

**Міністерство освіти і науки України
Одеський державний екологічний університет**

Є.А. Галич, Т.Є. Расторгуєва

ФІЗИКА

**Конспект лекцій
Частина 3**

для дистанційної форми навчання на підготовчому відділенні



Одеса 2019

Міністерство освіти і науки України
Одеський державний екологічний університет

Є.А. Галич, Т.Є. Расторгуєва

ФІЗИКА

Конспект лекцій
Частина 3

для дистанційної форми навчання на підготовчому відділенні

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерством освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 9 від 30.05.2019 р.)

Одеса 2019

Галич Є.А., Расторгуєва Т.Є.

Фізика: конспект лекцій / Одеський державний екологічний університет. Одеса, 2019 р. - 87с.

У конспекті лекцій міститься необхідний обсяг навчальної інформації, який забезпечує засвоєння основ курсу фізики та поглиблення знань в області тих явищ і законів фізики, які необхідні студентам під час навчання у навчальному закладі вищої освіти.

Розділи «Фізика коливань», «Оптика», «Спеціальна теорія відносності», «Квантова оптика», «Атом і атомне ядро» адаптовані максимально та розраховані на вивчення фізики. У конспекті широко представлений наочний матеріал: структурно - логічні схеми, таблиці, графіки, рисунки. Містяться запитання для самоперевірки.

Зміст конспекту відповідає «Програмі зовнішнього незалежного оцінювання з фізики», Київ, 2011 р., [16].

© Одеський державний
екологічний університет, 2019

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Фізика» відноситься до загальноосвітніх навчальних дисциплін і викладається для слухачів підготовчого відділення.

Головною метою цього конспекту лекцій є допомога слухачам підготовчого відділення (абітурієнтам) у підготовці до державної підсумкової атестації з фізики, зовнішнього незалежного оцінювання.

Конспект лекцій, підготовлений для самостійної роботи слухачів на підготовчому відділенні з дисципліни «Фізика» для дистанційної форми навчання, складається з таких тем:

Тема 1. Основи кінематики.

Тема 2. Основи динаміки.

Тема 3. Закони збереження в механіці. Елементи механіки рідин і газів.

Тема 4. Молекулярна фізика і термодинаміка.

Тема 5. Електродинаміка.

Тема 6. Електромагнетизм. Коливання та хвилі.

Тема 7. Оптика. Елементи теорії відносності. Квантова фізика.

Лекції призначені для того, щоб в максимально короткій та акцентованій формі викласти всю необхідну інформацію з певної теми, обсяг якої регламентується програмою зовнішнього незалежного оцінювання з дисципліни «Фізика». Теоретичний блок включає матеріал, який розкриває зміст основних фізичних параметрів, термінів і законів з відповідної теми.

Запитання і тести для самоперевірки призначені для оцінки обсягу засвоєння матеріалу після опрацювання лекційного матеріалу.

Контрольні роботи. По кожній із семи тем передбачається по одній контрольній роботі.

Контроль знань і вмінь слухачів системи довузівської підготовки, які навчаються за заочною формою, здійснюється за допомогою системи контрольних заходів. Вони складаються із заходів *поточного* та *підсумкового* контролю.

Поточний контроль здійснюється протягом усього навчального року (1 листопада – 1 травня) і включає заходи контролю самостійної роботи слухача під час вивчення навчальної дисципліни поза межами університету, а саме, виконання контрольних робіт.

Контроль самостійної роботи слухачів заочної форми навчання полягає у використанні дистанційних методів, які передбачають застосування сучасних інформаційно-комунікаційних засобів організації контролю, а саме:

- ✓ поетапне відправлення слухачем виконаних завдань контрольної роботи та отримання зауважень від викладача в режимі «*оф-лайн*» через мережу Інтернет;
- ✓ виконання завдань самостійної роботи безпосередньо в режимі «*он-лайн*» через мережу Інтернет за допомогою Moodle;
- ✓ спілкування (консультації) викладача зі слухачами в режимах «*оф-лайн*» і «*он-лайн*» через Інтернет у заздалегідь визначені дати і години, що може передбачати як відповіді на запитання слухачів щодо окремих тем, пунктів завдань, так і сумісне обговорення найбільш складних тем теоретичного матеріалу, контрольних або курсових робіт тощо.

У випадку, якщо слухач має накопичену суму балів поточного контролю не меншу ніж 60% від максимально можливої суми – 100 балів, він допускається до підсумкового контролю.

Підсумковий контроль здійснюється під час екзаменаційної сесії та має на меті встановлення рівня знань і вмінь, які опанував слухач після вивчення навчальної дисципліни. Форма підсумкового контролю – іспит.

Максимальна сума балів, яку може отримати слухач на іспиті, становить 100 балів. Кожен білет вміщує 20 тестових запитань, кожна правильна відповідь оцінюється в 5 балів.

- «**задовільно**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 60% від максимально можливої суми 100 балів;

- «**добре**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 74% від максимально можливої суми 100 балів;

- «**відмінно**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 90% від максимально можливої суми 100 балів;

Контроль самостійної роботи слухача заочної форми навчання здійснюється шляхом вивчення розділів дисципліни за графіком, який надається в табл. 1 перевірки контрольної роботи, яка реєструється Підготовчим відділенням у встановлені строки та подається слухачем на кафедру довузівської підготовки й на заходах підсумкового контролю, передбачених навчальним планом.

Таблиця 1– Терміни перевірки контрольних робіт.

| Перелік тем лекцій | №КР | Строки контролю |
|--|-------|-----------------|
| 1. Основи кінематики | КР №1 | 15.01-31.01 |
| 2. Основи динаміки | КР №2 | 01.02-15.02 |
| 3. Закони збереження в механіці. Елементи механіки рідин і газів. | КР №3 | 16.02-28.02 |
| 4. Молекулярна фізика і термодинаміка. | КР №4 | 01.03-15.03 |
| 5. Електродинаміка. | КР №5 | 16.03-31.03 |
| 6. Електромагнетизм. Коливання і хвилі. | КР №6 | 01.04-15.04 |
| 7. Оптика. Елементи теорії відносності. Квантова фізика. | КР №7 | 16.04-30.04 |

Під час вивчення дисципліни або виконання контрольних робіт звертатись до викладача на електронну адресу odeku_dp@gmail.com, закріплену за дисципліною, або зателефонувати на кафедру довузівської підготовки за тел. 42-77-64.

ЗМІСТ

| | |
|--|---|
| Вступ | 9 |
| | |
| 11 Фізика коливань | 1 |
| 11.1 Коливальний рух | 1 |
| 11.1.1 Основні поняття | 1 |
| 11.1.2 Гармонічні коливання. Рівняння гармонічних коливань | 1 |
| 11.2 Механічні коливання і хвилі | 1 |
| 11.2.1 Вільні коливання | 3 |
| 11.2.2 Згасаючі коливання. Змушені коливання. Резонанс | 1 |
| 11.3 Механічні хвилі | 6 |
| 11.3.1 Поздовжні та поперечні хвилі. Промінь. Довжина хвилі. Фронт хвилі | 1 |
| 11.3.2 Звук. Звукові хвилі. Швидкість звуку. Інтенсивність, висота і тембр звуку | 7 |
| 11.4 Електромагнітні коливання і хвилі | 1 |
| 11.4.1 Коливальний контур. Вільні електромагнітні коливання | 9 |
| 11.4.2 Змушені електричні коливання. Змінний струм | 2 |
| 11.4.3 Електромагнітні хвилі | 3 |
| 12 Оптика | 2 |
| 12.1 Геометрична оптика | 8 |
| 12.1.1 Прямолінійне розповсюдження світла в однорідному середовищі | 3 |
| 12.1.2 Закони відбивання світла | 3 |
| 12.1.3 Закони заломлення світла. Повне відбивання світла | 3 |

| | | |
|--|---|---|
| | | 5 |
| 12.1.4 | Сферичні лінзи. Основні поняття | 3 |
| | | 6 |
| 12.2 | Хвильова оптика | 3 |
| | | 9 |
| 12.2.1 | Монохроматичне світло. Заломлення світла | 3 |
| | | 9 |
| 12.2.2 | Дисперсія світла | 4 |
| | | 0 |
| 12.2.3 | Інтерференція світла | 4 |
| | | 0 |
| 12.2.4 | Дифракція світла | 4 |
| | | 1 |
| 12.2.5 | Поляризація світла | 4 |
| | | 2 |
| 13 Спеціальна теорія відносності (СТВ)..... | | 4 |
| | | 4 |
| 13.1 | Постулати СТВ. Перетворення Лоренца. Висновки СТВ | 4 |
| | | 4 |
| 13.2 | Релятивістський закон складання швидкостей | 4 |
| | | 6 |
| 13.3 | Імпульс тіла і маса в СТВ | 4 |
| | | 6 |
| 13.4 | Закон взаємозв'язку маси і енергії | 4 |
| | | 7 |
| 14 Квантова оптика..... | | 4 |
| | | 9 |
| 14.1 | Теорія Планка. Імпульс фотона | 4 |
| | | 9 |
| 14.2 | Фотоефект і його закони | 4 |
| | | 9 |
| 14.3 | Фотоелементи і їх вживання | 5 |
| | | 1 |
| 14.4 | Світловий тиск | 5 |
| | | 2 |
| 15 Атом і атомне ядро..... | | 5 |
| | | 5 |
| 15.1 | Фізика атома | 5 |
| | | 5 |
| 15.1.1 | Планетарна модель атома Резерфорда | 5 |
| | | 5 |
| 15.1.2 | Постулати Бора. Теорія атома водню | 5 |
| | | 5 |

| | | |
|-------------------------|--|---|
| | | 6 |
| 15.1.3 | Поглинання і випромінювання світла атомом | 6 |
| | | 0 |
| 15.1.4 | Лазер | 6 |
| | | 2 |
| 15.2 | Фізика атомного ядра | 6 |
| | | 5 |
| 15.2.1 | Відкриття протона і нейтрона | 6 |
| | | 5 |
| 15.2.2 | Теорія будови ядра | 6 |
| | | 5 |
| 15.2.3 | Енергія зв'язку ядра. Дефект маси | 6 |
| | | 8 |
| 15.2.4 | Ядерні реакції | 7 |
| | | 0 |
| 15.2.5 | Природна радіоактивність | 7 |
| | | 1 |
| 15.2.6 | Закон радіоактивного розпаду | 7 |
| | | 3 |
| 15.2.7 | Штучна радіоактивність. Ядерний реактор | 7 |
| | | 4 |
| 15.2.8 | Методи реєстрації іонізуючих випромінювань | 7 |
| | | 4 |
| Література | | 8 |
| | | 0 |
| Додаток | | 8 |
| | | 2 |
| ... | | |

ВСТУП

Фізика –найважливіша наука, яка вивчає найглибші закони природи. Вона вивчає найпростіші і разом з тим найбільш загальні властивості навколишнього матеріального світу. Тому поняття фізики і її закони лежать в основі будь-якого розділу природознавства.

Сучасна фізична картина світу – квантово-польова.

Теоретична основа – квантово-релятивістська.

Поділ матерії на речовину і поле умовний.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм притаманний усім видам матерії.

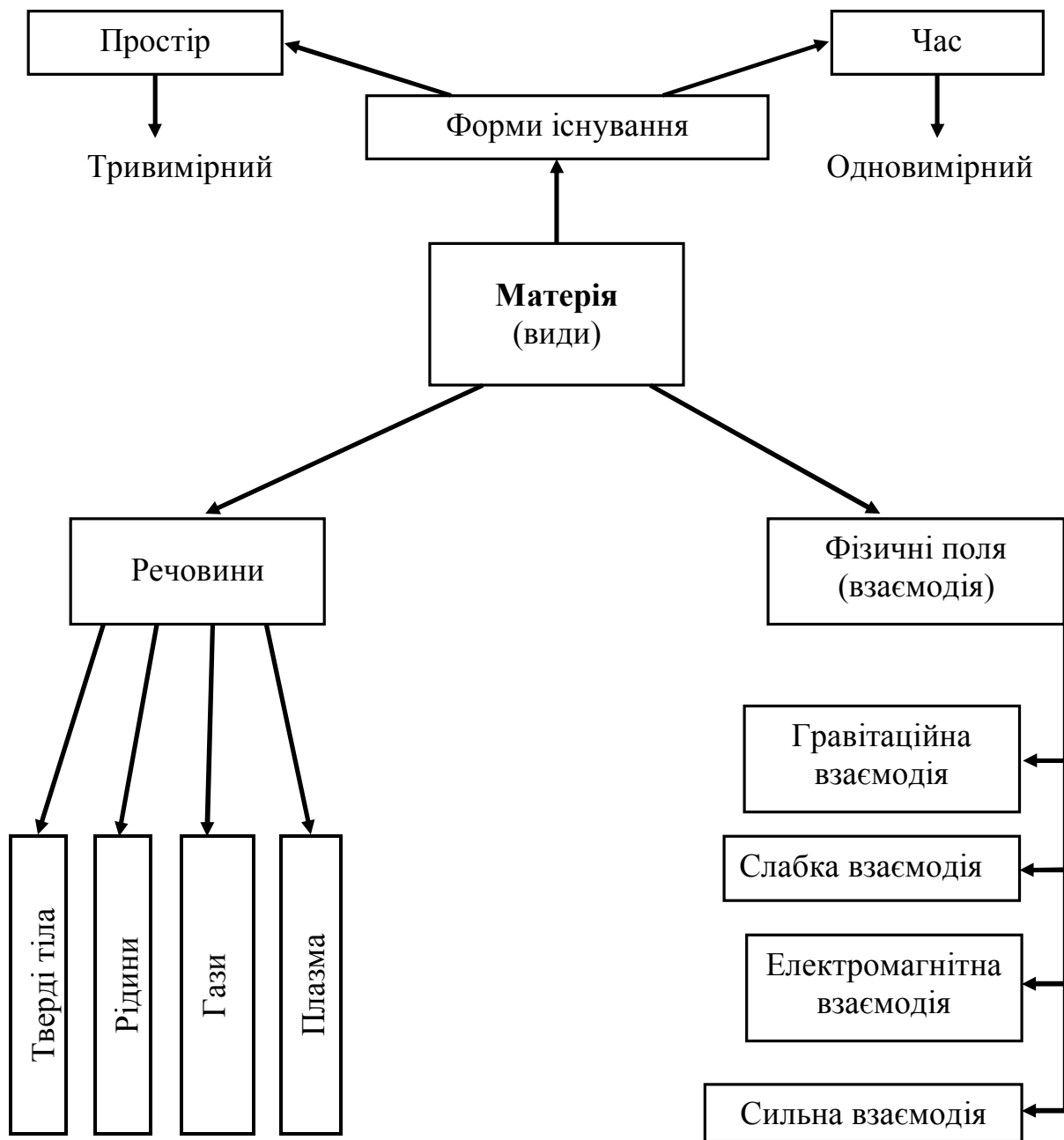


Рис. В1 – Фізична карта світу

Матерія –це категорія філософії, яка позначає об'єктивну реальність. Всі об'єкти природи – це матеріальні об'єкти.

Є два види матерії – речовина і поле. Наприклад, вода – це речовина, світло – це поле.

Речовина –це матеріальний об'єкт, який має масу спокою.

Поле –це матеріальний об'єкт, який не має маси спокою.

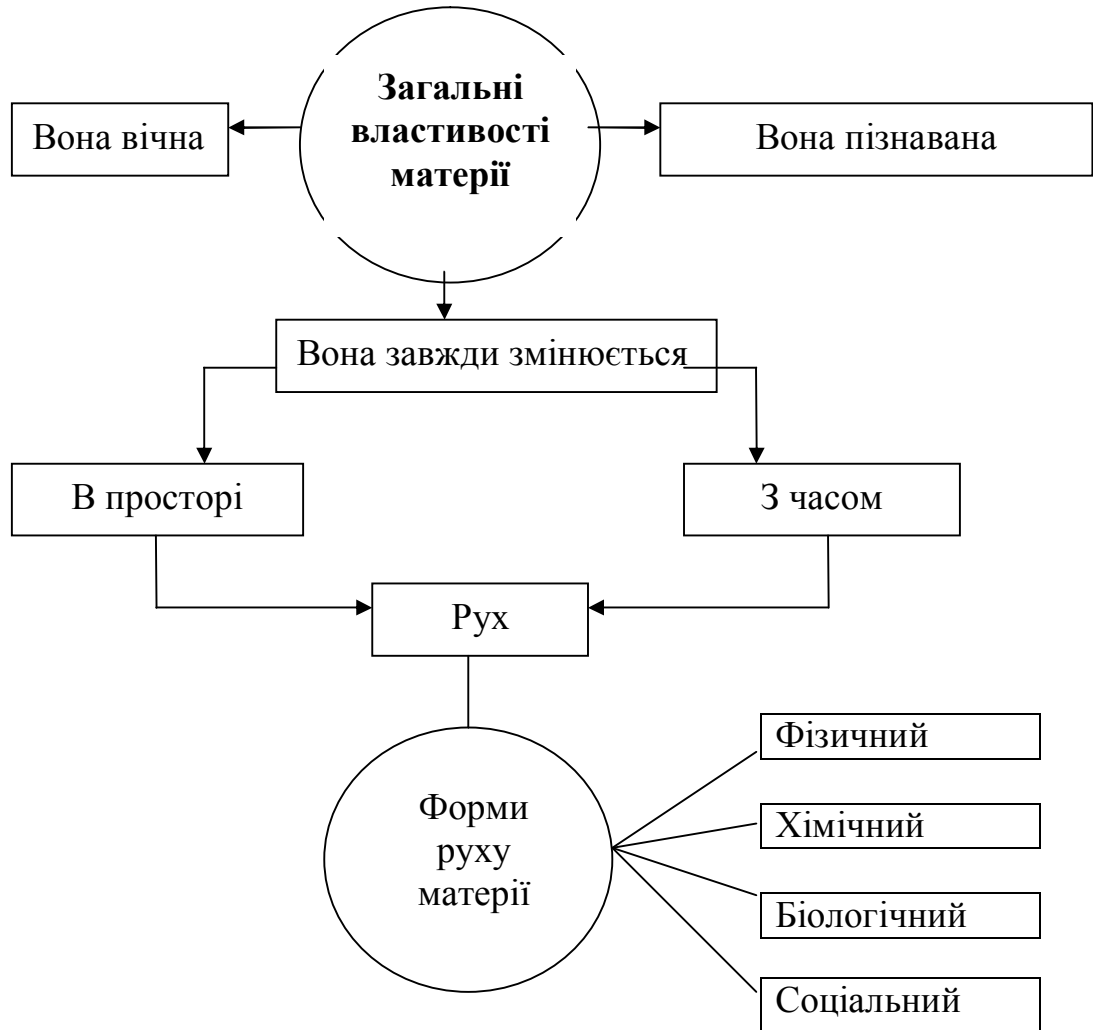


Рис. В2 – Загальні властивості та форми руху матерії

Будь-яка зміна матерії (в просторі і в часі) називається **рухом**. Матерія існує тільки в русі й не може існувати без нього.

Зміна стану (властивості, рух) матеріальних об'єктів спричиняється взаємодією цих об'єктів.

Фізика вивчає фізичні властивості матеріальних об'єктів і фізичні форми руху матерії (фізичні явища).

11 ФІЗИКА КОЛИВАНЬ

Цей розділ фізики розглядає механічні та електромагнітні процеси, спільністю яких є багатократна повторюваність.

11.1 Коливальний рух

11.1.1 Основні поняття

Коливання – це будь-який процес (рух тіла), під час якого стан тіла або фізичної системи тіл повторюється через певні інтервали часу.

Коливальні рухи здійснюють маятники годинника, мембрани телефонів, поршні двигунів внутрішнього згорання і тому подібне

Періодичні коливання – це коливання, при яких значення фізичної величини повторюються через рівні проміжки часу.

Період коливання (T) – це проміжок часу, після закінчення якого повторюються значення всіх величин, що характеризують коливальний рух:

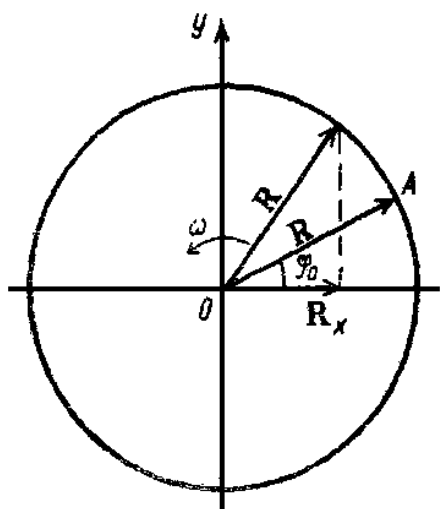
$$[T] = 1 \text{ с}. \quad (11.1)$$

Частота коливання (ν) – це число повних коливань за одиницю часу:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad [\nu] = \frac{1}{\text{с}} = 1 \text{ Гц (герц)} \quad (11.2)$$

Циклічна (колова) частота (ω) – це число повних коливань за 2π одиниць часу:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad [\omega] = \frac{1}{\text{с}}. \quad (11.3)$$



11.1.2 Гармонічні коливання. Рівняння гармонічних коливань

Важливими і поширеними є **гармонічні коливання**, під час яких деякі їх характеристики (наприклад, зміщення тіла з положення рівноваги) змінюються у часі за законом синуса або косинуса.

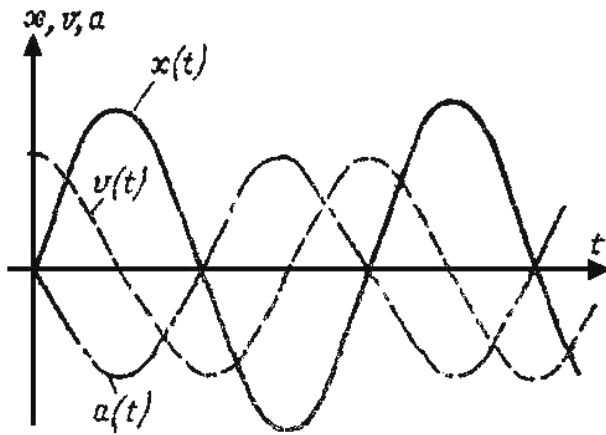
Коливання матеріальної точки має багато спільного з рухом по колу. При цьому значення проєкцій (x , y) радіуса-вектора матеріальної точки коливаються в

Рис. 11.1 діапазоні значень від 0 до $\pm R_1$ (рис. 11.1).

Позначимо $x_{\text{макс}} = y_{\text{макс}} = A$ – амплітуда коливання.

Оскільки $\varphi = \omega t$, тоді рівняння гармонічного коливання

$$x = A \cos \omega t, \text{ або } y = A \sin \omega t. \quad (11.4)$$



При гармонічних коливаннях зміна величини, що коливається, з часом відбувається за законом синуса або косинуса (рис. 11.2):

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (11.5)$$

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (11.6)$$

де x – миттєве значення величини, що коливається (зміщення від положення рівноваги), м;

Рис. 11.2

A – максимальне значення величини, що коливається, або амплітуда коливання, м; $(\omega t + \varphi_0) = \varphi$ – фаза коливання; φ_0 – початкова фаза, тобто значення фази коливання у момент початку відліку часу (t_0).

Фаза коливання – це кутова величина, яка визначає частку періоду (у градусах або радіанах), що пройде від початку коливання:

$$\omega t = 2\pi vt = \frac{2\pi}{T} t. \quad (11.7)$$

Якщо зсув точки змінюється за законом синуса

$$x(t) = A \sin \omega t.$$

Швидкість гармонічних коливань – це перша похідна координати за часом. Миттєве значення швидкості визначається як

$$v(t) = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = v_{\text{макс}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (11.8)$$

де $v_{\text{макс}} = A\omega$ – максимальна швидкість точки, м/с.

Прискорення гармонічних коливань – перша похідна швидкості за часом, друга похідна координати за часом:

$$a(t) = -\omega_0^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin(\omega t - \pi). \quad (11.9)$$

$$a = -\omega^2 x(t). \quad (11.10)$$

Гармонічними коливаннями – називають періодичні коливання фізичної величини залежно від часу, які відбуваються згідно із законами синуса або косинуса.

Загальна закономірність: якщо яка-небудь величина змінюється за законом синуса або косинуса, тоді швидкість її коливання змінюється за відповідним законом, але з амплітудою (максимальним значенням) в ω раз більшою і з фазою на $\pi/2$ більшою.

Сила, яка зумовлює гармонічні коливання, прямо пропорційна абсолютному зсуву від положення рівноваги і направлена протилежно йому:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m\vec{a}, \\ F_x &= -m\omega^2 x. \end{aligned} \quad (11.11)$$

11.2 Механічні коливання і хвилі

Механічне коливання – такий вигляд руху тіла (матеріальної точки), під час якого воно багато разів проходить ті самі положення. При цьому багаторазово змінюється напрям швидкості тіла.

11.2.1 Вільні коливання

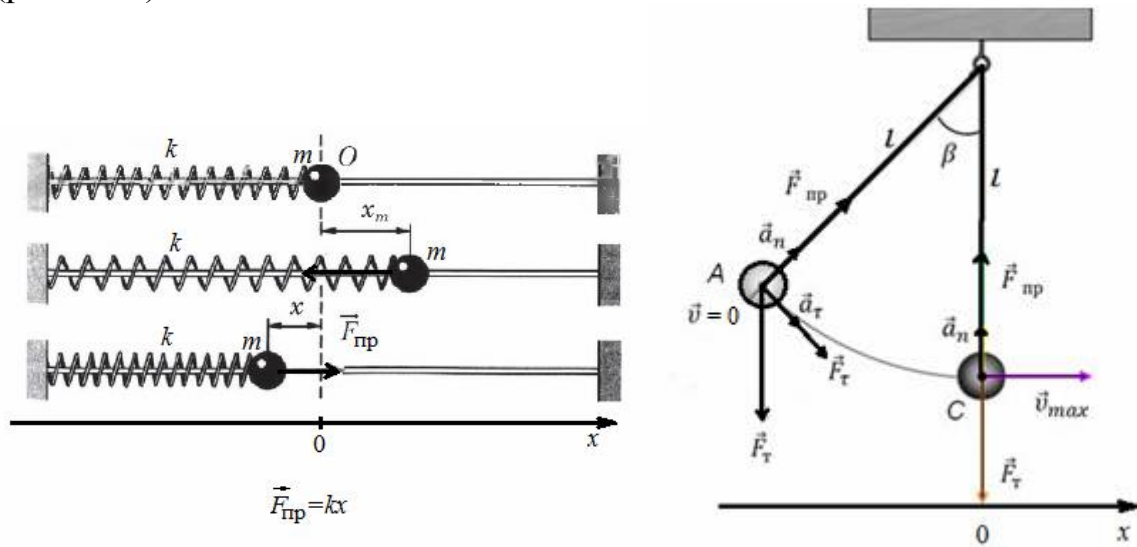
При відхиленні тіла від положення рівноваги в системі виникає сила, спрямована до положення рівноваги (зворотна сила). Тому в таких системах при відхиленні від положення рівноваги виникають коливання, які називаються вільними (або власними) коливаннями з частотою власних коливань

$$\omega_0 = 2\pi / T. \quad (11.12)$$

Вільні коливання зручніше описувати функцією косинуса, оскільки

$$\cos 0^\circ = 1, \quad x = A \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (11.13)$$

Прикладом механічного коливального руху є рух маятника (рис. 11.3).



а) пружинний маятник

б) математичний маятник

Рис. 11.3

$x = 0$ – рівновага;

x – зсув співвідношення маятника, м;

$x_m = A$ – максимальний зсув амплітуди, м.

Пружинний маятник – це тіло масою m , закріплене на пружині, жорсткість якої k , яке коливається під дією сили пружності (рис. 11.3, а):

$$F_{\text{пр}} = -kx = ma_x = -m\omega^2 x ; \quad (11.14)$$

$$a_x = -\frac{k}{m} x = -\omega^2 x = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x , \quad (11.15)$$

де $m = \text{const}$ – маса тіла, кг;

$k = \text{const}$ – жорсткість пружини, Н/м.

Період вільних коливань пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} , \quad (11.16)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} . \quad (11.17)$$

Математичний маятник – це тіло (матеріальна точка), підвішене на довгій невагомій нерозтяжній нитці.

Коливання математичного маятника відбувається під дією тангенціальної складової (\vec{F}_τ) сили тяжіння (рис. 11.13, б):

$$F_\tau = -\frac{mg}{l}x = ma_x, \quad (11.18)$$

$$a_x = -\frac{g}{l}x = -\omega^2 x = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x. \quad (11.19)$$

При $a \rightarrow 0$ коливання гармонійне.

Період вільних коливань математичного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (11.20)$$

де $l = const$ – довжина невагової нитки, м;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Період коливань математичного маятника не залежить від маси тіла.

Перетворення енергії при гармонічних коливаннях математичного маятника (рис. 11.13, б):

- якщо маятник утримувати в точці A , тоді $E_{П\max}, E_K = 0$, тому що $\vec{v} = 0$;
- при русі від A до C , $E_{П}$ зменшується, E_K зростає;
- у точці C швидкість максимальна, тому $E_{K\max}, E_{П} = 0$.

Перетворення енергії при коливаннях пружинного маятника: енергія пружної деформації перетворюється на кінетичну енергію:

$$\frac{kx_{\max}^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}. \quad (11.21)$$

Перетворення енергії при коливаннях математичного маятника: потенціальна енергія тіла перетворюється на кінетичну (рис. 311, а):

$$mgH = \frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh + \frac{mv^2}{2}. \quad (11.22)$$

11.2.2 Згасаючі коливання. Змушені коливання. Резонанс

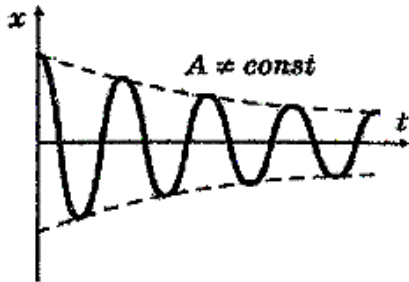


Рис. 11.4

Графік гармонічного коливання є синусоїдою або косинусоїдою. Проте в будь-якій коливальній системі, унаслідок неминучої наявності дії сил тертя й опору, власні коливання з часом «згасають».

Згасаючі – коливання, енергія яких зменшується з часом.

E – зменшується \Rightarrow A – амплітуда зменшується (рис. 11.4).

У природі й техніці поширені коливання систем в умовах дії на них зовнішніх сил, що змінюються в часі – змушені коливання.

Змушені коливання здійснюють дерева і фрагменти споруд під натиском вітру, підлога машинного залу на заводі, міст під ногами людей, мембрана мікрофона.

Змушені коливання можуть стати незгасаючими, якщо зовнішня дія (сила) буде компенсувати спад енергії в системі в результаті дії сил тертя і опору.

Змушені коливання зручніше описувати функцією синуса, оскільки $\sin 0^\circ = 0$:

$$x = x_{\max} \sin \omega t. \quad (11.23)$$

Досліди показують, що:

- 1) період (частота) змушених коливань дорівнює періоду (частоті) зовнішньої сили, що діє;
- 2) амплітуда змушених коливань залежить від частоти зовнішньої сили $A = f(\omega)$.

ω – частота зовнішньої сили \Rightarrow частота змушених коливань;

ω_0 – власна частота \Rightarrow частота вільних коливань;

A – амплітуда змушених незгасаючих коливань.

Резонанс – явище різкого (швидкого) збільшення амплітуди змушених коливань при збігу частоти зовнішньої сили (ω) з власною частотою системи (ω_0) (рис. 11.5).

Сила тертя послаблює резонанс:

$$F_{\text{тр1}} < F_{\text{тр2}} \Rightarrow A_{1 \text{ max}} > A_{2 \text{ max}} . \quad (11.24)$$

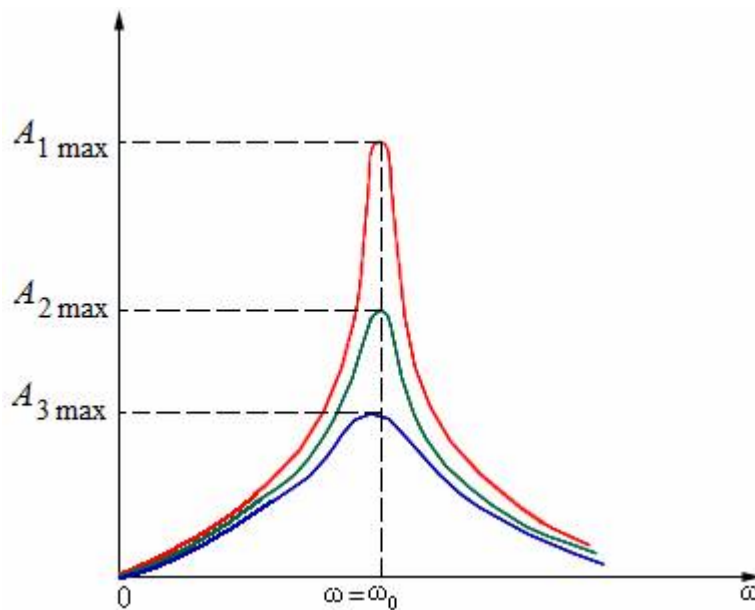


Рис.11.5

Для послаблення шкідливої дії резонансу в техніці використовують гасителі коливань (демпфери) або гумові прокладки.

Корисні прояви резонансу – підсилення звуку музичними інструментами (корпус гітари, міхи баяна).

11.3 Механічні хвилі

11.3.1 Поздовжні і поперечні хвилі. Промінь. Довжина хвилі. Фронт хвилі

Механічні хвилі – це поширення коливань в пружних середовищах.

Промінь – напрям поширення коливань (рис. 11.6).

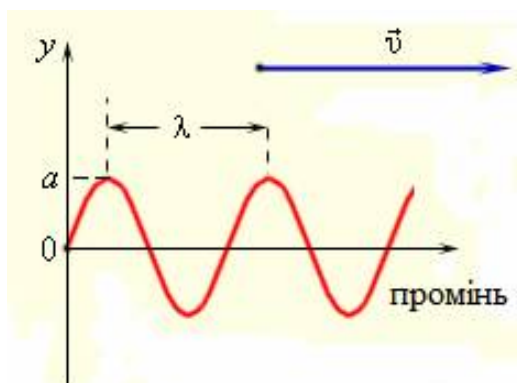
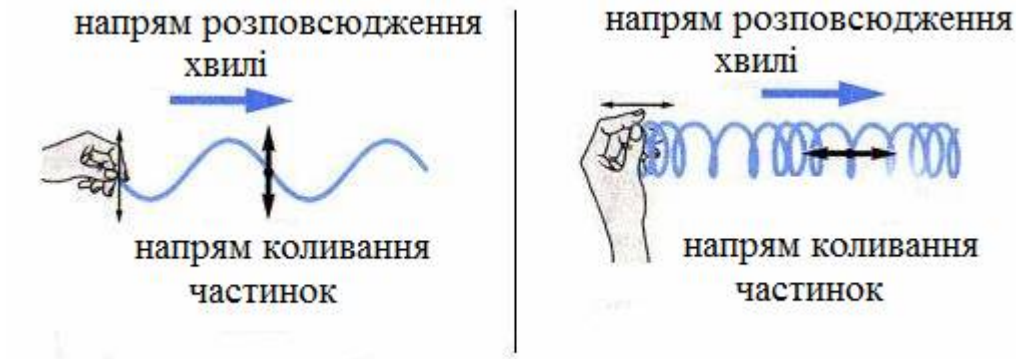


Рис.11.6

При поширенні пружних хвиль частинки середовища не переміщуються разом з хвилею, а лише здійснюють коливання біля своїх положень рівноваги.

Якщо коливання частинок відбувається перпендикулярно проміню, хвиля називається **поперечною** (рис. 11.7, а).

Поперечні хвилі виникають лише в середовищах, що проявляють пружність при зміні форми – в твердих тілах і на поверхні рідин.



а) поперечна хвиля б) поздовжня хвиля

Рис. 11.7 – Поперечна і поздовжня хвилі

Якщо частинки коливаються вздовж напрямку променя хвиля називається **поздовжньою** (рис. 11.7, б). Поздовжні хвилі виникають в середовищах, що проявляють пружність при зміні об'єму, тобто в усіх середовищах. Поздовжні хвилі складаються з ряду зтиснень і розріджень.

Довжина хвилі (λ) – відстань, на яку поширюється хвиля протягом одного періоду коливань T (рис. 11.6):

$$\lambda = \nu T \quad (11.25)$$

Точки середовища, віддалені одна від одної на відстань, рівну довжині хвилі λ , коливаються в однакових фазах.

Швидкість хвилі:

$$\nu = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu \quad (11.26)$$

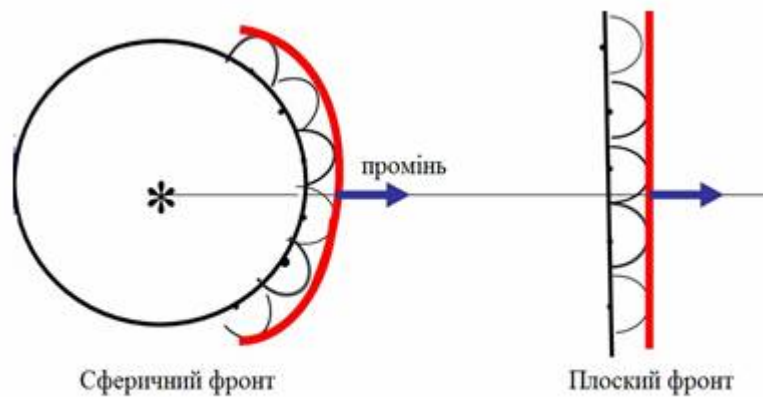


Рис. 11.8

Хвильова поверхня – геометричне місце точок, які коливаються в однакових фазах. Якщо джерелом хвилі є точка, тоді хвильові поверхні в просторі мають форму концентричних сфер (рис. 11.8).

Фронт хвилі – це поверхня, до якої досягли коливання в даний момент часу.

11.3.2 Звук. Звукові хвилі. Швидкість звуку. Інтенсивність, висота і тембр звуку

Звукова хвиля (звук) – поперечна хвиля, яка поширюється в твердих тілах, в рідинах і в газах, створюючи області високого та низького тиску (області розрідження і стиску) речовини.

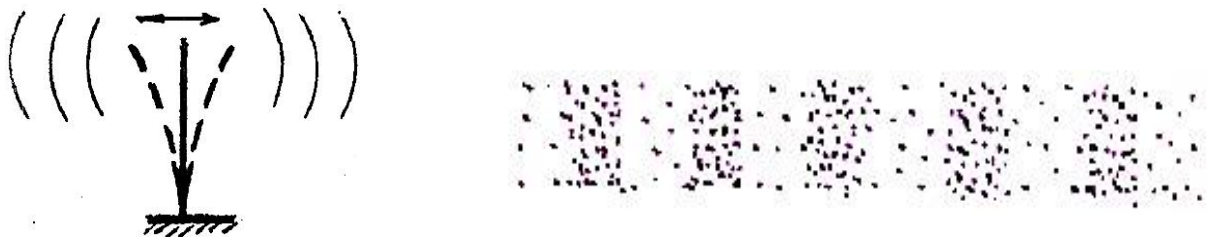


Рис. 11.9 – Джерела звукових хвиль – тіла, що коливаються

Акустика – наука, яка вивчає звук і пов'язані з ним явища.

Характеристики звукової хвилі

1) **Швидкість звуку** – швидкість поширення звукової хвилі. Звук поширюється в кожній речовині з певною швидкістю.

v звуку в твердих тілах $> v$ звуку в рідинах $> v$ звуку в газах.

Наприклад:

- у сталі $v = 6000$ м/с ($t^{\circ} = 15$ °С);
- у воді $v = 1435$ м/с ($t^{\circ} = 8$ °С);
- в повітрі $v = 332$ м/с ($t^{\circ} = 0$ °С);

$$\begin{aligned}v &= 342 \text{ м/с } (t^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}); \\v &= 349 \text{ м/с } (t^{\circ} = 30^{\circ}\text{C}); \\v &= 386 \text{ м/с } (t^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}).\end{aligned}$$

Швидкість звуку в речовинах визначається:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E – модуль Юнга, Па;

ρ – густина речовини, кг/м³.

Швидкість поширення звуку у повітрі:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

де $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показник адіабати;

$R = 8,31$ – універсальна газова стала, Дж/(К моль);

T – температура, К;

M – молярна маса, кг/моль.

2) **Інтенсивність звуку** – енергія хвилі (W), яку звукова хвиля переносить за секунду через одиницю площі поверхні (об'єктивна характеристика звукової хвилі):

$$I = \frac{W}{St}, [I] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

де W – енергія хвилі, Дж;

S – площа поверхні, м²;

t – час, с;

3) **Гучність звуку** (або сила звуку) – суб'єктивне сприйняття сили звуку (індивідуальні особливості органів слуху людини), яке залежить від тиску, амплітуди і частоти звукових коливань.

Одиниця гучності – децибел (1 дБ).

4) **Висота звуку** визначається його частотою:

високий звук \Rightarrow хвиля великої частоти

низький звук \Rightarrow хвиля малої частоти.

5) **Тембр звуку** визначається складом складного коливання і характеризує якість звуку.

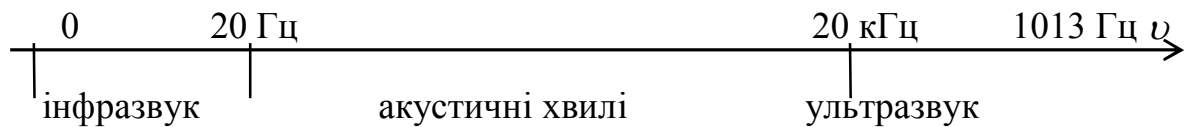


Рис. 11.9 Діапазон частот коливань звукових хвиль

1. **Акустичні хвилі** ($20 \leq \nu \leq 2 \cdot 10^4$ Гц)– звукові хвилі, які сприймаються вухом людини (людина чує);
2. **Інфразвук** ($\nu > 20$ Гц)– звукові хвилі низької частоти (часто шкідливий для здоров'я);
3. **Ультразвук** ($\nu > 20000$ Гц).

Ультразвук має велику енергію і значну проникність (поширюється в речовині, не значно згасаючи).

Використання ультразвуку:

1) у техніці:

- а) дія ультразвуків, що дробить;
- б) ультразвуки прискорюють процеси дифузії, розчинення і хімічних реакцій;
- в) дефектоскопія;
- г) гідролокація (вимір відстані до тіл, визначення положення тіл у воді).

Ехолот – прилад для визначення глибини моря.

У природі ультразвуковий локатор мають дельфіни, кажани.

2) у медицині:

- а) ехоскопія (діагностика хвороб) \Rightarrow ультразвук по-різному відбивається від різних тканин організму \Rightarrow видно відмінності тканин, зміни в тканинах, в органах;
 - б) ультразвук вбиває мікроби (стерилізація);
 - в) для лікування деяких хвороб і так далі.
- Мова людини \Rightarrow Джерело звуку – голосові зв'язки, що коливаються (у горлі).
 - Слух людини \Rightarrow Звукова хвиля, потрапляючи у вухо, приводить до коливання барабанні перетинки \Rightarrow сигнал про це йде в мозок \Rightarrow людина чує.

Контрольні запитання

1. Що називають коливаннями?
2. Що таке маятник?
3. Які коливання називають вільними (або власними)?
4. Яку систему називають математичним маятником?
6. Що таке зсув?
7. Що називають амплітудою?
9. Знайдіть формулу прискорення коливань вантажу на пружині.
10. Як залежить прискорення вільних коливань від зсуву?
11. Під дією яких сил відбуваються вільні коливання будь-якої системи?
12. Що називають коловою частотою?
13. Напишіть і прочитайте рівняння зсуву коливань.
14. Чому дорівнює період коливань?
15. Що називають частотою коливань?
16. Що таке фаза?
17. Які коливання називаються гармонічними коливаннями?
18. Які коливання є гармонічними коливаннями?
19. Знайдіть прискорення гармонічних коливань.
20. Як залежить прискорення гармонічних коливань від зсуву?
21. Чому ми говоримо, що власні коливання є гармонічними коливаннями?
22. Знайдіть колову частоту і період власних коливань будь-якої системи і математичного маятника.
23. Як залежить енергія коливань від амплітуди?
24. Чому амплітуда власних коливань зменшується?
25. Що таке згасаючі коливання?
26. Які коливання називають змушеними коливаннями?
28. Чому дорівнює частота змушених коливань системи?
29. Розкажіть, як змінюється амплітуда змушених коливань при зміні частоти сили, що змушує?
30. При якій частоті сили, що змушує, амплітуда змушених коливань найбільша?
31. Що таке резонанс?
32. Що називається хвилевим рухом або хвилею?
33. Які види механічних хвиль ви знаєте?
34. Яка хвиля називається поперечною хвилею?
35. Яка хвиля називається поздовжньою хвилею?
36. У яких середовищах поширюються поперечні і поздовжні хвилі?
37. Що називається довжиною хвилі?
38. Які коливання називаються звуковими коливаннями?
39. Від чого залежить швидкість поширення звуку?

11.4 Електромагнітні коливання і хвилі

11.4.1 Коливальний контур. Вільні електромагнітні коливання

Електромагнітні коливання – це коливання електричного заряду (q), сили струму (I), напруги (U), пов'язані з ними коливання напруженості електричного поля (\vec{E}) і індукції магнітного поля (\vec{B}), а також самостійні коливання \vec{E} і \vec{B} в електромагнітній хвилі.

Причиною електромагнітних коливань є електричні заряди, що рухаються з прискоренням.

Електричні коливання – це коливання електричного заряду (q), сили струму (I) та напруги (U).

Гармонічні електромагнітні коливання виникають в коливальному контурі. **Коливальний контур** – це електричний ланцюг, що складається з конденсатора, замкнутого на котушку індуктивності (рис. 11.10, а). Такий контур називається **закритим**, оскільки майже не випромінює енергії в простір. Контур називається ідеальним, якщо його активний опір $R \rightarrow 0$.

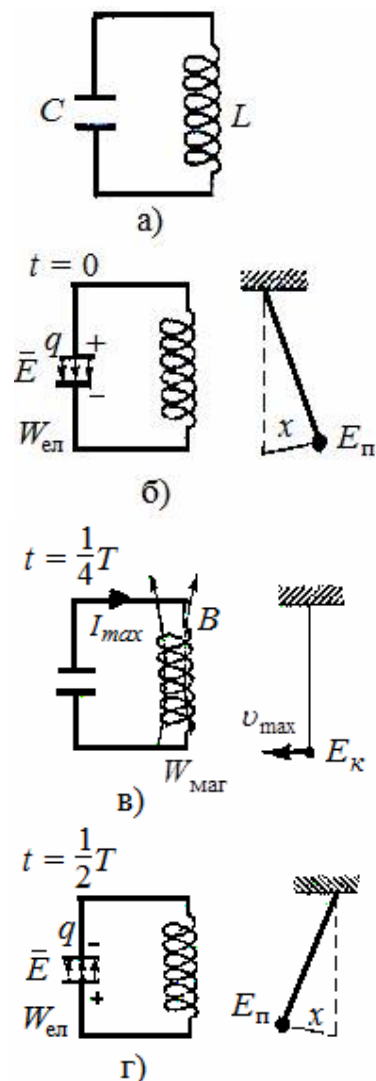


Рис. 11.10

При повідомленні конденсатору заряду q виникає електричне поле \vec{E} , а на його пластинах – різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2 = U$. Виникає струм, який збільшується поступово, оскільки його збільшенню протидіє вихрове електричне поле, що виникає при збільшенні магнітного потоку котушки. Струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора не перейде в енергію магнітного поля котушки. З цієї миті струм в ланцюзі «за інерцією» продовжує протікати, перезаряджаючи конденсатор і створюючи між його пластинами зростаюче електричне поле, що перешкоджає його протіканню. Струм зменшується поступово, оскільки його підтримує вихрове електричне поле, що виникає внаслідок зменшення магнітного потоку котушки. Струм припиняється, коли вся енергія магнітного поля перейде в енергію електричного поля.

Якщо проводити аналогію між електромагнітними коливаннями в контурі і механічними коливаннями математичного маятника, то q – аналог x , $W_{\text{ел}}$ – аналог $E_{\text{п}}$, $W_{\text{маг}}$ – аналог $E_{\text{к}}$ (рис. 11.10, б – г).

Період вільних незгасаючих електромагнітних коливань в коливальному контурі (встановив **В. Томсон**)

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{при } R = 0, [T] = 1 \text{ с}, \quad (11.27)$$

де C – електрична ємність конденсатора, Ф;

L – індуктивність котушки, Гн;

R – опір, Ом.

При наявності в коливальному контурі **активного опору** R – опір елемента електричного ланцюга, в якому електрична енергія безповоротно перетвориться на внутрішню, **період коливань** у ньому визначається за формулою Томсона для повного опору контура:

$$T = \frac{2\pi\sqrt{LC}}{\sqrt{1 - \frac{R^2C}{4L}}}. \quad (11.28)$$

Коливання в ідеальному контурі є гармонічними з циклічною частотою

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad [\omega] = 1 \text{ с}^{-1}. \quad (11.29)$$

Перетворення енергії в ідеальному коливальному контурі (закон збереження енергії)

$$\frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2}, \quad (11.30)$$

де U – напруга, В;

I – сила струму, А;

i – змінний електричний струм, А.

11.4.2 Змушені електричні коливання. Змінний струм

Як і механічні, вільні електричні коливання швидко затухають через опір системи. Практичне використання мають *змушені електричні коливання – змінний струм*.

Для здобуття незгасаючих електричних коливань в неідеальному контурі необхідно в кожен період коливань передавати контуру порцію енергії.

Так працює *генератор незгасаючих електричних коливань – генератор змінного струму*.

Найпростіший генератор складається із дротяної рамки (ротора), яку зовнішня сила приводить в обертання у полі нерухомого магніту (статора).

При обертанні рамки з постійною швидкістю в постійному магнітному полі \vec{B} в рамці виникає синусоїдальна (змінна) ЕРС (рис. 11.11, а):

$$e = BS\omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (11.31)$$

$$e = \varepsilon_{\max} \sin \omega t, \quad (11.32)$$

$$\text{де } \varepsilon_{\max} = BS\omega.$$



Рис. 11.11

Якщо N витків, тоді

$$\varepsilon_{\max} = BS\omega N. \quad (11.33)$$

На кінцях рамки (обмотки генератора) виникає синусоїдальна напруга, співпадаюча по фазі з ЕРС (рис. 11.11, б). Закон зміни миттєвої напруги з часом має вигляд

$$u = U_{\max} \sin \omega t. \quad (11.34)$$

У зовнішньому ланцюзі виникають *змушені електричні коливання заряду – змінний синусоїдальний струм*, який по фазі відрізняється від ЕРС і напруги на величину φ , залежну від властивості ланцюга

$$i = I_{\max} \sin(\omega t \pm \varphi), \quad (11.35)$$

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R}. \quad (11.36)$$

Для такого струму характерна зміна в часі швидкості руху зарядів і їх напрямку.

e, u, i – *миттєві значення* ЕРС, напруги та сили струму (значення відповідних величин в кожен момент часу).

Діюче значення сили змінного струму. При вмиканні в ланцюг змінного струму амперметра, розрахованого на вимір постійного струму, його стрілка коливатиметься з частотою 50 Гц. Тому визначити значення струму, змінного в межах від $-I_m$ до $+I_m$, буде практично неможливо.

Серед відомих дій електричного струму – хімічної, магнітної і теплової, лише тепла дія не залежить від зміни напрямку струму. Теплова потужність, що виділяється в резисторі, прямо пропорційна квадрату сили струму

$$P = I^2 R. \quad (11.37)$$

Сила змінного струму I_A – сила струму, що виділяє в провіднику таку ж кількість теплоти, що і постійний струм I_A за той же проміжок часу.

Амперметр змінного струму вимірює діюче значення сили струму.

Діюче значення сили змінного струму, дорівнює силі постійного струму, при якому в провіднику виділяється така ж кількість теплоти, що і при змінному струмі за той же проміжок часу.

Діюче значення сили змінного гармонічного струму I_d (ефективне), в $\sqrt{2}$ раз менше від його амплітуди. Аналогічно визначається діюче значення змінної гармонійної напруги U_d (ефективне):

$$\boxed{I_d = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad U_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}}. \quad (11.38)$$

У колах змінного струму резистор часто називають *активним опором*.

Активним опором володіють електролампи, обмотки електродвигунів, трансформаторів і ін.

Коло змінного струму, що містить котушку індуктивності і конденсатор, має повний опір

$$\boxed{Z = \sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (11.39)$$

де R – активний опір, X – реактивний опір.

$$X = X_L - X_C, \quad (11.40)$$

де X_L – індуктивний опір

$$X_L = \omega L, \quad (11.41)$$

X_C – ємнісний опір

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (11.42)$$

Зсув фаз в колах змінного струму. За наявності в колі індуктивності (L) сила струму відстає за фазою від напруги. За наявності в ланцюзі ємності (C) сила струму випереджає напругу по фазі.

Зсув фаз визначається як відношення активного і повного опору кола

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}. \quad (11.43)$$

Закон Ома для змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z}, I_{max} = \frac{U_{max}}{Z}. \quad (11.44)$$

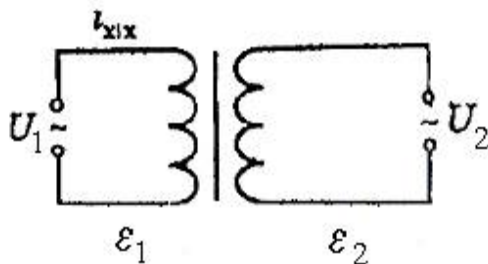


Рис. 11.12

Трансформатори. *Трансформатор напруги* – це пристрій для перетворення напруги змінного струму:

- зменшення напруги (знижувальні трансформатори);
- збільшення напруги (підвищувальні трансформатори).

Трансформатор напруги базується на явищі взаємної індукції двох котушок (обмотки) на одному феромагнітному осерді. Перетворює напругу, збільшуючи або зменшуючи її до необхідних значень (рис. 11.12).

Однакова ЕРС індукції наводиться в кожному витку, тому чим більше витків у вторинній котушці, тим більша напруга наводиться в ній. Якщо число витків в первинній котушці (n_1) більше, ніж у вторинній (n_2), то трансформатор знижує напругу, і навпаки.

Коефіцієнт трансформації – це відношення

$$\boxed{\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = K} \quad (11.45)$$

При $K > 1$ – знижувальний трансформатор, а при $K < 1$ – підвищувальний.

ККД трансформатора

$$\boxed{\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{стали}}} \quad (11.46)$$

де P_{Cu} – це втрати на нагрівання обмоток з міді, вони дуже малі, оскільки мідний дріт має низьке значення питомого опору ρ_{Cu} ;

$P_{стали}$ – втрати в сталі на перемагнічування осердя і струми Фуко, теж дуже малі, оскільки осердя складається з окремих ізольованих пластин магнітом'якого феромагнітного матеріалу;

P_1 – використана потужність, Вт;

P_2 – корисна потужність, Вт.

ККД трансформатора дуже високий $\eta \approx 98\%$.

По лініях передачі електричної енергії на великі відстані потужні трансформатори підвищують напругу до мільйонів вольт (В), а у споживача знижують його до необхідних значень (у побутових лініях 380/220 В).

11.4.3 Електромагнітні хвилі

Випромінювання електромагнітних хвиль відкритим коливальним контуром.

Електромагнітні хвилі – це поширення в просторі з часом вільного електромагнітного поля. Електромагнітні хвилі випромінюються електричними зарядами, що рухаються з прискоренням.

Відкритий коливальний контур випромінює електромагнітні хвилі, оскільки в процесі коливань в контурі електрони рухаються з прискоренням.

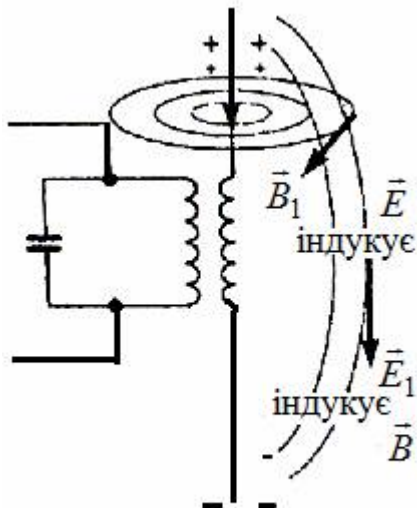


Рис. 11.13

При збудженні відкритому коливальному контурі коливань з великою амплітудою навколо контура виникають поля \vec{E}_1 і \vec{B}_1 , пов'язані із зарядами і струмом в контурі. Змінні поля \vec{E}_1 і \vec{B}_1 індукують відповідно поля \vec{B} і \vec{E} . Далеко від контура поля \vec{E} і \vec{B} , взаємно індукуючи один одного, утворюють **вільне електромагнітне поле** (рис. 11.13).

У електромагнітній хвилі \vec{E} і \vec{B} змінюються у взаємно перпендикулярних площинах, перпендикулярних до напрямку поширення, і збігаються по фазі (рис. 11.14):

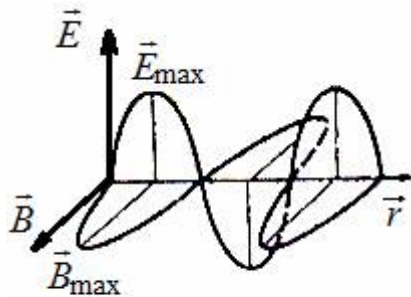


Рис. 11.14

$$\boxed{\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu_0 \mu}} \quad (11.47)$$

Електромагнітні хвилі – це *поперечні хвилі* ($\vec{B} \perp \vec{E} \perp \vec{v}$), які поглинаються, заломлюються та відбиваються.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль. Швидкість поширення електромагнітних хвиль *у вакуумі*

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}} \quad (11.48)$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

У *діелектрику* швидкість електромагнітної хвилі зменшується (хвиля гальмується)

$$\boxed{v_{сер} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}} \quad (11.49)$$

На межі середовища з вакуумом хвиля заломлюється. **Абсолютний показник заломлення** $n_{сер}$ – число, що визначає, в скільки разів швидкість хвилі в середовищі $v_{сер}$ менша за швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі c

$$n_{сер} = \frac{c}{v_{сер}} = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (11.50)$$

Довжина електромагнітної хвилі (λ) – це відстань, на яку хвиля поширюється за один період коливань \vec{E} і \vec{B} .

В повітрі $c = \lambda\nu$, в діелектриці $v_{сер} = \lambda_{сер}\nu$.

Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі (ω):

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{EB}{\nu\mu_0\mu}, \quad [\omega] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \quad (11.51)$$

Інтенсивність електромагнітної хвилі (I):

$$I = \vec{\omega} \nu = \frac{EB}{\mu_0\mu}, \quad [I] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (11.52)$$

Різні електромагнітні хвилі характеризуються величезним діапазоном довжин хвиль, від значень в десятки кілометрів до 10^{-12} м і менше.

Залежно від властивостей електромагнітних хвиль і способів їх виникнення весь цей діапазон розділений, як шкала, на окремі ділянки: радіохвилі; мікрохвилі (або ультракороткі хвилі); інфрачервоні промені; видиме світло; ультрафіолетові промені; рентгенівські промені; гамма-промені. Всі ці ділянки не мають чітких розмежувань, тобто хвилі однакових довжин можна отримати різними способами.

Принцип радіозв'язку

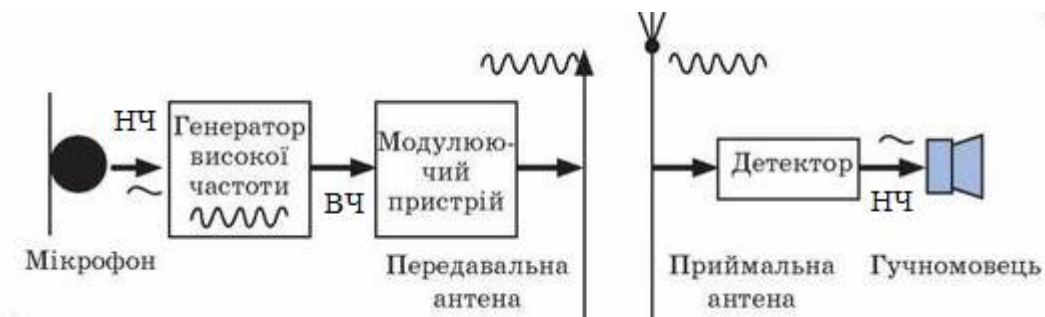


Рис.11.15– Принцип радіозв'язку

Детектор – пристрій, що перетворює модульовані високочастотні (ВЧ) коливання на низькочастотні (НЧ).

Радіолокація – виявлення й точне визначення місця розташування предмета за допомогою радіохвиль при частоті $\nu=10^8-10^{11}$ Гц (надвисокі частоти).

Таблиця 11.1 – Шкала електромагнітних хвиль

| Вигляд хвиль | Довжина хвиль, м | Частота хвиль, Гц | Джерело випромінювання |
|--------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| Низькочастотні хвилі | $>10^4$ | $<3 \cdot 10^4$ | Механічний генератор змінного струму |
| Радіохвилі | $10^4 \dots 10^{-1}$ | $3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{10}$ | Коливальний контур і вібратор Герца |
| Ультрарадіохвилі | $10^{-1} \dots 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{12}$ | Масовий випромінювач |
| Інфрачервоне випромінювання | $10^{-4} \dots 7,7 \cdot 10^{-7}$ | $3 \cdot 10^{12} \dots 4 \cdot 10^{14}$ | Лампи |
| Видиме випромінювання | $7,7 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$ | Лампи |
| Ультрафіолетове випромінювання | $4 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$ | $7,5 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$ | Лампи |
| Рентгенівське випромінювання | $10^{-8} \dots 10^{-11}$ | $3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{19}$ | Рентгенівська трубка |
| Гамма випромінювання | $<10^{-11}$ | $>3 \cdot 10^{19}$ | Радіоактивний розпад |

Таблиця 11.2 – Множники, префікси і їх позначення для кратних і часткових одиниць СІ

| Множник | Префікс | Позначення | | Множник | Префікс | Позначення | |
|-----------|---------|------------|-------|------------|---------|------------|-------|
| | | укр. | міжн. | | | укр. | міжн. |
| 10^{18} | екса | Е | Е | 10^{-1} | деци | д | d |
| 10^{15} | пета | П | P | 10^{-2} | санті | с | c |
| 10^{13} | тера | Т | T | 10^{-3} | міллі | м | m |
| 10^9 | гіга | Г | G | 10^{-6} | мікро | мк | μ |
| 10^6 | мега | М | M | 10^{-9} | нано | н | n |
| 10^3 | кіло | к | K | 10^{-12} | піко | п | p |
| 10^2 | гекто | г | h | 10^{-15} | фемто | ф | f |
| 10 | дека | да | da | 10^{-18} | атто | а | a |

Контрольні запитання

1. Що ми називаємо коливальним контуром?
2. Опишіть електромагнітні коливання в контурі і порівняйте їх з коливаннями маятника.
3. Напишіть формулу Томпсона: для періоду власних коливань; для частоти власних коливань; для колової частоти власних коливань.
4. Що ми називаємо резонансом у коливальному контурі?
5. Вкажіть причини, з яких власні коливання контура затухають.
6. Який струм називається змінним?
7. На якому явищі базується генератор змінного струму?
8. Як змінюється ЕРС індукції при збільшенні витків котушки?
9. Напишіть вираз для ЕРС індукції рамки з N витків, яка обертається в магнітному полі.
10. Напишіть і назвіть величини, які входять в формулу ЕРС індукції рамки.
11. Напишіть формулу закону Ома для змінного струму з опором R .
12. Як залежить ефективне значення струму від амплітуди струму?
13. Напишіть формули індуктивного опору котушки і ємнісного опору конденсатора.
14. Поясніть дію індуктивності і ємності в ланцюзі змінного струму.
15. Що ми спостерігаємо після вмикання конденсатора в ланцюг постійного струму?
16. Розкажіть про пристрій і принцип дії трансформатора.
17. Що таке коефіцієнт трансформації?
18. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії трансформатора?
19. Що є електромагнітним полем?
20. Дайте визначення електромагнітних хвиль.
21. Чому дорівнює довжина електромагнітної хвилі?
22. Напишіть формулу зв'язку довжини хвилі, швидкості і періоду та покажіть довжину хвилі на рисунку.
23. Де більше згасання електромагнітних коливань: у відкритому чи закритому коливальному контурі? Активний опір контурів однаковий?
24. У якому діапазоні частот (або довжин хвиль) лежать радіохвилі?

12 ОПТИКА

12.1 Геометрична оптика

Геометрична оптика розглядає закони поширення світла в прозорих середовищах лише на основі уявлень про світло як про сукупність світлових променів.

12.1.1 Прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі

Світловий промінь – лінія, уздовж якої поширюється енергія світлових електромагнітних хвиль.

Світловий пучок – це пучок світлових променів (рис. 12.1).

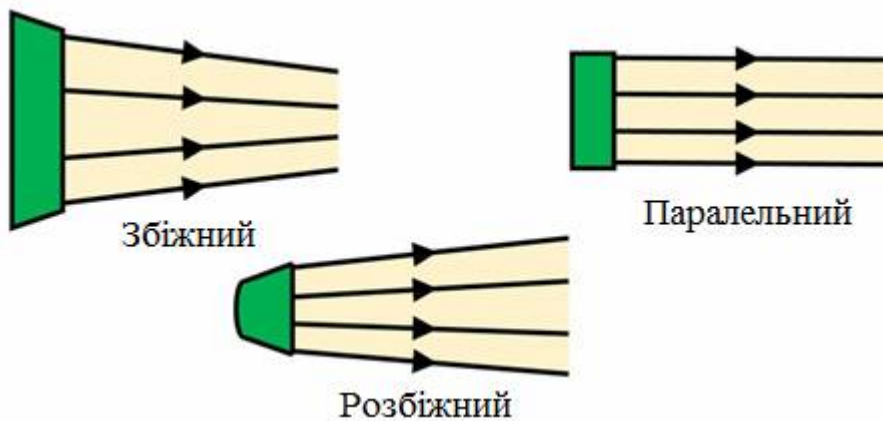


Рис. 12.1 – Світловий пучок

У оптично однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Один з доказів цього – утворення тіні і півтіні за перешкодою (рис. 12.2).

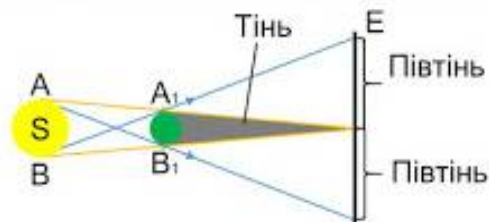


Рис. 12.2 – Поширення світла

12.1.2 Закони відбивання світла

1. Падаючий і відбитий промені і перпендикуляр до точки падіння променя, лежать в одній площині.
2. Кут відбивання дорівнює куту падіння: $\angle \alpha = \angle \beta$ (рис. 12.3).

Висновок: відбитий і падаючий промені взаємно обернені.

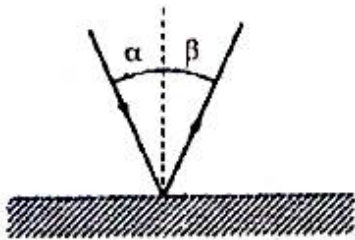


Рис. 12.3

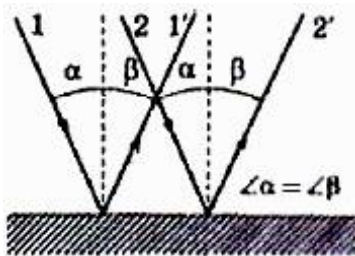


Рис. 12.4

Дзеркальне відбивання – відбивання від оптично гладкої плоскої поверхні (рис. 12.4).

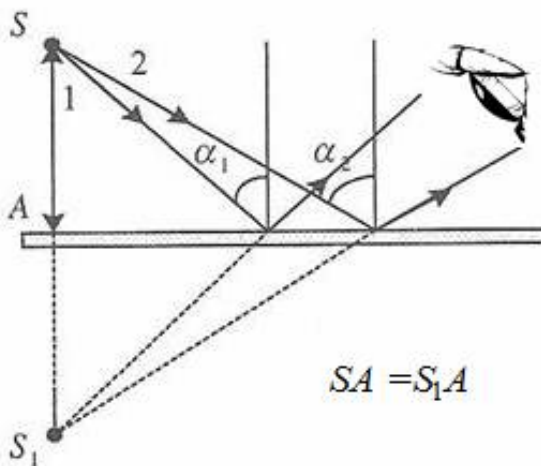
Дійсне зображення точкового джерела світла – це точка пересічення відбитих (або заломлених) променів.

Уявне зображення точкового джерела світла – це точка пересічення продовження відбитих (або заломлених) променів світла.

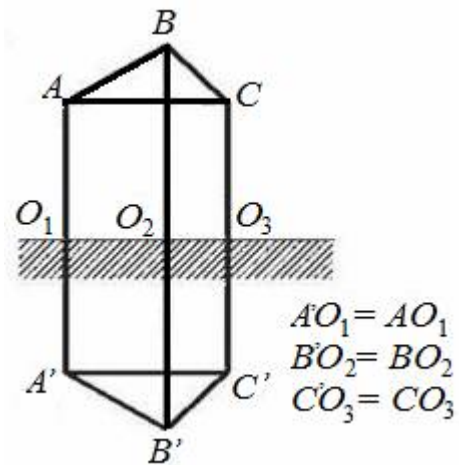
Уявне зображення точкового джерела світла сприймається очима людини, але насправді не існує (рис. 12.5, а).

Зображення в плоскому дзеркалі:

- зображення точки уявне і симетричне;
- зображення тіла уявне і симетричне (зображення суми точок) (рис. 12.5 б).



а)



б)

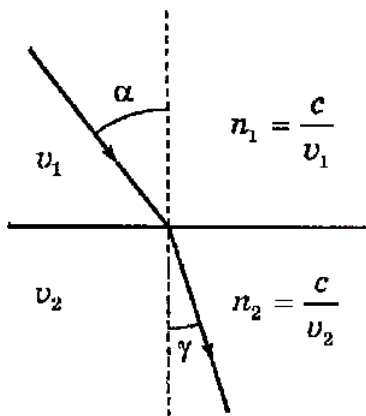
Рис. 12.5 – Зображення в плоскому дзеркалі

12.1.3 Закони заломлення світла. Повне відбивання світла

Закони заломлення світла:

1. Падаючий, заломлений промені і перпендикуляр до точки падіння променя, лежать в одній площині (рис. 12.6).
2. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення світла є величина стала ідорівнює відносному показнику заломлення двох середовищ

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{2-1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (12.1)$$



Показник заломлення середовища відносно вакууму називається абсолютним показником заломлення середовища:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}, \quad \text{тоді}$$

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c v_1}{v_2 c} = \frac{v_1}{v_2} \quad (12.2)$$

Рис. 12.6

З двох середовищ оптично більш щільним вважається те, показник заломлення якого більший.

Повне відбивання світла (рис. 12.7). Якщо перше середовище оптично щільніше від другого, тоді в міру збільшення α заломлений промінь, «опускаючись», наближається до межі поділу середовищ.

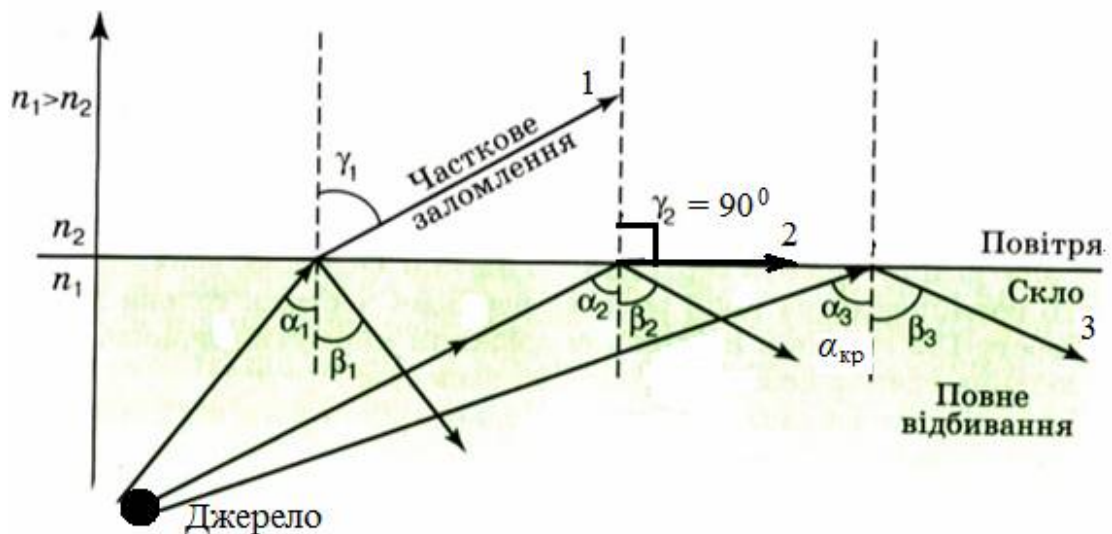


Рис.12.7 – Повне відбивання світла

При деякому значенні α (критичний або граничний кут $\alpha_{кр}$) заломлення немає, промінь ковзає уздовж поверхні поділу середовищ (промінь 2). При $\alpha > \alpha_{кр}$ світловий промінь повертається в перше середовище, тобто відбувається лише відбивання світла усередині першого середовища без виходу в друге (промінь 3).

12.1.4 Сферичні лінзи. Основні поняття

Хід променів в лінзах. *Лінза* – оптично прозоре тіло, обмежене сферичними поверхнями, одна з яких може бути плоскою.

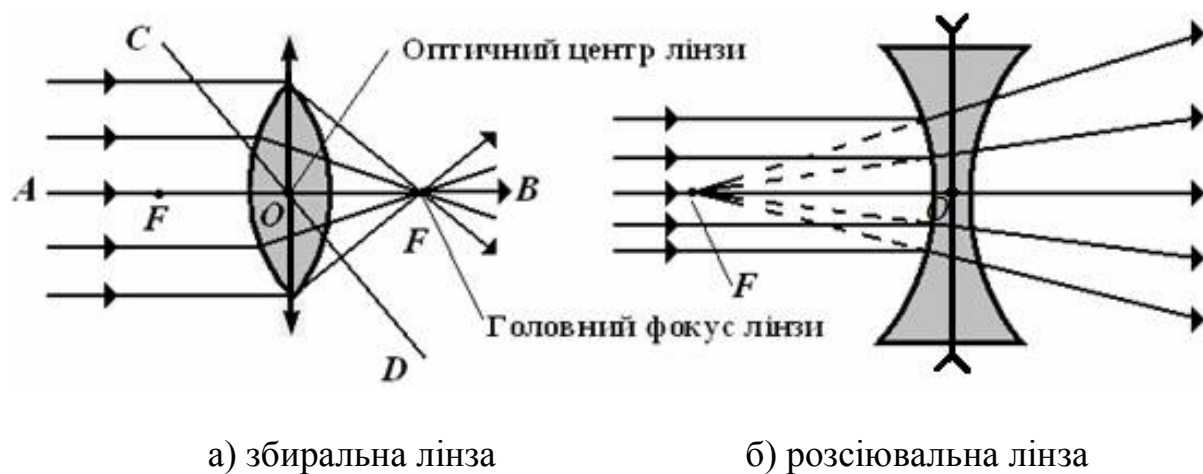


Рис. 12.8 – Хід променів в лінзах

Головна оптична вісь лінзи (AB) – це пряма лінія, що проходить через центри сферичних поверхонь (рис. 12.8).

Оптичний центр лінзи (O) – це точка лінзи, через яку промені проходять, не заломлюючись.

Побічна оптична вісь лінзи (COD) – це будь-яка пряма лінія, що проходить через оптичний центр лінзи.

Промені, падаючі на лінзу паралельно головній оптичній осі (рис. 12.9), збираються (дійсно або уявно) в одній точці, яка називається **головним фокусом** (F). Головний фокус лежить на головній оптичній осі.

Площина, яка проходить через головний фокус перпендикулярно до головної оптичній осі, називається **фокальною площиною**.

Точка пересічення фокальної площини з побічною оптичною віссю, називається **побічним фокусом**. Промені, падаючі на лінзу паралельно побічній осі, збираються (дійсно або уявно) в побічному фокусі.

Фокусна відстань лінзи (F) – це відстань між фокальною площиною і центром лінзи.

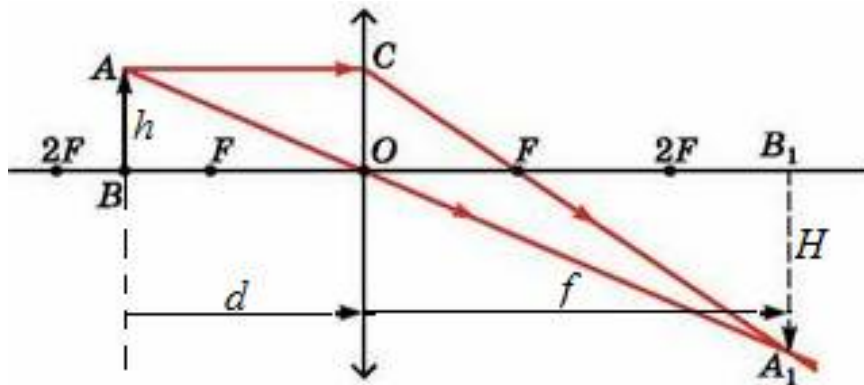


Рис. 12.9– Збиральна лінза

Оптична сила лінзи (D) – це величина, обернена фокусній відстані

$$\boxed{D = \frac{1}{F}}, \quad (12.3)$$

$[D]$ = дптр (діоптрія), 1 дптр = 1 м⁻¹.

$$D_{зб} > 0; \quad D_{роз} < 0. \quad (12.4)$$

Формула, за якою можна розрахувати оптичну силу лінзи

$$D = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (12.5)$$

де n – відносний показник заломлення речовини лінзи;

R_1 і R_2 – радіуси сферичних поверхонь лінзи, м.

Радіуси опуклих поверхонь вважаються позитивними, увігнутих – негативними.

Формула лінзи

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}, \quad (12.6)$$

де d – відстань від предмета до лінзи, м;

f – відстань від зображення H до лінзи, м (рис.12.9).

Правило знаків: якщо фокус, предмет або зображення дійсні, то перед відповідним членом – знак «+», якщо уявні – знак «-».

Лінійне збільшення лінзи (Γ) – це відношення лінійного розміру зображення до розміру предмета

$$\Gamma = \frac{H}{h}, \text{ але } \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F}, \quad (12.7)$$

тому

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F}. \quad (12.8)$$

Збільшення лінзи лупи приблизно дорівнює $\Gamma = f_0 / F$, де $f_0 = 25$ см – відстань найкращого зору.

Збільшення мікроскопа дорівнює $\Gamma = \sigma \cdot f_0 / (F_1 F_2)$, де σ – відстань між фокусами об'єктива F_1 і окуляра F_2 .

Контрольні запитання

1. Які тіла називають джерелами світла? Назвіть джерела світла.
2. Що є світловими променями і як вони поширюються?
3. Що називається світловим потоком?
4. Що називається лінзою?
5. Що називається оптичним центром, головною оптичною віссю і головним фокусом лінзи?
6. Що називається оптичною силою лінзи і в яких одиницях вона виражається?
7. Де і в який час вийде зображення предмета, який знаходиться за подвійною фокусною відстанню розсіюючої лінзи?
8. Де і яке вийде зображення предмета, що знаходиться між фокусом збиральної лінзи і точкою подвійної фокусної відстані?
9. Побудуйте зображення предмета, що знаходиться між збиральною лінзою і її фокусом.

12.2 Хвильова оптика

Світло – це видиме випромінювання, тобто електромагнітні хвилі високої частоти.

12.2.1 Монохроматичне світло. Заломлення світла

Світлові хвилі за їх частотою (довжиною хвилі у вакуумі) і сприйняттю органами зору людини поділяються на видиме випромінювання, інфрачервоні промені, ультрафіолетові промені.

Довжини хвиль у вакуумі:

- ультрафіолетові промені: 0,01 мкм – 0,39 мкм;
- видиме випромінювання: 0,39 мкм – 0,76 мкм;
- інфрачервоні промені: 0,76 мкм – 1 мм.

Світло однієї певної частоти (довжини хвилі) називається монохроматичним світлом.

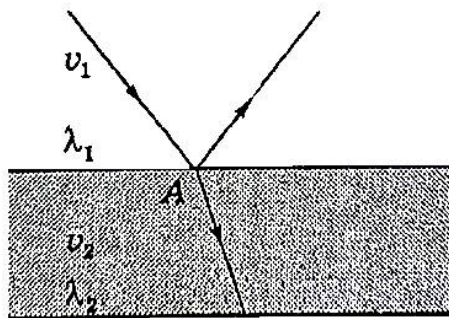


Рис. 12.10

На межі поділу двох прозорих середовищ світло частково відбивається, частково заломлюється, переходячи в друге середовище (рис. 12.10).

Заломлення світла – це зміна напрямку його поширення відповідно до зміни швидкості поширення.

Середовище, яке більшою мірою гальмує поширення світла ($v_{сер} < c$), називається *оптично густішим середовищем*.

Відношення швидкості поширення світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі називається *абсолютним показником заломлення середовища*

$$n_{сер} = \frac{c}{v_{сер}} \quad (12.9)$$

Відносний показник заломлення середовищ

$$\frac{v_1}{v_2} = n \quad (12.10)$$

Із збільшенням кута відбиття світла збільшується відсоток світлової енергії, яка відноситься відбитим світлом, а відсоток світлової енергії, що переходить в друге середовище, зменшується.

12.2.2 Дисперсія світла

Дисперсія світла – це залежність швидкості світла в речовині від частоти прохідного світла (залежність v від ν).

При заломленні світла в скляній призмі видиме випромінювання розкладається на частини, відповідно до зміни частоти світла: червоний, помаранчевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий кольори (рис. 12.11).

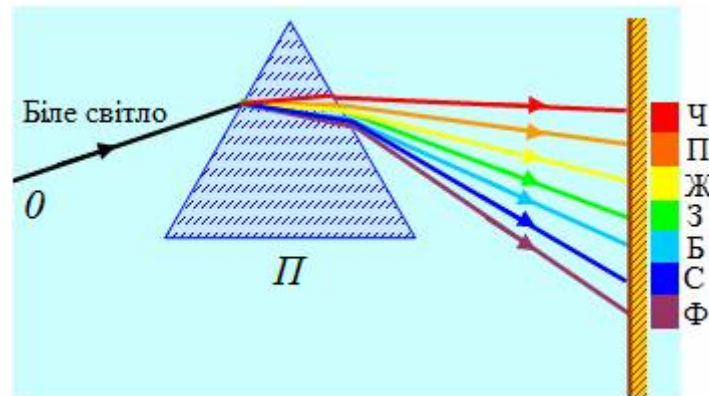


Рис. 12.11 –Дисперсійний спектр

Цей дослід доводить, що біле світло є сукупністю променів різного кольору, а не одиничним променем «білого кольору».

12.2.3 Інтерференція світла

Когерентні хвилі– хвилі з однаковою частотою, поляризацією і постійною різницею фаз.

Дві хвилі когерентні, якщо:

- а) $\nu_2 = \nu_1$;
- б) їх фази або збігаються ($\varphi_2 = \varphi_1$), або не збігаються ($\varphi_2 \neq \varphi_1$), але $\varphi_1 - \varphi_2 = const$.

Когерентні хвилі випромінюють лише лазери. Когерентні світлові хвилі від інших джерел можна одержати штучно, розділяючи хвилю (промінь) на дві частини і забезпечуючи проходження ними до точки зустрічі різних шляхів. Для цього використовують подвійні щілини, подвійні дзеркала, подвійні лінзи, подвійні призми, напівпрозорі дзеркала.

Інтерференція хвиль – це явище, яке виникає в результаті процесу накладання декількох когерентних хвиль і полягає у збільшенні амплітуди коливань в одних ділянках простору і зменшенні – в інших.

Таке чергування інтерференційних максимумів і мінімумів амплітуди коливань утворюється шляхом перерозподілу в просторі енергії хвиль, що накладаються, для випадку світлових хвиль воно має вигляд світлих і темних ділянок.

Інтерференційні максимуми утворюються на ділянках, до яких хвилі, що додаються, прийшли з геометричною різницею ходу $l_2 - l_1 = \Delta$, визначуваною умовою

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad (12.11)$$

де k – ціле число (Δ дорівнює парному числу половинок довжин хвиль або цілому числу довжин хвиль);

l_2 та l_1 – шляхи хвиль, м.

Умова **інтерференційного мінімуму**

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (12.12)$$

де Δ дорівнює непарному числу половинок довжин хвиль.

Якщо світлові промені проходять не в повітрі, а в іншій прозорій речовині (вода, скло), то замість l_2 , l_1 і Δ розглядають оптичні шляхи nl_2 та nl_1 , а також оптичну різницю ходу $n\Delta$, де n – показник заломлення речовини.

12.2.4 Дифракція світла

Дифракція – явище відхилення прямолінійності поширення світла в однорідному середовищі при його проходженні перешкодо або крізь отвори, потрапляння світла в ділянки геометричної тіні.

Дифракційні ґрати – скляна тонка пластинка, на яку нанесені паралельні штрихи (непрозорі смуги), розташовані на однаковій відстані. Ширіна щілини і штриха позначається d і називається **сталюю ґрат** або **періодом ґрат**.

При падінні на ґрати пучка паралельних променів перпендикулярно до площини ґрат (плоскої хвилі), завдяки дифракції, світло від кожної щілини розділиться на декілька пучків, які поширяться в різні напрямки (рис. 12.12)

$$AC = d, \quad (12.13)$$

AB – різниця ходу, $AB = d \sin \varphi$, $AB = n\lambda$,

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k} \quad (12.14)$$

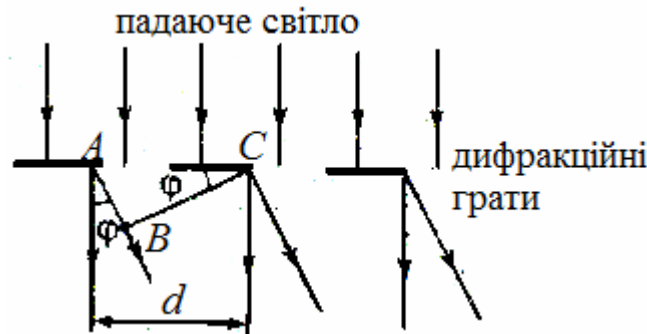


Рис. 12.12–Дифракційні ґрати

Умови головних максимумів освітленості при дифракції на дифракційних ґратах при нормальному падінні на них світла

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (12.15)$$

де d – стала ґрати;

φ – кут відхилення променів, відповідний головному максимуму;

k – порядок головного максимуму;

λ – довжина світлової хвилі, м.

12.2.5 Поляризація світла

Електромагнітна світлова хвиля називається природною (неполяризованою), оскільки вздовж променя коливання \vec{E} і \vec{B} відбуваються у всіх площинах, перпендикулярних до напрямку променя (рис. 12.13, а).

Строга фіксація коливань \vec{E} і \vec{B} в певних площинах, перпендикулярних променю, називається **поляризацією світла**, а хвилі називаються **плоскополяризованими** або **лінійно-поляризованими**. Пристрій, що перетворює природне світло на поляризоване, називається **поляризатором** (рис. 12.13, б). Поляризатором може служити кристал турмаліну, що пропускає світло з коливаннями \vec{E} і \vec{B} лише в певних площинах, перпендикулярних до осі кристала.



Рис. 12.13

При відбитті і заломленні світла відбувається його часткова поляризація: коливання \vec{E} і \vec{B} в одній площині переважають над коливаннями в інших площинах.

Тангенс кута падіння світлової хвилі, при якому відбувається максимальна часткова поляризація заломленого променя, дорівнює абсолютному показнику заломлення середовища, що відображає закон Брюстера

$$\boxed{\operatorname{tg} \theta_{Br} = n} \quad (12.16)$$

де n – показник заломлення другого середовища відносно першого;
 θ_{Br} – кут падіння (кут Брюстера).

Контрольні запитання

1. У чому полягає принцип суперпозиції хвильових рухів?
2. Що таке інтерференція хвиль?
3. Які джерела коливань називають когерентними?
4. Назвіть умови посилення і послаблення коливань.
5. Чому не можуть інтерферувати промені, що йдуть від двох некогерентних джерел світла?
6. Де застосовується явище інтерференції?
7. Що називається дисперсією світла?
8. Вкажіть характер залежності показника заломлення світла від довжини хвилі для нормальної дисперсії.
9. Як можна пояснити дисперсію світла?
10. Який закон описує поглинання світла?
11. Чим відрізняється поглинання світла в газах, рідинах і твердих тілах?
12. Що називається розсіянням світла?
13. Як залежить інтенсивність розсіяного світла від довжини хвилі?

13 СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ (ЧАСТИННА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ)

Спеціальна теорія відносності Ейнштейна (СТВ) – система сучасних поглядів на простір і час.

Простір – форма існування матерії, що характеризує взаєморозташування матеріальних об'єктів; має три виміри, однорідний (всі точки рівноправні) і ізотропний (всі напрями рівноправні).

Час – форма існування матерії, що характеризує послідовність ходу подій; має один вимір, незворотний, однорідний (всі миті рівноправні), ізотропний (рівноправний відлік вперед і назад).

13.1 Постулати СТВ. Перетворення Лоренца. Висновки СТВ

1. Всі закони фізики у всіх інерціальних системах відліку (ІСВ) однакові (**принцип відносності Ейнштейна**).
2. Швидкість світла у вакуумі ($c=3 \cdot 10^8$ м/с) не залежить від швидкості руху джерела, тобто є однаковою у всіх інерціальних системах відліку (c – інваріант).

Відносність довжини (відстаней). Довжина тіла в системі відліку, де воно покоїться (K'), називається «власною» довжиною l_0 .

Лоренцеве скорочення довжини (рис. 13.1) – зменшення довжини тіла у напрямку руху $v \approx c$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow l < l_0 \quad (13.1)$$

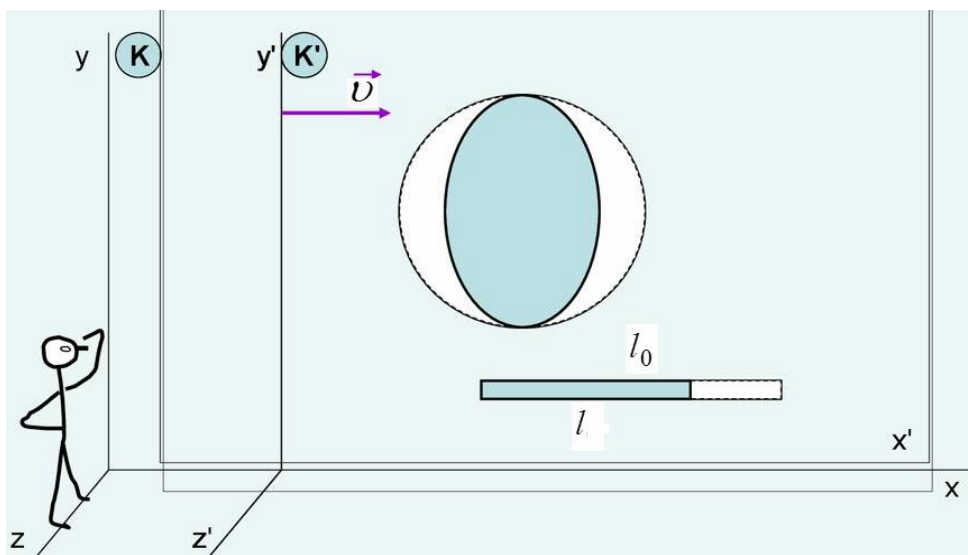


Рис. 13.1 – Лоренцеве скорочення довжини

Тобто «власна» довжина l_0 максимальна.

При $v \ll c$ маємо $l = l_0$ – класична механіка.

Кінематичний ефект

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (13.2)$$

Відносність проміжку часу(рис. 13.2). Час, виміряний в системі відліку, де точки системи нерухомі (K'), називається «власним» часом τ_0 . Час в рухливій системі відліку (K)

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow \tau > \tau_0 \quad (13.3)$$

Тобто «власний» час τ_0 мінімальний. Хід рухомого годинника сповільнюється.

При $v \ll c$ маємо $\tau = \tau_0$ – класична механіка.

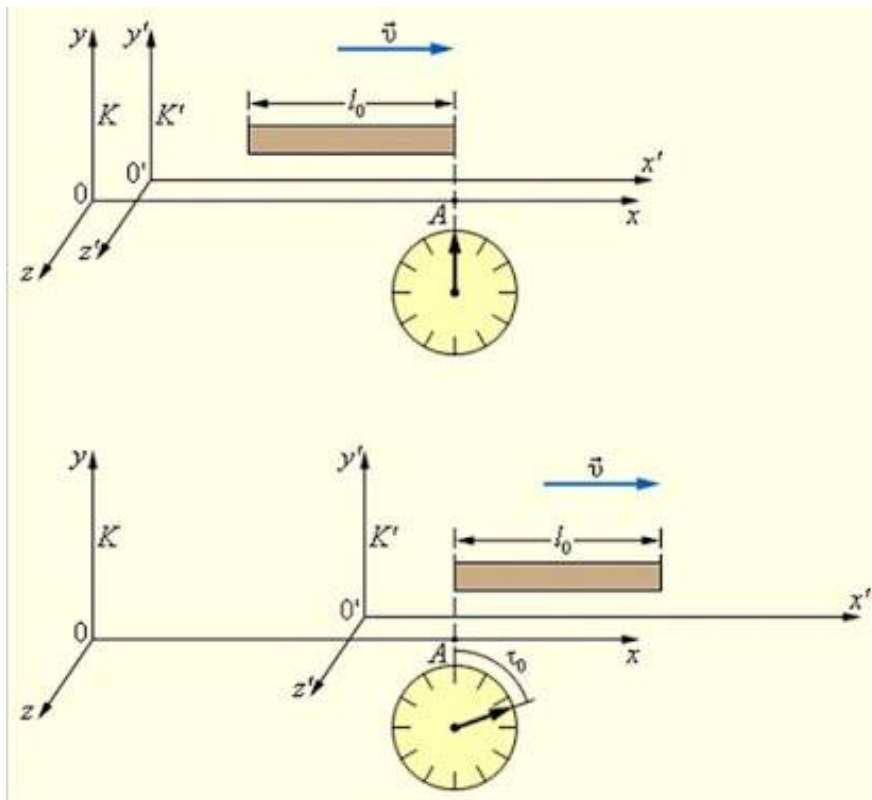


Рис. 13.2 – Відносність проміжку часу

13.2 Релятивістський закон додавання швидкостей

Релятивістський закон додавання швидкостей напрямлених уздовж однієї прямої.

У класичній механіці все просто: вагон рухається зі швидкістю v_1 , у ньому йде людина із швидкістю v_2 в напрямі руху поїзда, тоді швидкість відносно землі при $v_1 \ll c$, $v_2 \ll c$

$$v = v_1 + v_2,$$

але якщо v_1, v_2 близькі до c , то їх сума буде більшою за c , що неможливо.

Швидкість світла у вакуумі (c) – гранична швидкість в нашій Галактиці.

У цьому випадку використовується формула

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}, \quad (13.4)$$

13.3 Імпульс тіла і маса в СТВ

Залежність маси від швидкості v

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (13.5)$$

де m – релятивістська маса тіла, що рухається зі швидкістю v , кг;
 m_0 – маса нерухомого тіла, кг.

При $v \rightarrow c$ $m \rightarrow \infty$.

Імпульс тіла, як і в класичній механіці, пропорційний швидкості

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (13.6)$$

Жодна частка (тіло) з масою спокою m_0 , відмінною від нуля, не може рухатися зі швидкістю, рівною швидкості світла у вакуумі (лише з меншою ніж c).

Другий закон Ньютона в імпульсній формі такий же, як і в класичній механіці:

$$\boxed{\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}},$$

$$\boxed{\vec{F}\Delta t = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.}$$
(13.7)

13.4 Закон взаємозв'язку маси і енергії

Закон взаємозв'язку маси й енергії

$$\boxed{E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.}$$
(13.8)

Енергія спокою тіла (власна енергія тіла) – це його внутрішня енергія

$$E_0 = m_0c^2.$$
(13.9)

де m_0 – маса нерухомого тіла, кг.

Зміні енергії тіла відповідає зміна маси тіла, і навпаки

$$\boxed{\Delta E = \Delta mc^2},$$
(13.10)

де Δm – зміна маси тіла, кг.

При збільшенні енергії будь-якої нерухомої системи на ΔE її маса зростає на

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$
(13.11)

У релятивістській фізиці енергія тіла складається з енергії спокою тіла і його кінетичної енергії

$$\boxed{mc^2 = m_0c^2 + E_k} \quad (13.12)$$

де $E_k = \frac{mv^2}{2}$ – кінетична енергія тіла, Дж.

При зміні температури тіла змінюється його внутрішня енергія, відповідно змінюється і його маса.

Масі спокою в 1 а.е.м. відповідає енергія 931 МэВ:

1 а.е.м. – 931 МэВ,

1 а.е.м. = $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг,

1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Контрольні запитання

1. Які принципи лежать в основі теорії відносності?
2. Коли виникають релятивістські ефекти?
3. У чому виявляється релятивістський ефект скорочення розмірів тіл?
4. У чому полягає релятивістський ефект уповільнення ходу часу?
5. Як виражається релятивістський закон складання швидкостей?
6. Як залежить маса тіла від його швидкості?
7. Що називається релятивістською масою?
8. Що називається релятивістським імпульсом?
9. Написати залежність, що пов'язує енергію тіла з його масою.
10. Основне виведення спеціальної теорії відносності.

14 КВАНТОВА ОПТИКА

14.1 Теорія Планка. Імпульс фотона

Світло випромінюється (гіпотеза Планка), поширюється і поглинається окремими порціями енергії, які називаються **квантами**.

Енергія кванта прямо пропорційна частоті світла

$$\boxed{\varepsilon = h\nu}, \quad (14.1)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;

ν – частота світла.

Квант світла – це частка світла, яку називають **фотоном**.

Фотон не має маси спокою ($m_0 = 0$), а існує, лише рухаючись із швидкістю світла у вакуумі.

Фотон володіє певним імпульсом (\vec{p}_ϕ)

$$\boxed{p_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda_0}}. \quad (14.2)$$

Квантові властивості світла зумовлені тим, що енергія, імпульс і маса електромагнітного випромінювання зосереджені в частках світла – фотонах.

14.2 Фотоефект і його закони

Зовнішній фотоефект (фотоелектронна емісія) – вибивання електронів з твердих тіл і рідин за їх межі під дією падаючого на них потоку фотонів.

Тіло втрачає частину електронів і набуває позитивного заряду.

Внутрішній фотоефект – вибивання з атомів, молекул або іонів електронів, що залишаються всередині речовини.

Закони зовнішнього фотоефекту. Співвідношення Ейнштейна

1. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів залежить лише від частоти світла і властивостей поверхні металу.
2. Число електронів n , які вибиваються світлом за одиницю часу, прямо пропорційно освітленості металу ($n \approx E$).
3. Для кожної речовини існує поріг фотоефекту («червона» межа фотоефекту), тобто довжина хвилі світла (λ_{\max}), більше якої (або частота світла (ν_{\min}), менше якої) фотоефект не відбувається.

Фотоефект відбувається, якщо тіло освітлюється світлом з

$$\nu \geq \nu_{\min} \quad (\lambda \leq \lambda_{\max}).$$

Кожен фотон взаємодіє лише з одним електроном.

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту (рис 14.1) – енергія фотона витрачається на здійснення роботи виходу електрона з металу ($A_{\text{вих}}$) і на збільшення кінетичної енергії електрона, що вилітає

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}. \quad (14.3)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;
 $A_{\text{вих}}$ – робота виходу електрона з речовини, Дж;
 m – маса електрона, кг;
 ν_{\max} – максимальна швидкість фотоелектрона, м/с.

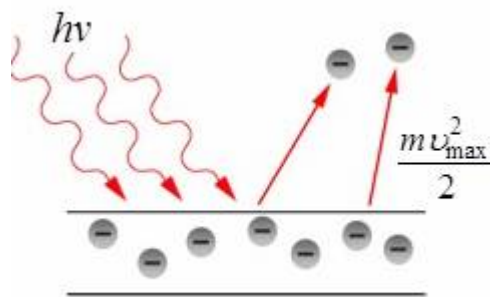


Рис. 14.1 – Зовнішній фотоефект

Якщо $h\nu < A_{\text{вих}}$, тоді фотоефект не відбувається.

«Червона» межа фотоефекту (найбільша довгохвильова $\lambda_{\max} = \lambda_{\text{черв.меж.}}$) визначається так:

$$\nu = 0 \Rightarrow E_k = 0 \Rightarrow h\nu_{\min} = A_{\text{вих}}, \quad (14.4)$$

$$\nu_{\min} = \frac{A_{\text{вих}}}{h}, \quad (14.5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}. \quad (14.6)$$

Поріг фотоефекту цезію лежить в області інфрачервоних променів (мала $A_{\text{вих}}$).

Поріг фотоелементу вольфраму, золота лежить в області ультрафіолетових променів (велика $A_{\text{вих}}$).

14.3 Фотоелементи і їх вживання

Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом – вакуумні безінерційні прилади для здобуття фотострумів (рис. 14.2).

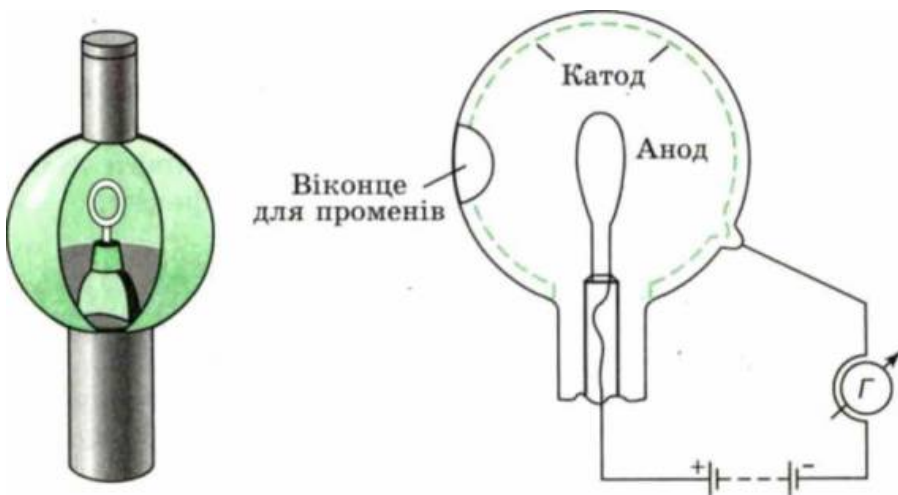


Рис. 14.2 – Фотоелемент із зовнішнім фотоелементом

Потік фотоелектронів, що вириваються світлом з катода, під дією електричного поля утворює фотострум, що замикає електричний ланцюг

Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом – фотоелементи із замикаючим шаром («Струм в напівпровідниках») (рис. 14.3).

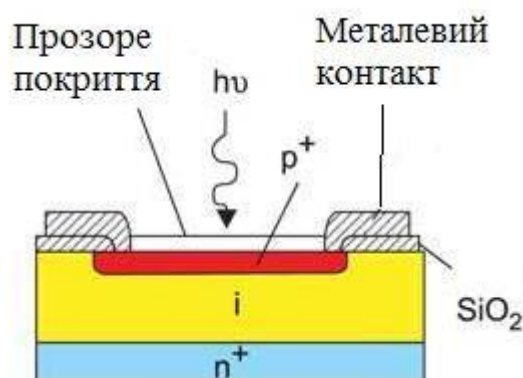


Рис. 14.3 – Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом

Кремнієві фотоелементи перетворюють енергію світла на електричну (батареї калькуляторів, сонячні батареї).

Фотоопір – напівпровідники, в яких під дією світла відбувається внутрішній фотоелемент і різко змінюється їх опір.

Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом застосовуються у фотореле, в звукозапису кіно і так далі (рис. 14.4).

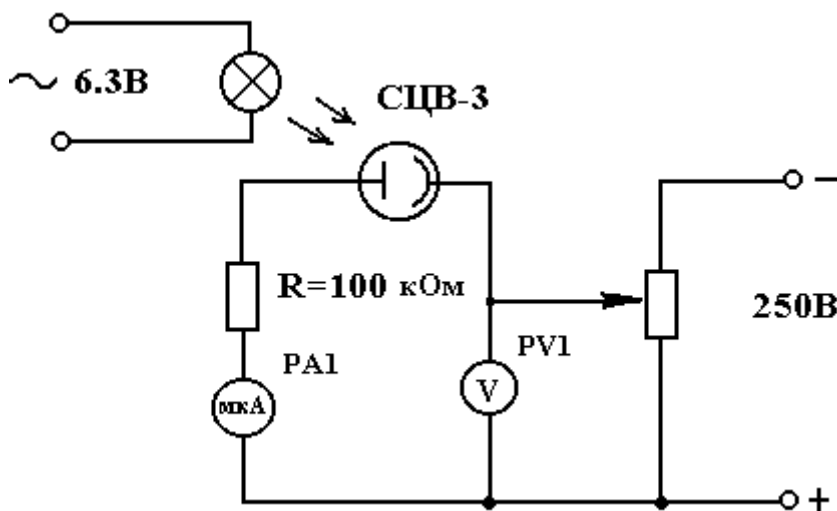


Рис. 14.4 – Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом (схема фотореле)

14.4 Світловий тиск

Світловий тиск – це тиск, який виробляє електромагнітна хвиля, падаюча на поверхню тіла (теоретично обґрунтував Д.К. Максвел, вперше встановив і досліджував на досліді П.Н. Лебедєв).

У явищі світлового тиску наочно виявляється корпускулярно-хвильовий дуалізм (подвійність) світла.

Світло має хвильові властивості (інтерференція, дифракція, поляризація світла), а з іншого боку – світло є потоком фотонів – квантів, що є частинками.

Світловий тиск якісно і кількісно пояснюється як квантовими, так і хвильовими властивостями світла.

При малих частотах переважають хвильові властивості, при великих частотах – квантові властивості світла.

Енергія фотона прямо пропорційна частоті світла.

Формула Максвелла

$$p_{\text{св}} = (1 + r)\omega = (1 + r)\frac{u}{c}, \quad (14.8)$$

- де r – коефіцієнт відбиття;
 ω – густина енергії електромагнітної хвилі;
 u – густина потоку світлової енергії;
 c – швидкість світла, м/с.

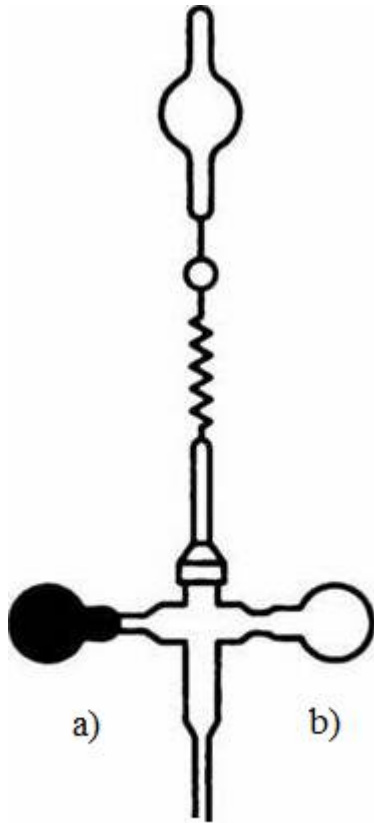


Рис. 14.5

а) при поглинанні

б) при відбитті

Оскільки швидкість поширення світла c вельми велика, то при практично досяжних потоках світлової енергії світловий тиск малий. Так, прямі сонячні промені в яскравий день чинять при повному поглинанні тиск в 0,4 міліграм на квадратний метр.

Завдяки настільки незначній величині світлового тиску, відмітити його важко. Вперше експериментальний світловий тиск виявлено і виміряно професором Московського університету П.Н. Лебедевим. Основною частиною приладу Лебедева був дуже легкий підвіс на тонкій нитці, до якого прикріплені легкі пластинки a і b (рис. 14.5) – одна поглинаюча (наприклад, a), а інша відбиваюча (бліскуча).

Імпульс фотона передається (поглинається) атомам або молекулам тіла з чорною поверхнею. При віддзеркаленні від блискучої поверхні імпульс фотона $\frac{h\nu}{c}$ змінюється на протилежний,

а частинкам речовини передається імпульс $2\frac{h\nu}{c}$:

$$\Delta p = \frac{h\nu}{c}; \quad (14.9)$$

$$\Delta p = -2\frac{h\nu}{c} \quad (14.10)$$

Завдяки світловому тиску, що надається на крильце, підвіс обертався і закручував нитку, на якій він був підвішений.

Порівнюючи закручування, викликані при освітленні зачорненого і блискучого крилець, П.Н. Лебедев міг встановити, що відповідно до теорії, тиск на зачорнену поверхню удвічі менший від тиску на віддзеркалювальну поверхню.

Хімічна дія світла. Під дією світла можуть відбуватися процеси дисоціації молекул, приєднання атомів до молекул.

Фотографія – утворення тонкого шару срібла внаслідок падіння світла на кристали аргентум броміду.

Фотосинтез – під дією світла з вуглекислого газу й води у хлорофілі утворюється кисень та органічні речовини.

Контрольні запитання

1. Які факти свідчать про наявність у світла корпускулярних властивостей?
2. Від чого залежить енергія фотона?
3. Як визначити масу, імпульс фотона?
4. Яка розмірність постійної Планка?
5. Коли було відкрито явище зовнішнього фотоефекту?
6. Що називається внутрішнім фотоефектом?
7. У чому сутність законів зовнішнього фотоефекту?
8. Що таке квант світла і як пов'язана його енергія з частотою?
9. Що виражає рівняння Ейнштейна для фотоефекту?
10. Як можна пояснити закони фотоефекту на основі квантової теорії світла?
11. Як можна пояснити червону межу фотоефекту?
12. Якими властивостями одночасно володіє світло?
13. За якої умови виявляється квантова природа світла?
14. Ким було теоретично обґрунтовано існування світлового тиску?
15. Ким було експериментально доведено існування світлового тиску?
16. Чому дорівнює світловий тиск?
17. Чим підтверджується реальність існування фотонів?
Якими властивостями володіє світло?
18. У чому полягає подвійна природа світла?

15 АТОМ І АТОМНЕ ЯДРО

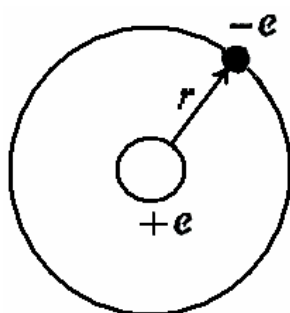
15.1 Фізика атома

15.1.1 Планетарна модель атома Резерфорда

Резерфорд, спостерігаючи розсіювання α -частинок (ядер гелію) при проходженні їх крізь золоту фольгу, обґрунтував модель атома.

Атом складається з позитивно зарядженого атомного ядра, в якому зосереджена майже вся маса атома. Довкола нього на певних орбітах рухаються електрони.

В цілому атом нейтральний. Тому число внутрішньоатомних електронів, як і заряд ядра, дорівнює порядковому номеру елемента в періодичній системі. Відомо, що покоїтися електрони всередині атома не можуть, оскільки вони «впали би» на ядро. Вони рухаються довкола ядра, подібно до того як планети обертаються навколо Сонця. Такий характер руху електронів визначається дією кулонівських сил з боку ядра.



У атомі водню навколо ядра обертається всього лише один електрон. Ядро атома водню має позитивний заряд, рівний за модулем заряду електрона, і масу, приблизно в 1836,1 рази більшу від маси електрона. Це ядро було названо **протоном** (p) і стало розглядатися як елементарна частинка.

Розмір атома – це радіус орбіти його електрона (рис. 15.1).

Рис. 15.1

Лінійні розміри ядра $10^{-15} - 10^{-14}$ м. Лінійних розмірів атома $\approx 10^{-10}$ м.

Проста і наочна планетарна модель атома має пряме експериментальне обґрунтування. Вона здається абсолютно необхідною для пояснення дослідів з розсіювання α -частинок. Але на основі цієї моделі не можна пояснити факт існування атома, його стійкість. Адже рух електронів по орбітах відбувається з прискоренням, причому вельми чималим. Прискорений рухомий заряд за законами електродинаміки Максвелла повинен випромінювати електромагнітні хвилі з частотою, рівною частоті його обертання. Випромінювання супроводжується втратою енергії. Втрачаючи енергію, електрони повинні наближатися до ядра, подібно до того як супутник наближається до Землі при гальмуванні у верхніх шарах атмосфери. Як показують строгі розрахунки, основані на законах механіки Ньютона і електродинаміки Максвелла, електрон за

незначний час (порядка 10^{-8} с) повинен «впасти» на ядро. Атом повинен припинити своє існування.

Насправді нічого подібного не відбувається. Атоми стійкі і в незбудженому стані можуть існувати необмежено довго, абсолютно не випромінюючи електромагнітні хвилі.

Висновок, що не узгоджується з дослідом, про неминучу загибель атома внаслідок втрати енергії на випромінювання – це результат вживання законів класичної фізики до явищ, що відбуваються всередині атома. Звідси витікає, що до явищ атомних масштабів закони класичної фізики неприйнятні.

15.1.2 Постулати Бора. Теорія атома водню

Криза в теорії атома була здолана в 1913 р. датським фізиком Н. Бором.

В основі квантової теорії будови атома, розвиненої Бором (боровська теорія будови атома), лежить ідея, об'єднання в єдине ціле:

- а) закономірностей лінійчатого спектра атома водню, виражених у формулі Бальмера – Рідбергу;
- б) ядерній моделі атома Резерфорда, що не допускає класичного пояснення;
- в) квантового характеру випромінювання і поглинання світла.

Бор, зберігаючи класичний підхід до опису поведінки електрона в атомі, висунув два постулати, які називаються *постулатами Бора*.

Розробляючи теорію атома водню, Бор використовував планетарну модель Резерфорда. Згідно цієї моделі на електрон, що обертається навколо ядра із зарядом $+e$ по колу радіусу r зі швидкістю v , діє кулонівська сила $F_k = ke^2 / r^2$. Ця сила задає електрону доцентрове прискорення $a_n = v^2 / r$. За другим законом Ньютона

$$\boxed{m_e \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}} \quad (15.1)$$

Перший постулат Бора: у стійкому атомі електрон може рухатися лише по особливих, стаціонарних орбітах, не випромінюючи при цьому електромагнітної енергії.

Гіпотеза де Бройля. На довжині кола кожної стаціонарної орбіти укладається ціле число n довжин хвиль де Бройля $\lambda_B = \frac{h}{m_e v}$, відповідних руху електрона

$$\boxed{\frac{2\pi r}{\lambda_B} = n}, \quad (15.2)$$

де n – головне квантове число; $n = 1, 2, 3, \dots$.

Умова (15.2) враховує хвильові властивості електрона, хоча вона була запропонована Бором до появи гіпотези де Бройля у вигляді правила **квантування орбіт**: на стаціонарній орбіті момент імпульсу електрона квантується (кратний сталій Планка \hbar)

$$\boxed{m_e v r = n \hbar}, \quad (15.3)$$

де $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{34}$ Дж · с – стала Планка (h перекреслене);

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрона;

n – головне квантове число; $n = 1, 2, 3, \dots$.

У класичній механіці величина $L = m v r$ називається **моментом імпульсу** (векторна фізична величина).

Рівняння (15.2) Бор визначав як умову квантування орбітального моменту імпульсу. Орбітальний момент імпульсу електрона кратний \hbar . Окрім руху навколо ядра по орбіті електрон обертається довкола власної осі. При цьому його власний момент імпульсу дорівнює $\hbar/2$. Будучи зарядженою частинкою, що обертається довкола своєї осі, електрон створює власне магнітне поле (подібно до струму, що протікає по кільцевому провідникові).

Можливі значення радіусів стаціонарних орбіт визначаються рівнянням

$$\boxed{r_n = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} n^2}, \quad (15.4)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$.

Радіуси стаціонарних орбіт квантовані, тобто мають дискретні значення, пропорційні квадрату головного квантового числа.

Атом має мінімальний розмір, коли $n = 1$. Радіус першої орбіти електрона, найближчої до ядра, дорівнює

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (15.5)$$

Швидкість руху електрона по n -й орбіті можна визначити, підставивши рівняння (15.4) у формулу (15.3)

$$v_n = k \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (15.6)$$

Швидкість електрона максимальна на першій борівській орбіті

$$v_1 = k \frac{e^2}{\hbar} \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Енергетичний спектр атома водню. Енергія електрона в атомі складається з його кінетичної енергії і потенціальної кулонівської енергії взаємодії з ядром

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{ke^2}{r} \quad (15.7)$$

Нуль потенціальної енергії електрона вибраний на нескінченній відстані від ядра. Знак мінус відповідає енергії тяжіння від'ємного і позитивного зарядів. Підставляючи в останній вираз значення радіуса стаціонарних орбіт (15.4) і швидкості руху по них електрона (15.6), отримаємо можливу величину енергії електрона в атомі

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (15.8)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$

Енергія електрона в атомі набуває не будь-які, а дискретні значення, тобто квантується.

Борівська орбіта – це геометричне місце точок, в яких з найбільшою ймовірністю можна виявити електрон (де щільність електронної хмари найбільша), оскільки електрон в атомі проявляє як корпускулярні властивості, так і хвилеві.

Основний стан атома (молекули) – стан з мінімальною енергією.

Атом водню має певний спектр енергій. Стан атома з $n = 1$ називають **основним станом**.

Енергія основного стану електрона в атомі водню

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ.} \quad (15.9)$$

В основному стані електрон знаходиться щонайближче до ядра і його енергія зв'язку з ядром максимальна за модулем.

Збуджені стани атома – стани з $n > 1$. Чим більше головне квантове число n , тим далі від ядра знаходиться електрон, тим вище його енергетичний рівень.

При $n \rightarrow \infty$ електрон віддаляється від ядра на нескінченно велику відстань, а її енергія зв'язку з ядром прагне до нуля. Це означає, що при $E = 0$ електрон вже не пов'язаний з ядром, стаючи вільною часткою.

Вільні стани електрона– енергетичні стани з додатною енергією електрона.

У вільному стані швидкість електрона і його кінетична енергія може бути будь-якою. Енергетичний спектр вільних станів безперервний.

Рухаючись по орбіті довкола ядра, електрон пов'язаний з атомом або знаходиться в зв'язаному стані.

Зв'язані стани електрона– енергетичні стани з від'ємною енергією електрона.

Згідно формулі (15.8), енергетичний спектр зв'язаних станів дискретний.

Другий постулат Бора (правило частинок).

Під час переходу атома з одного стаціонарного стану в інший випускається або поглинається один фотон. Атом випромінює (поглинає) один квант електромагнітної енергії, коли електрон переходить з орбіти з великим (меншим) на орбіту з меншим (великим) головним квантовим числом.

Енергія фотона дорівнює різниці енергій атома в двох його стаціонарних станах

$$\boxed{h\nu_{kn} = E_k - E_n}. \quad (15.10)$$

Якщо $E_k < E_n$, то відбувається випромінювання фотона; якщо $E_k > E_n$ – поглинання фотона.

Враховуючи значення енергії атома в початковому і кінцевому станах, отримаємо

$$\nu_{kn} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (15.11)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots; k > n$.

Всі можливі частоти, дають спектр випромінювання атома водню, що добре узгоджується з експериментальними даними.

Спектр складають ряд серій випромінювання, кожна з яких утворюється при переходах атома в один з фіксованих нижніх енергетичних станів n зі всіх можливих верхніх енергетичних станів $k (k > n)$.

Основні випромінювальні процеси атомів: поглинання світла, спонтанне і вимушене випромінювання.

15.1.3 Поглинання і випромінювання світла атомом

Розглянемо тепер можливі процеси взаємодії атома з фотоном. За умови енергія фотона

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (15.12)$$

де E_2, E_1 – енергії основного і збудженого станів атома, Дж.

1. **Поглинання світла.** Електрон атома, що знаходиться в основному стані з енергією E_1 , може поглинути фотон, перейшовши в збуджений стан з енергією $E_2 > E_1$. Інтенсивність поглиненого випромінювання пропорційна концентрації n_1 атомів, що знаходяться в основному стані.

Для вибивання електрона з атома потрібна додаткова енергія, аби здолати кулонівське тяжіння електрона до ядра.

Енергія іонізації – мінімальна енергія, яку потрібно витратити для переведу електрона з основного стану атома у вільний стан

$$I_1 = |E_1|. \quad (15.13)$$

Іонізація атома може відбуватися, наприклад, під дією падаючого на нього фотона з енергією $h\nu_1 \geq I_1$. При цьому електрон поглинає фотон, покидаючи атом. Якщо енергія фотона недостатня для іонізації атома $h\nu < I_1$, електрон, що знаходиться на першій борівській орбіті (в основному стані з енергією E_1), під дією фотона може перескочити на іншу орбіту (що відповідає збудженому стану з енергією E_k). Згідно закону збереження енергії, цей перехід електрона із основного стану в збуджений можливий, якщо частота ν_m фотона, що поглинається, задовільняє співвідношення

$$\boxed{h\nu_{k1} = E_k - E_1}. \quad (15.14)$$

За наявності фотонів відповідних частот можливе поглинання світла, що приводить до переходів між збудженими станами, а також іонізації атома, що знаходиться у збудженому стані.

2. **Спонтанне випромінювання** – випромінювання при мимовільному переході атома з одного стану в інший. За відсутності зовнішніх полів або зіткнень з іншими частинками електронів, що знаходяться у збудженому

стані, через час порядку $10^{-8} - 10^{-7}$ спонтанно повертається в основний стан.

3. *Індуковане (вимушене) випромінювання* – випромінювання атома, що виникає при його переході на нижчий енергетичний рівень під дією зовнішнього електромагнітного випромінювання.

У 1917 р. Ейнштейн передбачив, що збуджений атом може випромінювати під дією падаючого на нього світла.

Інтенсивність індукованого випромінювання пропорційна концентрації n_2 атомів, що знаходяться у збудженому стані. При цьому в світловій хвилі, яка виникла при індукованому випромінюванні, частота, фаза, поляризація і напрям поширення виявляються такими ж, як і в хвилі, падаючої на атом. Тим самим збільшується інтенсивність зовнішнього випромінювання – *виникає оптичне посилення*.

Види випромінювань. Для того, щоб випромінювати фотон, атом повинен володіти надлишковою енергією в порівнянні з енергією основного стану, тобто атомний електрон повинен знаходитися у збудженому стані. Оскільки будь-яка система прагне зайняти стан з мінімальною енергією, то в термодинамічній рівновазі більшість атомів знаходиться в основному стані. Перехід атома в збуджений стан можливий при повідомленні йому енергії ззовні.

1. *Теплове випромінювання* виникає при теплових зіткненнях атомів (лампи розжарювання).

2. *Люмінесцентне випромінювання* (від латів. *luminis* – світло) виникає при проходженні електричного заряду в газі (північне сяйво). Люмінесцентні явища розрізняються механізмом збудження атомів.

3. *Катодолюмінесценція* – світіння твердих тіл внаслідок бомбардуванні атомів електронами (екран телевізора).

4. *Фотолюмінесценція* – при опроміненні речовини видимим світлом, рентгенівським або гамма-випромінюванням.

5. *Хемілюмінесценція* – світіння холодних тіл внаслідок хімічних реакцій (світлячки).

6. *Флуоресценція* – короткочасна люмінесценція (що закінчується через 10^{-8} с після збудження атомів).

7. *Фосфоресценція* – тривала люмінесценція.

На явищі люмінесценції заснована робота люмінесцентних ламп, у декілька разів економічніших, ніж ламп розжарювання. Внутрішня поверхня люмінесцентних ламп покрита люмінофором – речовиною, в якій відбувається люмінесценція (у лампах – фотолюмінесценція, в електронних трубках – катодолюмінесценція). Досліди з

дослідження фотолюмінесценції вперше в Росії були проведені в 50-х р.р. XX ст. С.І. Вавіловим.

Спектральний аналіз – метод визначення хімічного складу і інших характеристик речовини за його спектром випромінювання або поглинання.

Атоми кожного хімічного елемента випромінюють певні довжини хвиль і мають лінійчатий спектр, характерний саме для цього елемента.

Лінійчатий спектр – спектр випромінювання, що складається з окремих вузьких спектральних ліній різної інтенсивності.

Дослідження лінійчатого спектра дозволяє визначити, з яких саме хімічних елементів складається випромінююча речовина і в якій кількості в ньому міститься кожен елемент.

Висока чутливість цього методу дозволяє виявляти в речовині домішки масою до 10^{-10} г, а також склад небесних тіл, віддалених від Землі на мільярди світлових років. Подібно до дактилоскопічних відбитків, лінійчаті спектри неповторно індивідуальні.

15.1.4 Лазер

Принцип дії лазера. У 1939 р. російський фізик В.А. Фабрикант спостерігав експериментально посилення електромагнітних хвиль (оптичне посилення) в результаті процесу індукованого випромінювання.

Російські вчені Н.Г. Басів і А.М. Прохоров і американський фізик Ч. Таунс, які створили в 1954 р. квантовий генератор випромінювання, що працює в сантиметровому діапазоні, були удостоєні в 1964 р. Нобелівської премії з фізики. Перший лазер, що працює на кристалі рубіна у видимому діапазоні, був створений в 1960 р. американським фізиком Т. Мейманом. Слово «лазер» утворене початковими буквами англійський слів light amplification by stimulated emission of radiation («посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання»).

Лазер – джерело випромінювання, що підсилюється в результаті індукованого випромінювання.

Посилення випромінювання, падаючого на середовище, виникає тоді, коли інтенсивність індукованого випромінювання перевищує інтенсивність поглиненого випромінювання. Це станеться в разі, якщо у збудженому стані знаходиться більше частинок, ніж в основному

$$n_2 > n_1.$$

В стані термодинамічної рівноваги, електрон з більшою ймовірністю буде знаходитися з меншою енергією E_1 , тобто $n_1 > n_2$, посилення не буде відбуватися.

Інверсна населеність енергетичних рівнів– нерівноважний стан середовища, при якому концентрація атомів у збудженому стані, більша ніж концентрація атомів в основному стані.

Спонтанний перехід є чинником, що перешкоджає накопиченню атомів у збудженому стані. Цим можна нехтувати, якщо збуджений стан метастабільний.

Метастабільний стан– збуджений стан електрона в атомі, в якому він може знаходитися достатньо довго (наприклад, 10^{-3} с) в порівнянні із звичайним збудженим станом (10^{-8} с).

В даний час існує багато різних типів і конструкцій лазерів. Схема будови та принцип дії рубінового лазера рис. 15.2.

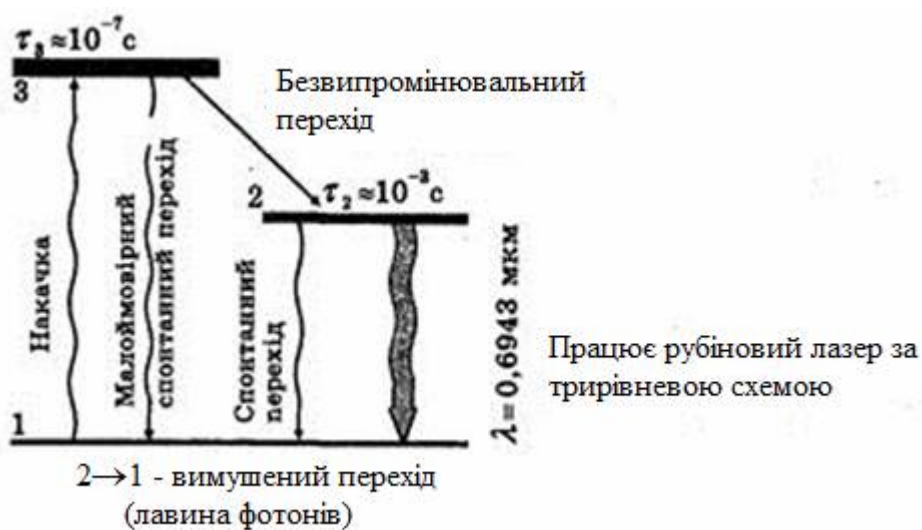


Рис. 15.2 – Принцип дії рубінового лазера

Основні особливості лазерного випромінювання наступні:

- лазерне випромінювання володіє винятковою монохроматичністю і когерентністю;
- пучок світла лазера має дуже малий кут розбіжності (близько 10^{-5} рад);
- лазер – найбільш потужне штучне джерело світла. Напруженість електричного поля в електромагнітній хвилі, що випромінюється лазером, перевищує напруженість поля усередині атома.

Вживання лазерів. Лазери знайшли вживання в різних областях науки, техніки й медицини. Дуже перспективне вживання лазерного випромінювання для космічного зв'язку, в світлолокаторах, що вимірюють великі відстані з точністю до міліметрів, для передачі телевізійних і комп'ютерних сигналів по оптичному волокну. Лазери використовуються при прочитуванні інформації з компакт-дисків, з штрих-код товарів. За допомогою променя лазерів малої інтенсивності можна проводити

хірургічні операції, наприклад «приварювати» сітківку, яка відшарувалася від очного дна, робити судинні операції. Випромінювання потужних лазерів зварює і розрізає металеві листи. Перспективне використання потужного лазерного випромінювання для здійснення керованої термоядерної реакції.

Лазери застосовуються також для топографічної зйомки, тому що промінь лазера задає ідеальну пряму лінію. Напрямок тунелю під протокою Ла-манш задавався лазерним променем. За допомогою лазерного випромінювання виходять голографічні тривимірні об'ємні зображення.

Створення лазерів – результат використання фундаментальних фізичних законів в прикладних дослідженнях. Воно привело до гігантського прогресу в різних областях техніки і технології.

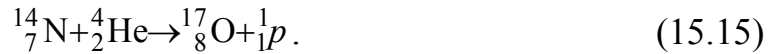
Контрольні запитання

1. У чому полягає планетарна модель атома?
2. У чому логічна непослідовність планетарної моделі атомів?
3. Сформулюйте перший постулат Бора.
4. Сформулюйте правило квантування.
5. Як квантуються ресурси стаціонарних орбіт в атомі водню?
6. Як квантується енергія електрона в атомі водню? Чому дорівнює енергія електрона в основному стані атома?
7. Які енергетичні стани електрона в атомі називають зв'язаними; вільними? Коротко охарактеризуйте їх.
8. Які переходи електрона в атомі можливі при поглинанні світла?
9. Яку енергію називають енергією іонізації?
10. Сформулюйте другий постулат Бора.
11. Запишіть вираз для спектра електромагнітних хвиль, що випромінюються і поглинаються атомом водню.
12. Перерахуйте і коротко охарактеризуйте основні види випромінювань.
13. На яких фізичних принципах ґрунтується спектральний аналіз? Наведіть приклади вибіркового поглинання електромагнітного випромінювання атмосферою Землі.
14. Які можливі процеси взаємодії атома з фотоном?
15. Яке джерело випромінювання називають лазером?
16. Яку населеність енергетичних рівнів атома (молекули) називають інверсною?
17. Який стан електрона в атомі називають метастабільним?
18. Опишіть принцип дії рубінового лазера. Охарактеризуйте основні особливості лазерного випромінювання.
19. Як використовуються лазери в різних галузях науки, техніки і медицини?

15.2 Фізика атомного ядра

15.2.1 Відкриття протона і нейтрона

У 1919 р. Е. Резерфорд здійснює першу ядерну реакцію і відкриває протон (p)



Протон – елементарна частинка з масою спокою $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг і електричним зарядом $+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

У 1932 р. Д. Чедвік відкриває нейтрон (n)



Нейтрон – елементарна частка з масою спокою трохи більшою від маси спокою протона $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг, що не має електричного заряду.

Загальна назва протонів і нейтронів – **нуклони** (від латів. nucleus – ядро). Між нуклонами діють короткодійні сили притягання – **ядерні сили**.

Протон – нуклон в зарядженому стані, **нейтрон** – в нейтральному.

Для позначення протона в ядерних реакціях використовують символ 1_1p , а нейтрона 1_0n . Нижній індекс характеризує електричний заряд частинки, кратний заряду ($+e$) протона, верхній, – число нуклонів, яке містить частинка.

Подібно до електрона, протон і нейтрон мають спинний момент імпульсу, рівний $\hbar/2$, тобто протон і нейтрон володіють напівцілим спином (у одиницях \hbar).

15.2.2 Теорія будови ядра

Згідно протонно-нейтронній моделі ядра, запропонованої в 1932 р. російськими фізиками Д.Д. Іваненко і В. Гейзенбергом, ядра складаються з елементарних частинок: протонів і нейтронів (рис.5.3).

Число протонів в ядрі дорівнює числу електронів в атомній оболонці, оскільки в цілому атом нейтральний. **Кількість протонів** в ядрі позначається Z і збігається з порядковим номером в таблиці Менделєєва. **Кількість нейтронів** у ядрі атома позначається N .

Загальна кількість протонів і нейтронів (нуклонів) позначається A – **масове число атома**

$$\boxed{A = Z + N}. \quad (15.17)$$

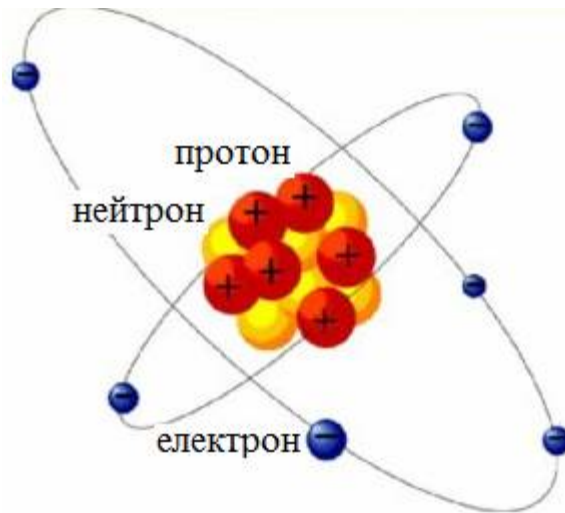


Рис 15.3 – Будова атома

Оскільки маси протона і нейтрона близькі один до одного, то масове число дорівнює закругленій до цілого числа відносній атомній масі елемента.

Ядро позначають ${}^A_Z X$, де X – хімічний елемент.

Масові числа можна визначити шляхом грубої зміни мас ядер приладами, що не володіють особливо великою точністю.

Ізотопи(нукліди) – атоми, що мають однакове число протонів в ядрі (зарядове число Z) і різне число N нейтронів.

Ядра ізотопів мають одне і те ж значення Z , але різні масові числа A , тобто різне число нейтронів N .

Усі ізотопи того самого елемента мають однакові хімічні властивості, але різні фізичні властивості (наприклад, радіоактивність).

Водень має три ізотопи: ${}^1_1\text{H}$ – *протій* (у ядрі лише один протон), ${}^2_1\text{H}$ – *дейтерій* (у ядрі – протон і нейтрон), ${}^3_1\text{H}$ – *тритій* (у ядрі – протон і два нейтрони) (рис. 15.4).

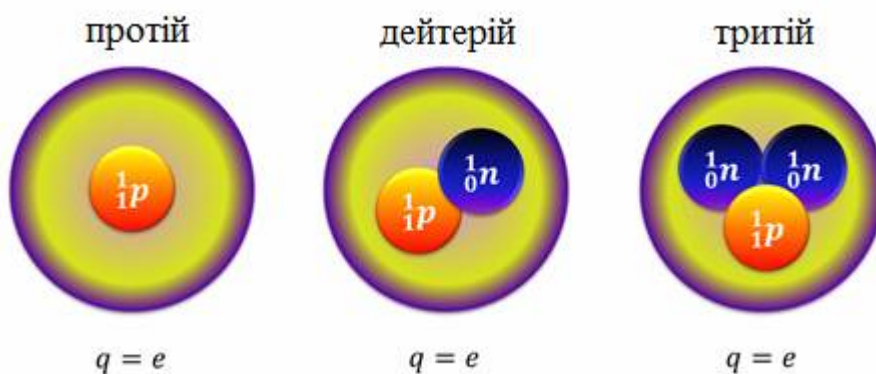


Рис 15.4 – Три ізотопи водню

Ядро будь-якого атома складається лише з протонів і нейтронів (нуклонів), які в ядрах деяких атомів можуть перетворюватися один на одного:

- якщо протон перетворюється на нейтрон, то утворюється **позитрон** і супроводжує його нейтрино



- якщо нейтрон перетворюється на протон, то утворюється електрон і супроводжує його антинейтрино (**антинейтрино** – нейтральна частинка з нікчемно малою масою спокою)



У ядрі протони і нейтрони міцно зв'язані внутрішньоядерними силами. В основі внутрішньоядерних сил лежать змінні сили (*сильна взаємодія*). Протони і нейтрони безперервно обмінюються частинками π —**мезонами** (рис.15.5) (π^+ , π^- , π^0) – *нестабільні частинки*. Змінні сили на багато порядків (у 100 разів) перевищують кулонівські сили відштовхування однойменно заряджених протонів.

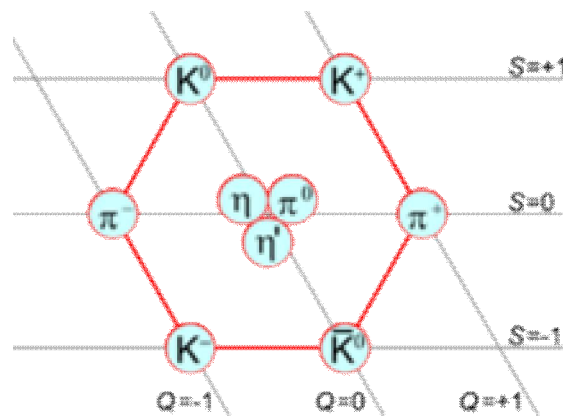


Рис 15.5 – Мезони–родина елементарних частинок

15.2.3 Енергія зв'язку ядра. Дефект маси

За співвідношенням Ейнштейна між масою і енергією *енергія ядра*

$$E = m_{\text{я}}c^2. \quad (15.20)$$

Найточніші виміри мас ядер показують, що маса спокою ядра $m_{\text{я}}$ завжди менше суми мас спокою протонів і нейтронів, що складають його

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n .$$

Дефект масиядра дорівнює різниці між сумами мас спокою нуклонів у вільному стані і масою спокою ядра(рис.15.6)

$$\Delta m_{\text{я}} = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}. \quad (15.21)$$



Рис 15.6 – Дефект маси ядра

Різниця мас позитивна. Зокрема, для гелію маса ядра на один відсоток менше від суми мас двох протонів і двох нейтронів. Відповідно для одного моля гелію $\Delta m = 0,286$ г.

Зменшення маси при утворенні ядра з частинок означає, що при цьому зменшується енергія цієї системи часток на значення енергії зв'язку $\Delta E_{\text{зв}}$.

Енергія зв'язку ядра – це енергія, необхідна для розщеплювання ядра на окремі нуклони; відповідно, це енергія, яка виділяється при утворенні ядра з окремих вільних нуклонів.

Енергія зв'язку ядра визначається по дефекту маси ядра

$$E_{\text{зв я}} = \Delta m_{\text{я}} c^2. \quad (15.22)$$

$$\Delta E_{\text{зв}} = \Delta m_{\text{я}} c^2 = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}) c^2. \quad (15.23)$$

Але куди при цьому зникає енергія $\Delta E_{\text{зв}}$ і маса Δm ?

При утворенні ядра з частинок останні за рахунок дії ядерних сил на малих відстанях спрямовуються з величезним прискоренням один до одного. Випромінювані при цьому γ -кванти володіють енергією $\Delta E_{\text{зв}}$ і масою

$$\Delta m = \frac{\Delta E_{\text{зв}}}{c^2}.$$

Енергія зв'язку ядра зазвичай вимірюється в МеВ

$$1\text{МэВ} = 10^6 \text{эВ} = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Дж} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{Дж}. \quad (15.24)$$

Енергія зв'язку ядра ${}^4_2\text{He}$ дорівнює 28 МеВ.

Про те, як велика енергія зв'язку, можна судити по такому прикладу: утворення 4 г гелію супроводиться виділенням такої ж енергії, що і згорання 1,5 – 2 вагонів кам'яного вугілля.

Питома енергія зв'язку – енергія зв'язку, що припадає на один нуклон (рис.15.7).

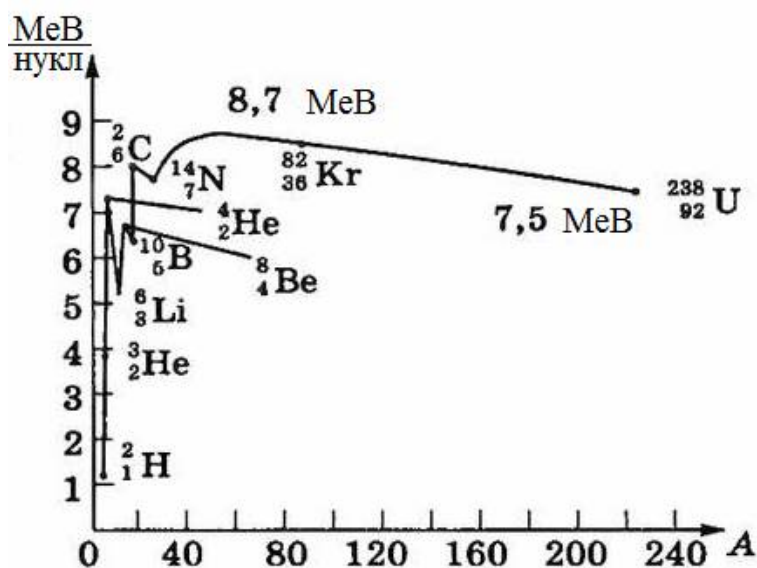


Рис 15.7 – Питома енергія зв'язку

Приклад. Розрахуємо середню (питому) енергію зв'язку нуклона в атомі вуглецю $^{12}_6\text{C}$. Для цього знайдемо спочатку повну енергію зв'язку $E_{зв}$ всіх нуклонів в ядрі, через дефект маси

$$E_{зв} = \Delta mc^2. \quad (15.25)$$

Відомо, що
 $m_a = 12 \text{ а.о.м.}, m_p = 1,007276 \text{ а.о.м.}, m_n = 1,008665 \text{ а.о.м.}, m_e = 0,000549 \text{ а.о.м.}$
 Маса ядра

$$m_{я} = (m_a - 6m_e) = 11,99706 \text{ а.о.м.} \quad (15.26)$$

Маса нуклонів

$$6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а.о.м.} \quad (15.27)$$

Дефект маси

$$\Delta m = 6(m_p + m_n) - m_{я} = 0,09894 \text{ а.о.м.} \quad (15.28)$$

Енергія зв'язку всіх нуклонів в ядрі

$$E_{зв} = 0,09894 \text{ а.о.м.} \cdot 931,5 \text{ МеВ/а.е.м.} = 92,16 \text{ МеВ.} \quad (15.29)$$

Питома енергія зв'язку нуклона

$$(E_{зв})_1 = \frac{E_{зв}}{A} = \frac{92,16}{12} = 7,68 \text{ МеВ/нуклон.} \quad (15.30)$$

15.2.4 Ядерні реакції

Два способи вивільнення внутрішньоядерної енергії:

- а) поділ важких ядер (наприклад $^{235}_{92}\text{U}$) на більш легкі;
- б) злиття легких ядер, наприклад ізотопів водню, у більш важкі (синтез більш важких, наприклад гелію).

Ядерними реакціями називаються перетворення ядер при взаємодії одне з одним або з іншими «елементарними» частинками.

Ядерна реакція протікає так: ядро захоплює бомбардуючу частинку, поглинає її енергію, переходить в нестійкий стан і розпадається. Реакція, яка протікає з поглинанням енергії – *ендотермічна*, з виділенням енергії – *екзотермічна*.

15.2.5 Природна радіоактивність

Це самочинні перетворення ядер одних атомів на ядра інших з виникненням трикомпонентного випромінювання(рис. 15.8): ядер гелію (α -частинки), швидких електронів (β -частинки) і електромагнітних хвиль типу рентгенівських (γ -променів).

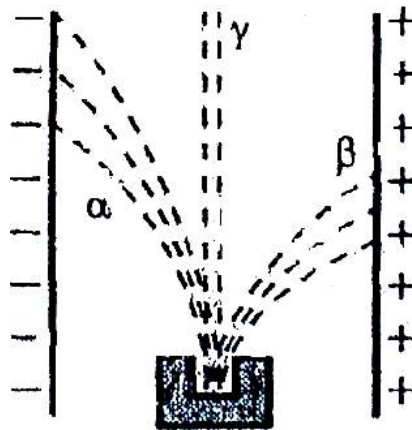
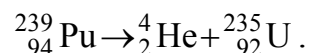


Рис 15.8 – Радіоактивність

1. **α -распад.** У деяких важких ядрах $2p$ і $2n$ вступають в замкнуту взаємодію і виштовхуються з ядра. В результаті важке ядро випускає α -частинку (ядро ${}^4_2\text{He}$) і перетворюється на нове ядро, зміщуючись на дві клітки до початку таблиці Менделєєва. Маса ядра зменшується на 4 одиниці, а заряд на 2 одиниці



Наприклад



2. **β -распад.** У деяких ядрах нейтрон перетвориться на протон з утворенням електрона (e^-) і антинейтрино ($\tilde{\nu}$) (рис. 15.9), які випромінюються ядром, а ядро перетворюється на нове, зміщене до кінця таблиці Менделєєва на одну клітку. Виникаючий потік електронів називають β -випромінюванням



Наприклад

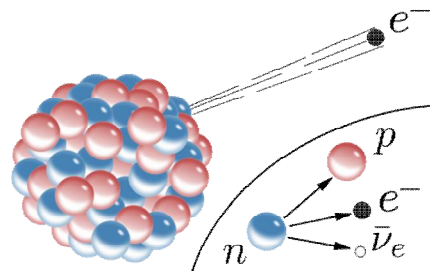
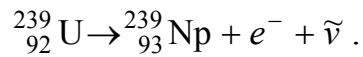


Рис 15.9 – β-распад

3. **γ-випромінювання** не супроводжується зміною заряду, маса ядра майже незмінюється. Ядра, що виявилися у збудженому стані, випромінюють квант електромагнітного випромінювання високої частоти (γ-квант), переходячи в стаціонарний стан



Цікаві факти.

Відстань, яку проходять до зупинки різні випромінювання:

- а) в повітрі: α – від 3 до 9 см; β – до 40 м; γ – декілька сотень метрів;
- б) у біологічній тканині: α – до 0,1 мм; β – до 6 см; γ – пересікає всю людину (рис. 15.10).

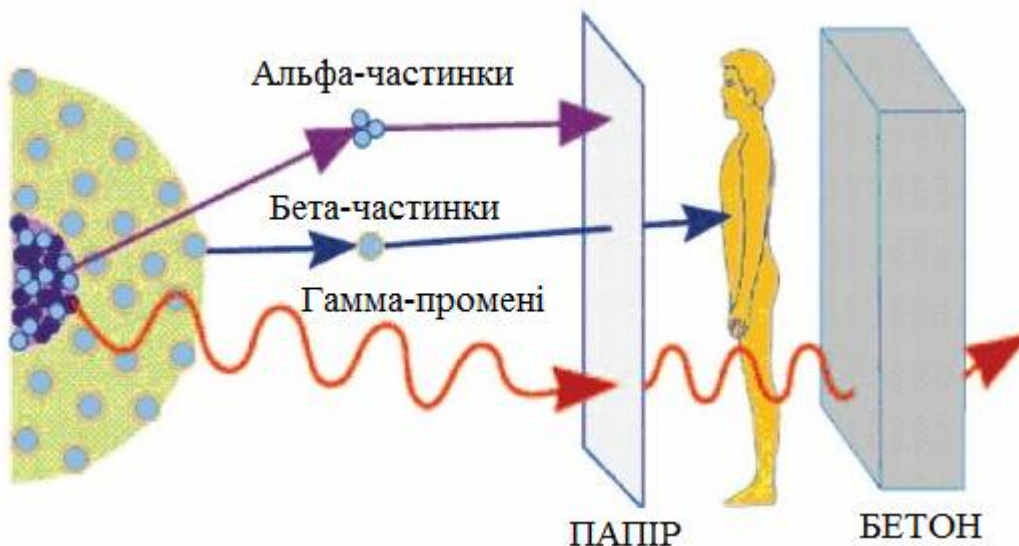


Рис 15.10 – Радіоактивність

15.2.6 Закон радіоактивного розпаду

Закон радіоактивного розпаду (рис. 15.11)

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (15.35)$$

де N – число радіоактивних атомів в даний момент часу;
 N_0 – число радіоактивних атомів в початковий момент часу;
 T – *період напіврозпаду* – час, за який розпадається половина радіоактивних атомів.

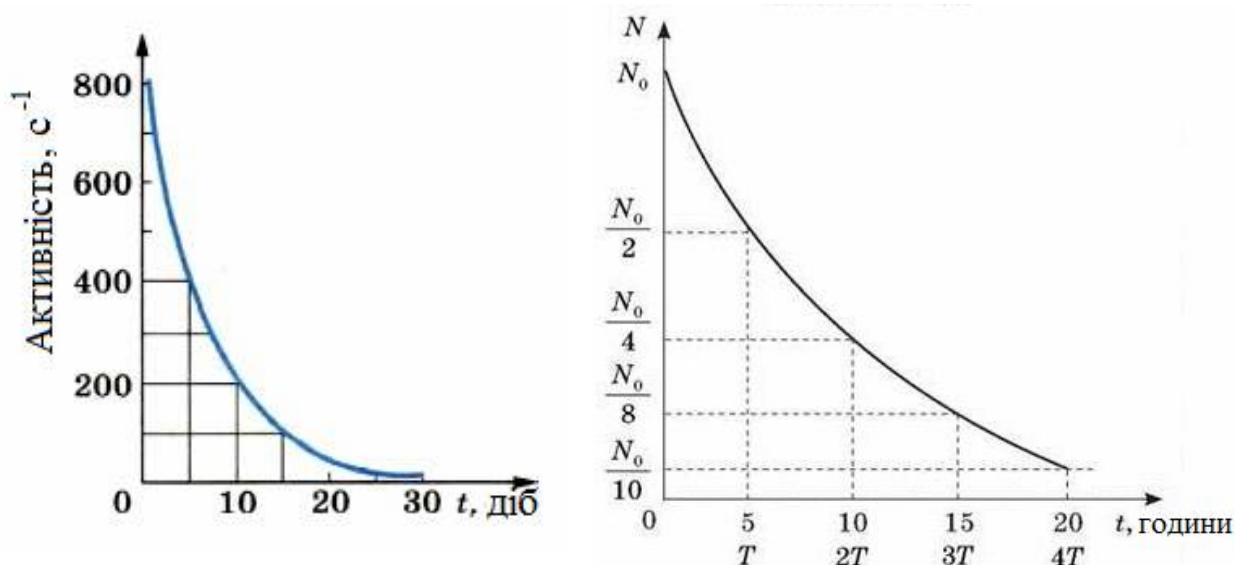


Рис. 15.11 – Графічне відображення закону радіоактивного розпаду

Цікаві факти

Період напіврозпаду:

вуглець $^{11}_6\text{C}$ – 20 хвилин; вуглець $^{14}_6\text{C}$ – 5600 років; йод $^{131}_{53}\text{I}$ – 8 діб;

кальцій $^{45}_{20}\text{Ca}$ – 165 діб; стронцій $^{89}_{38}\text{Sr}$ – 50,5 діб; кобальт $^{60}_{27}\text{Co}$ – 5,3 років; уран $^{235}_{92}\text{U}$ – $7,1 \cdot 10^8$ років.

Питома енергія зв'язку ядер зростає до середини системи Менделєєва. Енергія виділяється при з'єднанні легких ядер або при діленні важких.

Термоядерні реакції – так називають реакції синтезу ядер із більш легких, оскільки для злиття ядер вихідні речовини потрібно нагрівати настільки, щоб кінетична енергія ядер перевищувала енергію відштовхування їх протонів.

Термоядерний синтез легких ядер (відбувається при температурах в десятки мільйонів градусів). Енергія виділяється у вигляді кінетичної

енергії ядер і частинок, що утворюються, і супроводжується γ – випромінюванням



виділяється 17,6 МеВ;



виділяється 14,6 МеВ.

Енергія, що виділяється, дорівнює добутку величини дефекту маси ядерної реакції на квадрат швидкості світла

$$\Delta E = \Delta m_{\text{я.р.}} \cdot c^2. \quad (15.38)$$

Дефект маси ядерної реакції – це різниця між сумою мас спокою ядер і частинок до і після ядерної реакції. При ендотермічній ядерній реакції дефект маси від’ємний – $\Delta m < 0$ (енергія поглинається), при екзотермічній – $\Delta m > 0$ (енергія вивільнюється).

15.2.7 Штучна радіоактивність. Ядерний реактор

Деякі штучно отримані радіоактивні речовини зазнають β^+ – розпад.

У ядрах цих атомів один з протонів перетворюється на нейтрон. При цьому утворюється позитрон (позитивний електрон) і супроводжуюче його нейтрино, які виштовхуються з ядра. Утворюється ядро нового атома, зміщеного на одну клітку на початок таблиці Менделєєва



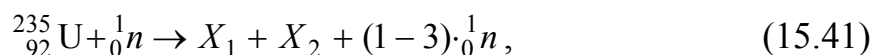
Ізотоп ${}^{30}_{15}\text{P}$ утворюється при бомбардуванні $\text{Al}\alpha$ -частинками



Ділення важких ядер.

Ядерні реакції особливо легко викликаються повільними нейтронами, які через відсутність заряду легко проникають в ядра атомів і зумовлюють їх перетворення.

Наприклад, ядро урану-235 при захваті нейтрона ділиться на два осколки: X_1 і X_2 ; утворюються 1-3 нейтрони (рис. 15.12)



виділяється близько 200 MeV енергії.

Тут X_1 і X_2 – радіоактивні ізотопи.

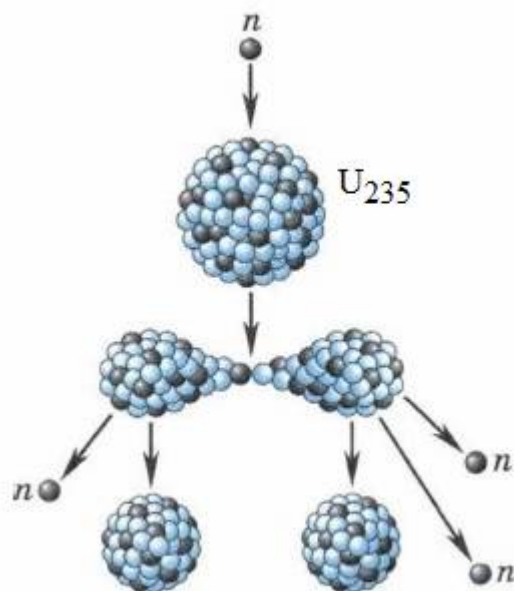


Рис. 15.12 – Ядро урану-235 при захваті нейтрона

Осколки– це різні ядра радіоактивних ізотопів. Майже рівноімовірно утворення будь-якої пари різних осколків з різним числом нейтронів

Zr і Te, Xe і Sr, Sb і Nb та інші.

${}_{92}^{235}\text{U}$ захоплює лише повільні (теплові) нейтрони.

Ланцюгові ядерні реакції. За певних умов кожен з тих нейтронів, що звільняються в результаті ділення важкого ядра, може бути знову захоплений ядром і звільнити ще 2-3 нейтрони і так далі. Виникає ланцюгова ядерна реакція, що самопідтримується.

Коефіцієнт розмноження нейтронів– це відношення числа нейтронів, які звільняються при діленні, до нейтронів, що викликають ділення в даній масі ядерного пального.

Для протікання ланцюгової реакції необхідно, аби коефіцієнт розмноження нейтронів в даній масі урану був $k \geq 1$.

Ланцюгова реакція в ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ здійснюється в атомних бомбах, де критична маса зумовлює $k \geq 1,01$ – **ядерний вибух**.

Пристрій ядерного реактора(15.13):

- регулюючі стрижні – стрижні кадмію і бору (речовин, які є хорошими поглиначами нейтронів);
- ядерне паливо ($^{235}_{92}\text{U}$ і $^{239}_{94}\text{Pu}$) і сповільнювач нейтронів (важка або звичайна вода, графіт);
- відбивач нейтронів (берилій);
- захист від радіації;
- теплоносій – вода або рідкий натрій.

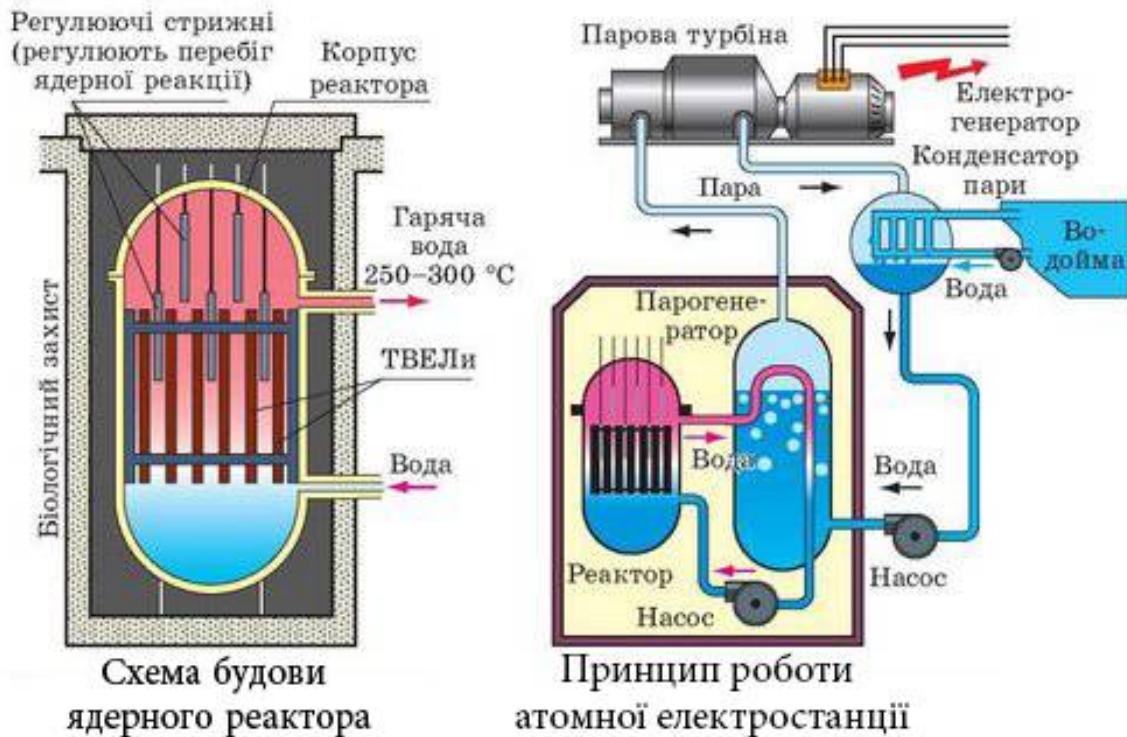
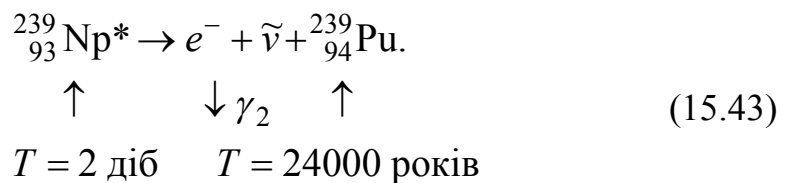
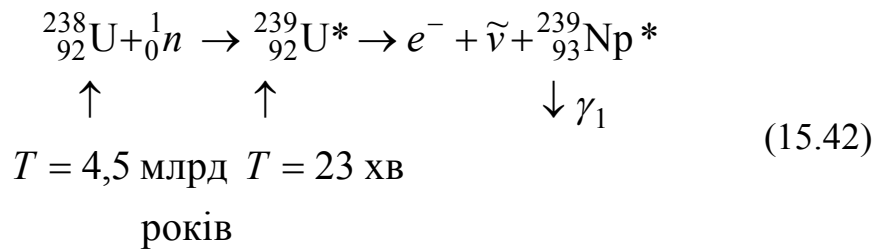


Рис. 15.13 – Схема будови ядерного реактора

У реакторах на атомних електростанціях здійснюється **керована ядерна реакція** ($k=1$). Сповільнювачем нейтронів в ураново-графітному реакторі є графіт (або важка вода). Енергія виділяється при розщеплюванні $^{235}_{92}\text{U}$.

У паливі ядерних реакторів $^{235}_{92}\text{U}$ в 20 разів менше, ніж $^{238}_{92}\text{U}$, який, захоплюючи нейтрон, перетворюється на плутоній $^{239}_{94}\text{Pu}$



Управляють реакцією стрижні, що вводяться в реактор, з бору або кадмію, які поглинають теплові нейтрони.

У реакторі-розмножувачі на швидких нейтронах з 1 кг $^{235}_{92}\text{U}$ отримують 1,5 кг плутонію.

15.2.8 Методи реєстрації іонізуючих випромінювань

Лічильник Гейгера (рис. 15.14). У наповненій газом (аргон) трубці (2) частинка, що пролітає через газ, іонізує атоми газу. Вони замикають коло між катодом (3) і анодом (1), створюючи імпульс напруги на резисторі R .

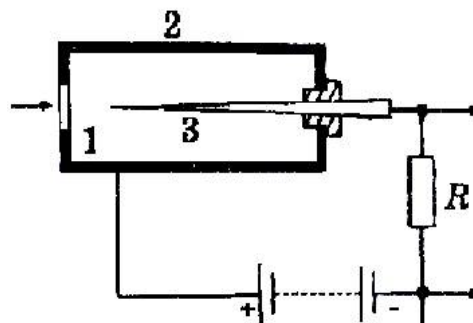


Рис. 15.14 – Принципова схема лічильника Гейгера

У лічильнику Гейгера-Мюллера (рис. 15.15) електрод із вістрям(3) замінений на тонкий дріт і змінена полярність електродів.

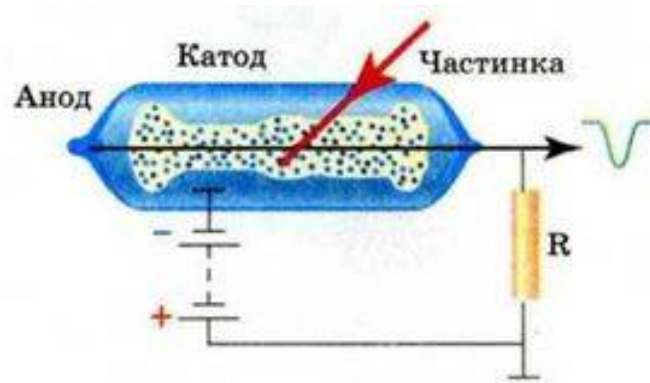


Рис. 15.15 – Принципова схема лічильника Гейгера-Мюллера

Камера Вільсона (рис.15.16). Камера заповнена сумішшю газу (аргон або азот) з насиченою парою води або спирту. Швидко розширюючи газ поршнем, переохолоджують пару. Пролітаюча досліджувана частинка іонізує атоми газу, на яких конденсується пара, утворюючи *краплинний трек* (слід).

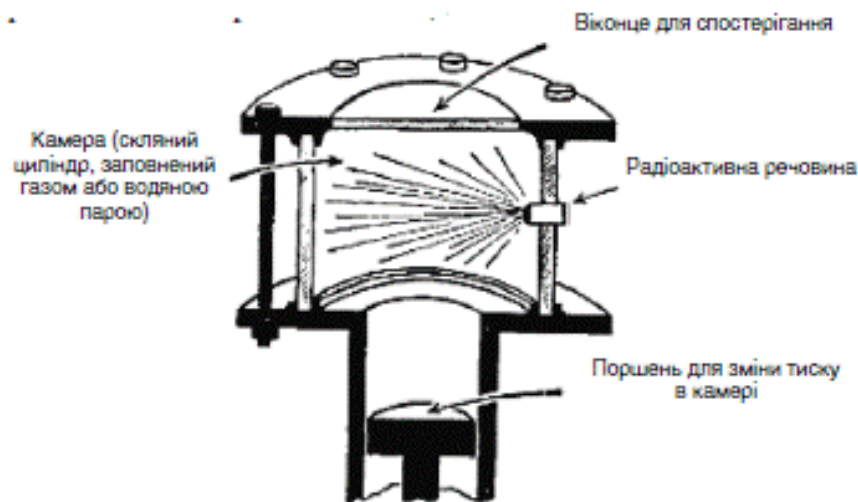


Рис. 15.16 – Схема камери Вільсона

Бульбашкова камера(рис. 15.17). Д. Глейзер сконструював камеру, в якій можна досліджувати частинки значно більшої енергії, ніж в камері Вільсона, оскільки густина робочої речовини камери Глейзера значно перевершує густина робочої речовини камери Вільсона. Бульбашкова камера містить **рідину**, яка легко кипить (наприклад, зріджений пропан або водень).

У перегрітій перед випробуванням рідині (шляхом різкого зменшення тиску) досліджувана частинка утворює *бульбашковий трек*.



Рис. 15.17 – Схема бульбашкової камери Д. Глейзера

Контрольні запитання

1. Наведіть основні характеристики протона і нейтрона. Охарактеризуйте протонно-нейтронну модель ядра.
2. Що таке ізотопи?
3. Коли утворюються нейтрино, антинейтрино?
4. Чому дорівнює масове число атома?
5. Яку енергію називають енергією зв'язку ядра?
6. Який процес називають ядерними реакціями? Як протікає ядерна реакція?
7. Яке фізичне явище називають радіоактивністю? Як розрізняють види радіоактивності?
8. Що є причиною радіоактивного розпаду?
9. Дайте визначення періоду напіврозпаду. Чому період напіврозпаду не залежить від початкового числа частинок?
10. Запишіть закон радіоактивного розпаду.
11. Які реакції називають термоядерними?
12. Що таке дефект маси ядерної реакції?
13. Який процес називають природною радіоактивністю?
14. Який радіоактивний розпад називають альфа-розпадом? Відносна частка яких нуклонів в ядрі зменшується в результаті альфа-розпаду?
15. Який радіоактивний розпад називають бета-розпадом? Відносна частка яких нуклонів в ядрі зменшується в результаті бета-розпаду?
16. Як пояснюється виникнення електронного антинейтрино при бета-розпаді?
17. Що таке γ -випромінювання?
18. Які методи реєстрації іонізуючих випромінювань ви знаєте?

Література

1. Корочкина Л.Н., Каурова А.С. и др. Физика: Учебное пособие для студентов – иностранцев подгот. фак. вузов. – М.: Высш. шк., 1983. – 392 с.
2. Соколович Ю. А. Справочник по курсу физики средней школы с примерами решения задач. Ю.А. Соколович, А.С. Богданова. – Х.: Веста: Изд-во Ранок, 2005. – 480 с.
3. Поляков В.М. Физика. Молекулярная физика и теплота. Электричество и магнетизм. Учебник для иностранных студентов подгот. фак. вузов Украины. – Одесса: ОНПУ, 2006. – 208с.
4. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Хохлова О.П. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 1. – Одеса: “Екологія”, 2008 – 130 с.
5. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Хохлова О.П. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 2. – Одеса: “ТЕС”, 2008 – 113 с.
6. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Шостак Н.А. Робочий зошит з дисципліни “Фізика” для слухачів факультету довузівської підготовки. Частина 3 – Одеса: “Екологія”, 2009 – 92 с.
7. Расторгуева Т.Е., Галич Е.А., Ткаченко Н.А. Методические указания для выполнения самостоятельной работы по дисциплине “Физика” раздел “Кинематика” для слушателей иностранцев подготовительного отделения – Одеса: “Екологія”, 2011 – 66 с.
8. Гончаренко С.У., Фізика: Підручник для 9 кл. серед. загальноосвітньої школи. Київ: Освіта, 2005. – 320 с.
9. Коршак Є.В., Фізика 9 кл.: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко О.І., Савченко В.Ф., - 2-ге вид., перероб. та доп. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2005. – 200 с.
10. Гончаренко С.У., Фізика: Підручник для 10 кл. серед. загальноосвіт. шк. – К.: Освіта, 2002. – 319с.
11. Коршак Є.В., Фізика 10 кл.: Підручник для загальноосвіт. навч. закл. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2004. – 296 с.
12. Гончаренко С.У. Фізика: Підручник для 11 кл. серед. загальноосвіт. шк. – К.: Освіта, 2005. – 319 с.
13. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. Фізика, 11 кл.: Підручник. – К.: Ірпень: ВТФ “Перун”, 2005. – 288 с.
14. Навчальні програми (довузівська підготовка іноземних громадян) / Уклад.: Андрющенко Б.М., Іващенко Ю.М., Колтаков Ю.О. та ін. – К.: „Видавництво «Політехніка»”, 2005. – Ч. 2: Фізика. Хімія. Математика.

- Основи інф-ки та обчисл. техніки. Креслення. Історія України. Рос. мова. Укр. і зарубіж. л-ра. Основи психології. Образотв. мистецт.–168 с.
15. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів з фізики для 7-9 класів (К.; Ірпінь: Перун, 2005, затвердженої МОН: лист від 23.12.2004 №1/11-6611) та для 10-12 класів (К., 2010, затвердженої МОН: наказ від 28.10.2010 № 1021).
16. Програма зовнішнього незалежного оцінювання з фізики / Додаток № 08 до наказу міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Деякі фізичні сталі

| Фізична величина | Позначення | Чисельне значення |
|--|-----------------|--|
| Гравітаційна стала | G | $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ |
| Прискорення вільного падіння | g | $9,8 \text{ м/с}^2$ |
| Швидкість світла у вакуумі | c | $2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ |
| Швидкість звуку в повітрі при 0°C | | 332 м/с |
| Атомна одиниця маси (а.о.м.) | | $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Маса спокою електрона | m_e | $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ |
| Маса спокою протона | m_p | $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Нормальний атмосферний тиск | p_0 | 101325 Па |
| Абсолютний нуль температури | | $-273,16^\circ\text{C}$ |
| Універсальна (молярна) газова стала | R | $8,31 \text{ Дж/ (моль} \cdot \text{К)}$ |
| Стала Авогадро | N_A | $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ |
| Стала Лошмідта | $N_L (n_0)$ | $2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ |
| Стала Больцмана | k | $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ |
| Нормальний (молярний) об'єм ідеального газу за нормальних умов (0°C і $1013,2 \text{ г Па}$) | V_{0m} | $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ |
| Стала Фарадея | F | $9,65 \cdot 10^4$ |
| Заряд електрона (абс. значення) | e | $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ |
| Електрична стала | ε_0 | $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ |
| Магнітна стала | μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} =$ $= 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ |
| Стала Планка | h | $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |

Дані про Сонце, Землю і Луну

| Фізична величина | Сонце | Земля | Луна |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| Середній радіус, км | $696 \cdot 10^3$ | $6,4 \cdot 10^3$ | $1,74 \cdot 10^3$ |
| Маса, кг | $1,98 \cdot 10^{30}$ | $5,88 \cdot 10^{24}$ | $7,36 \cdot 10^{22}$ |
| Прискорення вільного падіння на поверхні, м/с^2 | 274 | 9,8 | 1,62 |
| Швидкість поступальної ходи, км/с | 20 | 29,8 | 1,02 |
| Середня відстань до Землі, км | $1,5 \cdot 10^8$ | - | $3,84 \cdot 10^5$ |
| Період обертання навколо Сонця, с | - | $3,55 \cdot 10^7$ | $2,36 \cdot 10^6$ |

Латинський алфавіт

A a — а

B b — бе

C c — це

D d — де

E e — е

F f — еф

G g — же (ге)

H h — аш (ха)

I i — і

J j — йот

K k — ка

L l — ель

M m — ем

N n — ен

O o — о

P p — пе

Q q — ку

R r — ер

S s — ес

T t — те

U u — у

V v — ве

W w — дубль-ве

X x — ікс

Y y — ігрек

Z z — зет

Грецький алфавіт

| | |
|---------------|---------------|
| Α α — альфа | Ν ν — ню |
| Β β — бета | Ξ ξ — ксі |
| Γ γ — гамма | Ο ο — омікрон |
| Δ δ — дельта | Π π — пі |
| Ε ε — епсилон | Ρ ρ — ро |
| Ζ ζ — дзета | Σ σ ς — сигма |
| Η η — ета | Τ τ — тау |
| Θ θ — тета | Υ υ — іпсилон |
| Ι ι — йота | Φ φ — фі |
| Κ κ — каппа | Χ χ — хі |
| Λ λ — лямбда | Ψ ψ — псі |
| Μ μ — мю | Ω ω — омега |

Приставки і множники для утворення десяткових одиниць

| Приставка | Позначення | Множник |
|--------------|------------|------------|
| тера | Т | 10^{12} |
| гіга | Г | 10^9 |
| мега | М | 10^6 |
| кіло | к | 10^3 |
| гекто | г | 10^2 |
| дека | да | 10^1 |
| деци | д | 10^{-1} |
| санти | с | 10^{-2} |
| мілі | м | 10^{-3} |
| мікро | мк | 10^{-6} |
| нано | н | 10^{-9} |
| піко | п | 10^{-12} |

Позначення фізичних величин

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Шлях (довжина) | l |
| Висота | h |
| Переміщення | S |
| Координата | x, y, z |
| Площа | S |
| Об'єм | V |
| Час | t, τ |
| Маса | m, M |
| Вага | P |
| Тиск | p |
| Імпульс | p |
| Сила | F, N, T |
| Момент сили | M |
| Момент імпульсу | L |
| Момент інерції | J |
| Швидкість | v, u |
| Швидкість кутова | ω |
| Прискорення | a |
| Прискорення вільного падіння | g |

| | |
|--|-------------------------|
| Прискорення кутове | ε |
| Період коливань | T |
| Частота коливань | ν, f |
| Частота обертання | n |
| Частота кутова | ω |
| Фаза коливань (зсув фаз) | φ |
| Кількість речовини | ν |
| Кількість частинок | N |
| Концентрація частинок | n |
| Молярна маса | M |
| Термодинамічна температура | T |
| Температура за міжнародною шкалою температур | t, Θ |
| Робота | A |
| Потужність | N, P |
| Енергія | E, W |
| Внутрішня енергія | U |
| Густина енергії | W |
| Кількість теплоти | Q |
| Питома теплоємність | c |
| Теплоємність тіла | C |
| Питома теплота плавлення | λ |
| Питома теплота пароутворення | L |
| Питома теплота згорання | q |
| Температурний коефіцієнт | α |
| Поверхневий натяг | σ |
| Механічна напруга | σ |
| Жорсткість | k |
| Модуль пружності | E |
| Коефіцієнт тертя | μ |
| В'язкість | η |
| Абсолютна вологість | ρ, p |
| Відносна вологість | φ |
| Валентність | n |
| Коефіцієнт корисної дії | $KПД, \eta$ |
| Плоский кут | α, φ |
| Тілесний кут | Ω |
| Електричний заряд | q, Q |
| Густина електричного заряду поверхнева | σ |
| Напруженість електричного поля | E |
| Потенціал електричного поля | φ |
| Різниця потенціалів | $\varphi_1 - \varphi_2$ |

| | |
|----------------------------------|---------------|
| Сила струму | I |
| Густина струму | j |
| Електричний опір | r, R |
| Напруга | U |
| Питомий опір | ρ |
| Питома електропровідність | γ |
| Ємнісний опір | X_c |
| Індуктивний опір | X_L |
| Повний опір змінному струму..... | Z |
| Електрорушійна сила | ε |
| Електрична ємність | C |
| Індуктивність | L |
| Магнітна індукція | B |
| Магнітний потік | Φ |
| Магнітна проникність | μ |
| Діелектрична проникність | ε |
| Інтенсивність | I |
| Яскравість | B |
| Світловий потік | Φ |
| Освітленість | E |
| Сила світла | I |
| Лінійне збільшення | Γ |
| Кутове збільшення | β |