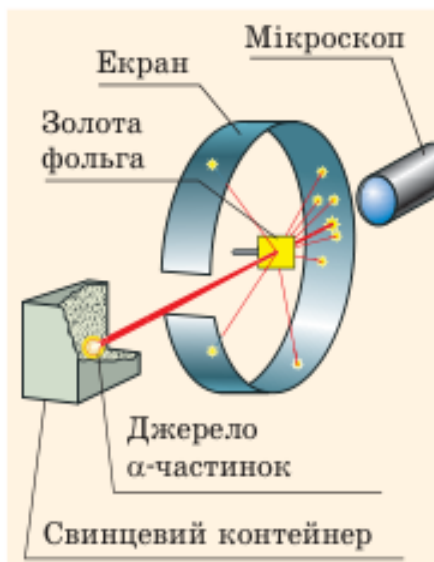


Рис. 36.2. Схема дослід з розсіювання α -частинок (дослід Резерфорда)

крізь золоту фольгу, не змінюючи напрямку свого руху; 2) деякі з α -частинок відхиляються від початкової траєкторії; 3) приблизно одна з 20 000 α -частинок відскакує від фольги, начебто натикаючись на якусь перешкоду (рис. 36.3).

Зрозуміло, що Е. Резерфорд не міг бачити внутрішню структуру атома, тому він залучив логіку.

Якщо позитивний заряд і маса рівномірно розподілені по всьому об'єму атома (так вважав Дж. Томсон), то всі α -частинки повинні пролетіти крізь фольгу практично не відхиляючись (маленькі електрони не можуть зупинити досить важкі й швидкі α -частинки — ядра атома Гелію, що рухаються зі швидкістю 10 000 км/с).

Якщо ж позитивний заряд і маса зосереджені всередині атома — в невеликому порівняно з атомом об'єкті, — то, зіштовхнувшись із ним, позитивно заряджена α -частинка може відскочити назад, а ті α -частинки, які пролітають близько до цього об'єкта, можуть відхилитися внаслідок електричного відштовхування.

Очевидно, що результатам експерименту відповідає саме друге припущення. У 1911 р., після дослідів із розсіювання α -частинок, Резерфорд запропонував **планетарну (ядерну) модель будови атома**: атом складається з позитивно зарядженого ядра, в якому зосереджена майже вся маса атома; біля ядра по певних орбітах обертаються електрони (рис. 36.4).

Планетарна модель атома, блискуче пояснивши результати експериментів із розсіювання α -частинок, разом із тим *суперечила законам класичної електродинаміки*.

Річ у тім, що рух планетарною орбітою є рухом із прискоренням (доцентровим), а відповідно до теорії Дж. Максвелла прискорений рух зарядженої частинки має супроводжуватися випромінюванням електромагнітних хвиль. Таким чином, електрон в атомі мав би випромінювати електромагнітні хвилі, а отже, втрачати енергію. А наслідками цього були б зменшення швидкості руху електрона та його падіння на атомне ядро (рис. 36.5). Проте атом є дуже стійким...

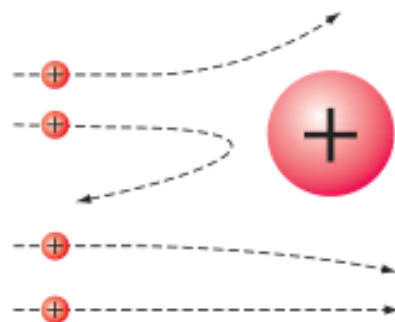


Рис. 36.3. Траєкторії α -частинок, що пролітають поряд із ядром Аурому



Рис. 36.4. Планетарна модель будови атома, запропонована Е. Резерфордом. Учений також розрахував розмір ядра: воно виявилося дуже малим — порядку 10^{-15} м, що в 100 000 разів менше, ніж розмір атома (10^{-10} м).



Рис. 36.5. Якби електрон рухався навколо ядра планетарною орбітою, то відповідно до законів класичної фізики він мав би за 10^{-8} с упасти на ядро, а власне атом припинив би своє існування

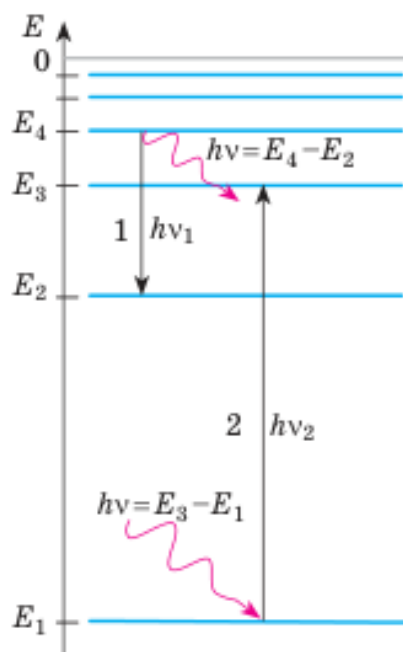


Рис. 36.6. Схема переходів атома з одного енергетичного стану в інший (переходи показано стрілками): у разі переходу на нижчий енергетичний рівень атом випромінює квант електромагнітної енергії (перехід 1), а поглинувши квант, атом стрибком переходить на вищий енергетичний рівень (перехід 2)

Зверніть увагу!

- Енергія будь-якого стаціонарного стану атома є від'ємною, оскільки зумовлена взаємодією електронної хмари і ядра атома, що мають заряди протилежних знаків.
- Енергію енергетичних станів атомів зазвичай подають в електрон-вольтах (eV), тому, розв'язуючи задачі, *сталу Планка* краще брати в електрон-вольт-секундах:

$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{с}$$

2 Постулати Н. Бора

Модифікацію планетарної моделі запропонував у 1913 р. данський фізик *Нільс Бор* (1885–1962), який був упевнений, що розглядати будову атома слід із точки зору квантових уявлень. Бор припустив існування особливих станів атомів і сформулював два постулати. Наведемо постулати Бора в сучасному формулюванні.

Перший постулат Н. Бора (про стаціонарні стани):

Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних (квантових) енергетичних станах, кожному з яких відповідає певне значення енергії; перебуваючи в стаціонарному стані, атом не випромінює енергію.

Другий постулат Н. Бора (про квантові стрибки):

При переході з одного стаціонарного енергетичного стану в інший атом випромінює або поглинає квант електромагнітної енергії:

$$h\nu = |E_k - E_m|,$$

де $h\nu$ — енергія кванта; E_k — енергія початкового стану атома; E_m — енергія стану, в який перейшов атом.

Випромінювання кванта енергії (фотона) відбувається внаслідок переходу атома зі стану з більшою енергією у стан із меншою енергією ($E_k > E_m$); у результаті *поглинання* кванта атом переходить зі стану з меншою енергією у стан із більшою енергією ($E_k < E_m$) (рис. 36.6).



Атом Гідрогену перейшов зі стану з енергією $-13,6$ eV у стан з енергією $-3,4$ eV. У цьому випадку атом поглинув фотон чи випромінив?

Для атома дійсно стійким є тільки *стаціонарний стан із найнижчим рівнем енергії* — **основний стан**, у якому атом може перебувати нескінченно довго. Щойно атом буде переведено у стан із вищим рівнем енергії, тобто щойно атом поглине фотон певної частоти, як цей атом довільно перейде в основний стан із випромінюванням фотона такої самої частоти або кількох фотонів менших частот. Саме тому всі стаціонарні стани атома, крім *основного*, називають **збудженими станами**.

Зверніть увагу! Стаціонарний стан атома означає, що його електрони певним (визначеним)

чином локалізовані в просторі: у Н. Бора йшлося про *орбіти електрона*, зараз ми говоримо про *орбіталі*. При квантовому переході атома з одного енергетичного стану в інший змінюється форма електронної хмари.

3 Фізичні основи квантової механіки

Формулюючи свої постулати, Н. Бор, як і Е. Резерфорд, спирався на уявлення, що електрон усередині атома поводить себе як частинка, що рухається певною орбітою. І в цьому була його помилка. Кількісна теорія, побудована Бором, виявилася недостатньою, щоб пояснити випромінювання складних атомів і випромінювання молекул, — учений зміг побудувати лише теорію випромінювання атома Гідрогену.

Річ у тім, що поведінка електрона всередині атома скоріше нагадує хвилю. «Але ж електрон — це частинка», — скажете ви і будете й праві, й не праві, адже електрон, як і світло, одночасно має властивості хвилі й частинки.

У 1924 р. французький фізик *Луї де Бройль* (1892–1987) висунув гіпотезу, згідно з якою *корпускулярно-хвильовий дуалізм є характерним не лише для фотонів, а й для будь-яких інших мікрочастинок*.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм — універсальна властивість матеріальних об'єктів, яка полягає в тому, що в поведінці того самого об'єкта можуть виявлятися і корпускулярні, і хвильові риси.

Уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм частинок лежить в основі *квантової механіки*, яка є одним із основних напрямів сучасної фізики.

За Луї де Бройлем, формули для розрахунку енергії ($E = h\nu$) та імпульсу ($p = \frac{h}{\lambda}$) слід вважати *універсальними* — такими, що справджуються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок.

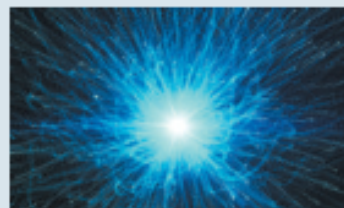
Кожній рухомій частинці відповідає певна хвиля — хвиля де Бройля, довжину якої визначають за формулою: $\lambda = \frac{h}{p}$.

Довжина хвилі де Бройля для всіх частинок виявляється дуже малою. Наприклад, для електронів, розігнаних до швидкості $7,3 \cdot 10^6$ м/с, вона дорівнює $1 \cdot 10^{-10}$ м (розмір атома), а для нейтронів, що вилітають з ядра Урану зі швидкістю $4 \cdot 10^6$ м/с під час його поділу, — лише $1 \cdot 10^{-13}$ м.

Разом із тим зараз експериментально виявлено хвильові властивості не тільки електронів та інших елементарних частинок (рис. 36.7), але й атомів і молекул.

Хвилі чи частинки?

І не хвилі,
і не частинки!



«Речовина і світло одночасно мають властивості хвилі і частинок, однак у цілому це не хвилі, й не частинки, і не суміш того й іншого. Наші механічні поняття не спроможні повністю охопити реальність, для цього недостатньо реальних образів».

Сергій Вавилов
(1891–1951)

*радянський фізик,
засновник школи
фізичної оптики*

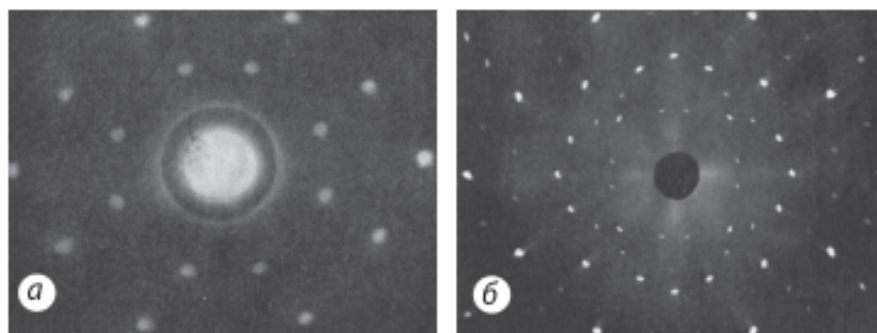


Рис. 36.7. Дифракція нейтронів (а) і рентгенівських променів (б) на монокристалі NaCl, який виконує функцію дифракційної ґратки

Квантова механіка, на відміну від класичної, використовує інший метод опису стану системи. У будь-якій задачі класичної механіки матеріальна точка (або тіло) має визначені координати, які характеризують її положення в просторі, та визначену швидкість (або імпульс). У квантовій механіці й координата, й імпульс одночасно визначаються лише з деякою точністю (Δx — невизначеність координати; Δp — невизначеність імпульсу), тобто можна знайти лише ймовірність виявлення об'єкта в певній ділянці простору, ймовірність наявності в об'єкта певного імпульсу.



Підбиваємо підсумки

- Дослідження, проведені фізиками в XIX ст., довели атомарну структуру речовини й підтвердили, що атом має складну будову.
- Експерименти під керівництвом Е. Резерфорда дозволили створити планетарну модель атома.
- Розвитком планетарної моделі атома стали постулати Бора, згідно з якими атоми можуть перебувати тільки в певних стаціонарних станах. У стаціонарному стані атом не випромінює електромагнітні хвилі. Випромінювання/поглинання електромагнітних хвиль (чітко визначеної частоти) відбувається тільки при переході атома з одного стаціонарного стану в інший.
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм є універсальною властивістю будь-яких матеріальних об'єктів. Хвильові властивості матеріального об'єкта, який має імпульс p , характеризує довжина хвилі де Бройля: $\lambda = \frac{h}{p}$.



Контрольні запитання

1. Опишіть модель атома Дж. Томсона.
2. Опишіть дослід під керівництвом Е. Резерфорда із розсіювання α -частинок атомами Ауруму. Яких висновків дійшов Резерфорд на підставі результатів цього досліді?
3. У чому розбіжність між моделями атомів, запропонованими Дж. Томсоном і Е. Резерфордом?
4. У чому недосконалість планетарної моделі атома?
5. Сформулюйте постулати Н. Бора.
6. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму?



Вправа № 36

1. На схемі енергетичних рівнів деякого атома (рис. 1) подано переходи цього атома з одного енергетичного стану в інший. Під час яких переходів атом випромінює фотон? поглинає фотон?
2. Під час якого переходу атома (див. рис. 1) частота випроміненого або поглиненого ним фотона є найбільшою? Під час якого переходу є більшою довжина хвилі?

3. Під час переходу атомів Меркурію в основний стан випромінюються фотони з енергією 4,5 еВ. Якою є довжина хвилі випромінювання?
4. На схемі енергетичних рівнів деякого атома (рис. 2) подано переходи цього атома з одного енергетичного стану в інший. Визначте, фотон якої енергії поглине атом, якщо перейде: а) зі стану E_1 у стан E_2 ; б) зі стану E_1 у стан E_4 . Відомо, що $\nu_{13} = 6 \cdot 10^{14}$ Гц, $\nu_{24} = 4 \cdot 10^{14}$ Гц, $\nu_{32} = 3 \cdot 10^{14}$ Гц.
5. У Великому адронному колайдері протони сягають швидкості, яка лише на 3 м/с менша від швидкості поширення світла у вакуумі. Визначте довжину хвилі де Бройля для цих протонів. Маса протона $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг.
6. Дізнайтесь, чому на рисунку на початку параграфа зображено трубку Крукса.

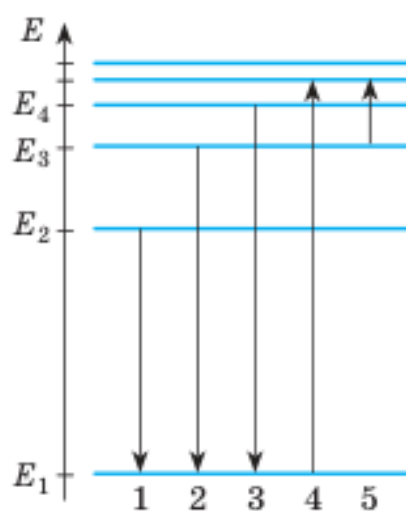


Рис. 1

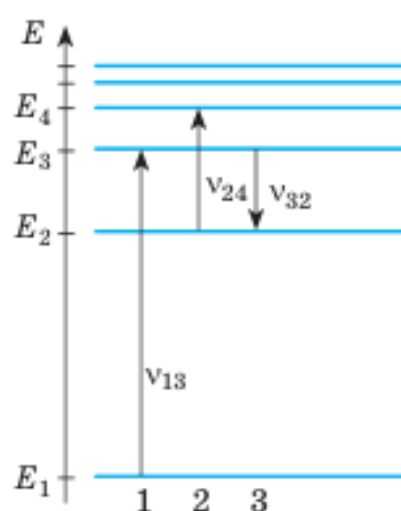


Рис. 2