§ 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?

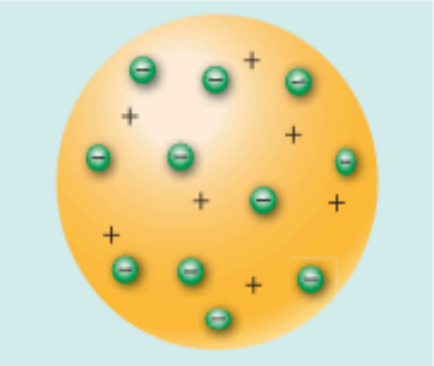


Рис. 36.1. Модель атома Томсона («пудинг із родзинками»)

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 дослідах, проведених під його керівництвом у 1908–1911 рр., вивчалося розсіювання α-частинок ядрами Ауруму.

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 сульфіду (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.

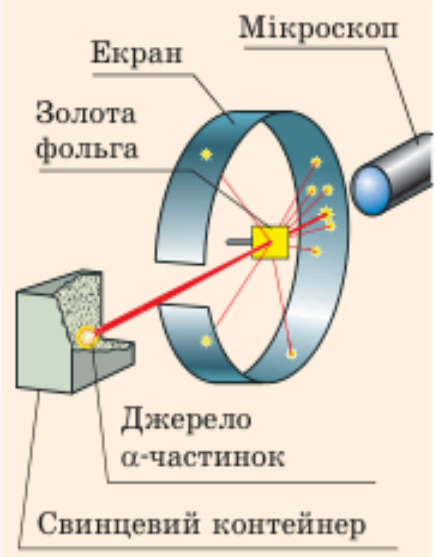


Рис. 36.2. Схема досліду з розсіювання α-частинок (дослід Резерфорда)

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

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 розсіяння α-частинок, Резерфорд запропонував **планетарну (ядерну) модель будови атома**: атом складається з позитивно зарядженого ядра, в якому зосереджена мало не 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...

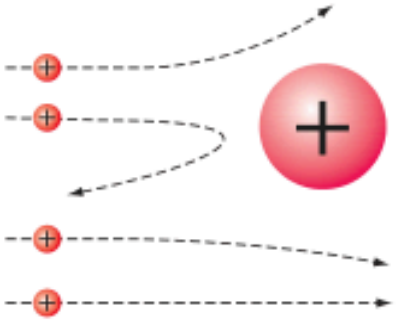


Рис. 36.3. Траєкторії α-частинок, що пролітають поряд із ядром Ауруму

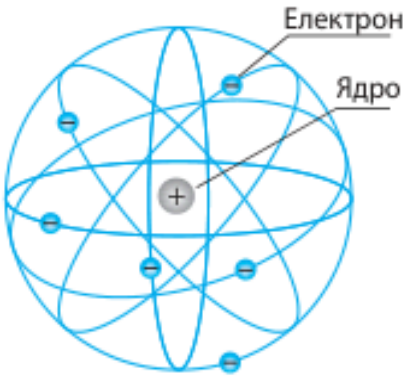


Рис. 36.4. Планетарна модель будови атома, запропонована Е. Резерфордом. Учений також розрахував розмір ядра: воно виявилося дуже малим — порядку 10^{-15} м, що в 100 000 разів менше, ніж розмір атома (10^{-10} м).

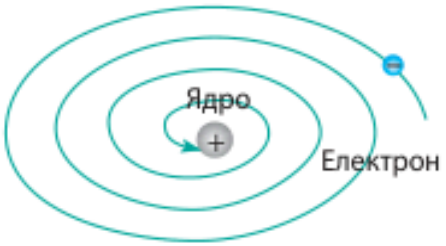


Рис. 36.5. Якби електрон рухався навколо ядра планетарною орбітою, то відповідно до законів класичної фізики він мав би за 10^{-8} с упасти на ядро, а власне атом припинив би своє існування

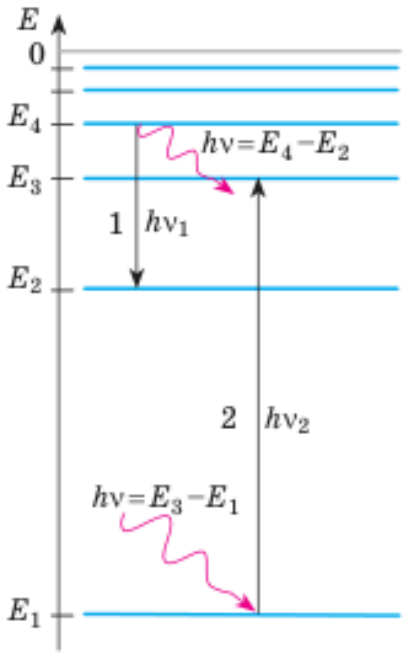


Рис. 36.6. Схема переходів атома з одного енергетичного стану в інший (переходи показано стрілками): у разі переходу на нижчий енергетичний рівень атом випромінює квант електромагнітної енергії (перехід 1), а поглинувши квант, атом стрибком переходить на вищий енергетичний рівень (перехід 2)

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 (еВ), тому, розв'язуючи задачі, *сталу Планка* краще брати в електрон-вольт-секундах:

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

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).

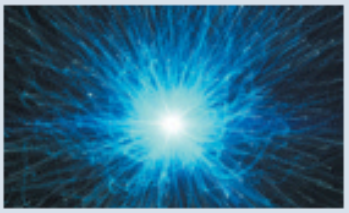
? Атом Гідрогену перейшов зі стану з енергією −13,6 еВ у стан з енергією −3,4 еВ. У цьому випадку атом поглинув фотон чи випромінив?

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.

Хвилі чи частинки? І не хвилі, і не частинки!



«Речовина і світло одночасно мають властивості хвиль 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

3 Фізичні основи квантової механіки

Формулюючи свої постулати, Н. Бор, як і Е. Резерфорд, спирався на уявлення, що електрон усередині атома поводиться 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 виявлятись 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.

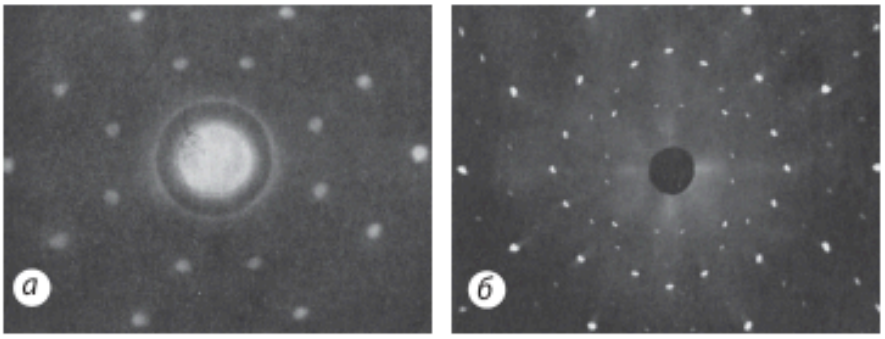


Рис. 36.7. Дифракція нейтронів (*а*) і рентгенівських променів (*б*) на монокристалі NaCl, який виконує функцію дифракційної ґратки

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 досліду? **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.

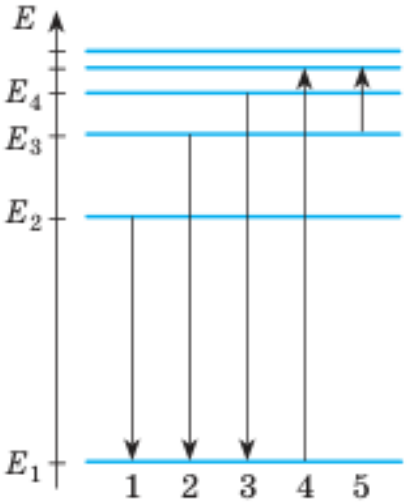


Рис. 1

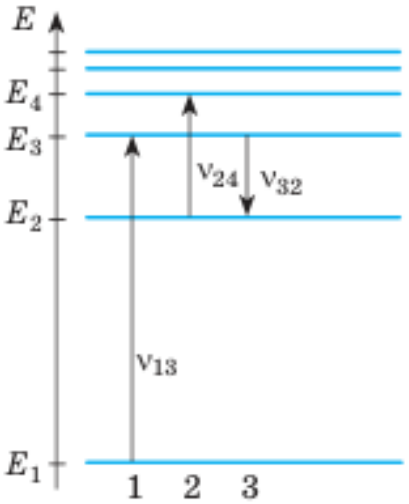


Рис. 2