

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 ($m_e \ll M_{\text{Hg}}$) 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 спостерігалось ультрафіолетове світіння парів ртуті, що остаточно підтвердило справедливність квантових постулатів Бора.


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 проявилось 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 випромінювання 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 випромінювання 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):



Мал. 5.7. Вуги 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.

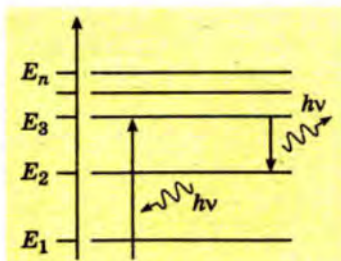
Суцільний оптичний спектр можливий за умови термодинамічної рівноваги речовини і випромінювання за даної температури. Проте в реальних умовах досягти такого стану практично неможливо, тому найчастіше спостерігають одночасно різні види спектрів. Так, за звичайних умов сонячне світло спостерігається в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

Для наочного представлення станів атома використовують енерге-



Мал. 5.8. Енергетичні рівні атома

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, \dots, 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.



210

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.



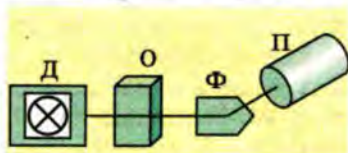
1. Які існують оптичні спектри залежно від характеру поширення електромагнітних хвиль?
2. Які бувають види спектрів?
3. Як можна пояснити природу лінійчастих спектрів?
4. Які переходи атома супроводжуються поглинанням світла, а які – випромінюванням?

§ 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 випромінювання, 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

ділянки випромінювання, 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*.

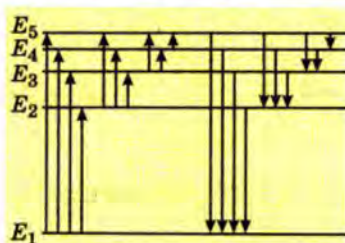
Для вивчення спектрів поглинання світловий потік від джерела Д спрямовується на досліджуваний об'єкт О, після проходження якого він потрапляє на селективний пристрій Ф. Виокремлена певним способом частина спектра фіксується пристроями відображення П (скануючі екрани, фотоелементи, фотоплівки тощо). Далі характеристики випромінювання 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



Мал. 5.10. Енергетична діаграма утворення лінійчастого спектра

гою 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.

212

(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,



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.

1. Що таке спектральний аналіз?
2. Який принцип покладено в основу дії спектральних приладів?
3. Для чого застосовують спектральний аналіз?

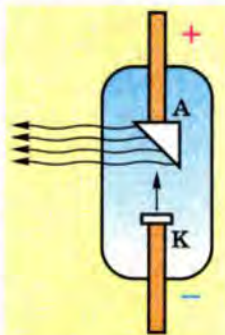
§ 68. Рентгенівське випромінювання

Серед усіх видів електромагнітних випромінень особливе місце посідають рентгенівські промені. У повсякденному житті ми часто стикаємося з цією назвою, особливо тоді, коли довідуємося про стан свого здоров'я, проходячи обстеження в спеціальному «рентгенівському» кабінеті лікарні чи поліклініки. Довжина хвилі цього випромінювання менша від 6 нм.

Для генерування рентгенівського випромінювання застосовують спеціальні електронні прилади, які називають *рентгенівськими трубками* (мал. 5.11). Це скляний або металевий балон, з якого викачано повітря.

У балон умонтовано два електроди, один з яких (катод К) підігрівається спеціальною спіраллю, по якій пропускають електричний струм. Унаслідок нагрівання з катода вилітає потік електронів і навколо нього утворюється електронна хмарка. Якщо між катодом і другим електродом (анодом А) прикласти високу напругу, то електрони почнуть прискорено рухатися від катода до анода. При потраплянні на анод унаслідок різкого гальмування вони випромінюватимуть промені, які дістали назву рентгенівських. Спектр частот цього випромінювання досить широкий і містить різні довжини хвиль, а тому може бути суцільним. Це пояснюють тим, що електрони, які потрапляють на анод, мають різні швидкості. Разом з тим збільшення прискорювальної напруги між анодом і катодом зумовлює розширення спектра, в якому утворюються промені все меншої довжини хвиль. За досить високої напруги починає переважати випромінювання певних довжин хвиль, яке утворює так званий *характеристичний спектр* рентгенівського випромінювання. За допомогою такого спектра визначають внутрішню будову речовини та її хімічний склад.

Спосіб вимірювання довжини хвиль рентгенівського випромінювання запропонував німецький фізик М. Лауе в 1912 р.



Мал. 5.11. Схема будови рентгенівської трубки

У його основу покладено явище дифракції цих хвиль на природних кристалах, які для рентгенівських променів є своєрідними дифракційними ґратками.

Цікава сама історія відкриття рентгенівських променів. Перші вакуумні трубки для одержання Х-променів (таку назву спочатку мало рентгенівське випромінення) були створені видатним фізиком, українцем за походженням Іваном Пулюєм, який тривалий час жив і працював у Австрії.



Пулюй Іван Павлович (1845–1918) – видатний український фізик і громадський діяч. Наукові праці присвячені дослідженню електричного струму у вакуумі. Відкрив Х-промені, які згодом назвали рентгенівськими, зробив вагомий внесок у розвиток електротехніки.

Він першим довів, що випромінювання з вакуумних трубок, якими проходить електричний струм, має хвильові властивості. Учений не лише встановив їхню природу, а й дослідив їхні основні властивості. Одержані І. Пулюєм фотознімки внутрішніх органів людини дотепер публікуються в навчальній літературі як приклад. Однак сталося так, що про відкриття нового виду електромагнітного випромінення першим повідомив німецький фізик В. Рентген у 1895 р. Після публікацій В. Рентгена відкрите випромінення почали називати рентгенівським.



Рентген Вільгельм Конрад (1845–1923) – німецький фізик-експериментатор, лауреат Нобелівської премії 1901 р. У 1895 р. опублікував повідомлення про відкриття Х-променів, названих пізніше рентгенівськими. Значна частина праць присвячена дослідженню рентгенівських променів, рідин, газів, кристалів, електромагнітних явищ.

Рентгенівське випромінення має велику проникну здатність, тому його використовують у промисловості для дослідження внутрішньої будови та виявлення дефектів металевих деталей.

Це випромінення чинить сильну фізіологічну дію на людський організм і може за тривалого впливу спричинити важкі недуги. У зв'язку з цим лікарі не рекомендують тривалий час знаходитися поблизу електронних приладів, які працюють при високій напрузі, наприклад електронно-променевих кінескопів телевізора чи дисплеїв комп'ютера. Оскільки елек-

трони в кінескопі прискорюються високою напругою (десятки тисяч вольт), то від екрана, на який потрапляють електрони, поширюються «м'які» рентгенівські промені. Хоча їхня інтенсивність незначна, на відміну від спеціально виготовлених рентгенівських трубок, однак тривала дія на організм людини може призвести до поганих наслідків.

1. Яке електромагнітне випромінення називають рентгенівським?
2. Як одержують рентгенівське випромінення?
3. Які основні властивості рентгенівського випромінення?
4. Хто з учених відкрив рентгенівські промені?
5. Де застосовують рентгенівські промені?
6. Чи можна змінювати довжину хвилі рентгенівського випромінення і як?
7. Яким способом вимірюють довжину хвилі рентгенівського випромінення?
8. Чим відрізняється характеристичний спектр рентгенівського випромінення від суцільного?



§ 69. Квантові генератори. Лазери та їх застосування

215

Як уже зазначалося, атом не може тривалий час перебувати у збудженому стані – через деякий час (приблизно протягом 10^{-8} с) він перейде в умовно стабільний або стабільний стан. Такий самочинний його перехід з одного енергетичного стану в інший супроводжується як правило спонтанним випромінюванням кванта світла певної частоти. Оскільки це відбувається довільно кожним атомом, то за звичайних умов спостерігається *спонтанне випромінювання* світла атомами, яке в сукупності є різночастотним, немонохроматичним і некогерентним за своєю природою.

Електромагнітне випромінення певної частоти (довжини хвилі) називається монохроматичним; випромінювання, що має однакову фазу, є когерентним.



У 1917 р. А. Ейнштейн припустив, що випромінювання за певних умов може бути вимушеним. Зокрема, якщо електрон в атомі переходить з одного енергетичного рівня на інший під дією зовнішнього електромагнітного поля, частота якого збігається з власною частотою квантового переходу електрона

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$$
, то випромінення буде *індукованим*.



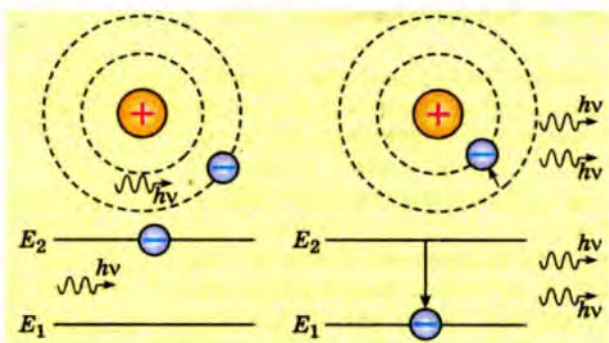
Індуковане електромагнітне випромінювання є монохроматичним і когерентним.

Особливістю такого випромінювання є те, що воно поширюється в тому самому напрямі, що й падаюче світло, є монохроматичним і когерентним з ним, тобто не відрізняється від поглинутої атомом електромагнітної хвилі ні частотою, ні фазою, ні поляризацією. Тобто внаслідок проходження електромагнітної хвилі крізь речовину може відбуватися когерентне підсилення світла за рахунок індукованого випромінювання фотонів (мал. 5.12).

Таке підсилення можливе лише в тому випадку, якщо більшість атомів речовини перебуває у збудженому метастабільному стані. З цією метою можуть використовуватися різні способи активізації речовини. Зокрема, в рубінових лазерах це робиться за допомогою потужної лампи, яка змушує електрон до квантового переходу на більш високий рівень за рахунок поглинання фотона. У такому стані атом може перебувати недовго, і тому через деякий час він повертається до стабільного стану, випромінюючи при цьому світло із частотою падаючого

випромінювання: $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$. Це явище, передбачене ще А. Ейнштейном, лягло в основу принципу дії квантових генераторів і підсилювачів.

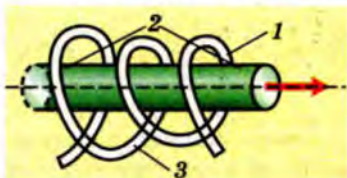
У 1954 р. російськими вченими М.Г. Басовим і О.М. Прохоровим та незалежно від них у 1955 р. американським фізиком Ч. Таунсом був створений перший квантовий підсилювач електромагнітного випромінювання в діапазоні радіохвиль – так званий мазер. У 1964 р. вони отримали Нобелівську премію за фундаментальні роботи в галузі квантової електроніки.



Мал. 5.12. Підсилення світла вимушеним випромінюванням

У 1960 р. американський фізик Т. Мейман створив на кристалі рубіна перший квантовий генератор оптичного діапазону, названий *лазером*.

Рубіновий лазер складається з кристалу рубіна (оксид алюмінію Al_2O_3 з домішками хрому), виготовленого у формі стрижня 1 з плоскопаралельними торцями 2 (мал. 5.13). Один з торців роблять дзеркальним, а другий – напівпрозорим. Рубіновий стрижень охоплює спіральна газорозрядна лампа 3 імпульсного режиму, у спектрі випромінювання якої є електромагнітна хвиля збуджуючої частоти.



Мал. 5.13. Бугова лазера

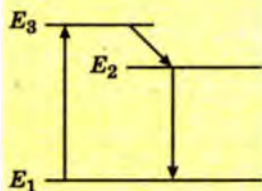
Лазер – абревіатура слів англійського виразу «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» (підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання).

Атом хрому в кристалі рубіну, поглинаючи фотон з довжиною хвилі 560 нм, активізується і переходить з основного, стабільного стану E_1 у збуджений з енергією E_3 (мал. 5.14). У такому стані він перебуває недовго (приблизно 10^{-8} с), після чого самочинно переходить на метастабільний рівень E_2 , в якому перебуває більш тривалий час (приблизно 10^{-3} с). Така трирівнева система активізації рубіну дає змогу насичувати його метастабільний енергетичний рівень. Завдяки тому, що більшість атомів хрому перебуває в збудженому стані, можливе підсилення світла за рахунок вимушеного електромагнітного випромінювання внаслідок квантового переходу атома з метастабільного енергетичного рівня E_2 на основний з енергією E_1 .

Лазерний промінь, спрямований із Землі на Місяць, висвітлює на його поверхні площу діаметром 3 см.

У підсиленні основну роль відіграють хвилі, що прямують уздовж осі стрижня. Багаторазово віддзеркалюючись від плоскопаралельних торців, вони створюють інтенсивне монохроматичне когерентне випромінювання.

Лазерне випромінювання світла характеризується певними властивостями, які вирізняють його серед інших джерел світла. Насамперед це вузькоспрямоване проміння з малим кутом розходження (до 10^{-5} рад). Завдяки цьому можлива



Мал. 5.14. Трирівнева система збудження рубінового кристала

точна локалізація променя і його вибіркова дія на атоми, йони, молекули, яка викликає фотохімічні реакції, фотодисоціацію та інші фотоелектричні явища, що використовуються в лазерній хімії, у технологіях запису інформації на лазерних дисках, у лікуванні зору тощо.



За допомогою лазерів можна досягати інтенсивності короткочасних імпульсів $10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$, що перевищує випромінювання Сонця в 10^{10} разів.

Виняткова монохроматичність і когерентність лазерного випромінювання дає змогу використовувати його в побудові стандартів частоти, спектроскопії, голографії, волоконній оптиці, в астрофізичних дослідженнях небесних тіл тощо. Наприклад, за допомогою лазерної локації вдалося уточнити параметри руху Місяця і Венери, швидкість обертання Меркурія, наявність атмосфери у планет.

218

Висока сконцентрованість енергії лазерного променя дає можливість досягати значної інтенсивності випромінювання, надвисоких температур і тисків, що використовується нині в зварюванні і плавленні металів, при одержанні надчистих матеріалів, у лазерній хірургії, під час термоядерного синтезу.

З появою лазерів утворилися такі нові розділи фізики, як нелінійна оптика і голографія.



1. Яке випромінювання називається індукованим?
2. Чим відрізняється спонтанне випромінювання від індукованого?
3. У чому полягає механізм підсилення світла завдяки вимушеному випромінюванню?
4. Який принцип дії рубінового лазера?
5. Які основні властивості лазерного випромінювання?
6. Наведіть приклади лазерних технологій.

Вправа 32

1. Обчислити кінетичну, потенціальну і повну енергію електрона атома Гідрогену, якщо радіус його орбіти дорівнює $5,29 \cdot 10^{-11}$ м.

2. Під час квантового переходу енергія атома змінилася на 2,5 еВ. Чому дорівнює частота і довжина хвилі випромінювання?

3. Світло якої довжини хвилі випромінює атом Гідрогену при квантовому переході з п'ятого на другий рівень?

4. Визначити мінімальну енергію збудження атома Гідрогену, якщо його енергія у незбудженому стані дорівнює 13,55 еВ.

§ 70. Атомне ядро

Відкриття в 1896 р. французьким фізиком А. Беккерелем природної радіоактивності солей урану та подальше дослідження цього явища П. Кюрі та М. Склодовською-Кюрі поклали початок розвитку *ядерної фізики*.

Для ядерної фізики характерні відстані, сумірні з розміром ядра ($\sim 10^{-15}$ м), та енергії від мегаелектрон-вольтів (MeV) до гігаелектрон-вольтів (GeV).

Досліди Е. Резерфорда, які утвердили ядерну модель атома, показали, що практично вся маса атома зосереджена в його ядрі, яке має позитивний заряд. Подальші його дослідження взаємодії альфа-частинок з атомами азоту привели до відкриття *протона* – другої елементарної частинки, відкритої після електрона. Згодом з'ясувалося, що до складу атомних ядер входить також ще одна частинка – нейтрон.

Протон (від грец. *prótos* – перший) – елементарна частинка, що складає ядро атома Гідрогену і має позитивний заряд, що дорівнює заряду електрона.

Вивчення властивостей протона показало, що він має позитивний заряд, який чисельно дорівнює заряду електрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; його маса $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг. Оскільки в ядерній фізиці прийнято користуватися атомною одиницею маси (а. о. м.) та її енергетичним еквівалентом електрон-вольт (eV), маса спокою протона дорівнюватиме $m_p = 1,007276470$ а. о. м. = 938,2796 MeV.

Ізотопи (від грец. *isos* – однаковий і *tópos* – місце) – різновиди одного й того самого хімічного елемента, що відрізняються атомними масами.

Відкриття на початку ХХ ст. ізоотопів засвідчило, що їхні атомні маси кратні масі ядра Гідрогену. Тому Е. Резерфорд припустив, що ядра всіх хімічних елементів складаються з протонів. Протонно-електронна модель атома добре узгоджувалася з експериментальними даними щодо властивостей Гідро-

гену. Проте вона зіткнулася з низкою труднощів при поясненні будови ядер більш важких хімічних елементів. Тому Резерфордом було висунуто припущення про існування *нейтронів* – елементарних частинок, які також входять до складу ядра.

Нейтрон (англ. *neutron*, від лат. *neuter* – ні той ні цей), тобто такий, що не має електричного заряду.

У 1932 р. англійський фізик Дж. Чедвік, досліджуючи властивості випромінювання, яке виникає під час бомбардування берилію альфа-частинками, встановив, що це потік нейтральних частинок, маса яких приблизно дорівнює масі протона. Вимірювання показали, що маса спокою нейтрона $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008665012 а. о. м. = 939,5731 МеВ.

Водночас український учений Д.Д. Іваненко (народився в м. Полтаві) і німецький фізик В. Гейзенберг незалежно один від одного запропонували *протонно-нейтронну модель* ядра атома. Вони висловили припущення, що атомне ядро утворюють *нуклони* – протони і нейтрони, які розміщуються певними групами, утворюючи ядерні оболонки. Кожний нуклон, знаходячись у певній оболонці, перебуває в певному квантовому стані, який характеризується його енергією та набором інших квантових величин (спіном, орбітальним моментом, парністю стану), що однозначно його визначають.

220

У сучасній фізиці протони і нейтрони в ядрі називають *нуклонами* (від лат. *nukleus* – ядро).

Згідно з цією моделлю загальна кількість нуклонів, тобто сума протонів і нейтронів, дорівнює масовому числу A ; кількість протонів дорівнює заряду ядра Z , кількість нейтронів $N = A - Z$. У ядерній фізиці ізоотоп хімічного елемента X прийнято позначати відповідним символом, вказуючи при цьому його масове число A (зліва вгорі) і зарядове число Z (зліва внизу), тобто у вигляді A_ZX . Наприклад, найлегший ізоотоп Гідрогену – Протій, ядро якого складається з одного протона, позначається ${}^1_1\text{H}$, альфа-частинка, що являє собою ядро атома Гелію, ${}^4_2\text{He}$ тощо.

Заповнення ядерних оболонок підпорядковується певній закономірності – *принципу Паулі*: два тотожні нуклони не можуть одночасно перебувати в однаковому квантовому ста-

Принцип Паулі був сформульований для пояснення закономірностей заповнення електронних орбіт в атомі.

ні, тобто характеризуватися одним і тим самим набором квантових величин. Тому існує ряд чисел – 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126, названих магічними, які визначають максимальну кількість нуклонів у заповнених оболонках.

Перехід ядра з одного стану в інший, наприклад зі стабільного в збуджений чи навпаки, пояснюється оболонковою моделлю як квантовий перехід нуклона з однієї оболонки на іншу. Кожного разу, коли кількість протонів чи нейтронів досягає магічного числа, відбувається стрибкоподібна зміна величин, що характеризують властивості ядра. Цим, зокрема, пояснюється існування періодичності у властивостях хімічних елементів, відображеної періодичною системою елементів Д.І. Менделєєва.

Принцип Паулі розкриває фізичну суть періодичного закону Д.І. Менделєєва.

Оболонкова модель атомного ядра є однією з найпродуктивніших в ядерній фізиці, зокрема для пояснення періодичності властивостей ядер і механізму ядерних реакцій. Проте вона також має свої обмеження, оскільки не спроможна дати тлумачення властивостей важких ядер і пояснити всі типи взаємодії нуклонів у ядрі. Тому існують й інші моделі атомних ядер, наприклад крапельна, за допомогою якої атомне ядро уявляється у формі краплі особливої квантової рідини.

1. Які відкриття дали поштовх розвитку ядерної фізики?
2. Дайте стисло характеристику протона і нейтрона. Чим вони відрізняються один від одного?
3. Що таке ізотопи?
4. Що таке нуклон? Як знайти число протонів і нейтронів за допомогою таблиці Менделєєва?
5. Наведіть опис оболонкової моделі ядра.
6. У чому полягає суть принципу Паулі?

§ 71. Ядерні сили та енергія зв'язку атомних ядер

Нуклони в ядрі утримуються завдяки ядерним силам, які є проявом однієї із чотирьох фундаментальних взаємодій – сильної взаємодії. За своєю природою вони короткодіючі ($r \sim 10^{-15}$ м), але дуже інтенсивні. У межах атомного ядра вони приблизно в 100 разів переважають сили електростатичної взаємодії двох протонів і в 10^{38} разів силу їхньої гравітаційної взаємодії. Проте на відстанях, більших за розміри ядер, вони настільки малі, що їхньою дією можна нехтувати.



Ядерні сили – короткодійчі, оскільки виявляють себе на відстанях у межах атомного ядра ($\sim 10^{-15}$ м).

Ядерні сили діють незалежно від наявності в нуклонів електричного заряду. Завдяки цьому в атомному ядрі утримуються електрично нейтральні нейтрони і не розлітаються одинокими заряджені протони. Експериментальні дослідження сил ядерної взаємодії у протон-протонних, протон-нейтронних і нейтрон-нейтронних пар показали, що в усіх випадках вони однакові і не залежать від типу нуклона.

У 1935 р. японський фізик Х. Юкава висловив припущення, що природа ядерних сил полягає в обмінному їх характері. Тобто за його передбаченням наявність ядерних сил обумовлює гіпотетична частинка ненульової маси, якою обмінюються між собою нуклони під час їхньої взаємодії.

Пі-мезони інколи називають піонами.

222

Пізніше, у 1947 р. така частинка була експериментально знайдена і названа *пі-мезоном*. Встановлено, що залежно від типу взаємодіючої пари нуклонів (протон-протон, нейтрон-нейтрон, протон-нейтрон, нейтрон-протон) існує три види пі-мезонів – додатний (π^+) і від'ємний (π^-) пі-мезони, маса спокою яких дорівнює 274 маси електрона m_e , що приблизно дорівнює 140 МеВ, і нейтральний пі-мезон (π^0), маса спокою якого дорівнює 264 m_e , що становить приблизно 135 МеВ.



Пі-мезони – це кванти ядерного поля, подібні до фотонів, які є квантами електромагнітного поля.

Пі-мезони не є складовими частинками протонів і нейтронів. Вони лише виявляють себе в ядерній взаємодії як обмінні частинки, завдяки яким здійснюється сильна взаємодія в атомному ядрі.

Енергія зв'язку – це та мінімальна енергія, яку треба витратити, щоб роз'єднати ядро на окремі нуклони, що його складають.

Сильна взаємодія є чинником об'єднання нуклонів у стабільне атомне ядро. Зв'язаний стан нуклонів у ядрі характеризується *енергією зв'язку*, яка необхідна для того, щоб утримувати протони і нейтрони в такому зв'язаному стані.



Точні вимірювання мас атомних ядер показали, що

$$m_n < Zm_p + Nm_n$$

Якщо порівняти масу атомних ядер з сумою мас нуклонів, які їх складають, то з'ясується, що вони різняться між собою: маса ядра завжди менша за сумарну масу вільних нуклонів. Тобто якщо скласти масу всіх Z протонів і N нейтронів, що входять до складу ядра, і порівняти її з масою самого ядра $m_{\text{я}}$, то спостерігатиметься *дефект мас* Δm :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$$

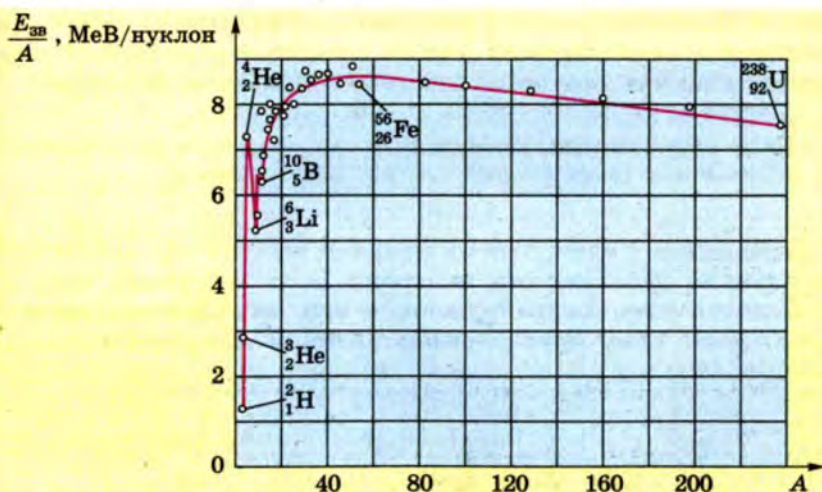
Причина його виникнення пояснюється тим, що для утворення ядра з вільних протонів і нейтронів необхідно виконати роботу, яка витрачається на їх об'єднання. Вона дорівнює енергії зв'язку, яка, враховуючи формулу взаємозв'язку маси і енергії, характеризується дефектом мас Δm :

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2.$$

Відношення $\frac{E_{\text{зв}}}{A}$ називається *питомою енергією зв'язку*.


Природно, що енергія зв'язку ядер у різних атомів неоднакова. Якщо скористатися поняттям питомої енергії зв'язку, тобто поділити її на кількість нуклонів в ядрі, то спостерігатиметься певна її залежність від масового числа A (мал. 5.15).

Як видно з графіка, спочатку крива різко зростає і досягає максимуму $\left(8,6 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}\right)$ в ізотопів елементів з масовим чис-




Мал. 5.15. Залежність питомої енергії зв'язку нуклонів у ядрі від масового числа A

лом від 50 до 60 (Ферум і близькі до нього елементи). Далі, зі збільшенням масового числа, крива починає плавно спадати, досягаючи значення $7,6 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}$ в урану ${}_{92}^{238}\text{U}$. Такий вид кривої зумовлений закономірностями забудови ядерних оболонок протонами і нейтронами. Проте оболонкова модель ядра не спромоглася пояснити характер забудови всіх елементів. Зокрема вона виявилася безсилою щодо важких елементів, де суттєвими стають електростатичні сили взаємодії протонів.

- 
1. З яких частинок складається атомне ядро? Чим вони відрізняються одна від одної? Які парні взаємодії характерні для ядер?
 2. Які види фундаментальних взаємодій проявляються в атомному ядрі? Який внесок кожної з них?
 3. Яка природа ядерних сил? Що є квантом сильної взаємодії?
 4. Чому виникає дефект мас? Чим це можна пояснити?
 5. Яка залежність існує між питомою енергією зв'язку нуклонів у ядрі та масовим числом?

§ 72. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Спостереження за різними ізотопами показали, що в природі існують стабільні і нестабільні ядра хімічних елементів. Ця їх якість зумовлена значенням енергії зв'язку ядер та співвідношенням у них кількості протонів і нейтронів. Наприклад, серед ізотопів легких елементів стабільними є ті, в яких кількість протонів і нейтронів приблизно однакова.



Якщо в ядрі переважатимуть протони, то на його стабільність впливатиме також енергія кулонівської взаємодії.

Ядра важких елементів як правило нестабільні, оскільки у них значно переважають нейтрони, а їх надлишок веде до збільшення енергії ядра (адже $m_n > m_p$), яку воно намагається вивільнити. Тому ядра окремих ізотопів можуть самочинно перетворюватися в інші хімічні елементи завдяки випромінюванню мікрочастинок або шляхом поділу на більш стійкі утворення. Така їх здатність до самочинних перетворень називається *радіоактивністю*.



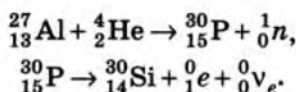
Радіоактивність – від лат. *radio* – випромінюю, та *activus* – діяльний.

Позначення мікрочастинки:

$$\begin{array}{l}
 {}^4_2\text{He} - \text{альфа-частинка} \\
 {}^1_0n - \text{нейтрон} \\
 {}^1_1p - \text{протон} \\
 {}^0_{-1}e - \text{електрон} \\
 {}^0_1e - \text{позитрон}
 \end{array}$$

Радіоактивність буває природною, яка спостерігається за звичайних умов, і штучною, коли радіоактивні перетворення відбуваються внаслідок зовнішнього втручання, наприклад бомбардування ядер стабільних ізотопів протонами, нейтронами, іншими частинками або ядрами хімічних елементів. Із фізичної точки зору принципової відмінності між ними немає – механізм радіоактивних перетворень у них однаковий.

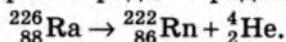
Природну радіоактивність солей урану вперше спостерігав А. Беккерель, а потім досліджували М. Склодовська-Кюрі та П. Кюрі. Штучну радіоактивність уперше одержали в 1934 р. французькі фізики Фредерік та Ірен Жоліо-Кюрі. Вони опромінювали альфа-частинками ядра ізотопу Алюмінію ${}^{27}_{13}\text{Al}$, внаслідок чого отримали нестабільний ізотоп Фосфору ${}^{30}_{15}\text{P}$, який внаслідок радіоактивного перетворення випромінював позитрон 0_1e :



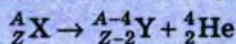
Позитрон – це елементарна частинка, що має масу електрона і рівний йому заряд, але протилежного знака.

Найбільш поширеними серед радіоактивних перетворень є *альфа-розпад*, *бета-розпад* і *спонтанний поділ ядер*.

Альфа-розпад – це перетворення нестійкого ізотопу в інший хімічний елемент, що супроводжується випромінюванням альфа-частинки. Наприклад, внаслідок альфа-розпаду відбувається перетворення радію в радон:



Правило зміщення для альфа-розпаду:



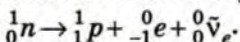
Під час альфа-розпаду ядра його зарядове число Z зменшується на 2, а масове число A – на 4, тобто при утворенні нового елемента Y справджується правило зміщення. Енергія, яка виділяється за рахунок альфа-розпаду, розподіляється між

альфа-частинкою і ядром елемента, що утворився. Таке перетворення може супроводжуватися також гамма-випроміненням.

Бета-розпад – це перетворення нейтрона в протон або протона в нейтрон в ядрі, яке супроводжується утворенням нового хімічного елемента. Існує два різновиди бета-розпаду:

1) β^- -розпад, який супроводжується вивільненням електрона ${}^0_{-1}e$ і утворенням ядра, кількість протонів якого на 1 більше. Наприклад: ${}^{14}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}_e$.

Найпростішим видом β^- -розпаду є розпад вільного нейтрона, що супроводжується випромінюванням нової елементарної частинки, яка називається антинейтрино:

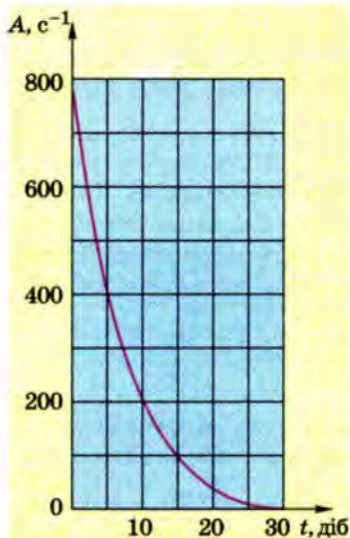


2) β^+ -розпад, внаслідок якого вивільняється позитрон 0_1e і утворюється ядро, кількість протонів якого на 1 менше. Наприклад: ${}^{11}_6C \rightarrow {}^{11}_5B + {}^0_1e + {}^0_0\nu_e$.

226

Мікрочастинку, яка супроводжує β -розпад з вивільненням позитрона, названо нейтрино (позначається ${}^0_0\nu_e$). Існує також антинейтрино (позначається ${}^0_0\bar{\nu}_e$), що супроводжує електронний β -розпад.

Самочинний поділ ядер Урану ${}^{235}_{92}U$ відкрили у 1940 р. російські вчені Г.М. Фльоров і К.А. Петржак.



Мал. 5.16. Зміна кількості радіоактивних ядер із часом

У важких елементів за певних умов може відбуватися спонтанний поділ на кілька більш легких ядер-уламків. Уперше це виявили у ядер Урану ${}^{235}_{92}U$, які без будь-якого зовнішнього впливу діляться на більш стійкі ізотопи як правило середньої частини періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва. Наприклад, ядро Урану може розділитися на два неоднакові уламки – ядро Барію ($Z = 56$) і ядро Криптону ($Z = 36$), які розлітаються в різні боки, набуваючи значної кінетичної енергії.

Оскільки радіоактивні ядра розпадаються, їх кількість весь час змінюється. Час життя радіоактивних ізотопів характеризується *періодом напіврозпаду* T . Це час, за який кількість ядер радіоактив-

ного ізотопу зменшується вдвічі (мал. 5.16). Пояснимо фізичну суть цієї величини детальніше. Так, якщо в початковий момент часу ($t = 0$) було N_0 радіоактивних ядер, то за період напіврозпаду T їх кількість зменшиться вдвічі і дорівнюватиме $\frac{N_0}{2}$; ще через такий самий час T їх уже буде $\frac{N_0}{4}$ і т. д. Тобто за n періодів напіврозпаду (де $n = \frac{t}{T}$) залишиться лише N ядер:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Цей вираз є законом радіоактивного розпаду.

Період напіврозпаду Урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ дорівнює 4,5 млрд років, Радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ – 1600 років, Полонію ${}^{218}_{84}\text{Po}$ – лише 3 хв.

Радіоактивні речовини відрізняються одна від одної періодом напіврозпаду: одні з них розпадаються швидше, інші повільніше. Тому період напіврозпаду T характеризує таку властивість як *активність радіонукліда*. Ця величина визначає інтенсивність радіоактивних перетворень, тобто кількість радіоактивних розпадів атомних ядер за 1 с. Вона прямо пропорційна числу атомних ядер і обернено пропорційна періоду напіврозпаду, якщо він значно більший за час спостереження:

$$A = \frac{0,693 N}{T}.$$

Величина $\frac{0,693}{T}$ називається сталою розпаду радіонукліда, а обернена їй величина $\frac{T}{0,693}$ називається часом життя. Вона показує, протягом якого часу кількість ядер радіонукліда зменшується в 1,44 рази.

Активність радіонукліда A в СІ вимірюється в *беккерелях* (Бк). 1 беккерель дорівнює активності радіонукліда, в якого за 1 с відбувається один розпад. На практиці користуються також одиницею активності, яка називається *кюри* (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

1. Що називається радіоактивністю? Які види радіоактивності бувають?
2. Чим зумовлено радіоактивне перетворення ядер при альфа-розпаді?
3. У чому полягає механізм бета-розпаду?
4. Що таке період напіврозпаду ядер? Що він характеризує?
5. У чому полягає суть закону радіоактивного розпаду?
6. Що таке активність радіонукліду? В яких одиницях вона вимірюється?

§ 73. Виги радіоактивного випромінювання. Дозиметрія

Відкриття А. Беккерелем радіоактивного випромінювання солей Урану дало поштовх до різнобічного вивчення цього явища іншими дослідниками. Зокрема, спочатку було експериментально встановлено його складники.

Різні радіоактивні речовини поміщали в контейнер К з вузькою щілиною (мал. 5.17). За контейнером на шляху променів знаходилася фотопластинка Ф, за допомогою якої можна було фіксувати траєкторію їх поширення. На виході з контейнера створювали сильне магнітне поле, лінії індукції якого були перпендикулярні до напрямку поширення випромінювання.

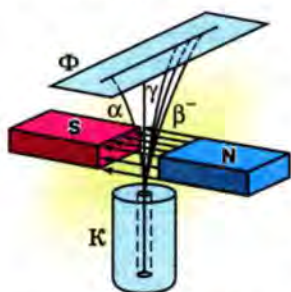
Дослідним шляхом встановлено, що в магнітному полі пучок радіоактивного випромінювання від різних ізотопів поширюється неоднаково: в одних випадках під дією магнітного поля радіоактивні промені відхиляються в різні боки на різні відстані, в інших – вони поширюються прямолінійно. На підставі цих дослідних фактів можна зробити висновок, що існують різні види радіоактивного випромінювання: два з них є потоком частинок, які несуть протилежні електричні заряди, а один – електрично нейтральний.

Встановлено, що радіоактивне випромінювання, яке несе позитивний заряд і незначно відхиляється в магнітному полі, є фактично потоком ядер атома гелію ${}^4_2\text{He}$. Його названо альфа-випромінюванням, або альфа-частинками.

228

Альфа-, бета- і гамма-промені є різновидами радіоактивного випромінювання.

Ті промені, що в магнітному полі відхилялися в різні боки, є потоком електронів або позитронів; їх названо бета-променями.



Мал. 5.17. Альфа-, бета- і гамма-промені

Електрично нейтральне випромінювання, що поширюється прямолінійно в магнітному полі, назвали гамма-променями. Це – електромагнітне випромінювання короткохвильового діапазону з довжиною хвилі $\lambda < 10^{-10}$ м.

Кожен з цих променів відрізняється своїми властивостями, зокрема йонізаційною і проникною здатністю, впливом на середовище, в якому вони поширюються. Поширюючись у речовині, вони взаємодіють з електронними оболонками

У повітрі альфа-частинка з энергією 4 МеВ пробігає 2,5 см; бета-частинка з энергією 2 МеВ має довжину пробігу в алюмінії лише 3,5 мм.

і ядрами атомів, збуджуючи їх або викликаючи дисоціацію молекул, ядерні реакції, штучну радіоактивність.

Альфа- і бета-частинки мають малу довжину пробігу в речовині, оскільки під час їх зіткнень з електронними оболонками атомів вони майже не відхиляються. Навіть щільна тканина одягу майже повністю поглинає бета-випромінювання і зовсім не пропускає альфа-промені. Проте за рахунок своєї енергії вони легко збуджують атоми, і тому дуже небезпечні при потраплянні в сам організм – легені, шлунок, на шкіру.

Гамма-випромінення, що несе кванти енергії 0,5 МеВ, ослаблюється в 10 разів шаром води завтовшки 24 см, бетону – 12 см, свинцю – 1,3 см.

Гамма-промені, взаємодіючи з електронними оболонками атомів, сприяють утворенню швидких електронів, які йонізують середовище. Вони мають значну проникну здатність і тому створюють для людини найбільшу небезпеку.

Для характеристики впливу будь-якого виду випромінення на речовину використовують дозиметричні величини. Відношення енергії, що надається речовині йонізуючим випроміненням, до маси речовини називається *поглиненою дозою випромінення*:

$$D = \frac{E}{m}$$

Поглинена доза випромінення в СІ вимірюється в *греях* (Гр): 1 Гр – це така доза випромінення, яка надає 1 кг речовини енергію йонізуючого випромінення 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

Існує позасистемна одиниця поглиненої дози випромінення *рад*:


$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

Поглинена доза випромінення має властивість нагромаджуватися із часом: при інших однакових умовах вона тим більша, чим більший час опромінення. Тому застосовують поняття *потужності дози*, тобто віднесення її до одиниці часу:

$$\dot{D} = \frac{D}{t}$$

Інтенсивність радіоактивного випромінення оцінюють також за його йонізувальною здатністю, оскільки фізична дія будь-якого випромінення пов'язана насамперед з йонізацією


атомів і молекул речовини. Ця характеристика називається *експозиційною дозою*. У СІ вона вимірюється в *кулонах на кілограм* $\left(\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\right)$: $1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ дорівнює експозиційній дозі випромінювання, при якому в сухому атмосферному повітрі масою 1 кг утворюються йони, сумарний електричний заряд яких кожного знака дорівнює 1 Кл.

 При дозі 1 Р в 1 см³ сухого повітря за нормальних умов утворюється $2,08 \cdot 10^9$ пар йонів.

На практиці продовжують користуватися позасистемною одиницею експозиційної дози – *рентгеном (Р)*:


$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Біологічна дія різних видів радіоактивного випромінювання на живі організми неоднакова навіть при рівній поглиненій дозі. Тому для оцінювання радіаційної небезпеки слід враховувати також вид йонізуючого випромінювання і його потужність. У дозиметрії прийнято їх порівнювати з рентгенівським чи гамма-випромінюванням, увівши одиницю *біологічного еквівалента рентгена* (бер). Залежно від виду випромінювання вводять коефіцієнт біологічної ефективності, значення якого визначають експериментально з урахуванням енергії частинок, яку вони мають.

 Для рентгенівського і гамма-випромінювань
 $1 \text{ бер} = 1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$

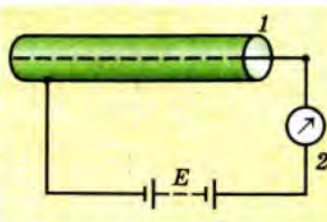
Вплив радіаційного випромінювання на живі організми викликаний не стільки розміром енергії, яку воно передає речовині, скільки його йонізують дією на клітину. Внаслідок йонізації в ній відбуваються біохімічні зміни, викликані утворенням нових радикалів, які не властиві звичайній клітині. Тому порушується її функція поділу, може виникати ракове переродження клітини тощо.

Смертельною для людського організму вважається доза, еквівалентна 6 Гр гамма-випромінювання, або 600 берам. При цьому слід враховувати час, протягом якого ця доза отримана, і якісні параметри випромінювання (вид променів, енергію частинок тощо). Ця доза буде меншою, якщо опромінення короткотривале і діє на весь людський організм.

 Для населення гранично допустимою дозою систематичного опромінення є еквівалентна доза 0,5 бер за рік.

Проте така доза, отримана протягом всього життя, вважається безпечною, оскільки не веде до відчутних змін організму. Адже

завдяки природному радіаційному фону (космічні промені, радіоактивні ізотопи земної кори, радонове випромінювання в атмосфері, промислові радіаційні забруднення тощо) усе живе на планеті Земля постійно перебуває під дією радіоактивного випромінювання. Так, радіаційний фон в Україні характеризується потужністю випромінювання від 0,1 до 0,3 мР/год.



Мал. 5.18. Схема дозиметра

Слід зазначити, що вплив радіоактивного випромінювання на живі організми має не лише негативні наслідки. У малих дозах його широко застосовують у лікуванні на мікробіологічному рівні, в агротехнологіях вирощування тварин і рослин, коли завдяки опроміненню викликають мутацію генів, у медичній діагностиці тощо. Більше того, досліди з вирощування рослин в умовах обмеження радіації показали, що їх розвиток сповільнюється і продуктивність знижується. Тобто на Землі під дією природного радіоактивного фону відбулася еволюція живої природи таким чином, що відсутність радіації негативно позначається на розвитку організмів.

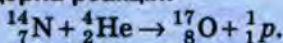
Вимірювання характеристик радіоактивного випромінювання здійснюють за допомогою дозиметричних приладів – дозиметрів. Основним їх конструктивним елементом (мал. 5.18) є пристрій для реєстрації йонізувального випромінювання – детектори. Найчастіше з цією метою використовують йонізаційні детектори (йонізаційні камери, лічильники Гейгера тощо). Це як правило циліндричні конденсатори, заповнені повітрям або газом, до електродів яких прикладена напруга. Частинка, потрапляючи в простір між пластинами конденсатора, йонізує газ між його обкладинками, внаслідок чого в колі виникає імпульс струму. У коло детектора 1 увімкнено вимірювальний пристрій 2, який фіксує інтенсивність йонізувального випромінювання і перетворює її значення у відповідні дозиметричні величини – питому активність радіонукліда, експозиційну чи еквівалентну дозу випромінювання, потужність дози випромінювання тощо.

1. Які види променів складають радіоактивне випромінювання? Що вони собою являють?
2. Який вплив чинить радіоактивне випромінювання на речовину?
3. Які дозиметричні величини характеризують радіоактивне випромінювання? Наведіть їх одиниці.
4. Чим пояснити різну дію альфа-, бета- і гамма-випромінень на живі організми?
5. Чому існує небезпека при радіаційному опроміненні людини? Які допустимі норми опромінення людини?
6. Яка будова дозиметричних приладів? Що є основою їх дії?

§ 74. Ядерні реакції. Погін ядер Урану

Одним з найдивовижніших наслідків ядерної фізики стало перетворення атомних ядер одних елементів в інші внаслідок взаємодії з мікрочастинками або один з одним. Це явище, назване *ядерною реакцією*, спостерігав ще Е. Резерфорд в 1919 р. під час бомбардування альфа-частинками ядер Азоту. Проте особливого значення воно набуло пізніше, коли виявили можливості його практичного використання в енергетиці.

Історично перша ядерна реакція:



На відміну від радіоактивного розпаду, який плине самостійно, ядерні реакції відбуваються завдяки зовнішньому впливу, наприклад бомбардуванню ядер мікрочастинками. Вони можуть відбуватися з будь-яким ядром, але за певних умов – при зближенні частинок на відстань дії ядерних сил (10^{-15} м) і подоланні ними енергетичних бар'єрів. Для позитивно заряджених частинок необхідне подолання кулонівської взаємодії; незаряджені частинки можуть проникати в ядро, маючи незначну кінетичну енергію.

Унаслідок ядерної реакції утворюється ядро – продукт ядерної реакції – і випромінюються частинки і гамма-кванти.

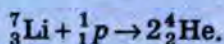
Механізм ядерних реакцій полягає в поглинанні частинки ядром, унаслідок чого воно збуджується. Спочатку відбувається перерозподіл внесеної в ядро енергії між усіма нуклонами. Таке ядро стає нестійким утворенням і з часом розпадається. Може статися так, що один з нуклонів або їх група внаслідок перерозподілу матимуть енергію, більшу за енергію зв'язку ядра. Тоді відбудеться також викид цього нуклона (групи нуклонів) з ядра, тобто ядерна реакція супроводжуватиметься випромінюванням протона, нейтрона або альфа-частинки.

Під час ядерних реакцій справджуються закони збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу, зарядового числа, які визначають кінцеві продукти реакції та її енергетичний вихід. Вони відбуваються з поглинанням або виділенням енергії, яка в мільйони разів перевищує енергетичні наслідки хімічних реакцій.

Момент імпульсу атомних ядер відтворюється напівцілим чи цілим квантовим числом, яке називається *спіном*.

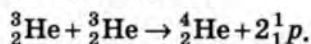
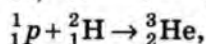
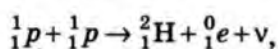
Енергетично вигідними є ядерні реакції, в результаті яких енергія виділяється. *Енергетичний вихід* таких реакцій обчислюється як різниця енергій ядер і частинок до реакції і після неї: якщо вона додатна, то енергія виділяється.

Перша термоядерна реакція була здійснена в 1932 р. на швидких протонах:



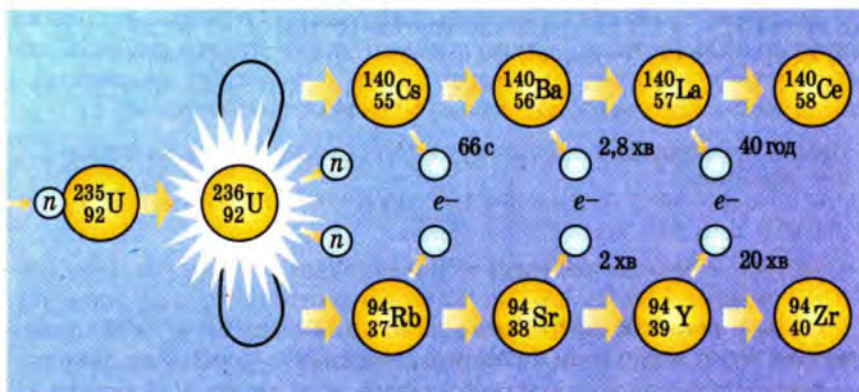
Під час ядерних реакцій може відбуватися злиття ядер (реакція синтезу) чи їх поділ. Реакція синтезу легких ядер називається *термоядерною реакцією*. Щоб сталася «перебудова» легких ядер внаслідок їх парних зіткнень, необхідно подолати електростатичне відштовхування між ними і зблизити їх до відстаней дії ядерних сил. Тому термоядерні реакції вимагають високих енергій взаємодіючих ядер або високих температур (10^8 К і вище). У земних умовах досягти таких температур можна лише за допомогою ядерного вибуху (така реакція буде некерованою) або в потужному імпульсі лазерного випромінювання (керована термоядерна реакція синтезу).

У природних умовах термоядерні реакції синтезу відбуваються в надрах зірок і є основним джерелом їх енергії. Для Сонця основним є перетворення чотирьох протонів в ядро Гелію, що супроводжується виділенням енергії понад 26 МеВ за один цикл:



Ядерну реакцію поділу атомних ядер вперше спостерігали в 1939 р. німецькі вчені О. Ган і Ф. Штрасман. Вони встановили, що при бомбардуванні ядер Урану нейтронами вони діляться на два приблизно однакові уламки. При кожному такому поділі вивільняється 2–3 нейтрони і близько 200 МеВ енергії. Ф. Жоліо-Кюрі висловив думку, що завдяки потоку вивільнених нейтронів ядерна реакція поділу ядер Урану може розвиватися як *ланцюгова* (мал. 5.19).

Для того щоб ланцюгова реакція розвивалася, необхідно підтримувати незмінним потік нейтронів і створювати умови, щоб вони проникали в ядра Урану. З цієї метою треба розміщати певну масу урану, достатню для реакції, в обмеженому просторі. Тоді нейтрони не пролітатимуть повз ядра, а потраплятимуть у них, спричиняючи подальший поділ. Мінімальна маса, за якої ланцюгова реакція відбуватиметься самостійно, називається *критичною масою*.



Мал. 5.19. Ланцюгова реакція поглину ядер Урану

234

Здійснення ланцюгової реакції поділу ядер Урану – досить складний процес. Адже повільні нейтрони, що вивільняються в процесі ядерної реакції, можуть викликати поділ лише ядер $^{235}_{92}\text{U}$; для поділу ядер $^{238}_{92}\text{U}$ потрібні швидкі нейтрони з енергією понад 1 МеВ. Оскільки природний Уран складається з двох ізотопів – 99,3 % Урану-238 і лише 0,7 % Урану-235, то для підтримання ланцюгової ядерної реакції необхідно задовольнити принаймні дві умови – досягти критичної маси і забезпечити, щоб число вивільнених нейтронів було достатнім для підтримання реакції і не зменшувалося із часом.

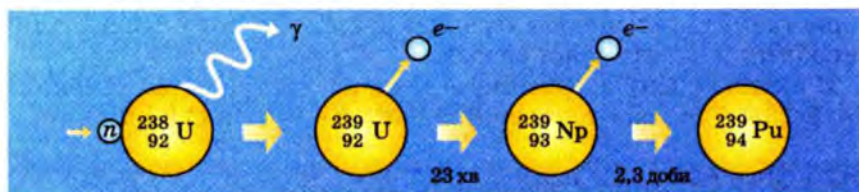


Для Урану-235 критична маса складає приблизно 50 кг. Радіус сфери такої маси дорівнює близько 8,5 см.



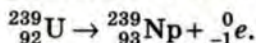
Трансуранові елементи – це хімічні елементи, розміщені в таблиці Менделєєва за ураном ($Z > 92$).

Повільні нейтрони не викликають поділу ядра Урану $^{238}_{92}\text{U}$. Проте їх захват цим ізотопом веде до цікавих наслідків – утворення *трансуранових елементів*. Спочатку виникає коротко-

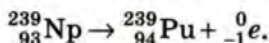


Мал. 5.20. Перетворення Урану-238 у Плутоній-239

живучий ($T_{0,5} = 23$ хв) радіоактивний ізотоп ${}^{239}_{92}\text{U}$, який внаслідок бета-розпаду утворює новий елемент – Нептуній:



У свою чергу нестійкий ізотоп Нептунію ${}^{239}_{93}\text{Np}$ (мал. 5.20) перетворюється у відносно стабільний Плутоній ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ($T_{0,5} = 24\,000$ років):



Ядерна реакція одержання Плутонію нині широко використовується в сучасних ядерних реакторах-розмножувачах.

1. Що називається ядерною реакцією? Чим вона відрізняється від радіоактивного розпаду?
2. Що таке енергетичний вихід ядерної реакції?
3. Які види ядерних реакцій бувають? Наведіть їх приклади.
4. Які умови виникнення і підтримання ланцюгової ядерної реакції?
5. Що таке трансуранові елементи? Опишіть реакцію одержання Плутонію.



§ 75. Ядерний реактор. Ядерна енергетика та екологічна безпека

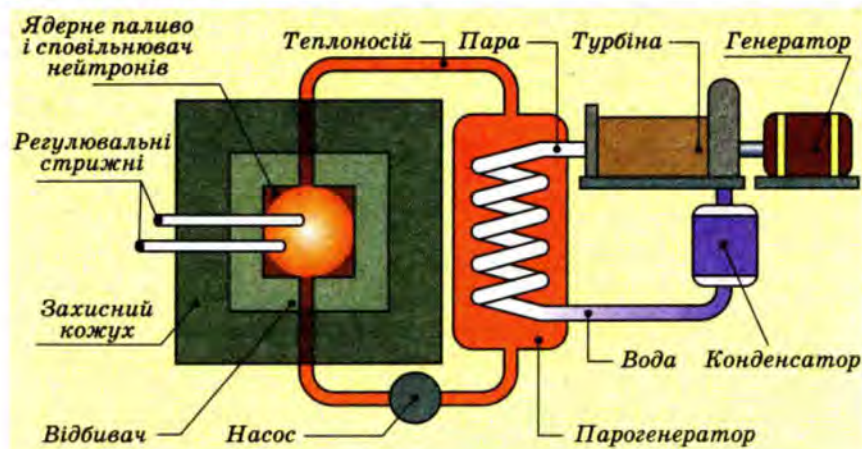
Людство зробило суттєвий крок уперед, коли змогло приборкати ядерну енергію. У 1942 р. під керівництвом Е. Фермі в США було збудовано перший *ядерний реактор*, в якому ланцюгова реакція поділу ядер урану стала керованою. Це дало поштовх бурхливому розвитку атомної (ядерної) енергетики.

Ядерний реактор складається з активної зони, де власне відбувається ядерна реакція, відбивачів й уповільнювачів нейтронів, захисного кожуха. Для отримання електроенергії на атомних електростанціях ядерний реактор поєднують з парогенератором, турбіною й електричним генератором (мал. 5.21). Принцип дії атомної електростанції полягає у використанні вивільненої внаслідок ядерної реакції енергії для вироблення електричної енергії.

В активну зону завантажують ядерне паливо – збагачений Уран-235 у вигляді тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) і ре-

Перший в Європі ядерний реактор було збудовано в 1946 р. під керівництвом І.В. Курчатова в Обнінську (Росія).





Мал. 5.21. Схема атомної електростанції

човину, що гальмує нейтрони (графіт або так звану важку воду), адже ядра ізотопу Урану-235 краще захоплюють повільні нейтрони.

Щоб ланцюгова реакція була керованою, необхідно регулювати кількість нейтронів в активній зоні. З цією метою до неї вводять регулювальні стрижні з матеріалу, який добре поглинає нейтрони (Кадмій, Бор). Змінюючи глибину їх введення, можна регулювати потік нейтронів, отже, керувати плином ланцюгової реакції.

Потужність ядерного реактора в 1 МВт відповідає ланцюговій реакції, за якої відбувається $3 \cdot 10^{16}$ актів поділу ядер за 1 с.

Енергія, що виділяється в результаті поділу ядер Урану, за допомогою теплоносія передається парогенератору. Вироблена ним водяна пара спрямовується на лопатки парової турбіни, до якої приєднано електрогенератор, що виробляє електроенергію. Таким чином, шляхом кількох перетворень енергія, що вивільняється внаслідок поділу атомного ядра, стає електричною. Завдяки електромережам вона потрапляє до споживачів.

Ядерні реактори є основою атомних електростанцій (АЕС). Нині у світі налічується понад 1000 ядерних енергетичних установок. Атомна енергетика вважається економічно найвигіднішою і високотехнологічною. Вона використовує останні досягнення науки, сучасні автоматизовані системи управління технологічним процесом на основі ЕОМ, вимагає високої кваліфікації працівників.

Експлуатація АЕС потребує запровадження широкого спектра засобів контролю і радіаційної безпеки, оскільки наслідки нехтування ними можуть бути катастрофічними. 26 квітня 1986 р. унаслідок порушення технологічного циклу роботи ядерного реактора на Чорнобильській АЕС сталася аварія: ланцюгова реакція стала неконтрольованою, відбувся вибух. Загинули люди, наслідки трагедії відчуються до сьогодні.

З 2001 р. Чорнобильська АЕС не працює, але продовжується робота з консервації зруйнованого блока, створення над ним захисного укриття.

1. Яке призначення ядерного реактора? З яких конструктивних елементів він складається?
2. Яким чином досягається керованість ланцюговою ядерною реакцією?
3. Що ви знаєте про Чорнобильську катастрофу?

§ 76. Елементарні частинки

237

Здавна вчені намагалися знайти найменші «це-глинки» матерії, за допомогою яких можна зрозуміти ієрархічну структуру будови речовини. Спочатку у давніх греків це був атом як неподільна частинка, з яких складаються всі тіла (Демокрит, Епікур). На початку XIX ст. це поняття було конкретизоване в дослідженнях хіміків і набуло значення найдрібнішої частинки речовини, що визначає її хімічні властивості (Я. Берцеліус, Дж. Дальтон, А. Авогадро).

Історія фізики відображає складний шлях розвитку поглядів на будову матеріального світу, пошук елементарних частинок, з яких він складається.

Наприкінці XIX ст., після відкриття електрона (Дж. Томсон) і широкого дослідження явища радіоактивності (А. Беккерель, П. Кюрі і М. Склодовська-Кюрі), вчені засумнівалися в елементарності атома і припустили, що він має складну будову. На початку XX ст. Е. Резерфорд підтвердив це експериментально і запропонував ядерну модель атома, згідно з якою ядро – це також складне утворення. У 1919 р. ним був відкритий протон – нуклон, що несе додатний заряд. Інша частинка – нейтрон, що входить до складу ядра, була відкрита у 1932 р. Дж. Чедвіком.

Для пояснення обмінного характеру сильної взаємодії нуклонів в ядрі Х. Юкава у 1935 р. висловив гіпотезу про існування пі-мезонів, які були знайдені в космічних променях у



Нині відомо понад 350 елементарних частинок і їх кількість невпинно збільшується.

1947 р. (С. Пауел). Раніше, у 1932 р., в складі космічних променів була виявлена перша античастинка – позитрон (К. Андерсон). Загалом дослідження космічних променів у 40–50-х роках ХХ ст., які виявили багато нових мікрочастинок, змусили вчених інакше поглянути на проблему їх елементарності. За сучасними уявленнями це не просто первинні неподільні частинки, з яких складається матерія, а специфічні об'єкти, яким окрім інших властива *слабка взаємодія* як особливий вид фундаментальної взаємодії.



Порівняно з іншими видами фундаментальних взаємодій слабка взаємодія викликає процеси, що плинуть повільніше (приблизно 10^{-10} с).

За інтенсивністю слабка взаємодія в багато разів менша за сильну і навіть електромагнітну взаємодії (приблизно в 10^{14} разів). Проте вона значно більша за гравітаційну взаємодію, оскільки маси елементарних частинок надто малі і радіус їх взаємодії становить лише 10^{-18} м.

238

Усі елементарні частинки характеризуються малими розмірами (у більшості з них порядок 10^{-15} м) і незначними масами. Це зумовлює квантову специфіку їх поведінки – вони підпорядковуються квантовим закономірностям і властивостям утворюватися (випромінюватися) або зникати (поглинатися) внаслідок взаємодії.

Загальними характеристиками елементарних частинок є їх маса m , електричний заряд q , спіні j та час життя τ . Окремі з них характеризуються також особливими величинами – лептонний заряд, баріонний заряд тощо. Як правило, усі вони виражаються у відносних одиницях, кратних певним значенням, наприклад масі чи електричному заряду електрона, сталій Планка тощо.



Масу елементарних частинок виражають в електрон-вольтах або числом, кратним масі електрона; електричний заряд – в одиницях, кратних заряду електрона e ; спіні – кратний значенню сталої Планка \hbar .

Таким чином, кожна елементарна частинка має набір дискретних квантових чисел, що визначають її специфічні властивості, за якими їх можна класифікувати (див. таблицю на форзаці).

Залежно від властивого їм типу взаємодій усі елементарні частинки, крім фотона, діляться на дві основні групи: *адрони*,

які беруть участь у всіх типах взаємодій – гравітаційній, електромагнітній, сильній і слабкій, та *лептони*, яким не властива сильна взаємодія.

За часом життя елементарні частинки поділяють на *стабільні* (фотон, електрон, протон, нейтрино, відносно стабільний нейтрон), *квазістабільні* ($\tau > 10^{-20}$ с), які розпадаються внаслідок електромагнітної чи слабкої взаємодії, і *нестабільні* ($\tau < 10^{-22}$ с), які розпадаються завдяки сильній взаємодії.

У фізиці існують й інші класифікації елементарних частинок. Зокрема, за знаком заряду їх можна поділити на частинки й античастинки (електрон–позитрон, нейтрино–антинейтрино); за значенням спінового квантового числа, яке може бути цілим або напівцілим, адрони ділять на *бозони* і *баріони*. Бозони з нульовим спіном називають *мезонами*. Цю класифікацію можна продовжити, покладаючи в її основу значення різних квантових чисел.

В останні роки дослідження елементарних частинок високих енергій (~ 10 ГеВ) за допомогою прискорювачів показало, що лептони не мають якоїсь структури, тобто є дійсно елементарними частинками. Разом з тим адрони виявили властивості, які вказували на те, що вони мають певну структуру і складаються з кількох «більш елементарних» частинок. У 1964 р. американські вчені М. Гелл-Манн і Дж. Цвейг незалежно один від одного запропонували кваркову модель адронів. Вони вважали, що всі адрони можна будувати як комбінування трьох кварків (для баріонів) або кварка і антикварка (для мезонів). Цим трьом кваркам були присвоєні імена: *u*, *d*, *s*.


Назви кварків походять від англійських слів *up* – вгору, *down* – вниз, *strange* – дивний, *charm* – зачарування, *beauty* – привабливість, краса, *truth* – істина.



Пізніше з'ясувалося, що побудувати все розмаїття елементарних частинок за допомогою трьох кварків не вдається, і тому їх набір доповнили ще трьома – *c*, *b* і *t*. Сукупність з шести кварків та їх антикварків дає змогу розкрити складну структуру всіх відомих на сьогодні адронів.

Таким чином, дослідження елементарних частинок і пояснення механізмів їх перетворення за допомогою слабкої взаємодії дало змогу цілісно представити сучасну фізичну картину світу на основі чотирьох фундаментальних взаємодій. Разом з тим теоретичні пошуки їх об'єднання в єдину фізичну теорію (так зване «Велике об'єднання»), яка б спромоглася дати цілісне трактування законів фізичного світу, поки не до-

сягли своєї мети, хоча окремі успіхи в цьому напрямі вже є. Так, в останні роки створена єдина теорія електромагнітної і слабкої (електрослабкої) взаємодії. Квантовий опис гравітаційної взаємодії на основі гіпотетичних частинок – гравітонів наближує вчених до цілісного розуміння картини світу як єдиної фізичної суті природи.

- 
1. Як у фізиці розвивалися уявлення про ієрархічну структуру речовини з точки зору пошуку її елементарних найдрібніших частинок?
 2. Який тип фундаментальних взаємодій характерний для елементарних частинок? Дайте його коротку характеристику.
 3. Набір яких величин визначає властивості елементарних частинок?
 4. На які дві основні групи поділяють елементарні частинки? Які ще класифікації елементарних частинок можуть бути?
 5. У чому полягає суть кваркової моделі елементарних частинок?

Вправа 33

1. Який склад мають ядра атомів Al, Au, Cs?
2. Чим відрізняється ядро атома Урану-235 від ядра атома Урану-238?
3. Знайти енергію зв'язку ядра Літію, якщо маса ядра дорівнює $11,6475 \cdot 10^{-27}$ кг.
4. Атомна маса Хлору дорівнює 35,45 а. о. м. Хлор має два ізотопи: ${}_{17}^{35}\text{Cl}$ і ${}_{17}^{37}\text{Cl}$. Яке процентне співвідношення вони мають?
5. Знайти дефект мас ядра Неону та енергію зв'язку його складових (у джоулях і MeV), що припадає на 1 нуклон, якщо маса його ядра дорівнює $m_{\text{Ne}} = 33,1888 \cdot 10^{-27}$ кг.
6. Ізотопи яких елементів утворюються з радіоактивного ізотопу ${}^7_3\text{Li}$ після його бета-електронного розпаду і наступного альфа-розпаду? Запишіть ці реакції.
7. Активність радіоактивного елемента за 8 діб зменшилася в 4 рази. Який у нього період напіврозпаду?
8. Період напіврозпаду радіоактивного Купруму становить 10 хв. Яка частка від початкової його кількості залишиться через годину?
9. Які ядра народжуються з радіоактивного Радію внаслідок п'яти альфа-розпадів і чотирьох бета-електронних розпадів?
10. Скільки енергії виділяється при синтезі 1 г Гелію з Дейтерію і Тритію? Скільки вугілля треба спалити, щоб отри-

мати таку саму енергію? Питома теплота згоряння вугілля дорівнює $30 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

11. Потужність дози гамма-випромінювання в зоні радіоактивного зараження дорівнює $0,2 \frac{\text{мГр}}{\text{год}}$. Скільки часу може перебувати людина в цій зоні, якщо гранична доза дорівнює $0,25 \text{ Гр}$?

12. Порівняйте енергії гравітаційної, кулонівської та ядерної взаємодій між двома протонами в ядрі.

Головне в розділі 5

1. Експериментальні дослідження Е. Резерфорда та його співробітників, теоретичні узагальнення М. Бора, Р. Шредингера, Л. де Бройля, В.К. Гейзенберга та інших учених створили підґрунтя для розвитку на початку ХХ ст. атомної фізики як квантової теорії. Цьому передували відкриття Х-променів В.К. Рентгеном (1895 р.), названих пізніше на його честь рентгенівськими, радіоактивності А. Беккерелем (1896 р.), електрона Дж.Дж. Томсоном (1897 р.) тощо.

У 1911 р. на підставі експериментальних даних Е. Резерфорд запропонував ядерну модель атома: *атом складається з позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертаються електрони.*

2. У 1913 р. Н. Бор сформулював квантові постулати:

- атоми перебувають у певних стаціонарних станах, в яких вони не випромінюють електромагнітні хвилі;
- 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 $h\nu = E_n - E_m$.

Ці постулати пов'язали між собою ядерну модель атома Резерфорда, побудовану на класичній теорії, і квантовий характер змін, якому підпорядковується внутрішній стан атома, що було підтверджено експериментально. Перший постулат знайшов підтвердження в дослідях Д. Франка і Г. Герца. Другий постулат пояснював закономірності лінійчатих спектрів, природу яких класична фізика так і не змогла розкрити.

3. Загалом спектри електромагнітних хвиль розділяють на спектри випромінювання, спектри поглинання, спектри розсіяння і спектри відбиття. Вони можуть бути суцільними, що охоплюють широкий діапазон довжин хвиль, лінійчастими, що складаються з окремих спектральних ліній певної довжи-

ни хвилі λ , і смугастими, тобто набором окремих смуг, що належать певному інтервалу довжин хвиль.

Механізм утворення суцільних оптичних спектрів спроможна пояснити класична фізика: поглинуте електромагнітне випромінення збуджує в речовині хвилі, частота яких відповідає частоті падаючого світла. Проте вона виявляється безсилою при поясненні лінійчастих і смугастих спектрів. Їхню природу можна зрозуміти лише на основі квантових постулатів Бора: *атом чи молекула випромінює або поглинає світло внаслідок їх квантового переходу з одного стану в інший; частота визначається різницею між рівнями енергії в атомах і молекулах:*

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

4. Самочинний перехід атомів чи молекул з одного енергетичного стану в інший супроводжується як правило спонтанним випромінюванням кванта світла певної частоти. Оскільки це відбувається довільно кожним атомом, то за звичайних умов *спонтанне випромінювання світла атомами в сукупності є різночастотним, немонохроматичним і некогерентним за своєю природою.*

Разом з тим за певних умов випромінювання може бути вимушеним, **індукованим**, якщо електрон в атомі перейде з одного енергетичного рівня на інший під дією зовнішнього електромагнітного поля, частота якого збігається з власною частотою квантового переходу електрона. Індуковане випромінювання є монохроматичним і когерентним. На цій властивості ґрунтується дія квантових генераторів – лазерів і мазерів.

Завдяки монохроматичності і когерентності випромінювання лазери знайшли широке практичне використання в спектроскопії, голографії, волоконній оптиці, в астрофізичних дослідженнях тощо. Висока сконцентрованість енергії лазерного променя дає можливість досягати значної інтенсивності випромінювання, надвисоких температур і тисків, що використовується нині в зварюванні і плавленні металів, при одержанні надчистих матеріалів, у лазерній хірургії, під час термоядерного синтезу.

5. Ядерна модель атома, запропонована Е. Резерфордом, передбачає, що практично вся його маса зосереджена в ядрі. Однією з найпоширеніших є **оболонкова протонно-нейтронна модель ядра атома**: атомне ядро складається з нуклонів – протонів і нейтронів, що розміщуються певними групами, утворюючи ядерні оболонки. *Загальне число нуклонів дорівнює масовому числу A ; число протонів дорівнює заряду ядра Z , число нейтронів $N = A - Z$.* Ядерні оболонки заповнюються

згідно з **принципом Паулі**: *два тотожні нуклони не можуть одночасно перебувати в однаковому квантовому стані*, тобто характеризуватися одним і тим самим набором квантових величин.

Нуклони утримуються в ядрі завдяки ядерним силам, які є проявом сильної взаємодії. За своєю природою вони короткодіючі ($r \sim 10^{-15}$ м), але дуже інтенсивні. Зв'язаний стан нуклонів в ядрі характеризується **енергією зв'язку**:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}})c^2.$$

6. Ядра важких елементів як правило нестійкі. Тому вони є радіоактивними ізотопами і можуть самочинно перетворюватися в інші хімічні елементи завдяки випромінюванню мікрочастинок або шляхом поділу на більш стійкі утворення. Існує три види радіоактивного випромінювання: альфа-, бета- і гамма-промені. Вони утворюються внаслідок радіоактивних перетворень:

– **альфа-розпаду**, коли перетворення нестійкого ізотопу в інший хімічний елемент супроводжується випромінюванням альфа-частинки (${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$);

– **бета-розпаду** – випромінювання ядром електрона чи позитрона, яке супроводжується утворенням нового хімічного елемента (${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}e + {}^0_0\nu_e$; ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_1e + {}^0_0\nu$);

– **спонтанного поділу ядер**, коли утворюється кілька більш легких ядер, наприклад поділ Урану на ядро Барію ($Z = 56$) і ядро криптону ($Z = 36$).

7. Характерною ознакою радіоактивних ізотопів є **період напіврозпаду** T – час, за який кількість ядер радіоактивного ізотопу зменшується вдвічі. Радіоактивний розпад відбувається за законом:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Період напіврозпаду T характеризує **активність радіонукліда** A , тобто кількість розпадів атомних ядер за 1 с.

8. Для характеристики впливу випромінювання на речовину використовують дозиметричні величини:

– **поглинену дозу випромінювання** $D = \frac{E}{m}$, тобто відношення енергії йонізуючого випромінювання до маси речовини;

– **потужність дози випромінювання** $\dot{D} = \frac{D}{t}$, тобто віднесення її до одиниці часу;

– **експозиційну дозу випромінювання**, тобто його здатність йонізувати атоми і молекули речовини;

– біологічний еквівалент рентгена, який ураховує вид йонізуювального випромінення і його потужність.

9. Перетворення атомних ядер одних елементів в інші внаслідок зовнішньому впливу, наприклад бомбардування ядер мікрочастинками, називається **ядерною реакцією**. Ядерні реакції характеризує **енергетичний вихід** – різниця енергій ядер і частинок до і після реакції. Енергетично вигідними вважаються ядерні реакції, в результаті яких енергія виділяється, наприклад реакція поділу урану. Завдяки потоку вивільнених нейтронів вона може розвиватися як ланцюгова. Для цього необхідно підтримувати незмінним потік нейтронів і створити умови, щоб вони проникали до ядра урану. Мінімальна маса, за якої ланцюгова реакція відбуватиметься самочинно, називається **критичною масою**. Ланцюгові реакції поділу урану використовують в ядерній енергетиці.

10. Дослідження різних мікрочастинок змусили вчених інакше поглянути на проблему їх елементарності – це не просто неподільні частинки, з яких складається матерія, а специфічні об'єкти, яким окрім інших властива **слабка взаємодія**.

Усі елементарні частинки характеризуються малими розмірами (у більшості з них порядку 10^{-16} м) і незначними масами. Це зумовлює квантову специфіку їхньої поведінки – вони підпорядковуються квантовим закономірностям і властивостям утворюватися (випромінюватися) або зникати (поглинатися) внаслідок взаємодії. **Загальними характеристиками елементарних частинок** є їх маса m , електричний заряд q , спин j і час життя τ , лептонний заряд L , баріонний заряд B тощо, виражені у відносних одиницях, кратних масі чи електричному заряду електрона, сталій Планка тощо.

Елементарні частинки можна класифікувати за різними ознаками. Наприклад, залежно від властивого їм типу взаємодій їх можна розділити на дві основні групи: **адрони**, які беруть участь у всіх типах взаємодій – гравітаційній, електромагнітній, сильній і слабкій, та **лептони**, яким не властива сильна взаємодія. Зокрема, запропонована кваркова модель будови адронів, згідно з якою вони складаються з комбінацій шести різних кварків.

За часом життя елементарні частинки поділяють на стабільні (фотон, електрон, протон, нейтрино, відносно стабільний нейтрон), квазістабільні ($\tau > 10^{-20}$ с), які розпадаються внаслідок електромагнітної чи слабкої взаємодії, і нестабільні ($\tau < 10^{-22}$ с), які розпадаються завдяки сильній взаємодії.

Віповіді до вправ

До розділу 1

- Вправа 1. 1. $1,6 \cdot 10^{-6}$ Н. 2. 200 Н/Кл. 3. $1,5 \cdot 10^{-4}$ Н/Кл.
4. $1,2 \cdot 10^{-2}$ м/с. 5. $32 \cdot 10^{12}$ м/с². 6. $1,1 \cdot 10^4$ Н/Кл. 7. $35,54 \cdot 10^{-4}$ м.
Вправа 2. 1. а) 700 Н/Кл; б) 100 Н/Кл; в) 500 Н/Кл.
2. $2,16 \cdot 10^4$ Н/Кл. 3. 0,12 м. 4. $9,2 \cdot 10^5$ Н/Кл. 5. $2,8 \cdot 10^4$ Н/Кл.
6. $15 \cdot 10^6$ Н/Кл; $7,9 \cdot 10^6$ Н/Кл. 7. $kq\sqrt{\frac{6}{a^2}}$.

- Вправа 3. 1. $9 \cdot 10^{-3}$ Н. 2. 6 Н. 3. Збільшиться в 64 рази.
4. $9,23 \cdot 10^{-8}$ Н. 5. На відстані 5,5 см від першого. 6. 0,3 м.
7. $1,7 \cdot 10^{-3}$ м. 8. $6,36 \cdot 10^{-2}$ кг. 9. $0,86 \cdot 10^{-13}$ Кл. 10. Зросте майже у 18 разів.

- Вправа 4. 1. 1,5 мкДж. 2. $2 \cdot 10^{-5}$ мкКл. 3. $2 \cdot 10^{-4}$ Дж.
4. $5 \cdot 10^{-4}$ Дж. 5. $0,24 \cdot 10^{-3}$ м; $0,47 \cdot 10^{-8}$ с.

Вправа 5. 1. 6 кВ. 2. 10^{-5} Кл. 3. 16 Н/Кл. 4. 0,15 м.

- Вправа 6. 1. 30 В. 2. $9,2 \cdot 10^{-3}$ Дж. 3. 10 м/с. 4. $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж.
6. 0,11 Дж.

Вправа 7. 1. $0,5 \cdot 10^{-11}$ Ф. 2. $4,5 \cdot 10^{-9}$ Кл. 3. $4 \cdot 10^4$ В. 4. Ні.

- Вправа 8. 1. $2 \cdot 10^{-9}$ Ф. 2. $3 \cdot 10^{-3}$ Кл. 3. $2 \cdot 10^3$ Н/Кл.
4. $3,2 \cdot 10^{-6}$ Кл.

Вправа 9. 1. 400 пФ. 2. 26 м². 3. 2,1 мм. 4. 2,8 пФ; 6 кВ.

- Вправа 10. 1. 37 пФ; 1,18 пФ. 2. 10^2 пФ. 3. $8 \cdot 10^{-5}$ Кл; 40 В; 20 В.
4. $176 \cdot 10^{-6}$ Кл; 44 В; 176 В.

Вправа 11. 1. 100 Дж. 2. 1,44 Дж. 3. $14 \cdot 10^{-10}$ Дж. 4. 10^3 В.

5. $2 \cdot 10^{-4}$ Ф. 6. $0,68 \cdot 10^{-5}$ Дж.

- Вправа 12. 1. 1 Ом; 5 Ом. 2. 12 В; 2 Ом. 3. 1 Ом; 6 А. 4. 1 А; 0,2 А.
1,6 В; 0.

До розділу 2

Вправа 13. 1. $1,2 \cdot 10^{-3}$ Тл. 2. 2 А. 3. 2,5 см.

Вправа 14. 1. 15 А. 2. $11,3^\circ$. 3. 20 мТл. 4. $1,3 \cdot 10^{-5}$ Н.

- Вправа 15. 1. $0,64 \cdot 1^{-13}$ Н. 2. $3,1 \cdot 10^7$ м/с. 4. 0,25 Тл. 5. 0,04.
6. $7,6 \cdot 10^6$ м/с.

Вправа 16. 2. $5 \cdot 10^{-3}$ В. 3. 100 м/с. 4. $0,5 \cdot 10^{-2}$ Дж.

Вправа 17. 1. $8 \cdot 10^{-4}$ Вб. 2. 0,4 Тл.

- Вправа 18. 1. 1 В. 2. $78,5 \cdot 10^3$ В. 3. $6 \cdot 10^{-2}$ Вб/с. 4. 2,3 А.
5. 1,7 Тл/с.

Вправа 20. 1. 0,375 Гн. 2. 10 А/с. 3. $2,5 \cdot 10^{-3}$ Гн. 4. 100 В.

Вправа 21. 1. 0,56 Дж. 3. 10^{-2} с.

До розділу 3

Вправа 22. 1. 1 с; 1 Гц; $6,28 \text{ с}^{-1}$. 4. ≈ 16 Н/м. 5. 12,7 Гц.

- Вправа 23. 1. 2 с. 2. 25 Гц. 3. $x = 5 \sin(5t + 0,5)$; -0,5 см.
4. 3 хв 48 с. 5. 1,25 с; 0,8 Гц. 6. 0,05 Гц; 8,5 м. 7. 0,2 Гц. 8. 9 м.

Вправа 24. 1. 10 м. 2. 20 м/с. 3. 10 м. 4. 2,4 м/с.

Вправа 25. 1. 160 МГц. 2. 0,15 А. 3. 100 мкс. 4. 118 мкс.

Вправа 26. 1. Зміниться в 9 разів. 2. 200. 3. 200 м. 4. 4 м. 5. 74 км.
6. $300 \text{ м} \leq \lambda \leq 900 \text{ м}$. 7. 1502,7 м. 8. $14 \cdot 10^{-6}$ Гн. 9. 31,6 пФ. 10. 597 м;
0,502 МГц. 11. 83 м. 12. 4. 13. 2350 м.

До розділу 4

Вправа 27. 1. $57,5^\circ$. 2. Приблизно половина зросту людини.
3. 24 см. 4. $1/7$ м; $1/14$ м. 5. 12 см.

Вправа 28. 1. 1,5. 2. $19,6^\circ$. 3. $26^\circ 43'$. 4. 38° . 5. 37° . 6. $2,3 \cdot 10^5$ км/с.
7. 1,135.

Вправа 29. 1. 12,5 см. 2. 300 см. 3. 21,8 см. 4. 60 чи 30 см. 5. 13 см.

Вправа 30. 1. 0,75 мкм; 0,6 мкм; 0,5 мкм; 0,667 мкм; 0,545 мкм;
0,461 мкм. 2. 14,4 мм. 3. 7,2 м. 4. 20 мкм.

Вправа 31. 1. $5 \cdot 10^{-19}$ Дж; $2,6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $1,66 \cdot 10^{-27}$ кгм/с;
 $8,7 \cdot 10^{-28}$ кгм/с; $5,5 \cdot 10^{-36}$ кг; $2,9 \cdot 10^{-36}$ кг. 2. 1,24 мкм; $1,78 \cdot 10^{-36}$ кг;
 $5,3 \cdot 10^{-28}$ кгм/с. 3. $1,2 \cdot 10^3$ м/с. 4. 55 фотонів. 5. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж;
 $6,1 \cdot 10^5$ м/с. 6. 650 нм; червоне світло. 7. 4,77 еВ; $7,64 \cdot 10^{-19}$ Дж.
8. Ні. 9. -7,9 В.

До розділу 5

Вправа 32. 1. $2,2 \cdot 10^{-18}$ Дж; $-4,4 \cdot 10^{-18}$ Дж; $-2,2 \cdot 10^{-18}$ Дж.
2. $6 \cdot 10^{14}$ Гц; 500 нм. 3. 437 нм. 4. 10,15 еВ.

Вправа 33. 1. Al: $p = 13$, $n = 14$; Au: $p = 79$, $n = 118$; Cs: $p = 55$,
 $n = 77$. 2. В Урану-238 нейтронів на 3 більше. 3. $6,201 \cdot 10^{-12}$ Дж.

4. ${}^{20}_{10}\text{Ne} - 91\%$, ${}^{22}_{10}\text{Ne} - 9\%$. 5. $2,832 \cdot 10^{-28}$ кг; $1,2744 \cdot 10^{-12}$ Дж;

7,39 МеВ. 6. ${}^7_4\text{Be}$; ${}^3_2\text{He}$. 7. 4 доби. 8. 1,6%. 9. ${}^{206}_{82}\text{Pb}$. 10. $4 \cdot 10^{11}$ Дж;

13 300 т. 11. 125 годин. 12. $E_\alpha : E_{\text{кул}} : E_{\text{гр}} \approx 1 : 10^{-2} : 10^{-37}$.

Алфавітний покажчик

А

Активність радіонукліда 227
Акцепторні домішки 68
Альфа-розпад 225
Альфа-частинка 204, 225, 228
Ампер 49
Амплітуда коливань 133

Б

Беккерель 227
Беккерель А. 219
Бер (біологічний еквівалент рентгена) 230
Бета-розпад 226
Бор Н. 206

В

Ват 52
Вебер 111
Вебер В. 111
Випромінення електромагнітне 155
Власна провідність напівпровідників 66
Внутрішній опір 53
Вольта А. 28
Вольт 28

Г

Гамма-промені 228
Генератор змінного струму 123
Генрі 118
Герц Г. 206
Гіпотеза Планка 190
Гістерезис 98
Грей 229

Д

Двигун постійного струму 90
Дефект мас 223
Джерело світла 165
Дзеркало 170
Дисперсія світла 185
Дифракція світла 183
Діамагнетики 96
Діелектрики 16
Діелектрична проникність 18, 21

Діод напівпровідниковий 69
Довжина хвилі 145
Доза випромінювання експозиційна 230
Доза випромінення поглинена 229
Дозиметр 231
Домени 97
Домішкова провідність напівпровідників 67
Донорні домішки 67
Дослід Ерстеда 78
Досліди Резерфорда 204
Дослід Роланда 78
Дослід Франка і Герца 206

Е

Ейнштейн А. 194, 215
Еквіпотенціальна поверхня 29
Електричне коло 49
Електричне поле 7
Електричний заряд 5
Електричний струм 48
248 Електровимірювальний прилад 89
Електроємність 32
Електроємність плоского конденсатора 39
Електромагнітна індукція 101
Електромагнітне поле 77
Електромагнітні хвилі 151
Електрон 60, 67, 225
Електрон-вольт 207
Електронно-дірковий перехід 69
Електропровідність 60
Електрорушійна сила 53, 105
Електрорушійна сила індукції 111
Електростатична індукція 14
Елементарні частинки 237
Енергія електричного поля 44
Енергія зв'язку ядра атома 222
Енергія магнітного поля 120, 149
Ерстед Г.Х. 78
Ефективне значення напруги 123
Ефективне значення сили струму 123

З

Закон відбивання світла 168
Закон Джоуля–Ленца 52
Закон електромагнітної індукції 112
Закон заломлення світла 173
Закони фотоефекту 193
Закон Кулона 20
Закон Ома для ділянки кола 50
Закон Ома для повного кола 54

Закон радіоактивного розпаду 227
Заломлення світла 173
Заряд ядра атома 220
Звук 147
З'єднання конденсаторів 42
Змінний електричний струм 122

I

Іваненко Д. 220
Ізотоп 219
Імпульс фотона 191
Індуктивність 118
Індукційне електричне поле 152
Індукційний струм 104, 108
Інтерференція світла 179
Інфразвук 148
Інфрачервоне випромінення 156, 188

K

Квант 191
Квантовий генератор 215
Кварк 239
Коливальний контур 148, 152
Коливання 131
– вимушені 136
– вільні 132
– гармонічні 132
Конденсатор 35
Корпускулярно-хвильовий дуалізм 165, 190
Критична маса 234
Кулон 8
Кюрі 227
Кюрі П. 225

249**Л**

Лазер 217
Ланцюгова реакція 233
Лінза 175

M

Магнітна взаємодія 79
Магнітна індукція 80, 84
Магнітна індукція поля прямого провідника зі струмом 83
Магнітна проникність 96
Магнітна складова сили Лоренца 91
Магнітне поле 79
Магнітний потік 109, 122
Магнітні властивості речовини 95
Максвелл Дж. 7,77

Маятник

- математичний 138
- нитяний 138, 141
- пружинний 133

Механічні хвилі 143

Н

Надпровідність 61

Напівпровідники 66

Напруга 50

Напруженість електричного поля 8

Нейтрон 220, 225

Нуклон 220

О

Оболонкова модель ядра атома 221

Ом Г.С. 49

Опір провідника 50

250

П

Парамагнетизм 96

Період коливань математичного маятника 139

Період піврозпаду 226

Питомий опір 51

Пі-мезон 222

Планк М. 190

Поглинання світла 167

Позитрон 225

Показник заломлення світла 173

Поляризація світла 166

Постулати Бора 206

Потенціал електричного поля 27

Потужність дози випромінення 229

Потужність електричного струму 52

Правило Ленца 107

Правило лівої руки 86

Правило правого гвинта 82

Правило правої руки 104

Принцип Гюйгенса–Френеля 168

Принцип Паулі 220

Принцип суперпозиції 11

Принцип Ферма 168

Провідники 14

Протон 219, 225

Пулюй І. 214

Р

Рад 229
Радіоактивне випромінення 228
Радіоактивність 224
Радіохвилі 155, 157
Резерфорд Е. 204
Рентген 230
Рентген В.К. 214
Рентгенівське випромінення 213
Рівняння Ейнштейна для фотоефекту 194
Рівняння коливань 133
Рідкі кристали 19
Різниця потенціалів 30
Робота виходу 194
Робота електричного поля 24
Робота електричного струму 51
Розсіювання світла 168

С

Самоіндукція 117
Світло 163
Сила Ампера 85, 105
Сила Лоренца 91
Сила струму 49
Сильна взаємодія 222
Склодовська-Кюрі М. 225
Спектральний аналіз 211
Спектрометр 187, 211
Спектр оптичний 208
Спектр оптичний випромінювання 208
Спектроскоп 186
Спін 232, 238
Спонтанний поділ ядер 226
Стала Планка 191
Столетов О.Г. 193

Т

Термоядерна реакція 233
Тесла 82
Тесла Н. 83
Томсон У. 150
Точка Кюрі 99
Трансформатор 124
Трансуранові елементи 234

Ф

Фаза коливань 133
Фарад 34
Фарадей М. 95, 101
Ферити 100
Феромагнетики 97
Формула лінзи 177
Фотодіод 196
Фотоелектрон 193
ФотоЕРС 196
Фотоефект 192
Фотон 164, 191
Фотопровідність 195
Фоторезистор 195

Х

Хвиля де Бройля 191
Хвиля електромагнітна 151
Хвиля поздовжня 145
Хвиля поперечна 144

252

Ч

Частота власних коливань 134, 150
Частота коливань 132
Чедвік Дж. 220, 237
Червона межа фотоефекту 193

Ш

Швидкість поширення хвилі 145
Швидкість світла 169
Шкала електромагнітних випромінювань 155

Я

Ядерна модель атома 203
Ядерна реакція 232
Ядерний реактор 235
Ядерні сили 222

<i>Дорогий друже!</i>	3
ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ТА СТРУМ	5
§ 1. Електричне поле заряджених нерухомих тіл	5
§ 2. Напруженість електричного поля.....	8
§ 3. Принцип суперпозиції електричних полів	11
§ 4. Провідники в електричному полі	14
§ 5. Діелектрики в електричному полі	16
§ 6. Закон Кулона	20
§ 7. Робота в електричному полі.....	24
§ 8. Потенціал електричного поля	27
§ 9. Різниця потенціалів.....	30
§ 10. Електроємність	32
§ 11. Конденсатор	35
§ 12. Електроємність плоского конденсатора	38
§ 13. З'єднання конденсаторів.....	42
§ 14. Енергія електричного поля.....	44
§ 15. Вплив електричного поля на живі організми.....	46
§ 16. Умови виникнення електричного струму.....	48
§ 17. Робота і потужність струму.....	51
§ 18. Електрорушійна сила джерела струму	52
§ 19. Закон Ома для повного кола	54
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму</i>	57
§ 20. Правила безпечного користування електричними приладами	59
§ 21. Електричний струм у різних середовищах.....	60
§ 22. Напівпровідники. Власна і домішкова провідність напівпровідників	66
§ 23. Напівпровідниковий діод. Застосування напівпровідникових приладів	69
<i>Лабораторна робота № 2. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом</i>	71
Головне в розділі 1	73
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ	77
§ 24. Магнітне поле	77
§ 25. Магнітна індукція	80
§ 26. Дія магнітного поля на провідник зі струмом. Сила Ампера	85

§ 27. Взаємодія провідників зі струмом	87
§ 28. Використання дії сили Ампера в техніці	89
§ 29. Сила Лоренца	91
§ 30. Магнітні властивості речовини	95
§ 31. Властивості феромагнетиків.....	98
§ 32. Використання магнітних властивостей речовини.....	99
§ 33. Електромагнітна індукція	101
§ 34. Правило Ленца	107
§ 35. Магнітний потік	109
§ 36. Закон електромагнітної індукції	112
§ 37. Електродинамічний мікрофон	114
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження явища електромагнітної індукції.....</i>	115
§ 38. Самоіндукція	116
§ 39. Енергія магнітного поля.....	120
§ 40. Змінний струм.....	121
§ 41. Трансформатор. Передача енергії змінного струму	123
Головне в розділі 2	128

РОЗДІЛ 3. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

§ 42. Коливальний рух. Вільні коливання.....	131
§ 43. Вимушені коливання	136
§ 44. Математичний маятник.....	138
<i>Лабораторна робота № 4. Виготовлення маятника і визначення періоду його коливань</i>	141
§ 45. Енергія коливального руху	142
§ 46. Механічні хвилі. Довжина хвилі	143
§ 47. Звукові хвилі	147
§ 48. Коливальний контур. Виникнення електромагнітних хвиль у коливальному контурі.....	148
§ 49. Утворення електромагнітних хвиль	151
§ 50. Шкала електромагнітних випромінень	155
§ 51. Радіохвилі	157
Головне в розділі 3	160

РОЗДІЛ 4. ХВИЛЬОВА І КВАНТОВА ОПТИКА

§ 52. Світло як електромагнітна хвиля. Розвиток уявлень про природу світла	163
§ 53. Поглинання і розсіювання світла. Відбивання світла	167
§ 54. Дзеркала. Одержання зображень за допомогою дзеркал	170
§ 55. Заломлення світла. Закони заломлення світла	172
§ 56. Лінзи. Побудова зображень, одержаних за допомогою лінз.....	175
§ 57. Інтерференція світла	178
<i>Лабораторна робота № 5. Спостереження інтерференції світла</i>	181
§ 58. Дифракція світла	182
<i>Лабораторна робота № 6. Спостереження дифракції світла</i>	184
§ 59. Дисперсія світла. Спектроскоп	185

§ 60. Інфрачервоне ультрафіолетове випромінення	187
§ 61. Квантові властивості світла. Фотон.....	190
§ 62. Фотоэффект. Рівняння фотоэффекту	192
§ 63. Застосування фотоэффекту. Приклади розв'язування задач ...	195
Головне в розділі 4	199
РОЗДІЛ 5. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА	202
§ 64. Історія розвитку вчення про будову атома. Ядерна модель атома	203
§ 65. Квантові постулати Бора	205
§ 66. Поглинання і випромінювання світла атомом. Оптичні спектри	208
§ 67. Спектральний аналіз та його застосування	210
§ 68. Рентгенівське випромінення	213
§ 69. Квантові генератори. Лазери та їх застосування.....	215
§ 70. Атомне ядро	219
§ 71. Ядерні сили та енергія зв'язку атомних ядер	221
§ 72. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	224
§ 73. Види радіоактивного випромінення. Дозиметрія	228
§ 74. Ядерні реакції. Поділ ядер урану	232
§ 75. Ядерний реактор. Ядерна енергетика та екологічна безпека	235
§ 76. Елементарні частинки	237
Головне в розділі 5	241
Відповіді до вправ	245
Алфавітний покажчик	247

Навчальне видання

**КОРШАК Євгеній Васильович
ЛЯШЕНКО Олександр Іванович
САВЧЕНКО Віталій Федорович**

ФІЗИКА

**Підручник для 11 класу
загальноосвітніх навчальних закладів**

Рівень стандарту

**Редактори *М. Зубченко, О. Мовчан*
Обкладинка і макет,
виготовлення ілюстрацій *В. Марущинця*
Технічний редактор *Ц. Федосіхіна*
Коректори *А. Кравченко, Л. Леуська*
Комп'ютерна верстка *Л. Ємець, Н. Корсун***

**Формат 60×90/16.
Умовн. друк. арк. 16. Обл.-вид. арк. 15,15.
Тираж 5 023. Вид. № 1112.
Зам. № 220а.**

**Видавництво «Генеза», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців серія ДК № 3966 від 01.02.2011 р**

**Віддруковано з готових діапозитивів у
ДП «Видавництво і друкарня «Таврида»,
вул. Генерала Васильєва, 44, м. Сімферополь, АРК, 95000.
E-mail: marketing@tavridabook.com.ua
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців серія ДК № 1174 від 25.12.2002.
Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи
№ 05.03.02-04/27643 від 27.04.2010 р.
www.testosvit.com**