АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

§ 64. Історія розвитку вчення про будову атома. Ядерна модель атома

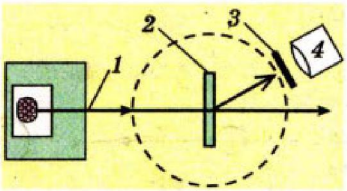
Наприкінці XIX і на початку XX ст. у фізиці було отримано кілька визначних дослідних фактів, які привернули увагу вчених до мікросвіту. Це відкриття рентгенівського випромінювання (1895 р., В.К. Рентген, І. Пулюй), радіоактивності (1896 р., А. Беккерель), електрона (1897 р., Дж.Дж. Томсон). Вони ставили під сумнів погляди давніх учених про неподільність атома, суперечили усталеним класичним уявленням про будову речовини, спонукали до поглиблення знань про явища, які відбуваються в мікросвіті. Так зародилася *атомна фізика*, яка вивчає будову і властивості атома, елементарні процеси на атомному рівні.

Для атомної фізики характерні відстані, сумірні з розміром атома (~ 10^{-10} м), та енергії порядку 10^{-19} Дж (кілька еВ).

У 1897 р. англійський фізик Дж.Дж. Томсон експериментально відкрив електрон як складову частинку атома і носія найменшого електричного заряду. Він припустив, що атом – це позитивно заряджена куля, всередині якої містяться нега-

Модель атома Томсона називають «пудинговою» – за аналогією з традиційним британським пирогом з родзинками.

www.testosvit.com



Мал. 5.1. Схема досліду Резерфорда

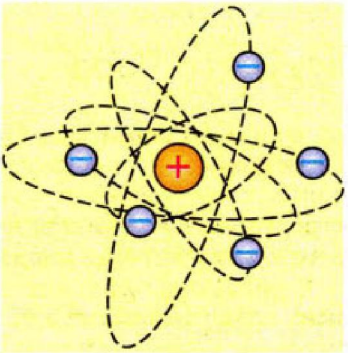
тивно заряджені електрони. Рівномірність їх розподілу в об'ємі кулі та рівність позитивного і негативного зарядів зумовлюють електричну нейтральність атома.

Проте така модель атома мала свої обмеження і не відповідала дослідним фактам, отриманим на той час фізиками. Запропонувати реальну модель атома вдалося лише після дослідів Е. Резерфорда і формулювання Н. Бором квантових постулатів.

У 1911 р. англійський фізик Е. Резерфорд, досліджуючи разом зі своїми співробітниками проходження α-частинками тонких металевих пластинок, установив, що ці заряджені частинки певним чином розсіюються в речовині (мал. 5.1). Вузький пучок швидких альфа-частинок *1* спрямовувався на тонку золоту чи платинову пластинку *2*, за якою розміщувався екран *3*, здатний фіксувати їх попадання на екран спалахами. За допомогою спеціального оптичного пристрою *4* можна було спостерігати і вимірювати кут відхилення φ альфа-частинок.

Альфа-частинки – це позитивно заряджені частинки, заряд яких дорівнює двом зарядам електрона, а маса в чотири рази більша за масу атома Гідрогену.

Більшість із них рухалася майже прямолінійно (кут відхилення φ становив 1–2°). Проте незначна їх частина відхилялася на більші кути; були зафіксовані навіть такі альфа-частинки, які після розсіювання змінювали напрям руху на протилежний (φ > 90°).



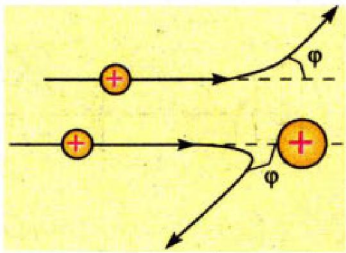
Мал. 5.2. Ядерна модель атома

Щоб пояснити одержані результати, Резерфорд припустив, що атом є складним утворенням, схожим на Сонячну систему: **всередині його міститься позитивно заряджене ядро, навколо якого обертаються електрони** (мал. 5.2). Його розрахунки показали, що в ядрі зосереджена практично вся маса атома, але його розміри набагато менші за самий атом. Вимірювання показали, що лінійні розміри атома ста-

www.testosvit.com

новлять 10^{-10} м, а радіус його ядра дорівнює приблизно 10^{-15} м.

Таким чином, на підставі одержаних експериментальних даних Е. Резерфорд запропонував *ядерну модель атома*, яка узгоджувалася з результатами його дослідів і пояснювала багато інших явищ, пов'язаних із будовою атома.



Мал. 5.3. Траєкторія α-частинок

Справді, швидкі α-частинки легко долають простір електронних оболонок атомів, не відчуваючи з їх боку значного впливу, і тому майже не відхиляються від прямолінійної траєкторії руху. Проте, коли вони пролітають досить близько від позитивно зарядженого ядра, кулонівська взаємодія між ними змушує їх викривляти траєкторію і відхилятися на певний кут (мал. 5.3).

Резерфорд на основі законів електромагнітної взаємодії вивів формулу, яка дає змогу обчислити кількість α-частинок, розсіяних на кут φ, залежно від їх енергії і хімічної природи досліджуваного матеріалу. Пізніше ця теоретично виведена формула дістала експериментальне підтвердження, унаслідок чого остаточно утвердила в фізиці ядерну модель атома.

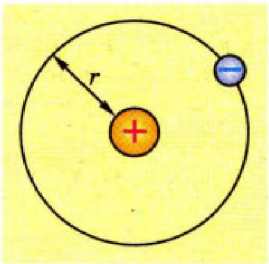
1. Які відкриття стали поштовхом у розвитку сучасної фізики?
2. У чому полягає суть дослідів Резерфорда?
3. Чим відрізняється ядерна модель атома, запропонована Резерфордом, від «пудингової» моделі Томсона?
4. Чому окремі α-частинки в дослідах Резерфорда відхилялися від прямолінійної траєкторії руху?

§ 65. Квантові постулати Бора

Тріумф класичної фізики в поясненні складної будови мікросвіту, який привів Е. Резерфорда до ядерної моделі атома, тривав недовго. При першій же спробі застосувати закони класичної механіки та електродинаміки до опису найпростішого атома Гідрогену фізики зустрілися з труднощами, які здавалися нездоланними.

Як відомо, атом Гідрогену є стійким утворенням, яке складається з ядра-протона і одного електрона, що обертається навколо нього під дією кулонівської сили взаємодії (мал. 5.4).

www.testosvit.com



Мал. 5.4. Модель атома Гідрогену

Якщо вважати орбіту електрона коловою, то одержимо

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}.$$

З теорії електродинаміки Дж. Максвелла відомо, що електрон, який рухається з прискоренням, повинен випромінювати електромагнітні хвилі і поступово втрачати енергію. Тобто із часом він має впасти на ядро, і атом припинить існування. Таким чином, за класичними міркуваннями, атоми повинні бути нестійкими утвореннями, які весь час випромінюють суцільний спектр електромагнітних хвиль. Проте цей висновок суперечить практиці, адже насправді вони «живуть» тривалий час і випромінюють енергію лише за певних умов.

Це протиріччя між класичною теорією і практикою спростував у 1913 р. відомий данський учений Нільс Бор, сформулювавши *квантові постулати*:

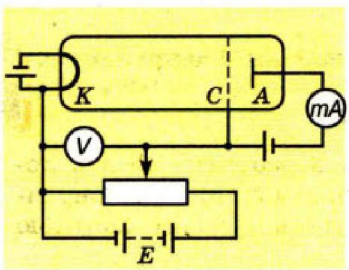
1) атоми перебувають у певних стаціонарних станах, у яких вони не випромінюють електромагнітні хвилі;

2) при переході атома з одного стаціонарного стану, що характеризується енергією E_n, в інший з енергією E_m він випромінює або поглинає квант, що дорівнює:

$$h\nu = E_n - E_m.$$

При розмірі атома $r \approx 10^{-10}$ м швидкість електрона дорівнюватиме $v \approx 10^6$ м/с, а його прискорення $a \approx 10^{22}$ м/с².

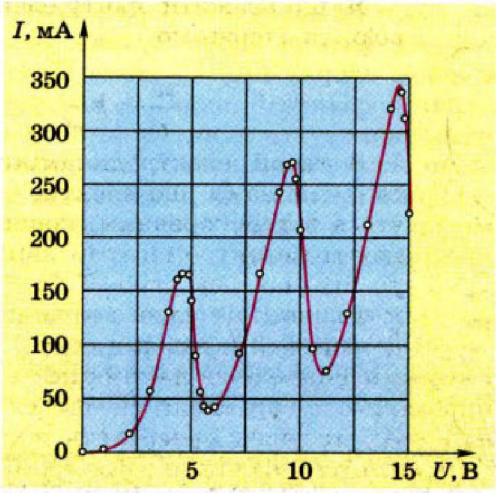
Перший постулат Бора, який спростовував фундаментальні положення класичної фізики, був експериментально підтверджений у 1913 р. дослідами Д. Франка і Г. Герца. Вони досліджували залежність сили струму від напруги у скляній колбі, заповненій парами ртуті (мал. 5.5).



Мал. 5.5. Схема досліду Д. Франка і Г. Герца

Електрони з катода K під дією електричного поля прямують до сітки C і анода A. Між сіткою C і анодом A існує незначна напруга (0,5 В), яка гальмує повільні електрони, не даючи змоги їм досягати анода.

www.testosvit.com



Мал. 5.6. Залежність сили струму від напруги в досліді Франка і Герца

Результати дослідження залежності сили струму I в колі анода від напруги U показали, що ця залежність має нелінійний складний характер (мал. 5.6). Існування максимумів струму при напрузі 4,9 В, 9,8 В і 14,7 В може бути пояснено лише однією причиною – існуванням в атомів ртуті стаціонарних станів. Дійсно, при напрузі $U < 4{,}9$ В електрони, що вилетіли з катода, зіткнувшись з атомами ртуті, практично не змінюють своєї енергії ($m_e << M_{Hg}$) і легко долають гальмівну напругу між сіткою і анодом. При напрузі $U = 4{,}9$ В відбувається їх непружне зіткнення і електрони втрачають енергію, збуджуючи атоми ртуті; їхньої енергії недостатньо для подолання гальмівної напруги, і сила струму в колі анода різко спадає. При подальшому зростанні напруги між катодом K і сіткою C сила анодного струму знову зростає, досягаючи максимуму при 9,8 В, тобто енергія атома ртуті змінюється на значення, кратне енергії 4,9 еВ.

Електрон-вольт **(еВ) – це енергія, якої набуває електрон під дією напруги 1 В:**

$$1 \text{ еВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

У збудженому стані атоми можуть перебувати досить короткий час ($\approx 10^{-8}$ с), після чого мусять самочинно повернутися в основний стан, випромінюючи світловий квант частотою $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$. У дослідах Франка і Герца при напрузі 4,9 В спостерігалося ультрафіолетове світіння парів ртуті, що остаточно підтвердило справедливість квантових постулатів Бора.

www.testosvit.com

Таким чином, квантові постулати Бора остаточно розв'язали труднощі класичної фізики щодо будови речовини. Вони пов'язали між собою ядерну модель атома Резерфорда, побудовану на класичній фізичній теорії, і квантовий характер змін, якому підпорядковується внутрішній стан атома, що було підтверджено експериментально. Їхнє значення для розвитку сучасної фізики проявилося пізніше, під час становлення квантової механіки, в основу якої покладена ідея квантування деяких фізичних величин.

1. Чому виникли труднощі у класичному поясненні ядерної моделі атома? У чому вони виявилися?
2. Чому постулати Бора вважаються квантовими?
3. Які дослідні факти підтверджують справедливість квантових постулатів Бора?
4. У чому полягає суть досліду Д. Франка і Г. Герца?
5. Яке значення мають квантові постулати Бора для сучасної фізики?

§ 66. Поглинання і випромінювання світла атомом. Оптичні спектри

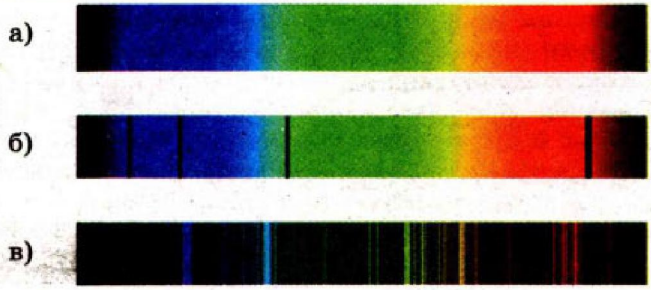
Електромагнітне випромінення будь-якої природи характеризується діапазоном частот, в яких воно виявляє певні свої властивості. В оптичному діапазоні залежно від характеру поширення електромагнітних хвиль виокремлюють *спектри випромінювання, спектри поглинання, спектри розсіяння і спектри відбивання.*

Оптичні спектри випромінювання спостерігаються у джерел світла, які випускають фотони внаслідок збудження речовини під впливом зовнішнього чинника. Наприклад, розжарена вольфрамова нитка електричної лампи випромінює світло внаслідок проходження по ній електричного струму. Останні три види спектрів спостерігаються при проходженні випромінення крізь речовину, внаслідок чого відбувається його поглинання, розсіювання або відбивання залежно від довжини хвилі λ або частоти ν.

Оптичні спектри поглинання, розсіювання і відбивання характеризують властивості речовини.

Оптичні спектри спостерігають візуально за допомогою спектральних приладів і фіксують як правило фотографічним способом або за допомогою фотоелементів. Вони можуть бути (мал. 5.7):

www.testosvit.com



Мал. 5.7. Види оптичних спектрів

а) *суцільними*, що охоплюють широкий діапазон довжин хвиль;

б) *лінійчастими* поглинання, що складаються з окремих спектральних ліній певної довжини хвилі λ;

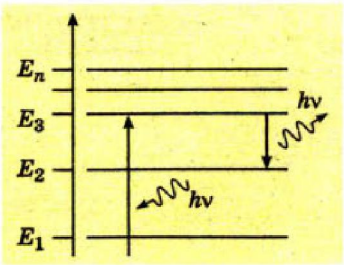
в) *лінійчастими* випромінювання – набором окремих спектральних ліній, що випромінюють атоми певного хімічного елемента.

Суцільний оптичний спектр можливий за умови термодинамічної рівноваги речовини і випромінювання за даної температури. Проте в реальних умовах досягти такого стану практично неможливо, тому найчастіше спостерігають одночасно різні види спектрів. Так, за звичайних умов сонячне світло спостерігається в спектроскопі у вигляді суцільного спектра з темними лініями поглинання.

Механізм утворення суцільних оптичних спектрів спроможна пояснити класична теорія Дж. Максвелла. За її тлумаченням поглинуте електромагнітне випромінення збуджує в речовині хвилі, частота яких відповідає частоті падаючого світла.

За класичною теорією монохроматичне світло збуджуватиме хвилі певної частоти, а природне світло утворюватиме суцільний спектр випромінювання.

Проте класична фізика виявилася безсилою для пояснення лінійчастих спектрів випромінювання та поглинання світла атомами і молекулами. Їхню природу можна зрозуміти лише на основі квантових постулатів Бора, завдяки інтерпретації квантових переходів між рівнями енергії в атомах і молекулах.



Мал. 5.8. Енергетичні рівні атома

Для наочного представлення станів атома використовують енерге-

www.testosvit.com

тичні діаграми, на яких рівні енергії позначають горизонтальними лініями (мал. 5.8). Доволі довго атом може перебувати лише в основному стаціонарному стані, що характеризується мінімальною енергією E_1. Решта станів атома чи молекули (E_2, E_3, ..., E_n) є стаціонарними лише умовно і тому їх називають *збудженими станами*. Наприклад, якщо незбуджений атом поглинає квант $h\nu$, то може відбутися його перехід в умовно стабільний, збуджений стан E_3; але згодом, випромінюючи квант частотою $\nu = \frac{E_3 - E_2}{h}$, атом може перейти в більш стабільний стан E_2. Слід підкреслити, що випромінювання відбувається при квантовому переході атома зі стану з більшою енергією в стан з меншою енергією, і навпаки, поглинання енергії атомом супроводжується його переходом зі стану з меншою енергією в стан з більшою енергією.

Перехід атома з одного енергетичного стану в інший стрибком, що задовольняє умову другого постулату Бора, називається квантовим переходом.

Молекулярні спектри характеризуються сукупністю смуг, за набором яких можна отримати інформацію про склад і структуру молекули, стан її електронних оболонок. Тому їх дослідження широко використовуються в хімії, в спектральному аналізі речовин.

1. Які існують оптичні спектри залежно від характеру поширення електромагнітних хвиль?
2. Які бувають види спектрів?
3. Як можна пояснити природу лінійчастих спектрів?
4. Які переходи атома супроводжуються поглинанням світла, а які – випромінюванням?

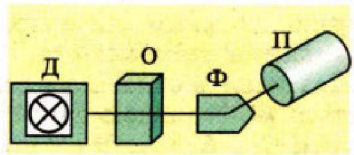
§ 67. Спектральний аналіз та його застосування

Вивчення атомних і молекулярних спектрів випромінювання і поглинання покладено в основу спеціальних методів дослідження складу і будови речовини – *спектрального аналізу*. Він ґрунтується на кількісних і якісних методах дослідження спектрів електромагнітного випромінення, які спостерігаються в речовин, за допомогою спеціальних приладів – *спектрометрів*.

Принцип дії цих приладів ґрунтується на їх здатності виокремлювати в просторі і часі з усього світлового потоку певні

www.testosvit.com

ділянки випромінення, які можна фіксувати фотографічним способом або вимірювати різні їхні характеристики – зміну світлового потоку, довжину хвилі спектральної лінії тощо (мал. 5.9). Тому головним їх елементом є селективний пристрій Ф (дисперсійна призма, дифракційна решітка, інтерферометр тощо), за допомогою якого вдається виділити частину спектра в певному інтервалі довжин хвиль.



Мал. 5.9. Схема спектрометра

Метод визначення якісного складу і кількісного вмісту речовини за її спектром називається *спектральним аналізом.*

Для вивчення спектрів поглинання світловий потік від джерела Д спрямовується на досліджуваний об'єкт О, після проходження якого він потрапляє на селективний пристрій Ф. Виокремлена певним способом частина спектра фіксується пристроями відображення П (скануючі екрани, фотоелементи, фотоплівки тощо). Далі характеристики випромінення порівнюються з отриманим спектром і залежно від обраного методу спектроскопії на підставі їхнього аналізу робляться висновки щодо досліджуваних спектрів поглинання.

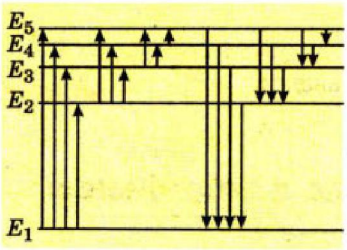
Кожний хімічний елемент має власний набір спектральних ліній, притаманний лише йому одному.

За допомогою атомного спектрального аналізу визначають елементний склад зразка, порівнюючи його спектр зі спектральними лініями хімічних елементів, що подані в спеціальних таблицях і атласах. Для отримання спектра випромінювання досліджувану речовину необхідно перевести в газоподібний стан і активізувати, тобто перевести її атоми у збуджений стан. Найпростіше це можна зробити за допомогою нагрівання досліджуваного зразка, наприклад помістивши його в полум'я.

Якщо досліджувана речовина перебуває в газоподібному стані, для отримання її лінійчастого спектра використовують іскровий розряд: за високої напруги на електродах у газовому середовищі виникає електричний розряд, у стовпі якого атоми досліджуваної речовини активізуються. Для спектрального аналізу твердих тіл часто застосовують дуговий розряд: досліджуваний зразок у плазмі дуги перетворюється в пару високої температури.

При високих температурах атоми переходять у збуджений стан E_2, E_3, E_4, E_5, в якому можуть перебувати недовго

www.testosvit.com



Мал. 5.10. Енергетична діаграма утворення лінійчастого спектра

(мал. 5.10). З часом вони повертаються у свій основний, стабільний стан E_1, випромінюючи при цьому світловий квант певної частоти:

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Кожний хімічний елемент має свій, властивий лише йому набір спектральних ліній – атомний спектр. За одержаними лініями атомного спектра зразка за допомогою спеціальних таблиць, в яких наведено серії довжин хвиль спектрів випромінювання різних речовин, визначають хімічний склад цього зразка.

В основі молекулярного спектрального аналізу лежить порівняння виміряного спектра зразка зі спектрами окремих індивідуальних речовин. Молекулярні спектри схожі з атомними – вони також лінійчасті, проте мають свої особливості – спектральних ліній більше і вони утворюють доволі широкі смуги. Це пояснюється тим, що енергетичні рівні атомів, що складають молекулу, розщеплюються, адже їх енергія зумовлена двома чинниками – власними коливаннями атомів у молекулі та її обертанням.

Лінійчастий атомний і смугастий молекулярний спектри відтворюють можливі електронні переходи з одного енергетичного рівня на інші.

Спектр молекули є її однозначною характеристикою. Завдяки цьому здійснюється ідентифікація речовин. Її кількісний вміст визначається за інтенсивністю випромінювання смугастого спектра. Зокрема, застосування сучасних фотоелектричних приладів разом з обчислювальною технікою дає змогу визначати вміст речовини в досить малих кількостях – до 1 мкг і менше. Тому цей метод знайшов широке застосування в науці і техніці. Зокрема, в металургійному виробництві за його допомогою контролюють вміст домішок у сплавах, щоб отримувати матеріали із заданими властивостями.

Спектральний аналіз дає змогу визначати хімічний склад і рух небесних тіл, які перебувають далеко за межами нашої галактики.

У гірничодобувній промисловості за допомогою спектрального аналізу визначають хімічний склад зразків корисних копалин.

www.testosvit.com