

34 БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ АТОМНОГО ЯДРА

§ 34.1. Структура ядра. Ізотопи

Атомному ядру даного елемента, як і будь-якому іншому матеріальному об'єкту, притаманні певні характерні властивості, які виражають індивідуальність цього ядра: **електричний заряд, маса, електричний і магнітний моменти, енергія зв'язку** тощо.

Електричний заряд ядра кратний заряду електрона $e = +1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл і його можна представити у вигляді $q_{\text{я}} = eZ$, де Z – ціле число, яке називається атомним номером. Число Z визначає кількість протонів в ядрі та число електронів в атомі.

Іншою важливою характеристикою ядра є його маса. Маси ядер, як правило, вимірюють в атомних одиницях маси (а. о. м.). 1 а. о. м. дорівнює 1/12 маси атома вуглецю $^{12}_6\text{C}$.

1 а. о. м. = 1/12 маси атома $^{12}_6\text{C} = 1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг = $(931,5016 \pm 0,0026)$ МеВ. Енергетичний вираз маси отримано при використанні релятивістського співвідношення $E = mc^2$. Маси атомів сьогодні виміряно з великою точністю за допомогою сучасних мас-спектрометрів.

Згідно сучасним даним ядра складаються із частинок двох типів: **протонів і нейтронів**, які мають загальну назву **нуклонів**.

Протон (p) – позитивно заряджена частинка: його заряд за величиною дорівнює заряду електрона $e = +1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, а його маса спокою $m_p = 1,007276$ а. о. м. = $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг = 938,28 МеВ. Протон є ядром найпростішого атома – атома водню ^1_1H .

Протон, як і електрон, володіє власним механічним моментом – спіном, який дорівнює $\hbar/2$, та магнітним моментом, що дорівнює $\mu_p = +2,79 \mu_0$ (де $\mu_0 = e\hbar / 2 m_p c = 5,05 \cdot 10^{-27}$ А·м² – ядерний магнетон, який є одиницею магнітного моменту в ядерній фізиці).

Нейтрон – електронейтральна частинка ($q_n = 0$). Маса нейтрона $m_n = 1,008665$ а. о. м. = $1,6750 \cdot 10^{-27}$ кг = 939,6 МеВ.

Власний механічний момент нейтрона дорівнює $\hbar/2$. Хоч нейтрон електронейтральний, все ж він володіє магнітним моментом, який дорівнює $\mu_n = -1,98 \mu_0$. Знак мінус вказує, що напрямок магнітного моменту протилежний спіну нейтрона.

У вільному стані нейтрон не стабільний і приблизно через 12 хв він розпадається за схемою:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu},$$

тут позначення означають: n – нейтрон, p – протон, e^- – електрон, $\tilde{\nu}$ – елементарна частинка, яка називається **антинейтрино**.

Число протонів в ядрі дорівнює атомному номеру Z хімічного елемента. Загальне число нуклонів в ядрі позначається буквою A і називається **масовим числом**. Число нейтронів N в ядрі визначається так:

$$N = A - Z$$

Наприклад, в ядрі заліза ($A = 56$; $Z = 26$) міститься 26 протонів і $N = A - Z = 56 - 26 = 30$ нейтронів.

Щоб характеризувати дане ядро, необхідно вказати тільки A і Z . Як правило, хімічні елементи прийнято позначати символом ${}_Z^AX$ або ${}_Z^AY$.

Атомні ядра (як і атоми, що їм відповідають) з однаковим числом Z , тобто з однаковим числом протонів, але різними масовими числами A (різною кількістю нейтронів), називаються **ізотопами**. Так, наприклад, в природі зустрічаються три стабільні ізотопи кисню: ${}^{16}_8O$, ${}^{17}_8O$, ${}^{18}_8O$; три стабільні ізотопи кремнію: ${}^{28}_{14}Si$, ${}^{29}_{14}Si$, ${}^{30}_{14}Si$. Водень має три ізотопи: 1_1H , 2_1H , 3_1H . Сьогодні практично всі ядра мають по декілька ізотопів.

Ізотопи володіють однаковими хімічними і в принципі однаковими оптичними властивостями.

В першому наближенні атомні ядра можна вважати сферичними і ввести поняття радіуса R тієї сфери, яка обмежує ядерну речовину. Щоправда, про точні радіуси ядер говорити важко, оскільки ядро є системою частинок, для яких характерний корпускулярно-хвильовий дуалізм. Тому просторові розміри ядер дещо розмиті, а поняття радіуса є в якійсь мірі умовним.

Під розмірами ядер розуміють розміри тієї області, в якій проявляється дія ядерних сил. Приблизні розміри ядер були вперше визначені Резерфордом в дослідях по розсіянню заряджених частинок. Дослідження показують, що радіуси ядер залежать від числа нуклонів в ядрі, і достатньо добре виражаються формулою

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad (34.1)$$

де $R_0 = (1,4 - 1,5) \cdot 10^{-15}$ м.

Оскільки об'єм сфери $V = 4/3 (\pi R^3)$, то можна зробити висновок, що $V \sim A$, а це означає, що всі ядра мають приблизно **однакову густину**. Густина “ядерної речовини” надзвичайно велика. Вона дорівнює $\rho_{ад} \approx 1,8 \cdot 10^{17}$ кг/м³. Подібних густин для макроскопічних тіл в природі не зустрічається. Виключно висока густина “ядерної речовини” свідчить про те, що речовина в ядрах знаходиться в особливому специфічному ядерному стані, і, мабуть, тільки при такій високій густині “ядерна речовина” досягає деякого рівноважного стану.

Зауважимо, що поряд із зарядом і масою, ядро володіє **спіном** (власним механічним моментом), який обумовлений наявністю спінів у нуклонів. Якщо ядро складається із парного числа нуклонів, то спін ядра є парним, якщо ж число нуклонів, що входять в ядро, не парне, то спін ядра є півцілим (в одиницях \hbar).

Наявність у ядра механічного моменту призводить до появи у нього магнітного моменту, який обумовлений двома причинами: 1) спіновими магнітними моментами нуклонів, які входять до складу ядра; 2) орбітальним рухом протонів у ядрі.

§ 34.2. Дефект маси і енергія зв'язку

Дуже точні експериментальні вимірювання атомних мас хімічних елементів показали, що їх маси дещо менші від сумарних мас нуклонів, які входять до складу ядер. Наприклад, маса нейтрального атома 4_2He дорівнює $m({}^4_2He) = 4,002603$ а. о. м. Сумарна маса двох нейтронів і двох протонів (включаючи масу двох електронів $m_e = 0,00054858$ а. о. м.) дорівнює: $2m_p + 2m_n + 2m_e = 2(1,007276 \text{ а. о. м.}) + 2(1,008665 \text{ а. о. м.}) + 2(0,00054858 \text{ а. о. м.}) = 4,032979 \text{ а. о. м.}$ Виміряна маса 4_2He на величину $\Delta M = 4,032979 \text{ а. о. м.} - 4,002603 \text{ а. о. м.}$

$= 0,030376$ а. о. м. менша сумарної маси нуклонів, які входять в склад ядра ${}^4_2\text{He}$. Цю різницю в масах називають **дефектом маси ядра**.

Згідно закону взаємозв'язку маси і енергії ($E = mc^2$) дефект маси ΔM , що виникає при утворенні ядра, є ознакою того, що при утворенні ядра вивільняється певна енергія системи. Ця енергія є мірою міцності ядра і називається **повною енергією зв'язку** атомного ядра, і ми її будемо позначати $E_{зв}$. Вона показує, **яку енергію потрібно затратити, щоб розділити ядро на його складові – протони і нейтрони**. Щоб стабільне ядро розділити на його складові – протони і нейтрони, необхідно затратити як мінімум енергію, що рівна енергії зв'язку. Таким чином, для енергії зв'язку можна записати формулу:

$$E_{зв} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - M_яc^2, \quad (34.2)$$

де $M_я$ – маса ядра, m_p і m_n – відповідно маси вільних протона і нейтрона, $N = A - Z$. Кожну масу в формулі (34.2) ми помножили на c^2 , щоб отримати відповідну їй енергію.

Якщо масу виразити в а. о. м., то, перемножуючи дефект маси $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я$ на перевідний множник (1 а. о. м. = 931,5 МеВ), отримаємо енергію зв'язку в МеВ:

$$E_{зв} = (Zm_p + Nm_n - M_я) 931,5 \text{ МеВ}. \quad (34.3)$$

Зауважимо, що енергія зв'язку нуклонів в ядрі гелію в мільйони разів перевищує енергію зв'язку валентних електронів в атомах, де вона становить 1 – 10 еВ. Надзвичайно великі значення енергії зв'язку атомних ядер свідчать про існування надзвичайно великих ядерних сил взаємодій між нуклонами в межах ядра.

Іноді користуються поняттям **питомої енергії зв'язку ядра**, тобто **енергії зв'язку, розрахованої на один нуклон в будь-якому ядрі**. Питому енергію зв'язку ядра можна розрахувати, якщо повну енергію зв'язку ядра поділити на число нуклонів в ньому.

Приклад 34.1. Розрахувати повну та питому енергії зв'язку ядра кисню ${}^{16}_8\text{O}$ ($M({}^{16}_8\text{O}) = 15,994915$ а. о. м.).

Розв'язок: Для розрахунку повної енергії зв'язку скористаємось формулою (34.3):

$$E_{зв} = (Zm_p + Nm_n - M_я) 931,5 \text{ МеВ}.$$

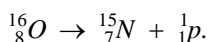
Тоді

$$E_{зв} = [8(1,007276) + 8(1,008665) - 15,994915] 931,5 \text{ МеВ} = 123,53 \text{ МеВ}.$$

Енергія зв'язку ${}^{16}_8\text{O}$ в розрахунку на один нуклон (питома енергія зв'язку) дорівнює $123,53/16 \text{ МеВ} = 7,72 \text{ МеВ}$.

Приклад 34.2. Розрахувати енергію відриву $E_{відр}$, яку необхідно затратити на відрив одного протона від ядра ${}^{16}_8\text{O}$. Енергією відриву називають мінімальну енергію, яку необхідно затратити, щоб відірвати від ядра найменш зв'язаний з ним нуклон.

Розв'язок: Якщо протон відірвати від ядра ${}^{16}_8\text{O}$, то отримаємо ядро ${}^{15}_7\text{N}$:



Розрахунок енергії проведемо, користуючись формулою (34.3):

$$E_{відр} = [M({}^{15}_7\text{N}) + m_p - M({}^{16}_8\text{O})] 931,5 \text{ МеВ} = [15,000108 \text{ а. о. м.} + 1,007276 \text{ а. о. м.} - 15,994915] 931,5 \text{ МеВ} = 11,6 \text{ МеВ}.$$

Тут $M({}_{7}^{15}\text{N}) = 15,000108$ а. о. м. – маса атома азоту, $M({}_{8}^{16}\text{O}) = 15,994915$ а. о. м. – маса атома кисню.

§ 34.3. Ядерні сили і їх властивості

Величезна енергія зв'язку нуклонів в ядрі та значна густина ядерної речовини свідчать, що між нуклонами існує дуже інтенсивна взаємодія. Ця взаємодія носить характер притягання. Вона втримує нуклони на відстанях $\sim 10^{-15}$ м один від одного, не дивлячись на сильне кулонівське відштовхування між протонами. Сили взаємодії між нуклонами в ядрі не можна звести ні до гравітаційних, ні до магнітних, ні до кулонівських сил. Це особливий, специфічний вид сил, які отримали назву "**ядерних сил**". Розглянемо основні характеристики ядерних сил.

1. Ядерні сили характеризуються **величезною інтенсивністю**, яка забезпечує середню енергію зв'язку на нуклон (7 – 8,6) МеВ. Це надзвичайно велика енергія.

2. На відміну від гравітаційних і електромагнітних сил ядерні сили є **короткодійними силами**. Їх радіус дії складає $\sim 10^{-15}$ м і із збільшенням відстані між нуклонами вони дуже швидко зменшуються. На відстанях, більших R_0 (див. формулу (34.1)), ядерні сили практично дорівнюють нулю.

3. Ядерні сили володіють властивістю **насичення**, що свідчить про те, що кожний нуклон в ядрі взаємодіє з обмеженим числом найближчих сусідніх нуклонів. На це вказує той факт, що, починаючи з ${}^4_2\text{He}$, енергія зв'язку на один нуклон для всіх ядер приблизно однакова. Свідченням насичення ядерних сил є і те, що густина "ядерної речовини" приблизно однакова для різних ядер, оскільки об'єм ядра V пропорційний A .

4. Ядерні сили не залежать від заряду нуклонів. Сили взаємодії між двома протонами, протоном і нейтроном і двома нейтронами мають однакову величину. Ця властивість називається **зарядовою незалежністю ядерних сил**. Той факт, що густина "ядерної речовини" майже однакова для всіх ядер, теж вказує на те, що сили притягання між окремими нуклонами приблизно однакові.

5. Ядерні сили залежать від взаємної орієнтації спінів взаємодіючих нуклонів. Так, наприклад, нейтрон і протон втримуються разом, утворюючи ядро важкого водню ${}^2_1\text{H}$ (дейтрон) тільки в тому випадку, якщо їх спіни паралельні один одному.

6. Ядерні сили не є центральними. Їх не можна представляти направленими вздовж прямої, яка з'єднує центри взаємодіючих нуклонів. Нецентральність ядерних сил впливає і із того факту, що вони залежать від орієнтації спінів нуклонів.

Короткодію ядерних сил вдалося пояснити на основі припущення про обмінний характер цих сил. Ідею про те, що дві частинки можуть взаємодіяти завдяки обміну третьою частинкою, вперше висловили в 1934 р. російські фізики І. Е. Тамм (1895 – 1971) і Д. Д. Іваненко (1904 – 1994). Було зроблено припущення, що взаємодія між нуклонами здійснюється через якісь віртуальні частинки (в квантовій механіці віртуальними називають частинки, які не можуть бути виявлені за час їх існування. В цьому змісті віртуальні частинки можна назвати уявними), як, наприклад, це відбувається між зарядженими частинками за допомогою квантів електричного або магнітного полів. На той час, крім нуклонів, були відомі лише фотон, електрон, позитрон і нейтрино. Найважча із цих частинок – електрон – володіє комптонівською довжиною хвилі $\lambda_c = 3,86 \cdot 10^{-13}$ м, яка в ~ 200 разів більша радіуса дії ядерних сил ($R_0 = (1,4 - 1,5) \cdot 10^{-15}$ м). Та і сили, які могли б бути обумовлені віртуальними електронами, як показали розрахунки, були б дуже малими. Таким чином, перша спроба пояснення ядерних сил за допомогою обміну віртуальними частинками виявилась невдалою.

В 1935 р. японський фізик Х. Юкава (1907 – 1981) висунув гіпотезу про те, що в приро-

ді існують поки що не виявлені частинки з масою в 200 – 300 разів більшою маси електрона, які і виконують роль переносників ядерної взаємодії. Пізніше ці частинки були названі **мезонами**. Через 12 років (1947 р.) англійські фізики Оккіаліні (1907 р.н.) і Пауел (1903 – 1969) відкрили в космічному випромінюванні частинки, які отримали назву π -мезонів або піонів. Ці частинки виявились носіями ядерних сил, передбачених Х. Юкавою. За передбачення існування мезонів і зокрема за теоретичне дослідження ядерних сил в 1949 р. Х. Юкаві була присуджена Нобелівська премія, а за вдосконалення методів вивчення ядерних процесів, яке призвело до експериментального відкриття мезонів, Нобелівська премія була присуджена в 1950 р. С.Ф. Пауелу.

Існують позитивний (π^+), негативний (π^-) і нейтральний (π^0) мезони. Заряд π^+ і π^- – мезонів дорівнює елементарному заряду e . Маса π^+ і π^- – мезонів однакова і дорівнює $273 m_e$, маса π^0 – мезона – $264 m_e$. Час життя π^+ і π^- – мезонів складає $2,60 \cdot 10^{-8}$ с, π^0 – мезона – $0,8 \cdot 10^{-15}$ с.

З'ясуємо характер (механізм) обмінної взаємодії між нуклонами за участю π – мезонів. В результаті віртуальних процесів $n + \pi^+ \rightleftharpoons p$, $p + \pi^- \rightleftharpoons n$, $n + \pi^0 \rightleftharpoons n$, $p + \pi^0 \rightleftharpoons p$ нуклон виявляється оточеним хмаринкою віртуальних π -мезонів, які утворюють поле ядерних сил. Поглинання цих мезонів іншими нуклонами призводить до сильної взаємодії між нуклонами.

Механізм обмінної взаємодії між нуклонами залежить від виду π – мезонів, якими обмінуються ці нуклони. Можливі кілька схем взаємодії нуклонів за допомогою π – мезонів:

$$p + n \rightleftharpoons n + \pi^+ + n \rightleftharpoons n + p.$$

Протон випромінює π^+ -мезон і перетворюється в нейтрон. Нейтрон поглинає π^+ -мезон і перетворюється в протон. Далі такий же процес протікає в зворотному напрямку:

$$n + p \rightleftharpoons p + \pi^- + p \rightleftharpoons p + n.$$

Нейтрон і протон обмінуються π^- – мезонами.

В обох випадках нуклони обмінуються зарядом, протон стає нейтроном, а нейтрон – протоном, нуклони ніби міняються місцями, відбувається обмін просторовими координатами.

Або

$$\begin{aligned} p + p &\rightleftharpoons p + \pi^0 + p \rightleftharpoons p + p, \\ n + n &\rightleftharpoons n + \pi^0 + n \rightleftharpoons n + n, \\ p + n &\rightleftharpoons p + \pi^0 + n \rightleftharpoons p + n. \end{aligned}$$

Взаємодіючі нуклони обмінуються π^0 – мезоном. В результаті такого обміну заряди нуклонів ($p - p$, $n - n$, $p - n$) залишаються незмінними, тобто нуклони не обмінуються просторовими координатами. Не дивлячись на те, що мезонна теорія ядерних сил ще не завершена, особливо в частині її кількісних виразів, основні її ідеї дають ключ до розуміння багатьох ядерних процесів.

§ 34.4. Природна радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

В 1896 р. А. Беккерель^{*}, вивчаючи люмінесценцію різних речовин, виявив, що солі урану випромінюють невідомі промені без попереднього їх освітлення. Це випромінювання здатне викликати почорніння фотопластинки, іонізувати газ, збуджувати флуоресценцію, викликати хімічну і біологічну дію, володіє великою проникаючою здатністю.

^{*} Анрі Беккерель (1852 – 1891) – див. ст. 502.

Подальші дослідження, проведені П. Кюрі* і М. Складовською-Кюрі*, Резерфордом і іншими вченими, показали, що здатність випромінювати подібні промені властива не тільки для урану, а й для ряду інших хімічних елементів, зокрема полонію (Po), радію (Ra), актинію (Ac), торію (Th). Цікавою особливістю виявленого випромінювання є його самочинність і сталість, повна незалежність від зміни зовнішніх умов і тиску, температури, освітленості тощо. За пропозицією М. Складовської-Кюрі речовини, які здатні випромінювати відкрите Беккерелем випромінювання, назвали **радіоактивними**, а саме явище – **радіоактивністю**.

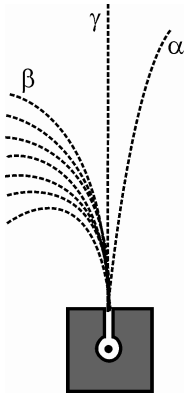


Рис. 34.1

Подальші дослідження показали, що радіоактивне випромінювання складається з трьох видів променів: α , β і γ . За характером відхилення променів в магнітному полі (рис. 34.1) було встановлено, що α -промені – це позитивно заряджені частинки і вони є ядрами гелію (${}^4_2\text{He}$); β -промені є потік швидких електронів. Енергія β -частинок може сягати 10 MeB, що відповідає їх швидкості, близької до швидкості світла у вакуумі; γ -промені не зазнають відхилення в магнітному полі – це жорстке електромагнітне випромінювання і має найбільшу проникну здатність. На рис

34.2 наведено порівняння проникаючої здатності α -, β -частинок і γ -квантів (з однаковою енергією), а також рентгенівського випромінювання (енергія 40 МкеВ) в алюмінії.

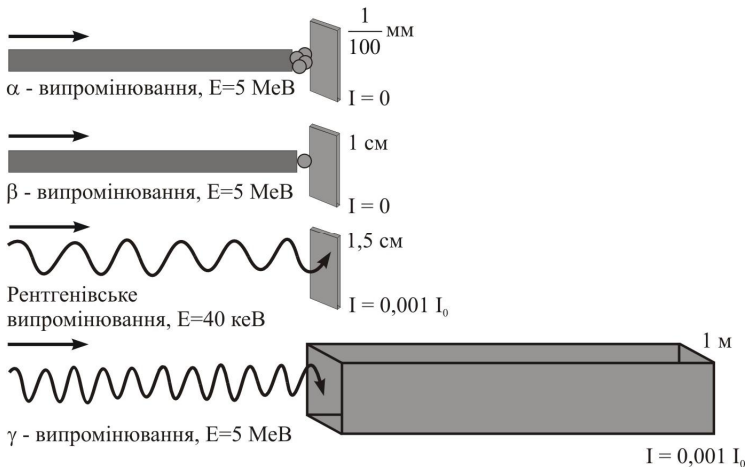


Рис. 34.2

Як уже відмічалось вище, радіоактивний розпад – це властивість самого атомного ядра і залежить він тільки від його внутрішнього стану. Не можна вплинути на протікання процесу радіоактивного розпаду, не змінивши стану ядра.

Спробуємо встановити закон радіоактивного розпаду. Нехай N – число атомів в зразку в даний момент часу t . Тоді число атомів dN , що розпалися за інтервал часу від t до $t + dt$, дорівнюватиме:

$$dN = -\lambda N dt, \quad (34.4)$$

* Анрі Беккерель (1852 – 1891), П'єр Кюрі (1859 – 1906) і Марія Складовська-Кюрі (1867 – 1934) – французькі фізики, за відкриття і за вивчення явища радіоактивності удостоєні Нобелівської премії з фізики (1903 р.).

де λ – стала величина, яка характерна для радіоактивної речовини і називається **сталою розпаду**. Знак “–” тут вказує, що кількість атомів N , які не розпалися, зменшується з часом. Із (34.4) випливає, що стала розпаду являє собою відносне зменшення числа ядер, які зазнають розпаду за одиницю часу:

$$\lambda = \frac{-dN / N}{dt}. \quad (34.5)$$

Інакше кажучи, стала розпаду характеризує долю ядер, які розпадаються, за одиницю часу, тобто визначає **швидкість** радіоактивного розпаду.

Перетворивши рівняння (34.5) до вигляду

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt,$$

можна знайти N , як функцію часу t . Для цього проінтегруємо останній вираз від $t = 0$ до $t = t$:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt,$$

де N_0 – число материнських ядер при $t = 0$ (первісне число ядер), а N – число ядер, що залишилися на момент часу t . Інтегруючи, отримуємо

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

або

$$\boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}. \quad (34.6)$$

Співвідношення (34.6) називається **законом радіоактивного розпаду**, із якого видно, що число радіоактивних ядер в даному зразку зменшується з часом експоненціально (рис. 34.3). Цей закон є статистичний і виконується строго лише для дуже великого числа ядер N , що

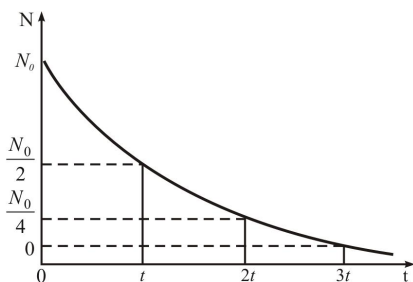


Рис. 34.3

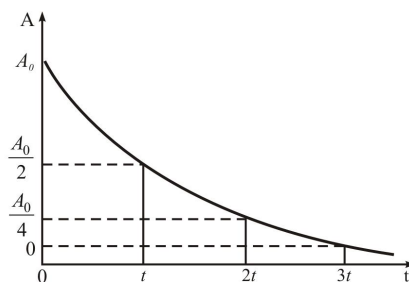


Рис. 34.4

розпадаються. Якщо число ядер, що розпадаються не дуже велике, то, як і в будь-якому іншому статистичному явищі, будуть спостерігатися флуктуації.

Швидкість розпаду або число розпадів за одиницю часу в чистому зразку дорівнює dN/dt . Ця величина називається **активністю** даного радіоактивного препарату. Із співвідношень (34.4) і (34.6) слідує, що

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (34.7)$$

Таким чином, має місце формула

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (34.8)$$

де $A_0 = -\lambda N_0$ – початкова активність, $A = \lambda N$ – активність препарату в момент часу t . Із (34.8) видно, що активність радіоактивного препарату зменшується за експоненціальним законом (рис. 34.4).

За одиницю активності взято активність препарату, в якому відбувається один розпад за секунду. Цю одиницю називають **беккерель (Бк)**. Іноді користуються позасистемною одиницею активності препарату – **кюрі (Ки)**: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Таку активність має 1 г радію – (${}^{226}_{88} \text{Ra}$).

Обернена величина сталої радіоактивного розпаду λ називається **середньою тривалістю життя** радіоактивного атома

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (34.9)$$

Враховуючи (34.9), формулу (34.6) іноді записують у вигляді

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Часто для характеристики тривалості життя радіоактивного ізотопу користуються поняттям періоду піврозпаду T . **Періодом піврозпаду називають час, на протязі якого розпадається половина початкової кількості даної радіоактивної речовини.** Покладаючи $t = T$, $N = N_0 / 2$, за формулою (34.3) знаходимо:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T},$$

звідки

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693\tau. \quad (34.10)$$

Періоди піврозпаду сьогодні відомих природних радіоактивних ізотопів різні – від $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ до $5 \cdot 10^{15}$ років.

Приклад 34.1. *Період піврозпаду ізотопу вуглецю ${}^{14}_6\text{C}$ складає $T = 5730$ років. В якийсь момент часу зразок містить $N = 1,0 \cdot 10^{22}$ ядер вуглецю ${}^{14}_6\text{C}$. Знайти активність зразка.*

Розв’язок: *Знайдемо, перш за все, сталу розпаду λ , яку виразимо із формули (34.10):*

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{(5730 \text{ років})(3,15 \cdot 10^7 \text{ с / рік})} = 3,84 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1},$$

(тривалість року в секундах $(60)(60)(24)(365) = 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$.)

За формулою (34.7) активність дорівнює (знак мінус опускаємо)

$$A = \lambda N = (3,84 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1})(1,0 \cdot 10^{22}) = 3,8 \cdot 10^{10} \text{ розп / с} = 1 \text{ Ки}.$$

Приклад 34.2 *В лабораторії є $m = 1,49$ мкг чистого ізотопу ${}^{13}_7\text{N}$ з періодом піврозпаду $T = 10,0$ хв. а) Скільки ядер ${}^{13}_7\text{N}$ містилось в початковому зразку? б) Яка його початкова активність? в) Яка його активність через $t = 1,00$ год? г) Через який час (приблизно) активність ізотопу впаде менш ніж до одного розпаду за секунду?*

Розв'язок: а) Оскільки атомна маса ізотопу ${}^{13}_7N$ дорівнює 13, то 13,0 г його містять $6,02 \cdot 10^{23}$ ядер (число Авогадро). Маса лабораторного зразка складає $1,49 \cdot 10^{-6}$ г, тому число ядер ${}^{13}_7N$ в ньому визначається пропорцією

$$\frac{N}{6,02 \cdot 10^{23}} = \frac{1,49 \cdot 10^{-6} \text{ г}}{13,0 \text{ г}},$$

звідки $N = 6,90 \cdot 10^{16}$ ядер.

б) Із формули (34.10) маємо:

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{(600 \text{ с})} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

Тоді, при $t = 0$

$$A_0 = \lambda N = (1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1})(6,90 \cdot 10^{16}) = 8 \cdot 10^{13} \text{ розп/с}.$$

в) Через 1 год. = 3600 с активність зразка зменшиться до

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = (8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}) e^{-(1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1})(3600 \text{ с})} = 1,23 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}.$$

г) Час t , після якого $A = 1,00 \text{ с}^{-1}$, визначимо із формули (34.8), попередньо прологарифмувавши її. Тоді

$$t = \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{\lambda \ln e} = \frac{\ln \frac{1,00 \text{ с}^{-1}}{8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}}}{1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}} = \frac{32,01}{1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}} = 2,76 \cdot 10^4 \text{ с} = 7,66 \text{ год}.$$

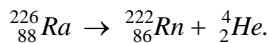
§ 34.5. Правила зміщення

Як уже відмічалось вище (§ 34.4), існують три види радіоактивного розпаду: α -, β - і γ -розпад.

α -розпад. Більшість важких ядер (при $Z \geq 84, A \geq 208$) розпадаються з випромінюванням α -частинок за схемою:



де ${}_Z^AX$ – материнське ядро (ядро, що розпадається), ${}_{Z-2}^{A-4}Y$ – дочірнє ядро (ядро, що утворилося), $\alpha ({}_2^4He)$ – частинка, яка є ядром гелію. Наприклад,



Таким чином, внаслідок α -розпаду утворюється **новий хімічний елемент**: дочірнє ядро (в нашому прикладі ${}_{86}^{222}Rn$). Причому новий хімічний елемент (${}_{86}^{222}Rn$) розміщений в таблиці Менделєєва на дві клітинки зліва від вихідного елемента (${}_{88}^{226}Ra$). Ядра радону також радіоактивні і служать потужними випромінювачами α -частинок. Він зустрічається в природних джерелах, вода яких, як прийнято вважати, володіє лікувальними властивостями.

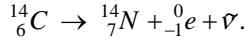
Зауважимо, що при випромінюванні α -частинок ядро може знаходитись в збудженому стані, тому при переході в основний стан воно може випромінювати γ -фотон.

β -розпад. β -розпадом називають процес спонтанного перетворення нестабільного ядра в ядро із зарядом, відмінним на $\Delta Z = \pm 1$ за рахунок випромінювання електрона (e^-) або позитрона (e^+).

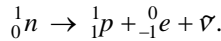
Перший тип β -розпаду (з випромінюванням електрона) відбувається за схемою



де ${}_Z^AX$ – материнське ядро, ${}_{Z+1}^AY$ – дочірнє ядро, ${}_{-1}^0e$ – електрон, $\tilde{\nu}$ – антинейтрино. Наприклад,



Процес β -розпаду зводиться до перетворення нейтрона в протон за схемою



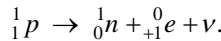
Таким чином, випромінюваний електрон не має ніякого відношення до орбітальних електронів в атомі, він народжується в самому ядрі.

Із (34.12) видно, що ядро, яке утворилося при β -розпаді з випромінюванням електрона, знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку справа від вихідного елемента.

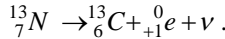
Другий тип β -розпаду (з випромінюванням позитрона) відбувається за схемою:



де ${}_Z^AX$ – материнське ядро, ${}_{Z-1}^AY$ – дочірнє ядро, ${}_{+1}^0e$ – позитрон (частинка за всіма властивостями схожа на електрон, але заряд має додатний), ν – нейтрино. В цьому випадку один із протонів перетворюється в нейтрон за схемою



Наприклад,

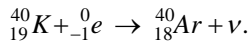


Таким чином, у випадку другого типу β -розпаду (з випромінюванням позитрона) утворюється ядро атома (в нашому прикладі ${}_{6}^{13}C$), що знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку зліва від вихідного елемента.

Поряд з випромінюванням β^- і β^+ -частинок (так часто позначають випромінювання електрона (${}_{-1}^0e$) і позитрона (${}_{+1}^0e$)) існує ще і третій процес того ж типу. Він називається **захопленням електрона** і воно полягає в поглинанні ядром одного із орбітальних електронів свого ж атома, в результаті чого один із протонів ядра перетворюється в нейтрон, випромінюючи при цьому нейтрино (${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + \nu$). Цей процес відбувається за схемою:



Наприклад, ядро калію ${}_{19}^{40}K$ при захопленні електрона перетворюється в ядро аргону ${}_{18}^{40}Ar$:



Як правило, захоплення електрона відбувається із самої внутрішньої К-оболонки атома, звідси і назва “К-захоплення”. Місце в К-електронній оболонці, яке звільнилося в результаті захоплення, заповнюється електронами із вищих електронних оболонок, в силу чого виникає рентгенівське випромінювання. Саме по такому випромінюванню у 1937 р. і було відкрито К-захоплення американським фізиком Л. Альваресом (1911 – 1988).

Із (34.14) видно, що в результаті К-захоплення утворюється ядро атома хімічного елемента, який знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку зліва від материнського елемента.

Вирази (34.11 – 34.14) називають **правилами зміщення** радіоактивного елемента в періодичній таблиці елементів Менделєєва.

При всіх трьох видах β -розпаду можливе випромінювання γ -фотона.

γ -розпад. Стабільні ядра, як правило, знаходяться в станах з найменшою енергією або в своїх основних станах. Однак, подібно атому, ядра можна перевести в збуджені стани, бомбардуючи їх частинками або фотонами великих енергій. Повертаючись в стан з більш низькою енергією або основний стан, ядро випромінює γ -фотон. Цей процес відбувається частіше за все. Схематично процес γ -розпаду записується так:

$$({}_Z^AX)^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma. \quad (34.15)$$

Зірочка в (34.15) означає, що ядро є збудженим. Обидва ядра: і материнське, і дочірнє – мають однаковий склад нуклонів (протонів і нейтронів). Гамма-розпад, як і α - і β -розпади, відбувається з обов'язковим виконанням законів збереження маси – енергії і імпульсу.

§ 34.6. Ядерні реакції. Штучна радіоактивність

В явищах природної радіоактивності, як було показано вище, відбувається перетворення одних ядер в інші. Виявляється, що подібні перетворення можна здійснювати бомбардуючи ядра частинками з великою енергією. Перебудову (перетворення) ядер в результаті таких впливів називають **ядерною реакцією**. Першу ядерну реакцію здійснив Е. Резерфорд у 1919 р., бомбардуючи α -частинками з енергією 7,68 MeV, які випромінювалися ядрами ${}_{84}^{214}\text{Po}$, ядра ${}_{7}^{14}\text{N}$ і отримав ядра ${}_{8}^{17}\text{O}$ і протони. Ядерна реакція відбувалася за схемою:



Цю реакцію можна віднести до типу ядерних реакцій, які символічно записують рівнянням

$$\alpha + X \rightarrow p + Y, \quad (34.17)$$

де α -частинка ${}_2^4\text{He}$ – бомбардуюча частинка, її ще називають частинкою-снарядом; X – ядро, яке бомбардують – ядро-мішень; p – протон; Y – ядро віддачі. Часто рівняння реакції (34.17) записують в такому вигляді:

$${}_Z^AX(\alpha, p){}_{Z+1}^{A+3}Y.$$

В цих позначеннях ядерна реакція (34.16) виглядатиме так:

$${}_7^{14}\text{N}(\alpha, p){}_8^{17}\text{O}.$$

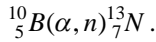
Такого типу реакції називають (α, p) – реакціями. Перша частинка в дужках є частинкою-снарядом, а друга, є частинка, що утворюється поряд з новим ядром.

У 1934 р. подружжя Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі* виявили, що при опроміненні деяких ядер α -частинками утворюються нові радіоактивні ізотопи, які розпадаються за тими ж самими законами. Такий розпад отримав назву **штучної радіоактивності**. Наприклад, при опроміненні ядер бору ${}_{5}^{10}\text{B}$ α -частинками, утворюються ядра азоту ${}_{7}^{13}\text{N}$ і нейтрони ${}_0^1\text{n}$:

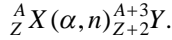
* Подружжя **Ірен** (1897–1956) і **Фредерік** (1900–1958) **Жоліо-Кюрі** – французькі фізики. За відкриття штучної радіоактивності і синтез нових елементів подружжя Жоліо-Кюрі удостоєні Нобелівської премії (1935 р.) з хімії.



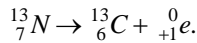
В скороченому вигляді реакцію (10.18) записують так:



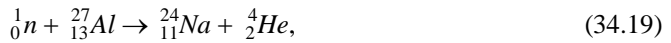
Цей тип реакцій називають (α, n) – реакціями і мають такий загальний вигляд:



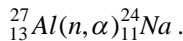
Ізотоп азоту ${}_7^{13}\text{N}$ (див. 34.18) сам радіоактивний з періодом піврозпаду $T = 10$ хв і розпадається за схемою:



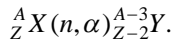
У 1934 р. Е. Фермі* із співробітниками встановив, що шляхом бомбардування ядер нейтронами також можна отримати ядра нових радіоактивних ізотопів. Наприклад, бомбардуючи нейтронами ядра алюмінію ${}_{13}^{27}\text{Al}$, отримуються ядра натрію ${}_{11}^{24}\text{Na}$ і α -частинки (${}_2^4\text{He}$):



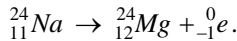
або



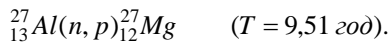
Цей тип реакцій в загальному вигляді записується так:



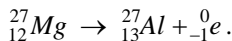
Ізотоп натрію ${}_{11}^{24}\text{Na}$ радіоактивний з періодом піврозпаду $T = 14,9$ год розпадається за схемою:



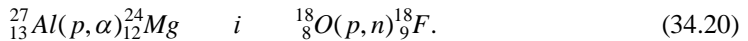
Під дією нейтронів може відбуватися і інший тип реакцій – (n, p) . Наприклад,



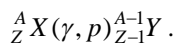
Магній ${}_{12}^{27}\text{Mg}$ радіоактивний ($T = 9,51$ год) і розпадається за схемою:



Радіоактивні ізотопи можуть виникати і при опроміненні ядер протонами. Тут можуть проходити ядерні реакції типу (p, α) і (p, n) . Наприклад,



Деякі радіоактивні ізотопи можна отримати під дією γ -фотонів (**ядерний фотосфekt**). Цей тип реакції записують так:



***Енріко Фермі (1901–1954)** – видатний італійський фізик, лауреат Нобелівської премії (1938 р.) з фізики за відкриття штучної радіоактивності, викликаної бомбардуванням повільними нейтронами.

Наприклад,



Ядро берилію під дією γ -фотона переходить в збуджений стан і випромінює протон, перетворюючись в радіоактивний ізотоп літію ${}^8_3\text{Li}$. Число відомих сьогодні ядерних реакцій виражається тисячами.

За допомогою ядерних реакцій було отримано ряд нових хімічних елементів, які в природі не існують. Це елементи з порядковими номерами від 93 до 107 і вони називаються **трансурановими** (заурановими) **елементами**. В природі зустрічаються елементи з атомними номерами від 1 до 92, включаючи і плутоній (Pu, $Z = 94$), щоправда він спочатку був отриманий штучно, а потім виявлений в природі.

Трансуранові елементи кюрій (${}_{96}\text{Cm}$), ейнштейній (${}_{99}\text{Es}$), фермій (${}_{100}\text{Fm}$), менделевій (${}_{101}\text{Md}$) отримали назву на честь видатних вчених. Курчатовій (${}_{104}\text{Ku}$) отримав назву на честь видатного радянського фізика І.В. Курчатова.

§ 34.7. Поділ ядер урану

У 1938 р. німецькі фізики Отто Ган (1879–1968) і Фріц Штрассман (1902 – 1980) виявили, що при бомбардуванні урану нейтронами виникають ядра приблизно вдвічі легші, ніж вихідне ядро урану. Подальші ретельні дослідження показали, що в результаті опромінення урану нейтронами утворюються елементи лантан ${}^{139}_{57}\text{La}$ і барій ${}^{137}_{56}\text{Ba}$.

Ці результати в 1939 р. австрійські фізики Ліза Мейтнер (1878 – 1968) і Отто Фріш (1904 – 1979) пояснили так: ядро урану, поглинувши нейтрон, розпадається на дві приблизно рівні частини. Таке перетворення виглядало незвично, оскільки до цього всі відомі реакції супроводжувалися вилітанням із ядра окремих частинок (наприклад, n , p або α).

Нове явище отримало назву **поділу ядра**. Виявилось, що ізотоп ${}^{235}_{92}\text{U}$ ділиться легше, ніж більш поширений в природі ізотоп ${}^{238}_{92}\text{U}$. При кожному акті поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$ виділяється ~ 200 MeV енергії, внаслідок чого обидва осколки, розлітаючись майже в протилежних напрямках, володіють великою кінетичною енергією.

Процес поділу можна наочно зобразити, уявивши ядро урану у вигляді краплі рідини. Відповідно цієї **краплинної моделі** ядра, нейтрон, при поглинанні ядром ${}^{235}_{92}\text{U}$, передає йому додаткову внутрішню енергію (подібно до нагрівання краплі води) (рис. 34.5, а). Утворюється проміжний стан, або збуджене ядро ${}^{236}_{92}\text{U}$. Надлишкова енергія цього ядра призводить до більш інтенсивного руху окремих нуклонів, в результаті чого ядро набуває подовженої форми (рис. 34.5, б). Коли ядро набуває форми, зображеної на рис. 34.5, в, короткодіюча ядерна взаємодія нуклонів слабне внаслідок збільшення відстані між ними, а електростатичне відштовхування стає домінуючим, в результаті чого ядро розщеплюється на дві частини. Ядра N_1 і N_2 , які утворилися в результаті цього процесу, називають **осколками поділу** (рис. 34.5, г).

Важливим є і те, що поділ ядра супроводжується випромінюванням кількох нейтронів. Проміжне ядро існує менше 10^{-12} с,

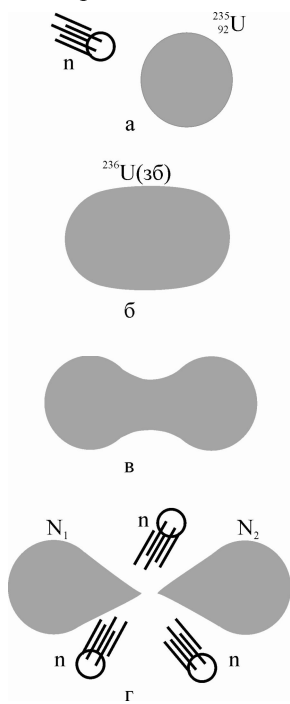
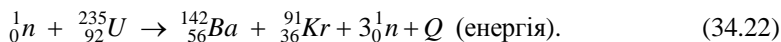


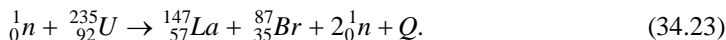
Рис. 34.5

тому процес поділу протікає дуже швидко.

Ядра (продукти поділу) можуть бути різноманітними. Найбільш типовим прикладом реакції поділу є:



На рис. 34.6 наведена схема цього поділу. Можливий також поділ



Продукти поділу найрізноманітніші, їх нараховується більше двісті видів. В результаті реакції поділу вивільняється велика кількість енергії. Так, в кожному

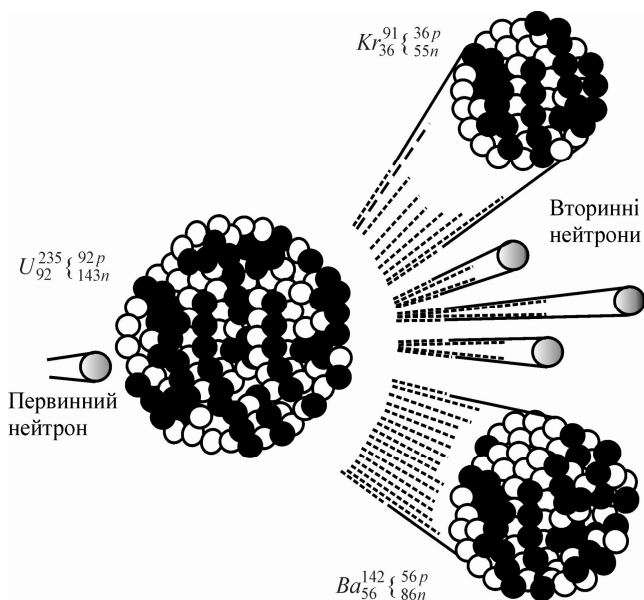


Рис. 34.6

акції поділу вивільняється велика кількість енергії. Так, в кожному акті поділу ядра урану, як відмічалось вище, виділяється енергія ~ 200 MeV. В ядерному масштабі – це величезна енергія. З практичної точки зору енергія, що виділяється при одному акті поділу, дуже мала. Але якщо одночасно ділиться велика кількість ядер урану, то в макроскопічних масштабах буде виділятися фантастично велика кількість енергії.

Виникнення при кожному акті поділу ядер кількох нейтронів робить можливим здійснення **ланцюгової реакції**. Дійсно, якщо ядром випромінено Z нейтронів, то вони можуть викликати поділ Z нових ядер, в результаті чого буде випромінено Z^2 нейтронів, які в свою чергу викличуть поділ Z^2 ядер і т. д. Таким чином, кількість нейтронів, які народжуються, росте в геометричній прогресії (рис. 34.7).

Однак, так було б в ідеальній системі. В дійсності далеко не всі народжені нейтрони поглинаються ядрами. Частина з них вилітає назовні, не взаємодіючи з ядрами, частина поглинається ядрами домішок, які не діляться, внаслідок чого вони також не прийматимуть участі в реакції. Розрахунки показують, що відносна доля нейтронів, які вилітають назовні, зменшується з ростом маси речовини, що ділиться.

Природний уран містить 99,27 % ізотопу ${}_{92}^{238}\text{U}$, 0,72 % ${}_{92}^{235}\text{U}$ і $\sim 0,01$ % ${}_{92}^{234}\text{U}$. Оскільки під дією нейтронів можуть ділитися тільки ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$, то в природному урані ланцюгова реакція не виникає.

Ланцюгова реакція в урані може бути здійснена двома способами. Суть першого способу заключається у виділенні із природного урану ізотопу ${}_{92}^{235}\text{U}$, який ділиться. Хоча ця задача не із легких, вона була розв'язана.

В шматку чистого ${}_{92}^{235}\text{U}$ (або ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) при кожному поділі ядра виникає $\sim 2,5$ нових нейтронів. Однак, якщо маса такого шматка менша певного критичного значення, то більшість випромінених нейтронів вилітають назовні, не викликаючи поділу, і ланцюгова

реакція не виникає. За підрахунками В. Гейзенберга*, маса урану повинна бути не менше 9 кг (критична маса). При масі урану ≥ 9 кг нейтрони швидко розмножуються, і реакція набуває вибухового характеру. На цьому принципі ґрунтується дія атомної бомби.

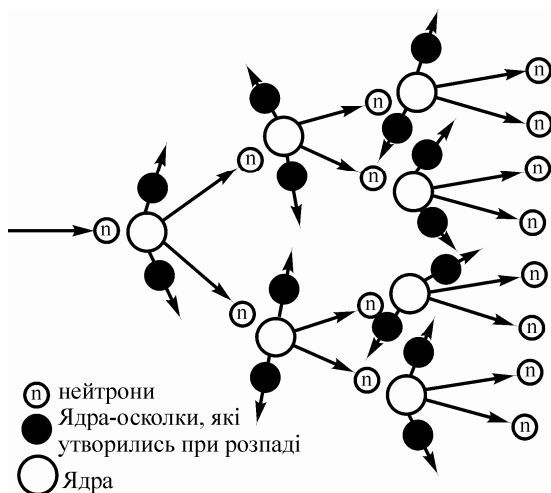


Рис. 34.7

В атомній бомбі ядерний заряд представляє собою два або більше шматків майже чистого $^{235}_{92}\text{U}$ або $^{239}_{94}\text{Pu}$. Маса кожного шматка менша критичної, внаслідок чого ланцюгова реакція не виникає. Щоб відбувся вибух, достатньо зблизити шматки ядерного заряду і утворити надкритичну масу, а в земній атмосфері завжди є певна кількість нейтронів, народжених космічними променями, які розпочнуть процес поділу ядер.

Інший спосіб здійснення ланцюгової реакції використовується в **ядерних реакторах**, перший із яких був побудований Е. Фермі із співробітниками в

Чикагському університеті (США) у 1942 р. В реакторах в якості ядерної речовини, що ділиться, використовують природний (або дещо збагачений) ізоотп урану $^{235}_{92}\text{U}$. Щоб не допустити захоплення нейтронів ядрами $^{238}_{92}\text{U}$, невеликі блоки ядерної речовини розміщують на деякій відстані один від одного, а проміжки між блоками заповнюють сповільнювачем, речовиною, в якій швидкі нейтрони сповільнюються до теплових швидкостей. В якості сповільнювачів використовують **важку воду** – це вода, в молекулах якої атоми водню ^1_1H замінені атомами дейтерію ^2_1H , **графіт**, який складається з атомів вуглецю $^{12}_6\text{C}$, і **берилій** (Be).

Для самопідтримуючої ланцюгової реакції в середньому принаймні один нейтрон, який виникає при кожному акті поділу, повинен викликати поділ одного ядра на наступному етапі. Середнє число нейтронів в кожному акті поділу, які викликають поділ інших ядер, називається **коефіцієнтом розмноження нейтронів** f . Для самопідтримуючої ланцюгової реакції повинна виконуватись нерівність $f \geq 1$. При $f < 1$ реактор називається **підкритичним**, при $f > 1$ – **надкритичним**. В реакторах є рухомі стержні для регулювання процесів в ньому. Ці стержні містять кадмій ($^{112}_{48}\text{Cd}$) і бор ($^{11}_5\text{B}$), які інтенсивно поглинають нейтрони. Введення стержнів в реактор зменшує коефіцієнт розмноження нейтронів, а виведення – збільшує. Спеціальний автоматичний пристрій керує стержнями так, щоб підтримувати потужність, що розвивається в реакторі на заданому рівні.

Схема уран-графітового реактора наведена на рис. 34.8. Тут цифрою 1 позначено сповільнювач-графіт, 2 – блоки із урану (твели), 3 – рухомі стержні.

Перші промислові реактори використовувалися для виробництва ядерної речовини для атомних бомб – плутонію.

* **Вернер Гейзенберг (1901–1976)** – німецький фізик – теоретик, лауреат Нобелівської премії (1932 р.) за розробку матричної механіки – перший варіант квантової механіки.

Застосування атомної енергії в мирних цілях вперше здійснено в СРСР під керівництвом

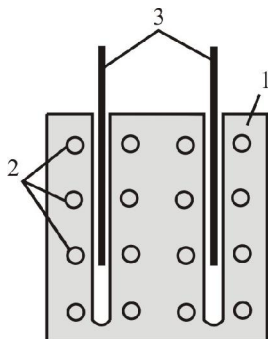


Рис. 34.8

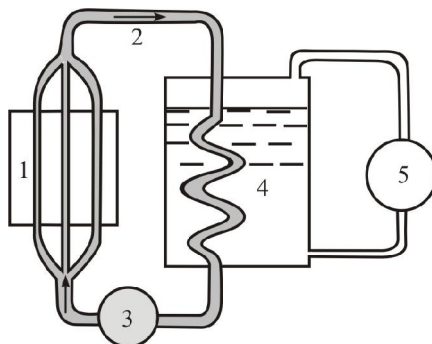
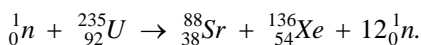


Рис. 34.9

І.В. Курчатова*. В 1954 р. в Радянському Союзі була введена в експлуатацію перша атомна електростанція потужністю 5000 кВт. На рис. 34.9 зображена схема атомної електростанції. Тепло, яке виділяється в зоні реактора 1, відводиться теплоносієм (вода або рідкий натрій), який циркулює в контурі 2. Циркуляція забезпечується насосом 3. В теплообміннику 4 теплоносії віддає своє тепло воді, перетворюючи її в пару, яка обертає турбіну 5.

Приклад 34.3. Вирахувати енергію, яка виділяється при реакції поділу



Розв'язок. Для того, щоб знайти енергію, яка виділяється при реакції поділу, необхідно знайти різницю суми мас частинок до і після поділу і помножити її на 931,5 МеВ (1 а. о. м. = 931,5 МеВ):

До поділу

$$235,043925 \text{ а. о. м. } ({}^{235}_{92}\text{U})$$

$$1,008665 \text{ а. о. м. } ({}^1_0n)$$

$$236,052590 \text{ а. о. м.}$$

Після поділу

$$87,905625 \text{ а. о. м. } ({}^{88}_{38}\text{Sr})$$

$$135,90722 \text{ а. о. м. } ({}^{136}_{54}\text{Xe})$$

$$1,008665 \text{ а. о. м. } (12^1_0n)$$

$$235,91683 \text{ а. о. м.}$$

Різниця мас дорівнює $\Delta M = 0,1357 \text{ а. о. м.}$. Величина енергії $Q = \Delta M(931,5 \text{ МеВ}) = (0,1357 \text{ а. о. м.})(931,5 \text{ МеВ}) = 126,5 \text{ МеВ}$. Зауважимо для порівняння, що енергія, яка виділяється при α -розпаді одного ядра $\approx 5 \text{ МеВ}$, а енергія, яка виділяється в одному акті хімічної реакції горіння, $\approx 4 \text{ еВ}$.

Приклад 34.4. Скільки актів поділу відбувається за 1 с в ядерному реакторі потужністю 2,5 МВт, якщо при кожному акті поділу виділяється енергія 200 МеВ.

Розв'язок: Енергія, що виділяється в реакторі за 1 с, дорівнює

$$E = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ еВ} = 1,56 \cdot 10^{25} \text{ еВ} = 1,56 \cdot 10^{19} \text{ МеВ}.$$

* Курчатова І.В. (1903–1960) – радянський фізик, організатор радянської ядерної науки, тричі Герой Соціалістичної Праці (1949, 1951, 1954 р.р.), лауреат Ленінської (1957 р.) і державних премій (1942, 1949, 1951, 1954 р.р.).

Оскільки при кожному акті поділу виділяється енергія 200 МеВ, то кількість актів поділу за 1с дорівнює: $N = \frac{1,56 \cdot 10^{19} \text{ MeB}}{200 \text{ MeB}} = 7,8 \cdot 10^{16}$.

§ 34.8. Термоядерні реакції

Термоядерні реакції – це реакції синтезу (злиття) легких ядер в одне ядро, які супроводжуються виділенням величезної кількості енергії. Однак, щоб зблизити ядра на відстань дії ядерних сил $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ м, потрібно виконати роботу проти сил електростатичного відштовхування

$$A = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_y},$$

де Z_1 і Z_2 – порядкові номери елементів, $R_y \approx 2 \cdot 10^{-15}$ м – радіус дії ядерних сил, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{В} \cdot \text{м}^2)$ – електрична стала. Навіть для ядер з $Z_1 = Z_2 = 1$ (ядер ізотопу водню (^1_1H , ^2_1H , ^3_1H), ця робота дорівнює

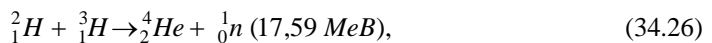
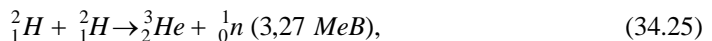
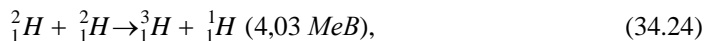
$$A = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R_y} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{4(3,14)(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-2})(2 \cdot 10^{-15} \text{ м})} = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 0,72 \text{ МеВ}.$$

Для виконання цієї роботи кожна з двох частинок повинна володіти кінетичною енергією

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}(1,15 \cdot 10^{-13}) \text{ Дж},$$

звідки випливає, що реакція повинна проходити при температурі $T \approx 2 \cdot 10^9$ К. Таким чином, синтез ядер повинен проходити при дуже високих температурах. У зв'язку з цим ці реакції називають ще **термоядерними**. Однак досвід показує, що деякі термоядерні реакції можуть протікати і при значно нижчих температурах порядку 10^7 К.

Сприятливіші умови існують для реакцій ізотопів водню, які можуть давати такі чотири типи реакцій (в дужках показано енерговиділення):



З найбільшою вірогідністю відбувається реакція синтезу дейтерію і тритію (34.26). При тій самій температурі синтез дейтерію і тритію відбувається в 100 разів швидше, ніж ядер дейтерію (34.24) і (34.25) і синтез ядер тритію (34.27).

Як видно (34.24) – (34.27), ядерний синтез, як і поділ важких ядер, супроводжується виділенням великої кількості енергії. Однак, оскільки питома енергія зв'язку (середня енергія зв'язку на один нуклон) у легких ядер менша, ніж у проміжних ядер (з A від 50 до 100), то в реакціях синтезу виділяється більша енергія, ніж при поділі ядер. Розрахунки показують, що в результаті повної реакції синтезу ядер 1 кг суміші дейтерію і тритію виділяється енергія $E = 72 \cdot 10^{13}$ Дж, яка у вісім разів більша від енергії поділу 1 кг $^{235}_{92}\text{U}$.

Перша термоядерна реакція дейтерію і тритію була здійснена в 1953 р. в СРСР у виг-

ляді вибуху потужної водневої бомби. У водневої бомби термоядерна реакція носить неконтрольований характер.

Вивільнення величезної кількості енергії в реакціях синтезу та великі запаси ядерного пального (дейтерій в необмеженій кількості міститься в морській воді ~ 1 г на 60 л води, що еквівалентно 400 л нафти), роблять актуальною проблему здійснення керованих термоядерних реакцій, однак для цього потрібно розв'язати цілий ряд серйозних і важливих технічних проблем. Одна із них – розігрів дейтерію в певному обмеженому об'ємі до температури 10^8 К, при якій речовина існує у вигляді плазми. Ще складнішою є проблема створення місткості, в якій можна б утримувати гарячу плазму при високому тиску, який необхідний для початку ядерної реакції злиття. Зрозуміло, що звичайна місткість для цієї мети не годиться, оскільки при такій температурі сама місткість перетворилася б у плазму. Тому зараз робляться спроби, і не безуспішні, втримати плазму і контролювати її поведінку за допомогою магнітного поля спеціальної форми. Є надії, що при відповідній напруженості поля і його форми (у вигляді тороїда), в такій “магнітній пляшці” вдасться нагріти плазму до потрібної температури і довести її до таких високих тисків, які потрібні для початку ядерної реакції злиття.

Інша цікава можливість – використовувати потужний ($P_{\max} \approx 5$ ГВт) імпульсний лазер на неодимовому склі. Припускається, що за допомогою такого лазера вдасться досягнути температури плазми 7–10 млн К. Реакція ядерного злиття повинна буде проходити в мішенях твердого дейтерію у вигляді дрібних крупинок.

Непростою справою є вимірювання температур в мільйон градусів. Можна б вимірювати температуру за розширенням спектральних ліній, однак, при вказаних температурах водень повністю іонізується і в спектрі випромінювання його ліній немає. Тому з цією метою використовують малі домішки азоту, атоми якого повністю не іонізуються і зберігають спектральні лінії у випромінюванні навіть при таких температурах.

Приклад 34.5. Скільки дейтерію необхідно для забезпечення електроенергією середнього будинку на протязі року, якщо середньодобова використовувана потужність складає 300 Вт. Припускається, що енергія виділяється в результаті реакції ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Розв'язок. Кількість енергії, необхідної для споживання протягом року

$$W = (300)(365)(24)(3600) \text{ Дж} = 9,4608 \cdot 10^9 \text{ Дж.} \quad (1)$$

(1 рік = (365) (24) (3600) с.)

Енергія, яка виділяється в одному акті синтезу

$$\begin{aligned} \Delta W &= [2m({}^2_1\text{H}) - (m({}^3_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n}))] 931,5 \text{ MeV} = \\ &= [2(2,014102) - (3,016029 + 1,008665)] 931,5 \text{ MeV} = \\ &= (3,51 \cdot 10^{-3})(931,5) \text{ MeV} = 3,269565 \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Дж}}{\text{MeV}} = 5,23 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.} \end{aligned} \quad (2)$$

Розділивши (1) на (2), знайдемо кількість циклів злиття ядер дейтерію за рік;

$$N = \frac{W}{\Delta W} = \frac{9,4608 \cdot 10^9 \text{ Дж}}{5,23 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} = 1,808948 \cdot 10^{22} \text{ циклів.} \quad (3)$$

Вага двох ядер дейтерію, що приймають участь в одному циклі реакції в грамах

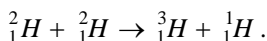
$$2m({}^2_1\text{H}) = 2(2,014102 \text{ а. о. м.})(1,6606 \cdot 10^{-24} \text{ г}) = 6,6892355 \cdot 10^{-24} \text{ г.} \quad (4)$$

Кількість дейтерію, яка необхідна для забезпечення електроенергією будинку, дорівнює кількості циклів N реакції в рік (3) помножити на масу 2-х ядер дейтерію (4). Тобто

$$M = N2m = (1,808948 \cdot 10^{22})(6,6892355 \cdot 10^{-24} \text{ г}) = 0,121 \text{ г.}$$

Приклад 34.6. Яка енергія виділяється при синтезі $m_1 = 1$ г пального в реакціях (34.24) і (34.26)? Порівняти отримані результати з енергією, яка виділяється при поділі $m_2 = 1$ г урану.

Розв'язок. 1) Перш за все знайдемо енергію, що виділяється в одному циклі синтезу в реакції (34.24):



Вона дорівнює

$$\begin{aligned}\Delta W &= [2m({}^2_1\text{H}) - (m({}^3_1\text{H}) + m({}^1_1\text{H}))] 931,5 \text{ MeB} = \\ &= [2(2,014102) - (3,016049 + 1,007825)] 931,5 \text{ MeB} = \\ &= (4,33 \cdot 10^{-3}) 931,5 \text{ MeB} = 4,03 \text{ MeB} = 4,03 \cdot 10^6 \text{ eB}.\end{aligned}$$

Кількість циклів N реакції злиття в 1 г тритію дорівнює

$$N = \frac{1}{2m({}^2_1\text{H})} = \frac{1}{2(2,014102)(1,6606 \cdot 10^{-24} \text{ з})} = 1,4949391 \cdot 10^{23} \text{ з}^{-1}.$$

Енергія, що виділяється при синтезі 1 г тритію (у випадку реакції (34.24)),

$$\begin{aligned}W &= N\Delta W = (1,4949391 \cdot 10^{23})(4,03 \cdot 10^6) \frac{\text{eB}}{\text{з}} = \\ &= 6,0246045 \cdot 10^{29} \frac{\text{eB}}{\text{з}} = (6,0246045 \cdot 10^{29})(1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{з}}) = 9,639 \cdot 10^{10} \frac{\text{Дж}}{\text{з}}.\end{aligned}$$

2) У випадку реакції (34.26) ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ матимемо:

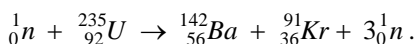
$$\Delta W = [2,014102 + 3,016049 - (4,002603 + 1,008665)] 931,5 \text{ MeB} = 17,58 \text{ MeB} = 17,58 \cdot 10^6 \text{ eB},$$

$$N = \frac{1}{(m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_1\text{H}))\text{з}} = \frac{1}{(2,014102 + 3,016049)(1,6606 \cdot 10^{-24} \text{ з})} = 1,1971648 \cdot 10^{23} \text{ з}^{-1}.$$

Енергія, що виділяється при синтезі 1 г речовини,

$$W = N\Delta W = (1,1971648 \cdot 10^{23})(17,58 \cdot 10^6) \frac{\text{eB}}{\text{з}} = (2,1 \cdot 10^{30})(1,6 \cdot 10^{-19}) \frac{\text{Дж}}{\text{з}} = 3,36 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{з}}.$$

3) Типовою реакцією поділу ядра урану є:



Енергія, що виділяється при одному акті поділу,

$$\Delta W = [1,008665 + 235,043925 - (140,913740 + 91,906960 + 3 \cdot 1,008665)] 931,5 \text{ MeB} = 191,81 \text{ MeB}.$$

Кількість циклів розпаду в 1 г урану

$$N = \frac{1}{m({}^{235}_{92}\text{U})\text{з}} = \frac{1}{235,043925(1,6606 \cdot 10^{-24} \text{ з})} = 2,56 \cdot 10^{21} \text{ з}^{-1}.$$

Енергія, що виділиться з 1 г урану,

$$W = N\Delta W = (2,56 \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{з}})(191,79 \cdot 10^6) \frac{\text{eB}}{\text{з}} = 4,91 \cdot 10^{29} \frac{\text{eB}}{\text{з}} = 7,86 \cdot 10^{10} \frac{\text{Дж}}{\text{з}}.$$

В першій реакції при синтезі 1 г пального виділяється енергії в 1,2 раз більше, ніж при розпаді 1 г урану, в другому випадку – в 4,3 рази.

§ 34.9. Застосування радіоактивних ізотопів

Виробництво і застосування радіоактивних ізотопів становить важливу галузь не тільки прикладної фізики але і медицини, біології, сільського господарства. Ми поведемо мову про застосування радіоактивних ізотопів лише в медицині, біології і сільському господарстві. Відразу, як тільки були відкриті радіоактивні ізотопи, стало зрозуміло, що за їх випромінюванням можна прослідкувати їх шлях, тобто їх можна використати як **радіоактивні індикатори**. Особливо цей напрямок інтенсивно почав розвиватися після початку масового виробництва **штучних радіоактивних елементів**. Це дозволяє вивчати фізіологічні процеси за допомогою радіоактивних ізотопів тих елементів, із яких побудований наш організм і які беруть участь в обміні речовин.

Крім того, радіоактивні ізотопи, так само як і стабільні, утворюють сполуки з іншими атомами. Так, наприклад, можна виробляти так звані **мічені молекули і сполуки**. Слово "мічений" виражає, що молекули, які містять радіоактивні ізотопи, завдяки їх випромінюванню, можна відрізнити від простих молекул, в порівнянні з якими вони ніби мічені. Мічені молекули в різних хімічних, біохімічних, а тому і біологічних процесах фактично ведуть себе так само, як і прості молекули. Поряд з більш простими неорганічними сполуками зараз є великий вибір мічених органічних сполук (мічені амінокислоти, гормони, ліки тощо), і навіть є можливість замінити атом $^{14}_6\text{C}$, якоїсь молекули, ізотопом вуглецю $^{14}_6\text{C}$. Часто внесена в живий організм мічена сполука в процесі нормальної діяльності перетворюється в більш складну органічну сполуку (біосинтез).

Значення радіоактивних ізотопів можна підсумувати наступним:

1. За атомами радіоактивних ізотопів, внесених в організм, можна прослідкувати, їх можна відрізнити від атомів, які раніше знаходилися в організмі. Так, достатньо просто можна отримати інформацію про **динаміку процесів**, в яких беруть участь мічені атоми або їх сполуки. Іноді можна отримати відповідь на такі питання, на які іншими способами не вдається її отримати.

2. Метод мічених атомів дуже **чутливий**. Нижня межа чутливості складає $\sim 10^9$ г. За допомогою сучасних радіоактивних вимірювальних приладів в принципі можна виявити присутність навіть одного атома. Чутливість радіоактивного метода на шість – вісім порядків вища чутливості мікроскопічних методів.

3. Висока чутливість робить можливою при вивченні тих або інших процесів роботу з такими мізерними кількостями речовин, які практично не впливають на життєві процеси. Наприклад, для вивчення **функції** щитовидної залози необхідно 10 мкКі радіоактивного $^{131}_{53}\text{I}$, а його маса дорівнює $\sim 8 \cdot 10^{-11}$ г. Ця кількість не впливає ні на стан і діяльність організму, ні на функцію щитовидної залози. Через маленьку кількість радіоактивного ізотопу в більшості випадків можна **знехтувати** також і присутністю продуктів розпаду, що утворюються в процесі радіоактивного розпаду.

В якості індикаторів (мічених атомів) можна використовувати і стабільні ізотопи, потрібно тільки забезпечити відповідний метод реєстрації.

У сільському господарстві метод радіоактивних індикаторів застосовують для контролю за рівномірним внесенням добрив у ґрунт, рівномірним розподілом малих доз вітамінів по усій масі кормів, а також для розв'язання багатьох інших задач.

Радіоактивні ізотопи, як джерела високих енергій, застосовують для дозованого опромінювання різних речовин з метою спричинити наперед заплановані зміни в їх структурі, а також в станах їх молекул і атомів. На ньому ґрунтуються методи **радіаційної хімії та радіаційної біології**.

Радіаційна хімія розв'язує проблеми, пов'язані із створенням речовин з максимальною опірністю руйнуванню, що спричинюється радіоактивним випромінюванням та створенням нових

матеріалів з цінними властивостями.

Радіаційна біологія вивчає зміни в живих організмах, спричинені дією радіоактивних випромінювань. Наприклад, дослідження зміни спадкових якостей рослин і тварин. Велику кількість нових перспективних сортів сільськогосподарських культур створено внаслідок зміни спадковості рослинних організмів під дією радіоактивних випромінювань.

§ 34.10. Дія радіації на людину

Різні види випромінювань (див. § 34.6) супроводжуються вивільненням різної кількості енергії і володіють різною проникаючою здатністю, а тому вони справляють неоднаковий вплив на тканини живого організму (рис. 34.10). α -випромінювання (α -частинки ядра ${}^4_2\text{He}$) затримується, наприклад, листком паперу і практично нездатне проникати через зовнішній шар шкіри, який утворюється відмерлими клітинами. Тому воно не представляє небезпеки до тих пір, поки α -частинки не попадуть всередину організму через відкриту рану, з їжею або з повітрям в процесі дихання: тоді вони стають **надзвичайно небезпечними**. β -випро-

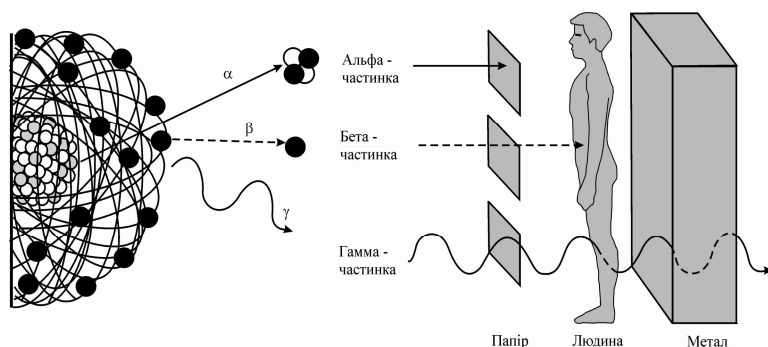


Рис. 34.10

мінюванню притаманна більша проникаюча здатність: воно проникає в тканини організму на глибину один-два сантиметри. Проникаюча здатність γ -випромінювання, яке поширюється із швидкістю світла, дуже велика: його може затримати лише товста свинцева пласина або бетонна плита.

Ушкодження, викликані в живому організмі випромінюванням, буде тим більше, чим більше воно енергії передасть тканинам; кількість такої енергії, переданої організму, називають **дозою**.

Кількість енергії випромінювання, поглинутої одиницею маси опромінюваного тіла (тканинами організму), називають поглинутою дозою. В СІ поглинута доза вимірюється в греях (Гр). $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Однак, різні види випромінювання мають різну здатність ушкоджувати тканини організму. Наприклад, α -випромінювання вважається \sim в двадцять раз небезпечнішим інших видів випромінювань. Враховуючи це, поглинуту дозу потрібно помножити на коефіцієнт **відносної біологічної активності**, який відображає здатність випромінювання даного виду ушкоджувати тканини організму. Перераховану таким чином дозу називають **еквівалентною дозою**. В СІ еквівалентну дозу вимірюють в **зівертах (Зв)**. $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ для рентгенівського, γ - і β -випромінювань.

Крім того, слід також враховувати, що одні частини тіла (органи, тканини) більш чутливі до випромінювання, ніж інші. Наприклад, при однаковій еквівалентній дозі опромінення виникнення раку в легенях більш імовірно, ніж в щитовидній залозі, а опромінення статевих залоз особливо небезпечно із-за ризику генетичних ушкоджень.

Таблиця 34.1

Ефекти дії різних доз іонізуючого випромінювання на організм людини

Інтенсивність опромінення	100 – 200 Р	200 – 600 Р	600 – 1000 Р	1000 – 5000 Р	>5000 Р
Ефект					
Випадки блювання	100 Р – 5 % 200 Р – 50 %	300 Р – 100 %	100 %	100 %	100 %
Через який термін	3 год.	2 год.	1 год.	1/3 год.	1/2 год.
Основний вражений орган	Кровотворні тканини	Кровотворні тканини	Кровотворні тканини	Тканини шлунка	Центральна нервова система
Характерні ознаки	Важка лейкемія, почервоніння, кровотеча, інфекція	–	–	Пронос, лихоманка	Конвульсії, сонливість
Критичний період після опромінення	–	4 – 6 тижнів	4 – 6 тижнів	5 – 14 днів	1 – 48 год.
Терапія	Психотерапія, контроль за станом крові, антибіотики	Переливання крові, антибіотики	По можливості пересадка кісткового мозку	Підтримка електролітичного балансу	Заспокійливе, снодійне
Прогноз	Відмінний	Сприятливий	Подвійний наслідок	Безнадійний	Безнадійний
Період одужання	Кілька тижнів	1 – 2 місяці	Тривалий	–	–
Випадки смерті	Ні одного	0 – 80 %	80 – 100 %	90 – 100 %	90 – 100 %
Смерть настає	–	2 місяці	2 місяці	2 тижні	2 дні
Причини смерті	–	Кровотеча, інфекції	Кровотеча, інфекції	Циркулюючий колапс	Дихальна недостатність

Тому дози опромінення органів і тканин також слід враховувати з різними коефіцієнтами. Помноживши **еквівалентні** дози на відповідні коефіцієнти і просумувавши по всім органам і тканинам, отримаємо **ефективну еквівалентну** дозу, яка відображає сумарний ефект опромінення для організму; вона також вимірюється в зівертах.

Ці три поняття описують індивідуально отримувані дози. Просумувавши індивідуальні ефективні еквівалентні дози, ми прийдемо до **колективної ефективної еквівалентної дози**, яка вимірюється в людино-зівертах (лд-зв).

Негативний вплив випромінювань, очевидно, пов'язаний з іонізацією і збудженням атомів живих клітин організму. В результаті окремі складові частини живої клітини змінюються або руйнуються, а продукти розкладу починають діяти як отрута.

Часто нормальний процес заміни клітин організму новими повністю порушується через нездатність опромінених клітин виробляти собі подібних, коли на ці клітини попадає іонізуюче випромінювання. Найбільш чутливі до випромінювання клітини кісткового мозку, менш чутливі – тканини м'язів, нерви, мозок.

Зауважимо, що іноді для вимірювання поглинутої дози використовують спеціальну оди-

ницю, яку називають **Радом (рад)**. 1 рад – це доза, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія, яка дорівнює 0,01 Дж. $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$.

Часто ще користуються поняттям експозиційна доза (Де): Експозиційна доза (Де) – кількісна характеристика поля іонізуючого випромінювання, яка ґрунтується на величині іонізації сухого повітря при атмосферному тиску: одиницею вимірювання Де є рентген (Р), $1 \text{ Р} = 2 \cdot 10^{15} \text{ пар/м}^3 = 0,011 \text{ Дж/м}^3$.

Корисно запам'ятати зручне правило, яке часто застосовується в практичній дозиметрії: доза 1 Р накопичується за 1 год. на відстані 1 м від джерела радіо масою 1 г, тобто активністю приблизно 1 Кі.

В таблиці 34.1 наведено порівняння ефектів дії різних доз опромінення іонізуючими випромінюваннями на організм людини.

§ 34.11. Методи реєстрації елементарних частинок

Згідно первісному задуму елементарні частинки є найпростішими частинками, із яких побудована речовина (атоми) існуючого світу. Елементарні частинки на самому початку уявлялись як щось вічне, незмінне, непорушне, і образ елементарної частинки пов'язувався з образом безструктурної маленької кульки.

Поняття «елементарна частинка» і в наші дні є достатньо складним, і ряд експериментальних фактів призводить до проблеми структури елементарних частинок.

Історично першою елементарною частинкою був електрон (Дж. Дж. Томсон, 1897 р.). Далі були відкриті протон, α -частинка, атомне ядро, нейтрон, нейтрино, μ - і π - мезони тощо. Відомо, що кожна елементарна частинка має собі протилежну – античастинку. Загальне число елементарних частинок сьогодні складає біля двісті. Більшість із них нестабільні і поступово перетворюються в більш легкі елементарні частинки. Відкриття нових частинок продовжується.

Основними характеристиками фізичних властивостей елементарних частинок є: **власна маса, спин, елементарний заряд, магнітний момент, час життя** тощо. Названі характеристики елементарних частинок дозволяють реєструвати їх і вивчати їхні властивості за допомогою численних фізичних методів. Розглянемо деякі із них.

Камера Вільсона. В 1911 р. англійський фізик Ч. Вільсон (1869 – 1959)* побудував прилад, за допомогою якого можна було бачити і фотографувати траєкторії (треки) заряджених елементарних частинок

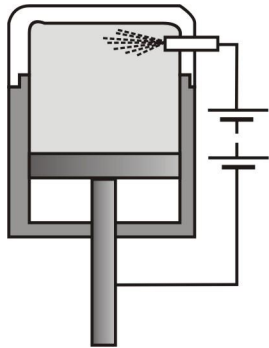


Рис. 34.11

Камера Вільсона (рис. 34.11) складається із циліндра з поршнем. Верхня частина циліндра виготовлена із прозорого матеріалу. В циліндр вводиться невелика кількість води або спирту, внаслідок чого всередині неї утворюється суміш насиченої пари і повітря. При швидкому опусканні поршня суміш адіабатично розширюється і охолоджується, внаслідок чого насичена пара перетворюється в пересичену.

Якщо повітря в камері очищено від механічних домішок (наприклад, пилинок), то перетворення надлишку пари в рідину утруднено через відсутність центрів конденсації. Однак, центрами конденсації можуть стати і іони, які можуть утворитися, якщо через камеру пролітає в цей час заряджена частинка, яка на своєму шляху іонізує молекули повітря. Траєкторія (трек) руху частинки всередині камери стає видимою у вигляді нитки туману. Однак, теп-

*Ч. Вільсон за створення камери для реєстрації елементарних частинок в 1927 р. був удостоєний Нобелівської премії.

ловий рух молекул повітря розмиває нитку туману і траєкторії частинок чітко видимі лише $\approx 0,1$ с, що достатньо для того, щоб сфотографувати її. На рис. 34.12 наведена фотографія треків α -частинок, що утворюються при розпаді ядер торію (Th).

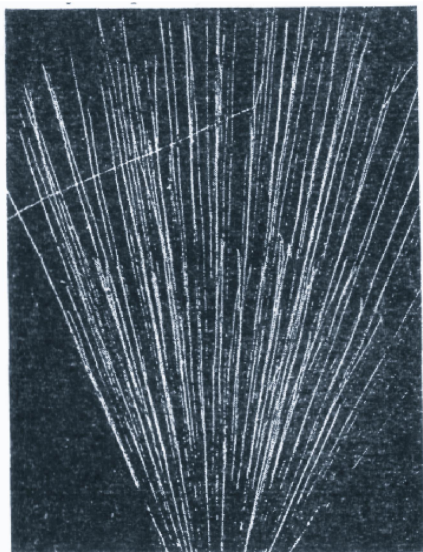


Рис. 34.12

товстий суцільний слід, протони – більш тонкий, а електрони – тонкий пунктирний слід.

В магнітному полі на рухому заряджену частинку діє сила Лоренца і її траєкторія стає викривленою. По викривленню траєкторії вдається визначити знак заряду частинки і її імпульс. На фотографії (рис. 34.13), отриманій за допомогою камери Вільсона, поміщеної в магнітне поле, видно треки електрона і позитрона.

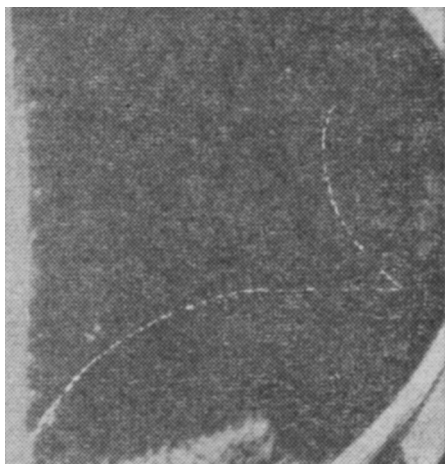


Рис. 34.13

Щоб видалити іони з робочого об'єму камери, всередині неї створюють електричне поле, яке притягає іони до електродів, де вони нейтралізуються.

Пізніше камера Вільсона була вдосконалена російським фізиком Д.В. Скобельциним (1892 р.н.) та американським вченим К. Андерсоном (1905 – 1991). Перший застосував камеру в сильному магнітному полі, паралельному її осі, а другий розробив до камери автоматичний пристрій для її запуску і фотографування в той момент, коли частинка попадає в камеру.

Вигляд треків на фотопластинці часто дозволяє судити про природу частинки і деякі її властивості. Так, α -частинка залишає відносно

За допомогою камери Вільсона було відкрито елементарні частинки **позитрон** та **мезон**, зафіксовано ядерні реакції, явища перетворення фотона в пару електрон-позитрон тощо.

Дифузійна камера. Недоліком камери Вільсона є те, що вона працює не неперервно, а циклами. Короткий ($\approx 0,1$ с) час чутливості камери чергується з мертвим часом (в 100 – 1000 раз більшим), на протязі якого камера готується до наступного робочого циклу. Дифузійна камера володіє

неперервною чутливістю до частинок. Вона була створена в 1939 р. американським фізиком Лангсдорфом. Робочою речовиною в дифузійній камері, як і в камері Вільсона, є пересичена пара. Однак, стан пересиченості створюється не адіабатичним розширенням, а в результаті стаціонарної дифузії пари спирту через газ від теплої кришки камери до холодної поверхні дна. Поблизу дна виникає шар пересиченої пари, товщиною в декілька сантиметрів, в якому і утворюються треки. На відміну від камери Вільсона, дифузійна камера працює неперервно.

Великою перевагою дифузійних камер є і те, що вони можуть бути дуже великих розмірів, а це важливо при вивченні космічних променів.

Бульбашкова камера (Д. Глазер (1926 р.н.), США, 1952 р.). Робочим середовищем бульбашкової камери є прозора перегріта рідина. Заряджена частинка, яка пролітає через камеру, викликає різке закипання перегрітої рідини вздовж свого сліду, і шлях частинки

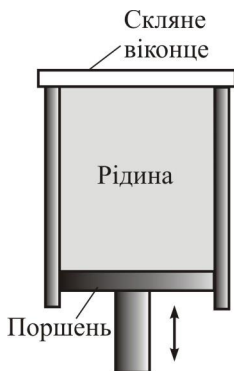


Рис. 34.14

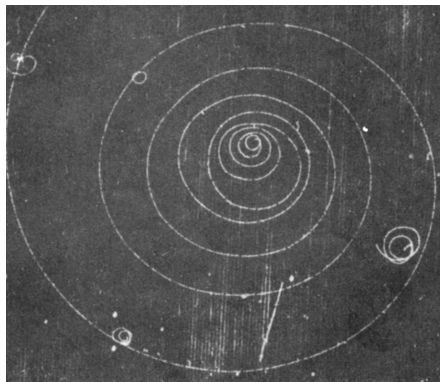


Рис. 34.15

відмічається ланцюжком бульбашок пари.

Рідина в камері знаходиться під підвищеним тиском, який затримує закипання нагрітої рідини. Для різних рідин цей тиск має різне значення і він створюється рухомих поршнем (рис. 34.14). Після раптового падіння тиску до нормального рідина виявляється перегрітою і починається бурхливе кипіння в області, в якій створені іони, пролітаючою зарядженою частинкою.

Для реєстрації проходження нових заряджених частинок камера повинна бути підготовлена до наступного робочого циклу. Тривалість робочого циклу бульбашкової камери складає 4 – 10 с. Знімки, отримані за допомогою бульбашкової камери, більш чіткі в порівнянні зі знімками в вільсонівських камерах. Завдяки високій густині робочої речовини весь слід частинки в більшості випадків вкладається в поле зору.

За створення бульбашкової камери в 1960 р. Д. Глазеру була присуджена Нобелівська премія з фізики.

На рис. 34.15 наведено слід електрона в рідинноводневій бульбашковій камері, поміщеної в однорідне магнітне поле. Радіус кривизни трека зменшується із зменшенням швидкості електрона в рідкому водні.

В 1970 р. в м. Серпухові (Росія) була пущена бульбашкова камера “Мірабель”: її висота – 15 м, маса – 2000 т, об’єм камери – 11 м³, об’єм, в якому можуть бути сфотографовані події – 6 м³, довжина можливої фіксації траєкторії частинки – 4,5 м.

Газорозрядний лічильник – це прилад, в якому заряджена частинка реєструється за імпульсом газорозрядного струму, що зумовлюється іонізаційною дією частинки в газах. Газорозрядні лічильники широко використовуються при реєстрації та вимірюванні іонізуючого випромінювання. Вони різняться конструктивно в залежності від природи випромінювання та призначення установки. Але фізичні явища, що

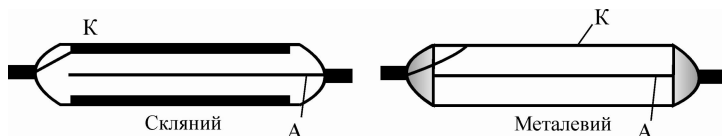


Рис. 34.16

розрядні лічильники широко використовуються при реєстрації та вимірюванні іонізуючого випромінювання. Вони різняться конструктивно в залежності від природи випромінювання та призначення установки. Але фізичні явища, що

лежать в основі їхньої роботи, та основні конструктивні елементи однакові. Всі вони складаються із циліндричного балона (металевого або скляного), заповненого сумішшю газів (рис. 34.16). Найбільш поширена суміш на основі аргону з 10%-ою добавкою органічних сполук, або добавками галогенів. Катодом служить сам металевий балон або тонкий шар металу, нанесений на внутрішню поверхню балона, анодом – тонка металева нитка. Між катодом і анодом створюється різниця потенціалів, близька до розрядної. Якщо заряджена частинка попадає в лічильник, то вона іонізує в балоні газ. Утворені при цьому електрони, рухаючись до анода, в свою чергу будуть створювати додаткову іонізацію, внаслідок чого протягом 10^{-7} – 10^{-6} с в балоні виникне розряд, імпульс розрядного струму, який можна реєструвати за допомогою вимірювальних приладів. Отже, попадання зарядженої частинки в об'єм лічильника викликає короткочасний, але досить сильний імпульс струму. Лічильники, які працюють в такому режимі, називають лічильниками Гейгера – Мюллера.

Елементарні частинки можна реєструвати лише за початком газового розряду, бо коли розряд уже почався, попадання нових частинок у лічильник істотно не впливатиме на розрядний струм і їх не можна виявити. Тому після кожної частинки, що попала в лічильник і зумовила розряд, потрібно автоматично погасити розряд, щоб зробити лічильник

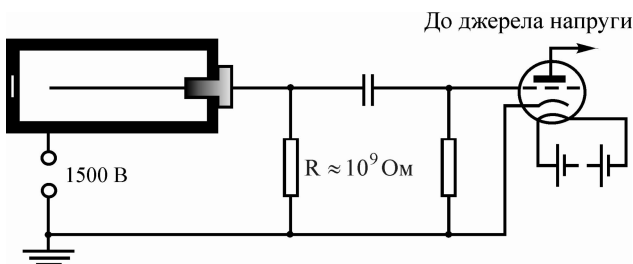


Рис. 34.17

придатним до реєстрації наступної частинки.

За способом припинення розряду лічильники поділяються на **несамогасні** і **самогасні**.

У **несамогасних** лічильниках в коло лічильника (рис. 34.17) вмикається досить великий опір (10^{10} – 10^8 Ом). При виникненні розряду весь спад напруги відбувається на опорі R, на-

пруга між анодом і катодом лічильника різко спадає і розряд припиняється. Крім того, цей опір впливає і на зростання напруги в розрядному проміжку, в результаті чого об'єм звільняється від позитивних іонів. Цей процес триває близько 10^{-2} с (мертвий час лічильника). Таким чином, максимальна швидкість лічби таких лічильників не перевищує 100 імпульсів/с.

Припинення розряду в самогасних лічильниках досягається спеціальним доббором суміші газів; наприклад, беруть 90 % аргону і 10 % пари етилового спирту чи інший багатоатомний газ, іонізаційний потенціал якого менший, ніж аргону. Загальний тиск їх становить близько 1 кПа. Мертвий час самогасних лічильників $\sim 10^{-4}$ с.

Метод товстошарових фотопластинок. Цей метод був запропонований в 1927 р. російськими фізиками Л.В. Мисовським (1888 – 1939) і А.П. Ждановим (1938 – 2006). Заряджені частинки впливають на фотографічну емульсію так само, як і фотони. Тому після хімічної обробки (проявлення і закріплення) пластинки в емульсії залишається видимий слід (трек) частинки, що пролетіла.

Треки вивчають за допомогою мікроскопа великого збільшення. Аналіз треків дає змогу з високим ступенем точності визначити заряд і масу частинки, напрямок її руху, енергію і час життя. Отже, за треком частинки можна провести повну її ідентифікацію.

А. Фундаментальні фізичні константи

Константа	Позначення	Числове значення
Швидкість світла у вакуумі	c	299792458 м/с
Гравітаційна стала	G	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Число Авогадро	N_A	$6,02214199 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	R	8,314 Дж/(моль·К)
Стала Больцмана	k	$1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Заряд електрона	e	$1,602176462 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Стала Стефана-Больцмана	σ	$5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
Електрична стала	ϵ_0	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	μ_0	$12,566370614 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Планка	h	$6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Маса спокою електрона	m_e	$9,10938188 \cdot 10^{-31} \text{ кг} =$ $= 0,00054858 \text{ а. о. м.}$
Маса спокою протона	m_p	$1,67262158 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$ $= 1,007276 \text{ а. о. м.}$
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,67492716 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$ $= 1,008665 \text{ а. о. м.}$
Атомна одиниця маси	а. о. м.	$1,66053873 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Б. Множники і префікси для утворення десяткових кратних і дільних одиниць та їх найменування (СИ)

Множник	Префікс	Позначення префікса	
		українське	міжнародне
10^{18}	екса	Е	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гіга	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кіло	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	мілі	м	m
10^{-6}	мікро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	піко	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

В. Окремі перевідні множники

Довжина

1 мікрон (мк) = 10^{-6} м
 1 нанометр = 10^{-9} м
 1 ангстрем(Å) = 10^{-10} м
 1 ікс-одиниця (X) = 10^{-13} м
 1 фермі = 10^{-15} м
 1 світловий рік = $9,46 \cdot 10^{15}$ м

Енергія

1 еВ = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж
 1 кВт·год = $3,8 \cdot 10^6$ Дж

Потужність

1 Вт = $1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$

Площа

1 мм² = 10^{-2} см² = 10^{-6} м²
 1 барн (δ) = 10^{-28} м²

Тиск

1 атм = $1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ = 760 мм.рт.ст.

1 Па = $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Час

1 доба = $1,44 \cdot 10^3$ хв = $8,64 \cdot 10^4$ с
 1 рік = $5,26 \cdot 10^5$ хв = $3,156 \cdot 10^7$ с

Кут

1 радіан (рад) = $57,3^\circ = 57^\circ 18'$
 $1^\circ = 0,01745$ рад
 $1' \text{ (кутова хв.)} = 2,91 \cdot 10^{-4}$ рад
 $1'' \text{ (кутова сек.)} = 4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
 $1 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 0,1047 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Маса

1 атомна одиниця
 маси (а. о. м.) = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг

Г. Інші корисні дані

Назва величини	Позначення	Числове значення
Сонце:		
маса	M_C	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
радіус	R_C	$696 \cdot 10^6$ м
густина (середня)	ρ_C	1400 кг/м^3
Земля:		
маса	M_3	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
радіус	R_3	$6,371 \cdot 10^6$ м
густина (середня)	ρ_3	5518 кг/м^3
Місяць:		
маса	M_m	$7,36 \cdot 10^{22}$ кг
радіус	R_m	$1,738 \cdot 10^6$ м
густина (середня)	ρ_m	3350 кг/м^3
Відстань від Землі до Сонця (середня)	L	$1,5 \cdot 10^{11}$ м
Відстань від Земля до Місяця (середня)	L	$3,85 \cdot 10^8$ м
Середня швидкість Землі по орбіті	v	~ 30 км/год

Д. Грецький алфавіт

Альфа	A α	Ню	N ν
Бета	B β	Ксі	Ξ ξ
Гамма	Γ γ	Омікрон	O o
Дельта	Δ δ	Пі	Π π
Епсілон	E ε	Ро	P ρ
Дзета	Z ζ	Сігма	Σ σ
Ета	H η	Тау	T τ
Тета	Θ θ	Іпсилон	Υ υ
Йота	I j	Фі	Φ φ ϕ
Каппа	K æ	Хі	X χ
Лямбда	Λ λ	Псі	Ψ ψ
Мю	M μ	Омега	Ω ω

Е. Окремі математичні формули

1. Корені квадратного рівняння

а) Якщо $ax^2 + bx + c = 0$, то $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.

б) Якщо $x^2 + px + q = 0$, то $x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$.

2. Теорема косинусів

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha,$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta,$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma,$$

де α, β, γ – кути, протилежні сторонам a, b, c відповідно.

3. Теорема синусів

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}.$$

4. Площі і об'єми

Фігура або тіло	Площа або площа поверхні	Об'єм
Круг радіуса r	πr^2	–
Сфера радіуса r	$4\pi r^2$	$\frac{4}{3}\pi r^3$
Кульовий сегмент висотою H	$2\pi r^2 H$	$\frac{1}{3}\pi H^2 (3r - H)$

5. Зв'язок між тригонометричними функціями одного аргументу

	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	$\operatorname{ctg} \alpha$
$\sin \alpha$	–	$= \pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$	$= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$	$= \frac{1}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$
$\cos \alpha$	$= \pm \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$	–	$= \frac{1}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$	$= \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$
$\operatorname{tg} \alpha$	$= \frac{\sin \alpha}{\pm \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}$	$= \frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}$	–	$= \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha}$
$\operatorname{ctg} \alpha$	$= \frac{\pm \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha}$	$= \frac{\cos \alpha}{\pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}$	$= \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$	–

6. Тригонометричні функції суми і різниці двох кутів

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta,$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta,$$

$$\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta}{1 \mp \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta},$$

$$\operatorname{ctg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta \mp 1}{\operatorname{ctg} \beta \pm \operatorname{ctg} \alpha}.$$

7. Тригонометричні функції подвійних і половинних кутів

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1,$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad \operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha},$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}, \quad \cos \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}},$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha}} = \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha},$$

$$\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha}.$$

8. Перетворення суми (різниці) тригонометричних функцій в добуток

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2},$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2},$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2},$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2} = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\beta - \alpha}{2},$$

$$\cos \alpha + \sin \alpha = \sqrt{2} \cos(45^\circ - \alpha),$$

$$\cos \alpha - \sin \alpha = \sqrt{2} \cos(45^\circ + \alpha),$$

$$\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cos \beta}, \quad \operatorname{ctg} \alpha \pm \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin(\beta \pm \alpha)}{\sin \alpha \sin \beta},$$

$$1 + \cos \alpha = 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad 1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

$$1 + \sin \alpha = 2 \cos^2(45^\circ - \frac{\alpha}{2}), \quad 1 - \sin \alpha = 2 \sin^2(45^\circ - \frac{\alpha}{2}),$$

$$1 \pm \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{2} \sin(45^\circ \pm \alpha)}{\cos \alpha},$$

$$1 - \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{\cos 2\alpha}{\cos^2 \alpha}, \quad 1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha = -\frac{\cos 2\alpha}{\sin^2 \alpha},$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta},$$

$$\operatorname{ctg}^2 \alpha - \operatorname{ctg}^2 \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin(\beta - \alpha)}{\sin^2 \alpha \sin^2 \beta},$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha - \sin^2 \alpha = \operatorname{tg}^2 \alpha \sin^2 \alpha,$$

$$\operatorname{ctg}^2 \alpha - \cos^2 \alpha = \operatorname{ctg}^2 \alpha \cos^2 \alpha.$$

9. Перетворення добутку тригонометричних функцій в суму

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)];$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)];$$

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha - \beta)] + \sin(\alpha + \beta).$$

Є. Похідні та інтеграли

1. Похідні: загальні правила

$$\frac{dx}{dx} = 1,$$

$$\frac{d}{dx} [af(x)] = a \frac{df}{dx} \quad (a = \text{const}),$$

$$\frac{d}{dx} [f(x) + \varphi(x)] = \frac{df}{dx} + \frac{d\varphi}{dx},$$

2. Похідні різних функцій

$$\frac{da}{dx} = 0 \quad (a = \text{const}),$$

$$\frac{d}{dx} x^n = nx^{n-1},$$

$$\frac{d}{dx} \sin ax = a \cos ax,$$

$$\frac{d}{dx}[f(x)\varphi(x)] = \frac{df}{dx}\varphi + f\frac{d\varphi}{dx},$$

$$\frac{d}{dx}[f(y)] = \frac{df}{dy}\frac{dy}{dx} \text{ (диференціювання}$$

складної функції),

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}}, \text{ якщо } \frac{dy}{dx} \neq 0.$$

$$\frac{d}{dx} \cos ax = -a \sin ax,$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{tg} ax = a \sec^2 ax,$$

$$\frac{d}{dx} \ln ax = \frac{1}{x},$$

$$\frac{d}{dx} e^{ax} = ae^{ax}.$$

3. Невизначені інтеграли: загальні правила

$$\int dx = x,$$

$$\int af(x)dx = a \int f(x)dx \quad (a = \text{const}),$$

$$\int [f(x) + \varphi(x)]dx = \int f(x)dx + \int \varphi(x)dx,$$

$$\int u dv = uv - \int v du, \text{ (інтегрування по частинам).}$$

4. Невизначені інтеграли від різних функцій

(До правої частини рівності може бути додана довільна стала)

$$\int af(x)dx = ax \quad (a = \text{const}),$$

$$\int x^m dx = \frac{1}{m+1} x^{m+1} \quad (m \neq -1),$$

$$\int \sin ax dx = -\frac{1}{a} \cos ax,$$

$$\int \cos ax dx = \frac{1}{a} \sin ax,$$

$$\int \operatorname{tg} ax dx = \frac{1}{a} \ln |\cos ax|,$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln x,$$

$$\int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax},$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} \quad (a \neq 0),$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \begin{cases} \frac{1}{2a} \ln \left(\frac{x-a}{x+a} \right) & \text{при } x^2 > a^2, \\ -\frac{1}{2a} \ln \left(\frac{a+x}{a-x} \right) & \text{при } x^2 < a^2. \end{cases}$$

Іменний покажчик

Авогадро А. 137, 138, 147
Альварес Л. 506
Ампер А. 215, 250, 289
Андерсон К. 520
Араго Д. 409, 419, 423, 426
Астон Ф. 296

Бальмер І. 469
Бардін Д. 253
Бартолін Є. 409, 413
Басов Н. 492
Бер 436
Беккерель А. 467, 501, 502
Бернуллі Д. 92
Біо Ж. 425
Бойль Р. 143
Больцман Л. 157, 166, 444, 466
Бор Н. 4, 7, 352, 471
Борн М. 160
Борман Б. 160
Боте В. 351
Брегг Г. 406
Брегг Л. 406
Брекетт 470, 471
Бройль Л. 478, 479
Бугер П. 436
Брюстер Д. 411, 421

Вавилов С.І. 438, 463
Ван-дер-Ваальс І. 192
Ван-Марум М. 190
Вант-Гофф Я. 203
Ватт Д. 67
Вебер В. 309
Вільсон Ч. 519
Він В. 445, 446, 448
Волластон У. 415
Вольта А. 249
Вуд Р. 383
Вульф В. 406

Галілей Г. 8, 16, 46
Гальвакс В. 449
Ган О. 509
Гарвей В. 7
Гаусс К. 224, 337
Гейгер Г. 522
Гейзенберг Г. 511

Гей-Люссак Ж. 144
Генрі Д. 313
Герц Генріх 340, 343, 347, 348, 449
Герц Густав 472
Глазер Д. 520, 521
Голіцин Б.Б. 441
Гук Р. 51
Гюйгенс Х. 346, 379, 409

Дальтон Д. 135, 148, 466
Дарвін Ч. 7
Девіссон К. 479
Декарт Р. 7
Демокріт 135, 466
Джаван А. 494
Джермер Л. 479
Джінс Д. 446
Джоуль Д. 65
Допплер Х. 131
Дюбуа-Реймон 7
Дюлонг П. 211
Дюре Ф. 215, 216

Ейхенвальд О.О. 340
Ейнштейн А. 46, 349, 452, 454
Ерстед Х. 286
Етвеш Р. 46

Жданов А.П. 522
Жоліо-Кюрі І. 507
Жоліо-Кюрі Ф. 507

Зеебек Т. 279, 421
Зоммерфельд А. 468

Іваненко Д.Д. 500
Іоффе А.Ф. 450

Кавендиш Г. 40, 41
Камерлінг-Оннес Г. 253
Карно Н. 182
Керр Дж. 422, 423
Кірхгоф Г. 259, 260, 443
Клапейрон Б. 147
Клаузіус Р. 184, 186
Корд'є П. 415
Коріоліс Г. 59

- Коттон Е. 423
Коші А.Л. 433
Крик Фр. 407
Кулон Ш. 216, 341
Купер Л. 253
Курчатов І.В. 509, 512
Кюрі П. 502
- Лавуазьє А. 7
Лайман С. 470, 471
Ламберт І. 436
Лангсдорф 520
Лаплас П. 7, 481
Лаує М. 405
Левшін В.Л. 438
Лейбніц Г. 7
Лемарк Ж. 7
Ленард Е. 449
Ленц Е.Х. 310
Леру Мойд Х. 431
Ллойд Х. 467
Ломоносов М.В. 466
Лоренц Г.А. 293, 435
Лоренц А. 435
Лошмідт Й. 148
Люммер О. 444
Льюїс Г. 349
- Майер Ю. 175
Майкельсон А. 375, 376, 377
Максвелл Д. 154, 158, 160, 215, 337, 346, 347
Малюс Е. 409, 410
Маріот Е. 143
Марконі Г. 345
Мисовський Л.В. 522
Мейман Т. 492
Мейтнер Л. 509
Менделєєв Д.І. 147, 466, 476
Міллікен Р. 453
Мозлі Г. 490
Мугон Х. 423
Мюллер Е. 522
- Нагаока Х. 467
Ніколь У. 414
Ньютон І. 32, 46, 150, 373, 381, 409, 430, 431
- Оккіаліні Дж. 501
Ом Г. 251
Оствальд В.Ф. 185
Остроградський М.В. 224, 337
- Паскаль Б. 156
Пауелл С. 501
Паулі В. 267, 484
Пашен Ф. 471
Пельтьє Ж. 280
Пірсон К. 7
Планк М. 186, 447
Плоткін В.І. 189
Попов О.С. 345
Прево П. 444
Принсгейм Е. 444
Прохоров О.М. 492
Пуазейль Ж. 97
Пуассон С.Д. 177, 386
Пті А.П. 211
Пфунд А.Г. 471
- Резерфорд Е. 390, 466, 467, 502
Рейнольдс О. 90
Релей Д. 401, 446
Рентген В. 467, 488
Реомюр Р. 141
Рідберг І. 469, 476
- Складовська-Кюрі М. 502
Скобельцин Д.В. 520
Сміт І. 455
Содді Ф. 467
Стефан Й. 444
Стокс Д. 98, 463
Столетов О.Г. 449
- Тагер П.Г. 423
Тамм І.М. 500
Тартаковський П.С. 479
Таунс Ч. 492
Тесла Н. 292
Тімірязєв К.А. 459, 460
Томсон (Кельвін) У. 280, 281
Томсон Дж.П. 449, 479
Томсон Дж.Дж. 296, 467, 519
Торрічеллі Е. 97
- Уілкінс М. 407

Ульянін В.А. 457
Умов М.О. 121
Уотсон Дж. 407

Фабрикант В.А. 492
Фарадей М. 215, 219, 283, 309, 310, 341,
426
Фаренгейт Г. 141
Фейнман Р. 466
Фермі Е. 510
Фік А. 160
Франк Д. 472
Франклін В. 215
Франклін Р. 407
Фраунгофер 384
Френель О. 346, 365, 379, 380, 384, 386,
407, 409, 431
Фріш О. 509
Фуко Ж. 317, 415

Ходжкін А. 407

Цельсій А. 141

Шарль Ж. 145
Шредінгер Е. 481
Шриффер Р. 253
Штайнер 84
Штрассман Ф. 509

Юкава Х. 500, 501
Юнг Т. 51, 87, 346, 364 409

Предметний покажчик

- Абсолютний нуль 142, 143
Абсолютно чорне тіло 442, 443
Агрегатні стани 139
Аксон 234, 235
Активність препарату 503, 504
Акустолюмінісценсія 462
Акцептори 274
Акцепторні рівні 274
Альфа-розпад 505
Аморфні тіла 205
Ампер (одиниця вимірювання) 217, 250
Амплітуда 102, 118
Аналіз лінійно поляризованого світла 416, 417
Аналізатор (світла) 416
Анізотропія (визначення) 205
– оптична 413
– – штучна 421
– – – при механічних деформаціях 421, 422
– – – в електричному полі 422, 423
– – – – магнітному полі 423
Антинейтрино 497
Антистоксове випромінювання 463
Атмосфера (одиниця вимірювання) 98, 203
Атом 135, 136
– водню 472, 473
Атомна електростанція 512
– одиниця маси 136, 497
– бомба 511
– маса 136
– – відносна 136, 137
Атомне ядро 497
– –, властивості 498
– –, густина 498
– –, енергія зв'язку 498, 499
– –, структура 497

Балістичний рух 23, 24
Барометр 158
Беккерель (одиниця вимірювання) 504
Бел (одиниця вимірювання) 127
Бета-розпад 505, 506
Биття 108
Біологічна активність 459
– – ультрафіолетового випромінювання 459
– – – –, дія бактерицидна 459
– – – –, – терапевтична 459
– – – –, – тонізуюча 459
– – – –, – психофізіологічна 459
Біолюмінесценція 462
Біомагнетизм 307
Біомагнітографія 307
Біопотенціали 233
Біоструми 307
Біпризма Френеля 366, 367
Ближній порядок 194
Будова атома 267, 466 – 468
– –, борівський радіус 473
– –, власні значення енергії 482
– –, електронні орбіти 471, 473
– –, енергетичні рівні 267, 474
– –, квантово-механічна картина 481 – 484
– –, магнітний момент 300 - 302
– –, модель Бора 472 - 476
– –, планетарна модель 468
– –, Резерфорда-Бора модель 468, 472
– –, радіус 468
– –, спектр 468, 469, 470
– –, стаціонарні стани 472
– –, умова квантування 472, 473
Броунівський рух 135

Вага тіла 34, 44
Важка вода 511
Ватт (одиниця вимірювання) 67, 265
Вебер (одиниця вимірювання) 309
Вектор поляризації 246
– електричного зміщення (електричної індукції) 247
– намагніченості 303, 304, 306
– Умова 121
Векторна діаграма 106, 107
Взаємоіндукція 314
Видима ділянка спектра 353
Випромінювальна здатність тіла 441
Випромінювання абсолютно чорного тіла 442, 443, 446
– вимушене (індуковане) 492
– теплове 440
– спонтанне 491
Вихрове поле електричне 340
– – магнітне 340, 341
Вихрові струми 317, 318
Відносна біологічна активність 517
Відносне видовження 50, 51

- Вічний двигун другого роду 185
 – – першого роду 171
 Власний (спіновий) момент імпульсу електрона 483
 Власні електричні коливання 331 – 333
 Властивості ядерних сил 500
 – світла 346
 Водна гіпотеза 308
 Воднева бомба 513, 514
 Волокнистий білок (колаген) 53
 Вольт (одиниця вимірювання) 230
 В'язкість 96
 – відносна крові 98
 –, коефіцієнт 97
- Газ ідеальний 143
 – електронний 209
 – реальний 190
 – –, рівняння стану 143
 Гальмівний шлях 15, 16
 Гамма-розпад 507
 Гармоніка 124
 Гармонічний осцилятор 104
 – –, енергія 104, 105
 Гексоза 460
 Генрі (одиниця вимірювання) 313
 Генератор змінного струму 322, 323
 Геометрична різниця ходу 460
 Герапатит 416
 Герц (одиниця вимірювання) 102
 Геофон 125, 129
 Гідродинаміка 89
 Гідрофон 125, 129
 Гіперзвуки 129
 Гіпотеза де Бройля 478
 – Планка 447
 – Юкави 500, 501
 Гравіметр 43
 Гравітаційна взаємодія 43
 – поле 42
 Гравітація штучна 61
 Гравітон 42
 Градієнт концентрації 160
 – температури 162
 – швидкості 165
 – електричного потенціалу 231
 Градус 141
 Графік руху 12, 13, 14
- Грей (одиниця вимірювання) 517
 Густина електричного заряду 226, 227, 238, 246, 247
 – енергії 242
 – потоку енергії 121
 – струму 254 – 256
- Дальній порядок 194
 Дейтерій 513
 Деполяризація 235
 Дефект маси 498, 499
 Деформація зсуву 52
 – кручення 52
 – пластична 49
 – пружна 49
 – розтягу 50
 – стиску 51
 Децибел (одиниця вимірювання) 129
 Джерела звуку 128, 129
 – електричного струму 257, 258
 Джоуль (одиниця вимірювання) 65
 Дзеркала Френеля 365, 366
 Дзеркало Ллойда 367
 Динаміка 8
 – матеріальної точки 32
 Диполь електричний 242
 – жорсткий 243
 – магнітний 301
 Дипольний момент 242, 243
 Дисперсійні сили 191
 Дисперсія світла 430
 – – аномальна 431
 – – нормальна 431
 – – обертальна 425
 – –, теорія 432 – 435
 Дифракційна решітка 393 – 396
 – –, дисперсія 399, 400
 – – двовимірна 403, 404
 – – одновимірна 395, 396
 – – тривимірна 404, 405
 – –, роздільна здатність 400 – 402
 Дифракційний спектр 396 – 398
 – –, обмеженість 397
 – –, порядок 397
 Дифракція світла 379
 – – на дифракційній решітці 393 – 396
 – –, інтенсивність головних максимумів 395
 – –, розподіл інтенсивності 394, 395
 – –, умова головних максимумів 394
 – –, – додаткових мінімумів 395

- рентгенівських променів 405, 406
- Фраунгофера 388
- – на двох щілинах 391 – 393
- – – одній щілині 388 – 390
- Френеля 384, 385
- – на круглому отворі 384, 385
- – – – екрані 386
- електронів 479
- Дифузія 160
- в рідинах 200, 201
- , коефіцієнт 161, 201
- , швидкість 161
- Дихроїзм лінійний 415
- Діаграма стану 213, 214
- Діамагнетизм 285, 306
- Діамагнетик 306
- Діелектрик 244, 270
- в електростатичному полі 244 – 248
- Діелектрична проникність 244
- – абсолютна 244
- – відносна 244
- Дія струму на людину 329, 330
- Добротність 115
- Довжина хвилі 118
- – видимого світла 450, 451
- – де Бройля 478, 479
- Домени 305
- Донорні рівні 273
- Дослід Боте 351, 352
- Резерфорда 467, 468
- Юнга 364

- Еквівалентна доза 517
- Еквівалентність гравітаційної і інертної мас 45, 46
- Еквіпотенціальні лінії 232
- поверхні 232
- Електризація 215
- Електрична енергія 265, 266
- індукція 236
- напруга 230, 251
- сприйнятливості 247
- Електричний заряд 215
- –, від’ємний 215
- –, вільний 245 – 247
- –, дискретність 215
- –, додатний 216
- – електрона 215
- –, зв’язаний 246
- – протона 215
- –, рух в магнітному полі 293, 294
- –, – – електричному 295, 296
- – ядра 497
- опір 251
- – питомий 251, 252
- –, залежність від температури 252
- потенціал 229 – 231
- струм 249, 250
- –, густина 254, 255, 256
- –, джерела 250, 257
- – змінний 320, 321
- – постійний 249, 250, 252
- –, потужність 265
- –, робота 265
- –, сила 249, 250
- – теплова дія 266
- Електричні коливання 331 – 336
- –, вимушені 335
- –, згасаючі 334
- Електроємність 236, 237
- сфери 237
- Електролюмінісценція 440, 461
- Електромагнітна індукція 309, 310
- –, закон Фарадея 310
- Електрон 215
- Електрони провідності 267, 268, 269
- Електронвольт (одиниця вимірювання) 65
- Електронна оболонка 484 – 486
- –, заповнення 485 – 487
- Електрична сприйнятливості 247
- Електрорушійна сила (ЕРС) 257, 258
- Електростатика 218
- Електростатичний захист 236
- Елементарна комірка 205
- Енантоморфізм 424
- Енергія (визначення) 67
- в біології 73
- взаємодії 69, 70
- внутрішня 71, 169
- гармонічного осцилятора 69, 104, 105
- електростатичного поля 241, 242
- електромагнітної хвилі 347, 348
- електрона в атомі 473, 474
- , закон збереження 71, 72 – 74
- збудження 475
- зв’язку 475
- – питома 499
- ідеального газу 170

- іонізації 475
- , квантування 473, 474, 475
- кінетична 67
- – обертання 85
- магнітного поля 318, 319
- – –, об'ємна густина 319
- механічна 67
- , густина 242
- поверхнева 195
- повна 71
- потенціальна 68
- – гравітаційна 69
- пружної хвилі 121
- Фермі (рівень) 269
- хвилі 121
- Енергетична світність 441
- Енергетичний вихід люмінесценції 464
- Ентропія 186 - 188
- і друге начало термодинаміки 188, 189
- , статистична інтерпретація 186 – 188
- ЕРС індукції у провіднику, що рухається в магнітному полі 311
- Ефект Керра 423
- Доплера 130 – 133
- Фарадея 426
- Ефективна еквівалентна доза 518
- "сила тяжіння" 63
- Ефективний зір 355
- Ємність електрична 237, 238
- земної кулі 237
- мембрани клітини 239
- плоского конденсатора 238
- сферичного конденсатора 239
- циліндричного конденсатора 239
- Жорсткість пружини 101
- Закон (визначення) 5
- Авогадро 147, 148
- Ампера 289, 290, 338
- Бойля-Маріотта 144
- Брюстера 411
- Бугера-Бера 437
- Бугера-Ламберта 436
- Вант-Гоффа 203
- – паралельне 263, 264
- – змішане 264
- конденсаторів 239
- всесвітнього тяжіння 41
- Гей-Люсака 144, 145
- Гука 50, 51
- Дальтона 148
- Джоуля-Ленца 266
- Дюлога-Пті 211
- електромагнітної індукції 309, 310, 337, 338
- збереження енергії 71, 72
- – заряду 215
- – імпульсу 36, 37
- – моменту імпульсу 82
- зміщення Віна 445
- інерції 33
- Кірхгофа 443
- Кулона 216
- Малюса 416, 417
- Мозлі 490, 491
- Ньютона перший 33
- – другий 33
- – третій 35
- Ома
- – в диференціальній формі 256
- – для ділянки кола 259
- – – повного кола 258
- радіоактивного розпаду 503
- розподілу молекул за висотою 157
- Стефана-Больцмана 444
- термодинаміки перший 166, 171
- – другий 166, 179, 184, 185, 188, 189
- –, обмеженість 188, 189
- – третій 166
- Стокса 463
- Фіка 161
- Шарля 145
- Закони фотоефекту 450 – 453
- Звук 124
- , висота 127
- , гучність 127
- , інтенсивність 127
- , тембр 127, 128
- Звукові хвилі 124 – 128
- –, швидкість поширення 125, 126
- Зв'язок Ван дер Ваальса 209, 210
- енергії і маси 350
- іонний 208, 210
- ковалентний 208, 210
- металічний 209, 210
- З'єднання джерел ЕРС 263
- – послідовне 263, 264

- паралельне 239
- послідовне 240
- провідників 261
- паралельне 261
- послідовне 261, 262
- Зіверт (одиниця вимірювання) 517
- Зіткнення непружне 37
- пружне 37
- Змінний струм 320
- амплітудне значення сили струму 320
- , –, – напруги 321
- , генератор 322, 323
- , діюче (ефективне) значення сили струму 321
- , ЕРС 321
- , –, – напруги 321
- , потужність 321
- Зона валентна 270, 455
- заборонена 270, 455
- дозволена 270, 455
- провідності 270, 455
- Зональна пластинка 383
- амплітудна 383
- фазова 383
- Зони Френеля 380, 381
- Зонна теорія твердих тіл 267

- Ідеальний газ 143 – 149
- , рівняння стану 146
- , внутрішня енергія 170
- Ізобаричний процес 144, 145
- Ізотерма Амага 190
- Ізотермічний процес 143, 144
- Ізотопи 136, 498
- Ізохоричний процес 145
- Імпеданс електричного кола 328
- Імпульс (кількість руху) 34
- сили 34
- Інверсійна населеність рівнів 492
- Індуктивність 313
- Індуктометр 317
- Індукція електромагнітна 309 – 311
- електростатична 236
- ЕРС 309 – 311
- Інертність 33
- Інерціальні системи відліку 33
- Інтенсивність світла 358
- Інтерференційний член 359
- Інтерференція світла 357 – 360
- двох когерентних джерел 361, 362
- , методи здійснення 363 – 368
- в тонких плівках і пластинках 368 – 374
- поляризованого 419 – 421
- Інтерференційні смуги 359, 362
- максимумами 362
- мінімумами 362
- , відстань між ними 362
- рівного нахилу 369, 370
- рівної товщини 371, 372
- , ширина 362
- Інтерферометр (визначення) 375
- Майкельсона 375, 376, 379
- технічний Релея 376, 377, 378
- Інфразвук 125, 129
- Інфрачервоне випромінювання 348, 354
- Ісландський шпат 413, 415

- Кавендиша експеримент 41
- Калорія (одиниця вимірювання) 74
- Камера Вільсона 519, 520
- бульбашкова 520, 521
- "Мірабель" 521
- дифузійна 520
- Канадський бальзам 414
- Капілярні явища 197, 198, 199
- Капілярність 198
- Кардієрит 415
- Катодолюмінісценція 440, 461
- Квантова гіпотеза Планка 447
- Квантове число 482
- головне 482
- магнітне 482, 483
- орбітальне (азимутальне) 483
- спінове магнітне 483
- Квантові генератори (лазери) 491
- Квантовий вихід люмінесценції 464
- фотоэффекту 453, 454
- Квантово-механічна теорія атома 481, 482
- Кельвін (одиниця вимірювання) 142
- К-захоплення 506
- Кіловат-година (одиниця вимірювання) 265
- Кілограм (одиниця вимірювання) 6
- Кількість руху (імпульс) 34
- речовини 137
- Кільця Ньютона 373
- Кінематика точки 8
- твердого тіла 8, 28 – 31
- Кінетична теорія газів 150
- енергія 152, 153

- обертання 85
- Когерентність світлових хвиль 359
- Коефіцієнт взаємодукції 314
- внутрішнього тертя (в'язкості) 165
- дифузії 161
- жорсткості 101
- корисної дії теплової машини 181, 182
- об'ємного розширення 144
- Пельтьє 280
- розмноження нейтронів 511
- самоіндукції 313
- теплопровідності 163
- тертя спокою 46, 47
- ковзання 47
- Томсона 280
- Колективна ефективна еквівалентна доза 518
- Коливання вільні (власні) 115, 116
- вимушені 115, 337
- гармонічні 101
- –, додавання 106 – 110
- електричні 331 – 333
- електромагнітні 334 – 335
- згасаючі 114, 334
- –, декремент згасання 115
- періодичні 101
- пружинного маятника 101
- Колаген 53
- Коливальний контур 331
- – відкритий 343
- Колові процеси (цикли) 180, 181
- Кольори Ньютона 374
- Комірка елементарна 205
- Керра 423
- Конвекція 162
- Конденсатор 237
- плоский 237, 238
- –, ємність 238
- сферичний 238
- –, ємність 238
- циліндричний 239
- –, ємність 239
- Контактна різниця потенціалів 275, 276, 277
- Контактні явища 275
- Контрастність (контраст) 359
- Короткохвильова межа рентгенівського спектра 489
- Корпускулярно-хвильовий дуалізм 352
- – – частинок речовини 478, 479, 480
- Крайовий кут 197, 198
- Краплинна модель ядра 509
- Кристалізація 213
- Кристали атомні 208, 210
- іонні 207, 208, 210
- металічні 209, 210
- молекулярні 209, 210
- одновісні 413
- Кристалічна ґратка 205, 206
- Кристалічна система 206, 207
- Кристалолюмінесценція 462
- Критерій Релея 401
- Критична ізотерма 192
- маса 511
- об'єм 192
- стан 193
- температура 214, 253
- точка 192, 214
- тиск 192
- Ксилема 200
- Кулон (одиниця вимірювання) 216, 217
- Кут Брюстера 411
- Кюрі (одиниця вимірювання) 504
- Лазер 491, 492
- гелій-неоновий 494 – 496
- рубіновий 494
- , застосування 496
- Ламінарна течія 90, 91
- Лампи денного світла 465
- Ланцюгова реакція 510, 511
- Лауєграма 405
- Лічильник газорозрядний 521, 522
- Лобовий опір 96
- Логарифмічний декремент затухання 115
- Люмінесцентний аналіз 465
- Люмінесценція (визначення) 461
- вимушена 462, 463
- резонансна 462
- спонтанна 462
- рекомбінаційна 463
- , застосування 464, 465
- Магнітна проникність абсолютна 285, 304
- – відносна 285, 304
- сприйнятливість 285, 304
- Магнітний момент атома 300, 301, 302
- – – орбітальний 300
- – – спіновий 301
- – контура зі струмом 299, 300

- Магнітне поле 283, 284
–, дія на живі організми 307, 308
–, – електричний струм 290 – 292
–, зв’язок з електричним 316
– Землі 284
–, індукція 284, 285
–, напруженість 284, 285
– на осі соленоїда 288
– створюване електричним струмом 286 – 291
– – коловим струмом 288
– – паралельними струмами 287
Магнітний потік 309, 337, 338
Магнітні домени 305
– бурі 284
Магнітоокупограма (МОГ) 307
Манометр 88
Маса 33, 34
– атомна 136
– гравітаційна 46
–, дефект 498, 499
– електрона 215
– Землі 43
– інертна 34, 45
– критична 511
– молекулярна 136
– молярна 138
– протона 215
– ядра 497
Масове число 136, 137, 497
Мас-спектрограф 296, 297, 298
Мас-спектрограма 298
Маятник математичний 110, 111
– пружний 101
– фізичний 112
–, зведена довжина 113
Межа міцності 50, 55
– пружності 49
Мезони 501
Мембранний потенціал 233
Меніск 197
Метали 270
Метастабільний стан 193
Метод біомагнітографії 307
– електрографічний 307
– зон Френеля 380 – 382
– Лауе 405
– поділу амплітуди 363
– фронту хвиль 363
– макроскопічний 166
– термодинамічний 166
– фотопружності 421, 422
Метр (одиниця вимірювання) 6
Механіка (визначення) 8
Механічна напруга 50
Міжнародна система одиниць (СІ) 6
Міліметр ртутного стовпчика (одиниця вимірювання) 89, 100, 160
Мічені атоми (молекули) 516
Мода коливань 355
Модель атома Резерфорда-Бора 469
– Нагаока 467
– Томсона 467
Модуль зсуву 52
– об’ємної пружності 51
– пружності (Юнга) 51
Молекула 136
–, власний об’єм 191
– водню 208
– двоатомна 172
–, кінетична енергія 152
– неполярна 191, 243
– полярна 243, 245, 191
–, розміри 136, 243
–, потенціальна енергія 191
Молекулярна теорія газів 135
Моль (одиниця вимірювання) 137
Момент імпульсу 80 – 83
– інерції 79
– – головний 84
– – твердого тіла 83, 84
– сили 77, 78
Монокристали 205, 206

Нагрітість тіла 141
Надпровідність 253
Накачка 492, 493
Намагніченість речовини 303, 304
Напівпровідники 271
– власні 271, 272
– домішкові 271
– n-типу 273
– p-типу 274
Напівпровідниковий діод 276
Напруга електрична 230, 251
Напруженість електричного поля 219, 221
– магнітного поля 284
– потоку електричного поля 222 – 224

- Невагомість 44, 45, 61
Нейромагнетизм 307
Нейрон 234
Нейтрон 497
–, поглинання 509
–, розпад 497
Неренберга прилад 412
Нерівноважний стан 140
Нуклони 497
Ньютон (одиниця вимірювання) 34
- Обертальний рух 25 – 28
– механічний момент 78, 242
– – твердого тіла 28 – 31
Обертони 124
Об’ємна густина енергії 121
Об’ємний розхід рідини 91
Ом (одиниця вимірювання) 251
Оператор Лапласа 481
Опір електричний активний 251, 252, 323
– –, залежність від температури 252
– внутрішній 258, 259
– ємнісний 324, 325
– індуктивний 326, 327
– питомий 251, 252
– повний (імпеданс) 327, 328
– реактивний 327
Опис стану 140
– – макроскопічний 140
– – мікроскопічний 140
Оптика (визначення) 346, 348
Оптична різниця ходу 360
Оптичний шлях 360
Оптично активні речовини 424
– – – лівообертаючі 424
– – – правообертаючі 424
Орбітальний момент імпульсу електрона 483
- Палеонтологія 465
Парамагнетизм 305
Парамагнетики 285, 305, 306
– аномальні 306
– нормальні 306
Параметр видимості 359
Паскаль (одиниця вимірювання) 87
Передача теплоти 162, 163
Переміщення 9
Переохолоджена пара 193
Період коливань 102, 111, 113
– обертання 29
– піврозпаду 504
Питома провідність 252
– теплота плавлення 212
Підіймальна сила 95, 96
Плавлення твердих тіл 212
 π – мезони 501
Площина коливань 410
– поляризації 410
– –, повертання 424 – 426
– –, – питоме 424, 425
– –, – магнітне 426, 427
Пляма Пуассона 386
Поверхнева енергія 195
Поверхнево-активні речовини 197
Поверхневий натяг 195 – 200
Поглинальна здатність 442
Поглинання світла 435
– – від’ємне 438
– –, коефіцієнт 436, 437
Подвійне променезаломлення 413
Поділ ядер урану 509, 510
Позитрон 506
Показник заломлення 365, 367, 369
Поле біомагнітне 307
– гравітаційне 41, 42
– електричне 340, 341
– електростатичне 219
– – поблизу нескінченної рівномірно зарядженої площини 226, 227
– – – провідника довільної форми 227
– – – рівномірно зарядженої сфери 224, 225
– – – непровідної кулі 225, 226
– – – зарядженого довгого провідника 226
– електромагнітне 340, 341
– магнітне 283 – 285
– фізична реальність 41, 42, 219, 343 – 345
Полікристал 205
Поляризатор 412, 416
Поляризаційні пристрої 414 – 416
Поляризація світла 408
– – лінійна 410
– – при відбиванні 411
– – – заломлення 411
– – хроматична 421
– – часткова 410, 417
Полярні 416
Полюси магнітні 283
– – Землі 284

- Поріг больового відчуття 127
– чутливості 127
Постулати Бора 472
Потенціал 229, 230
– дії 234, 235
– електричного поля 229, 230
– мембранний 233, 234
– спокою 233
Потенціальна енергія 68
– – гравітаційна 68, 69
– – електричного поля 230
– – пружини 69
Потік магнітної індукції 309, 310
– напруженості електростатичного поля 222, 223, 224, 228
Потрійна точка 214
Потужність (визначення) 67
– змінного струму 321
– постійного струму 265
Правила Кірхгофа 259, 260
– зміщення 505 – 507
Правило Ленца 310
– лівої руки 291
– правого гвинта 286
– правої руки 286, 312
Призма Волластона 415
– Ніколя 414
– Фуко 415
Приймачі звуку 125
Принцип Гюйгенса-Френеля 380
– доповнювальності 352
– еквівалентності 46
– заборони Паулі 302
– суперпозиції 218, 284, 285
– – хвиль 357
Природна радіоактивність 501 – 503
Прискорення (визначення) 13
– вільного падіння 17, 43, 44
– доцентрове (нормальне) 25, 26, 30
– корiolісове 60
– кутове 27
– миттєве 13
– повне 28
– середнє 13
– тангенціальне 27
Провідники в електростатичному полі 236
Провідність електрична 252
– діркова (р-типу) 274
– домішкова 273
– електронна (п-типу) 272
– іонна 250
– питома 252
Просторовий перерозподіл світлової енергії 360
Протон 497
Процес 141
– адіабатичний 176, 177
– ізобаричний 144, 145
– ізотермічний 143, 144
– ізохоричний 145
– коловий 180
– необоротний 167, 179
– нерівноважний 141, 167
– оборотний 167, 179
– рівноважний 141, 167
– термодинамічний 167
Пуаз (одиниця вимірювання) 97
Пучності стоячої хвилі 123
р-п – переходи 275
Рад (одиниця вимірювання) 519
Радіоактивні індикатори 516
Радіоактивність 501, 502
– природна 501 – 503
– штучна 507
Радіаційна біологія 516, 517
– хімія 516, 517
Радіоактивні ізотопи 508, 509
Радіологічна безпека 517, 518
Радіохвилі 344
Резонанс електричний 328, 336
– механічний 115, 116, 117
Рекомбінація 272
Рентген (одиниця вимірювання) 519
Рентгенівське випромінювання 488 – 491
– – гальмівне 488, 489
– – характеристичне 489, 490
Рентгенівська трубка 488
Рентгенівські серії атома 490
Рентгенівські спектри 489, 490
Рентгенолюмінесценція 461
Рентгеноспектральний аналіз 406
Рентгеноструктурний аналіз 406
– – біологічних об'єктів 406, 407
Реперні точки 141
Реполяризація 236
Рівень гучності 127
Рівноважне випромінювання 440
Рівняння Бернуллі 92, 93

- біжучої хвилі 120
- Ван-дер-Ваальса 192
- власних електричних коливань 332, 333
- Ейнштейна для фотоефекту 452
- кінетичної теорії газу 150 – 152
- коливань 102
- Майєра 175
- Менделєєва – Клапейрона 147, 191
- Максвелла 341, 342
- моментів 81
- нерозривності 90, 91
- Пуассона 177
- стану ідеального газу 146
- – реального газу 191, 192
- руху матеріальної точки 13, 14, 15
- Шредінгера 481, 482
- стоячої хвилі 122
- Рідина ідеальна 90, 91
- , будова 194
- перегріта 193
- , "розтягнута" 200
- , теплове розширення 194
- Різниця потенціалів електричного поля 229, 230
- фаз 358, 360
- Робота (визначення) 65, 66
- виходу 453
- і теплота 167, 168
- переміщення заряду в електростатичному полі 228, 229
- постійного струму 265
- Розподіл Больцмана 157
- електронів в атомі 485 – 487
- енергії за ступенями вільності 171 – 173
- молекул за швидкостями 154
- – з висотою в полі тяжіння 157
- Розширення газу 167 – 183
- – адіабатичне 176 – 178, 183
- – ізобаричне 167
- – ізотермічне 182, 183
- Рух відносний 19, 20
- криволінійний 21 – 25
- молекулярний 137
- обертальний (по колу) 25 – 28
- прямолінійний рівномірний 9, 10, 13
- рівноприскорений 14
- тіл кинутих вертикально 16 – 18
- – – горизонтально 21, 22
- – – падаючих 16 – 18
- зарядженої частинки в електричному полі 295, 296
- – – магнітному полі 293 – 295
- Самоіндукція 312
- Самодифузія 160
- Світло 346
- , електромагнітна (хвильова) теорія 346 – 349
- , інтерференція 357 – 360
- когерентне 359
- , корпускулярна (квантова) теорія 349 – 351, 454
- , корпускулярно-хвильовий дуалізм 352
- лінійно-поляризоване 410
- природне 408, 409
- частково поляризоване 410, 417
- , швидкість поширення 346, 347
- Свічення дискретних центрів 463
- речовини 464
- Сейсмограф 126
- Секунда (одиниця вимірювання) 6
- Середнє число зіткнень 158
- Середня довжина вільного пробігу 158, 159
- Серія Бальмера 469, 470, 471, 474
- Бреккета 470, 471
- Лаймана 470, 471, 474
- Пашена 470, 471, 474
- Пфунда 471
- Сила (визначення) 32
- Ампера 292
- ваги 44
- віддачі 96
- відцентрова 58, 59
- внутрішня 36
- гравітаційна 32, 39, 40, 41
- доцентрова 58, 59
- електромагнітна 39
- електрорушійна (ЕРС) 257, 258
- земного тяжіння 43 – 45
- зовнішня 36
- інерції 56, 57
- контактна 32
- Коріоліса 59, 60
- кулонівська 217
- лобового опору 96
- Лоренца 293, 312
- обмінна 208
- осцилятора 435

- підймальна 96
- пружності 49, 50
- рівнодійна 33, 34
- слабкої взаємодії 39
- струму 249, 250
- тертя 46, 47
- ядерна 40
- Сили адгезії 197
- дипольно-орієнтаційні 191
- дисперсійні 191
- зв'язку Ван-дер-Ваальса 190
- іонні 207, 208
- ковалентні (обмінні) 208
- когезії 197
- консервативні 70, 229
- неконсервативні 70
- металічні 209
- поверхневого натягу 195
- фундаментальні 39, 40
- Силові лінії 221, 222
- , властивості 222
- Сильна взаємодія 40
- Синтез ядер 513, 514
- Системи відліку 8, 9
- інерціальні 33, 56
- неінерціальні 56, 57
- Скін ефект 318
- Слабка взаємодія 39, 40
- Смуги однакового нахилу 369, 370
- однакової товщини 371 – 374
- Соленоїд 288
- Сонолюмінесценція 462
- Спектр атома водню 469, 470
- звуку 128
- випромінювання абсолютно чорного тіла 444
- поглинання 437
- Спектральна густина випромінювання 441
- Спектральні закономірності атома водню 468
- серії 469, 470, 471, 474
- Спектрометр 398
- Спектроскоп 397
- Спектрофотометр 398
- Способи збудження ЕРС індукції 309 – 311
- Стала Больцмана 148, 149
- Верде 427
- Віна 445
- газова універсальна 147, 149
- гравітаційна 141
- екранування 491
- електрична 217
- Керра 423
- Коттона-Мутона 423
- магнітна 284
- Планка 447
- Рідберга 469, 476, 491
- розпаду 503
- Стефана-Больцмана 444
- Стан атома збуджений 474
- основний 474
- газоподібний 87, 139
- кристалічний 191
- метастабільний 193
- нерівноважний 140
- рівноважний 140
- рідкий 87, 140
- твердий 87, 140
- Статика 8
- Статистична фізика 136
- Стопа Столетова 411
- Стоячі хвилі 122 – 124
- Струм постійний 249
- витоку 330
- змінний 320
- , отримання 322, 323
- зміщення 338, 339
- індукції 310
- повний 339
- провідності 339
- Фуко 317
- Струмінь 90
- Ступені вільності 171, 172, 173
- Ступінь поляризації 417
- Сублімація 213, 214
- Твели 511
- Тверде тіло аморфне 205
- кристалічне 205
- , зонна теорія 267, 268
- , енергетичні рівні 268, 269
- Температура 141
- абсолютна 142
- , вимірювання 141, 142
- кристалізації 212, 213
- критична 214, 253
- Кюри 305

- плавлення 212
- Температурна шкала 141
- Кельвіна 142
- Реомюра 141, 142
- Фарангейта 141, 142
- Цельсія 141, 142
- Теорема Гюйгенса-Штейнера 84
- про зв'язок енергії і роботи 70, 71
- Остроградського-Гаусса 222 – 224, 337
- Теплове випромінювання (визначення) 440
- Теплоємність 173
- ідеальних газів 174
- металів 210, 211
- молярна 174, 175, 176
- питома 174
- при сталому тиску 175, 176
- – – об'ємі 175, 176
- Теплова дія струму 266
- машина 181
- смерть 188, 189
- Теплоізолятори 163
- Теплопередача 162
- Теплопровідність 162, 163
- Теплота 167 – 169
- зведена 187
- кристалізації 212, 213
- плавлення 212
- Термодинаміка 166, 167
- Термодинамічні параметри 167
- Термометр 141
- Термо-ЕРС 279
- Термоелектрика 279, 280, 281
- Термометричне тіло 141
- Термопара 281
- Термостовпчик 282
- Термоядерні реакції 513
- –, енергія 513, 514
- Тертя внутрішнє (в'язке) 46, 163, 164
- ковзання (кінетичне) 46, 47
- кочення 47, 48
- спокою (статичне) 46
- Тесла (одиниця вимірювання) 292
- Течія ламінарна 90, 91
- нестационарна 90
- стаціонарна 90, 91
- турбулентна 90
- крові в кровоносній системі 99, 100
- Типи кристалів 207
- Тиск (визначення) 87
- абсолютний 89
- атмосферний 88, 146, 157
- внутрішній 191
- гідравлічний 93
- діастолічний 99
- динамічний 93
- капілярний 200
- надлишковий (манометричний) 89, 146
- від'ємний 200
- осмотичний 203
- парціальний 148
- систолічний 99
- статичний 93
- Товстошарові фотопластинки 522
- Томсона модель атома 467
- Точка матеріальна 8
- Траєкторія 9
- Транзистор 276
- Трансуранові елементи 509
- Триболюмінесценція 462
- Трубка Вентурі 94
- Піто 94
- течії 90
- Турмалін 415
- Удар непружний 37
- пружний 37
- Ультразвук 125, 129
- Ультразвуковий скальпель 130
- Ультрафіолетова ділянка спектра 348, 351
- катастрофа 447
- Ультракороткі хвилі 344
- Умова Вульфа-Брегга 406
- квантування Бора 472
- Умови зору 354 – 356
- Універсальна газова стала 147, 149
- функція 445
- Універсальні фізичні сталі (константи) 6
- Фаза коливань 102
- хвилі 120
- Фазова діаграма 214
- Фарад (одиниця вимірювання) 237
- Феромагнетизм 305
- Фігури ліссажу 110
- Фізика (визначення) 4
- Фізичні величини 5
- константи 5
- Флуоресценція 462

- Формула Бальмера 471
– барометрична 156, 157
– Віна 448
– Вульфа-Брегга 406
– Ейнштейна для фотоефекту 452
– Лоренца 293
– Лоренца-Лоренца 435
– Ньютона 97
– Планка 447
– Планка-Ейнштейна 355
– Пуазейля 98
– Релея-Джінса 446
– Стокса 98
– Томсона 332
– Торрічеллі 95
Фосфоресценція 462
Фотобіологічна дія світла 459, 460
Фото-ЕРС 456
Фотоелектронний помножувач 457
Фотоемісійні електронні мікроскопи 459
Фотоелементи 456
– вакуумні 456, 457
– –, вольт-амперна характеристика 450, 452
– вентильні 456, 458
–, фотоопори 456, 458
–, використання 458, 460
Фотоемісія 450
Фотон 350, 351
–, енергія 350
–, імпульс 351
–, маса 350
Фотоефект (визначення) 449
– вентильний 455
– внутрішній 455
– зовнішній 449
–, теорія 452
–, червона межа 453
Фотолюмінесценція 440, 461
Фотопровідність 455
Фотопружний ефект 421
Фотосинтез 459, 460
Фотострум 449
– насичення 451
Фронт хвилі 120, 349
Фундаментальні взаємодії 39, 40
Функція розподілу Максвелла 154
– Фермі-Дірака 268, 269
– біжуча 120
– відбита 122
– де Бройля 478 – 480
–, довжина 118
– електромагнітна 342 – 345, 347
– –, довжина 348, 353
– –, енергія 347, 348
– –, період 353
– –, частота 353
– –, – колова 353
– –, – лінійна 353
– –, рівняння 347
– –, швидкість поширення 346, 347
– звукова 124, 125
– механічна 118
– плоска 120
– повздовжня 119
– поперечна 119
– пружна 119
– світлова 346, 347
– стояча 122 – 123
– сферична 120
–, швидкість поширення 119
Хвильова функція 483
– поверхня 120
Хвильове число 120, 349
Хвильовий вектор 351
Хемілюмінесценція 442, 461
Холодильник 181, 182
Центр мас 76, 77
Центрифуга 63
Цикл в термодинаміці 180, 181, 182
– Карно 182, 183
– оборотний 180 – 182
– прямий 181
Цукрометри (поляриметри) 425
Частота коливань 102, 118
– колова 27, 102, 103
– лінійна 102, 103
– резонансна 115, 116
Частотний спектр 128
Число (стала) Авогадро 137
– Лошмідта 148
– Рейнольдса 90
– ступені вільності 171, 172, 173
Швидкість (визначення) 10
Хвиля (визначення) 118

Швидкість звуку 125

– дрейфу електронів 255

– кутова 26

– крові в капілярах 99

– найбільш імовірна 155

– лінійна 25, 26

– миттєва 11, 12

– середня 11

– світла 349, 350

– середньоарифметична 153, 155

– середньоквадратична 153, 155

Шкала електромагнітних хвиль 348

Шлуночкові фібриляції 330

Штучна радіоактивність 507, 508

Явище Зеебека 279

– змочування 197

– капілярності 197

– осмосу 202, 203

– Пельтьє 280

– Томсона 280

Ядерна реакція 507, 508

– – ланцюгова 510, 511

Ядерні сили 500, 501

– –, властивості 500

– –, обмінний характер 501

Ядерний реактор 511, 512

– синтез 513

– фотоефект 508

Ядро атома 497

–, густина 498

–, енергія зв'язку 499

– дочірне 505

– материнське 505

–, радіус 498

ЛІТЕРАТУРА

1. Остафійчук Б.К., Рувінський М.А., Яцура М.М. Курс загальної фізики. Оптика: хвилі, промені, кванти. – Івано-Франківськ.: Гостинець, 2003.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
3. Білий М.У., Скубенко А.Б. Загальна фізика. Оптика. – К.: Вища школа, 1987.
4. Белый М. У., Охрименко Б.А. Атомная физика. – К.: Вища школа, 1984.
5. Фриш С.З., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т. 1, 2, 3. – М.: ГИТТЛ, 1964.
6. Яворський Б.М., Детлаф А.А. Курс фізики. Хвильові процеси. Оптика. Атомна і ядерна фізика. – К.: Вища школа, 1973.
7. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1, 2, 3. – М.: Наука, 1971 – 1977.
8. Годжаев Н.М. Оптика. – М.: Высшая школа, 1977.
9. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. – К.: Вища школа, 1993.
10. Кучерук І.М. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. – К.: Вища школа, 1991.
11. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Вища школа, 1993.
12. Джанколи Д. Физика. Т. 1,2. – М.: Мир, 1989.
13. Мерион Дж.Б. Общая физика с биологическими примерами. – М.: Высшая школа, 1986.
14. Акоста Л., Кован К., Грем Б. Основы современной физики. – М.: Просвещение, 1981.
15. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. – М.: Высшая школа, 1987.
16. Линднер Г. Картины современной физики. – М.: Мир, 1977.
17. Суорц Кл.Е. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 1,2. – М.: Наука, 1987.
18. Орир Дж. Физика. Т. 1,2. – М.: Мир, 1981.
19. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. Ч. 1,2. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1972.
20. Чалий О.В. і інші. Медицина і біологічна фізика. Видання 2-е. – К.: Книга плюс, 2005.
21. Физическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1988.
22. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982.
23. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977.
24. Чолпаков В. Ученые и открытия. – М.: Мир, 1987.
25. Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. – К.: Наукова думка, 1977.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	
------------------------	--

РОЗДІЛ 1. ВСТУП 4

§ 1.1. Предмет фізики	4
§ 1.2. Фізичні величини та одиниці їх вимірювання.	5
§ 1.3. Фізика і біологія.	7

РОЗДІЛ 2. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ І ТВЕРДОГО ТІЛА 8

§ 2.1. Системи відліку	8
§ 2.2. Траєкторія, шлях, переміщення	9
§ 2.3. Швидкість і прискорення	9
§ 2.4. Шлях при прямолінійному рівноприскореному русі.	14
§ 2.5. Рух падаючих тіл, і тіл, кинутих вертикально	16
§ 2.6. Відносність руху.	19
§ 2.7. Рух тіла, кинутого горизонтально.	21
§ 2.8. Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту.	23
§ 2.9. Рух по колу.	25
§ 2.10. Кінематика твердого тіла.	28

РОЗДІЛ 3. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ 32

§ 3.1. Сила	32
§ 3.2. Перший закон Ньютона	33
§ 3.3. Другий закон Ньютона	33
§ 3.4. Третій закон Ньютона	35
§ 3.5. Закон збереження імпульсу	36
§ 3.6. Фундаментальні сили природи	39
§ 3.7. Гравітаційні сили	40
§ 3.8. Сила тяжіння	43
§ 3.9. Вага і невагомість	44
§ 3.10. Інертна і гравітаційна маса	45
§ 3.11. Сила тертя	46
§ 3.12. Сила пружності	49
§ 3.13. Пружні властивості біологічної матерії	53

РОЗДІЛ 4. НЕІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ 56

§ 4.1. Сили інерції	56
§ 4.2. Сили інерції у системах відліку, що рухаються прямолінійно	57
§ 4.3. Відцентрова сила інерції	58
§ 4.4. Сила Коріоліса	59
§ 4.5. Штучна гравітація	61
§ 4.6. Вплив руху з великим прискоренням на живі організми	62
§ 4.7. Центрифуга	63

РОЗДІЛ 5. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ЕНЕРГІЯ 65

§ 5.1. Робота і потужність	65
§ 5.2. Кінетична і потенціальна енергія	67

§ 5.3. Консервативні сили	70
§ 5.4. Інші види енергії	71
§ 5.5. Закон збереження енергії	71
§ 5.6. Енергія в біології	73

РОЗДІЛ 6. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА 76

§ 6.1. Центр мас (центр ваги)	76
§ 6.2. Момент сили	77
§ 6.3. Момент інерції	79
§ 6.4. Момент імпульсу	80
§ 6.5. Момент інерції твердого тіла	83
§ 6.6. Кінетична енергія обертання	85

РОЗДІЛ 7. МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ 87

§ 7.1. Загальна характеристика рідин і газів	87
§ 7.2. Тиск в рідинах і газах	87
§ 7.3. Течія рідини	89
§ 7.4. Рівняння нерозривності	90
§ 7.5. Рівняння Бернуллі	92
§ 7.6. Підймальна сила, яка діє в потоці рідини	95
§ 7.7. Рух в'язкої рідини. Формула Пуазейля	96
§ 7.8. Течія крові в кровоносній системі	99

РОЗДІЛ 8. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ 101

§ 8.1. Коливання пружини	101
§ 8.2. Енергія гармонічного осцилятора	104
§ 8.3. Додавання гармонічних коливань методом векторних діаграм	106
§ 8.4. Додавання взаємно перпендикулярних гармонічних коливань	108
§ 8.5. Математичний маятник	110
§ 8.6. Фізичний маятник	112
§ 8.7. Згасаючі коливання	114
§ 8.8. Вимушені коливання. Резонанс	115

РОЗДІЛ 9. МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ 118

§ 9.1. Характеристика хвиль	118
§ 9.2. Рівняння біжучої хвилі	120
§ 9.3. Енергія пружної хвилі. Потік енергії	121
§ 9.4. Стоячі хвилі	122
§ 9.5. Звукові хвилі	124
§ 9.6. Інфра - і ультразвуки	129
§ 9.7. Ефект Допплера	130

РОЗДІЛ 10. СТАН РЕЧОВИНИ 135

§ 10.1. Атоми і молекули	136
§ 10.2. Агрегатні стани речовини	139
§ 10.3. Поняття про стан речовини. Параметри стану	140
§ 10.4. Поняття про температуру. Термометри. Температурні шкали	141
§ 10.5. Ідеальний газ. Закони ідеального газу	143

§ 10.6. Закон Авогадро	147
§ 10.7. Закон Дальтона	148
РОЗДІЛ 11. ОСНОВИ КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ГАЗІВ	150
§ 11.1. Основне рівняння кінетичної теорії газів	150
§ 11.2. Розподіл молекул за швидкостями	154
§ 11.3. Барометрична формула	156
§ 11.4. Середня довжина вільного пробігу	158
§ 11.5. Поняття про дифузію	160
§ 11.6. Передача теплоти. Теплопровідність	162
§ 11.7. Внутрішнє тертя в газах	163
РОЗДІЛ 12. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ	166
§ 12.1. Основні поняття і визначення	166
§ 12.2. Теплота і робота	167
§ 12.3. Внутрішня енергія	169
§ 12.4. Внутрішня енергія ідеального газу	170
§ 12.5. Перший закон термодинаміки	171
§ 12.6. Розподіл енергії за ступенями вільності	171
§ 12.7. Теплоємність	173
§ 12.8. Теплоємність ідеальних газів	174
§ 12.9. Адіабатне розширення газів	176
РОЗДІЛ 13. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ	179
§ 13.1. Оборотні і необоротні процеси	179
§ 13.2. Колові процеси (цикли)	180
§ 13.3. Цикл Карно	182
§ 13.4. Другий закон термодинаміки	184
§ 13.5. Поняття про ентропію	186
§ 13.6. Обмеженість другого закону термодинаміки	188
РОЗДІЛ 14. РЕАЛЬНІ ГАЗИ	190
§ 14.1. Відхилення властивостей газів від ідеальності	190
§ 14.2. Уявлення про сили міжмолекулярної взаємодії	190
§ 14.3. Рівняння стану реального газу. Критичний стан речовини та його параметри	191
РОЗДІЛ 15. РІДИНИ	194
§ 15.1. Будова рідин	194
§ 15.2. Поверхнева енергія. Поверхневий натяг	195
§ 15.3. Капілярні явища	197
§ 15.4. Дифузія в рідинах	200
§ 15.5. Явище осмосу	202
РОЗДІЛ 16. ТВЕРДІ ТІЛА	205
§ 16.1. Характеристика твердих тіл	205
§ 16.2. Сили зв'язку в твердих кристалічних тілах	207
§ 16.3. Теплоємність твердих тіл	210

§ 16.4 Плавлення, кристалізація, сублімація	212
§ 16.5 Діаграма стану	213

РОЗДІЛ 17. ЕЛЕКТРОСТАТИКА 215

§ 17.1. Електричний заряд. Закон збереження електричного заряду	215
§ 17.2. Взаємодія електричних зарядів. Закон Кулона	216
§ 17.3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля	219
§ 17.4. Силкові лінії	221
§ 17.5. Теорема Остроградського-Гаусса	222
§ 17.6. Робота переміщення заряду в електростатичному полі	228
§ 17.7. Електричний потенціал і різниця потенціалів	229
§ 17.8. Зв'язок між електричним потенціалом і напруженістю електричного поля. Градієнт потенціалу	231
§ 17.9. Еквіпотенціальні поверхні	232
§ 17.10. Поняття про біопотенціали	233
§ 17.11. Провідники в електростатичному полі	236
§ 17.12. Електроємність	236
§ 17.13. Конденсатори	237
§ 17.14. З'єднання конденсаторів	239
§ 17.15. Енергія електростатичного поля	241
§ 17.16. Електричний диполь	242
§ 17.17. Діелектрики в електричному полі	244

РОЗДІЛ 18. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ 249

§ 18.1. Електричний струм	249
§ 18.2. Закон Ома. Електричний опір	251
§ 18.3. Густина електричного струму	254
§ 18.4. Джерела струму. Електрорушійна сила	257
§ 18.5. Закон Ома для повного кола	258
§ 18.6. Правила Кірхгофа	259
§ 18.7. З'єднання провідників	261
§ 18.8. З'єднання джерел ЕРС	263
§ 18.9. Робота і потужність постійного струму	265
§ 18.10. Теплова дія електричного струму	266

РОЗДІЛ 19. ЕЛЕМЕНТИ ЗОННОЇ ТЕОРІЇ ПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ 267

§ 19.1. Зонна теорія твердих тіл	267
§ 19.2. Розподіл електронів по енергетичних рівнях	268
§ 19.3. Класифікація твердих тіл за їх електропровідністю на основі зонних уявлень	269
§ 19.4. Напівпровідники	271
§ 19.5. Напівпровідникові пристрої	275
§ 19.6. Контактна різниця потенціалів	277
§ 19.7. Термоелектричні явища	279
§ 19.8. Термопара	281

РОЗДІЛ 20. МАГНІТНЕ ПОЛЕ 283

§ 20.1. Магніти і магнітне поле	283
§ 20.2. Магнітне поле, створюване електричним струмом.	286
§ 20.3. Закон Ампера	289
§ 20.4. Дія магнітного поля на струм	290
§ 20.5. Рух зарядженої частинки в магнітному і електричному полях. Сила Лоренца	293
§ 20.6. Мас-спектрографи	297
§ 20.7. Магнітний момент контура зі струмом	299
§ 20.8. Магнітний момент атома	300
§ 20.9. Вектор намагніченості	303
§ 20.10. Феромагнетизм	305
§ 20.11. Парамагнетизм. Діамагнетизм	305
§ 20.12. Поняття про біомагнетизм.	307
§ 20.13. Дія магнітного поля на живі організми	307

РОЗДІЛ 21. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ 309

§ 21.1. Електрорушійна сила індукції. Правило Ленца	309
§ 21.2. ЕРС індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі	311
§ 21.3. Самоіндукція. Індуктивність	312
§ 21.4. Взаємодія	314
§ 21.5. Зв'язок магнітного поля з електричним	316
§ 21.6. Струми Фуко	317
§ 21.7. Енергія магнітного поля	318

РОЗДІЛ 22. ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ 320

§ 22.1. Основні характеристики змінного струму	320
§ 22.2. Отримання синусоїдального змінного струму	322
§ 22.3. Закон Ома для кіл змінного струму з омичним опором, ємністю та індуктивністю	323
§ 22.4. Дія струму на людину	329

РОЗДІЛ 23. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ 331

§ 23.1. Коливальний контур. Електромагнітні коливання	331
§ 23.2. Диференціальне рівняння власних електричних коливань	332
§ 23.3. Згасаючі коливання	334
§ 23.4. Вимушені електромагнітні коливання. Електричний резонанс	335

РОЗДІЛ 24. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ 337

§ 24.1. Основні положення теорії Максвелла	337
§ 24.2. Струм зміщення	338
§ 24.3. Електромагнітне поле	340
§ 24.4. Рівняння Максвелла	341
§ 24.5. Електромагнітні хвилі	342

РОЗДІЛ 25. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА 346

§ 25.1. Хвильові і корпускулярні уявлення про природу світла	346
--	-----

§ 25.2. Характеристики оптичного діапазону електромагнітних хвиль	352
§ 25.3. Чому ми бачимо саме у видимому діапазоні	354

РОЗДІЛ 26. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА 357

§ 26.1. Додавання світлових хвиль	357
§ 26.2. Оптична різниця ходу	360
§ 26.3. Інтерференція від двох когерентних джерел	361
§ 26.4. Методи здійснення інтерференції	363
§ 26.5. Інтерференція в тонких плівках і пластинках	368
§ 26.6. Інтерферометри та їх застосування	375

РОЗДІЛ 27. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА 379

§ 27.1. Явище дифракції	379
§ 27.2. Принцип Гюйгенса – Френеля	380
§ 27.3. Метод зон Френеля	380
§ 27.4. Дифракція Френеля	384
§ 27.5. Дифракція Фраунгофера	388
§ 27.6. Дифракційний спектр	396
§ 27.7. Дисперсія і роздільна здатність дифракційної решітки	399
§ 27.8. Дифракція на дво- і тривимірних структурах	403
§ 27.9. Дифракція рентгенівських променів	405

РОЗДІЛ 28. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА 408

§ 28.1. Поперечність світлових хвиль	408
§ 28.2. Природне і поляризоване світло	409
§ 28.3. Поляризація при відбиванні і заломленні світла на межі двох діелектриків	410
§ 28.4. Оптична анізотропія: подвійне променезаломлення	413
§ 28.5. Поляризаційні пристрої	414
§ 28.6. Аналіз лінійно поляризованого світла. Закон Малюса	416
§ 28.7. Інтерференція поляризованого світла	419
§ 28.8. Штучна анізотропія	421
§ 28.9. Повертання площини поляризації в кристалах і аморфних речовинах	424
§ 28.10. Застосування поляризації світла	428

РОЗДІЛ 29. ДИСПЕРСІЯ І ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА 430

§ 29.1. Нормальна і аномальна дисперсія	430
§ 29.2. Елементи класичної теорії дисперсії світла	432
§ 29.3. Поглинання (абсорбція) світла	435
§ 29.4. Від’ємне поглинання світла	438

РОЗДІЛ 30. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЕННЯ 440

§ 30.1. Рівноважне випромінювання	440
§ 30.2. Випромінювальна і поглинальна здатності тіл	441
§ 30.3. Абсолютно чорне тіло	442
§ 30.4. Закон Кірхгофа	443
§ 30.5. Закон Стефана-Больцмана	444

§ 30.6. Закони Віна	445
§ 30.7. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла .	446
§ 30.8. Формула Планка	447
РОЗДІЛ 31. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ	449
§ 31.1. Загальні відомості про фотоефект	449
§ 31.2. Закони фотоефекту	450
§ 31.3. Теоретичне обґрунтування законів фотоефекту	452
§ 31.4. Фотоефект у напівпровідниках і діелектриках	455
§ 31.5. Фотоеlementи та їх застосування	456
§ 31.6. Фотобіологічна дія випромінювання	459
РОЗДІЛ 32. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ	461
§ 32.1. Класифікація і механізм люмінесценції	461
§ 32.2. Застосування люмінесценції	464
РОЗДІЛ 33. БУДОВА АТОМА	466
§ 33.1. Модель атома Резерфорда	466
§ 33.2. Спектральні закономірності атома водню	468
§ 33.3. Постулати Бора	471
§ 33.4. Борівська теорія атома водню	472
§ 33.5. Хвилі де Бройля	478
§ 33.6. Основи квантово-механічної теорії	480
§ 33.7. Квантово-механічна картина будови атома	481
§ 33.8. Принцип Паулі. Розподіл електронів на енергетичних рівнях атома .	484
§ 33.9. Заповнення електронних оболонок атомів	485
§ 33.10. Рентгенівське випромінювання	488
§ 33.11. Будова і принцип дії лазера	491
РОЗДІЛ 34. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ АТОМНОГО ЯДРА	497
§ 34.1. Структура ядра. Ізотопи	497
§ 34.2. Дефект маси і енергія зв'язку	498
§ 34.3. Ядерні сили і їх властивості	500
§ 34.4. Природна радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	501
§ 34.5. Правила зміщення	505
§ 34.6. Ядерні реакції. Штучна радіоактивність	507
§ 34.7. Поділ ядер урану	509
§ 34.8. Термоядерні реакції	513
§ 34.9. Застосування радіоактивних ізотопів	516
§ 34.10. Дія радіації на людину	517
§ 34.11. Методи реєстрації елементарних частинок	519
Додатки	523
Іменний показчик	529
Предметний показчик	532
Література	546

Богдан Костянтинович Остафійчук
Михайло Михайлович Яцура
Анна Михайлівна Гамарник

Фізика

*За редакцією д-ра фіз.-мат. наук,
проф. Б.К. Остафійчука*

Літературний редактор *О.Р. Яцура*
Набір і комп'ютерна верстка *Н.В. Гладій*

Здано в набір 2009
Підписано до друку 2009
Формат . Папір офсетн.
Літ. гарн. Умовно друк. арк. 47

*Видавничо-дизайнерський відділ ЦІТ
Прикарпатського національного університету
імені Василя Стефаника
м. Івано-Франківськ*