



С. У. Гончаренко

# Фізика



# ФІЗИКА

С. У. Гончаренко

Підручник для 11 класу  
середньої загальноосвітньої школи

*Затверджено Міністерством  
освіти і науки України*

КИЇВ «ОСВІТА» 2002



ББК 22.3я721  
Г65

*Затверджено Міністерством освіти і науки України  
(Рішення Колегії Міністерства освіти і науки України,  
протокол № 8/1 – 19 від 26 липня 2001 р.)*

Права авторів та видавничі права ДСВ «Освіта» захищені Законом України «Про авторське право і суміжні права» від 23.12.1993 р.

Друковане копіювання книги або її частини, будь-які інші контрафактні видання тягнуть за собою відповідальність згідно зі ст. 44 п. 1.3 цього Закону.

**Гончаренко С. У.**

**Г65** Фізика: Підруч. для 11 кл. серед. загальноосв. шк.—  
К.: Освіта, 2002. — 319 с.

ISBN 966-04-0435-2.

**ББК 22.3я721**

ISBN 966-04-0435-2

© С. У. Гончаренко, 2002  
© Видавництво «Освіта»,  
художнє оформлення, 2002

## РОЗДІЛ I

---

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Досі ми розглядали електричні й магнітні поля, які не змінюються з часом, так звані *статичні* поля. З'ясували, що електричне поле виникає навколо електричних зарядів, а магнітне — навколо постійних магнітів і постійних електричних струмів у нерухомих провідниках. Однак цікавішими виявилися явища в електричних і магнітних полях, що змінюються з часом. Такі явища дістали назву *явищ електромагнітної індукції*. Про них і йтиметься в цьому розділі.

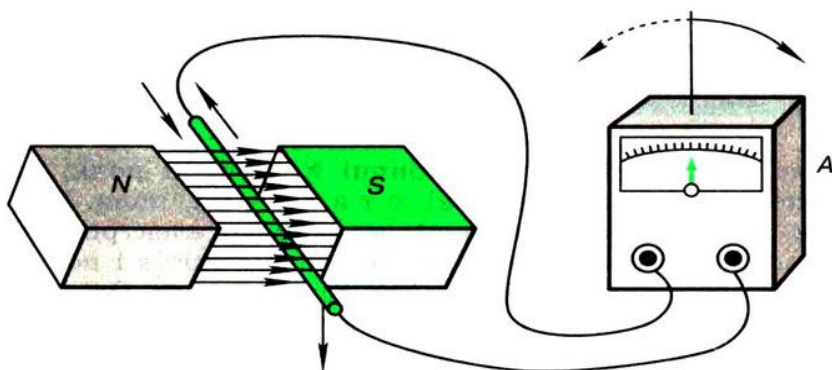
Досліджувати явища електромагнітної індукції розпочали відразу ж після відкриття у 1820 р. Хансом Ерстедом явища виникнення навколо провідника зі струмом магнітного поля. Якщо електричний струм створює магнітне поле, то чи існує обернене явище: виникнення електричного струму в провіднику, вміщеному в магнітне поле? Численні спроби виявити це не дали бажаних результатів. У нерухомих провідниках (звичайно, замкнутих), вміщених у найсильніші на той час магнітні поля, електричний струм не виникав.

Лише у 1831 р. видатний англійський фізик *Майкл Фарадей* експериментально відкрив явище електромагнітної індукції. Він встановив, що електричний струм все-таки виникає в нерухомому провіднику, вміщеному в магнітне поле, однак лише тоді, коли це магнітне поле змінюється. Явище електромагнітної індукції згодом стало основою всієї сучасної електротехніки й радіотехніки. Зокрема, на ньому ґрунтується принцип дії генераторів усіх електростанцій світу, які перетворюють механічну енергію в енергію електричного струму. Відкриття явища електромагнітної індукції дало змогу з'ясувати глибокий внутрішній зв'язок між електричними й магнітними явищами. Як переконаємося пізніше, світлові явища теж зв'язані з електромагнітною індукцією.

## § 1 — ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

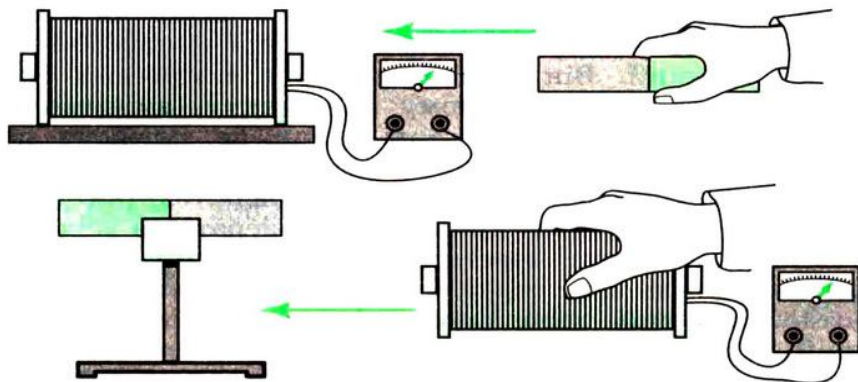
Досліди Фарадея, які сприяли відкриттю явища електромагнітної індукції, досить прості і їх легко відтворити в шкільних умовах.

Приєднаємо до гальванометра довгий гнучкий провідник і помістимо його між полюсами магніту (мал. 1).



Мал. 1

Якщо провідник і магніт нерухомі, струму в провіднику немає. Але варто почати рухати провідник, як гальванометр відразу ж покаже наявність у провіднику струму. Якщо під час руху провідника в одному напрямі стрілка гальванометра відхиляється, наприклад, вправо, то під час руху в зворотному напрямі стрілка відхиляється вже вліво, що свідчить про зміну напрямку струму в провіднику. Струм у провіднику виникає і тоді, коли магніт переміщається відносно нерухомого провідника.



Мал. 2



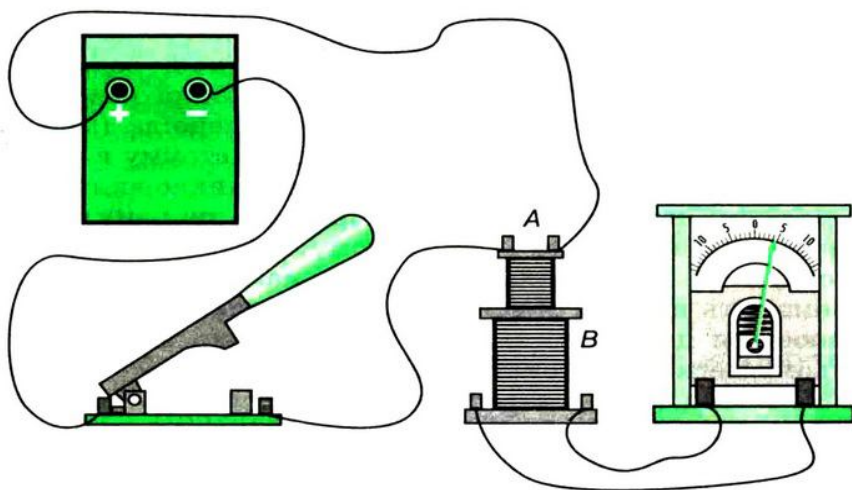
**Майкл  
ФАРАДЕЙ**  
(1791—1867)

Видатний англійський фізик, хімік і фізико-хімік, основоположник вчення про електромагнітне поле. Відкрив явище і встановив закон електромагнітної індукції, закони електролізу, явища пара- і діамagnetизму, обертання площини поляризації світла в магнітному полі.



Під'єднаємо тепер до гальванометра котушку. Коли всередину цієї котушки вводити або виймати з неї магніт (мал. 2), гальванометр теж покаже виникнення в колі електричного струму. Отже, струм виникає лише під час відносного руху магніту і провідника.

Замкнемо котушку *B* через гальванометр і вставимо всередину неї соленоїд *A*, який можна під'єднати до джерела струму (мал. 3). У момент замикання кола соленоїда стрілка гальванометра відхилиться, тобто під час зміни (виникнення) магнітного поля соленоїда котушкою проходить електричний струм. Однак після встановлення в соленоїді струму магнітне поле перестане змінюватися, струм у котушці зникає — стрілка гальванометра встановлюється на нулі.



Мал. 3

Тепер розімкнемо коло соленоїда. У разі зникнення струму в соленоїді, а разом з ним і його магнітного поля, стрілка гальванометра відхиляється в протилежний бік. Це означає, що в котушці виникає електричний струм, напрям якого протилежний напрямку струму, що проходив при замиканні соленоїда. В цих дослідах під час замикання кола соленоїда виникає магнітне поле, а під час розмикання — зникає. У разі таких змін магнітного поля в котушці виникає струм, який називають *індукційним*.

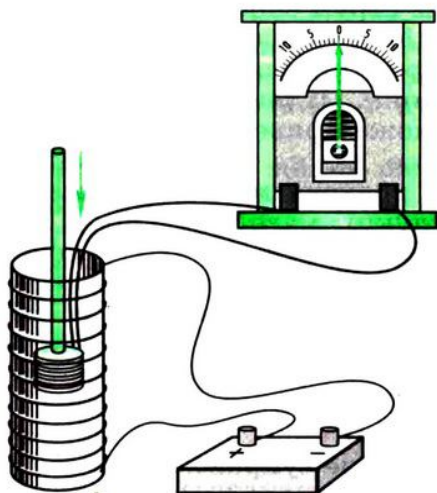
У коло соленоїда можна увімкнути реостат і ним змінювати силу струму в колі. Легко переконатися, що під час зростання сили струму в колі соленоїда у котушці виникає індукційний струм одного напрямку, а під час зменшення — струм протилежного напрямку. При зміні сили струму в соленоїді змінюється і його магнітне поле, і в котушці виникає індукційний струм.

Отже, ми переконалися, що виникнення індукційного струму пов'язане зі змінами магнітного поля, причому причина цих змін не має значення. Магнітне поле може змінюватися з різною швидкістю. На розглянутих вище дослідах неважко переконатися, що сила індукційного струму в замкнутому провіднику визначається швидкістю змін магнітного поля (його індукції).

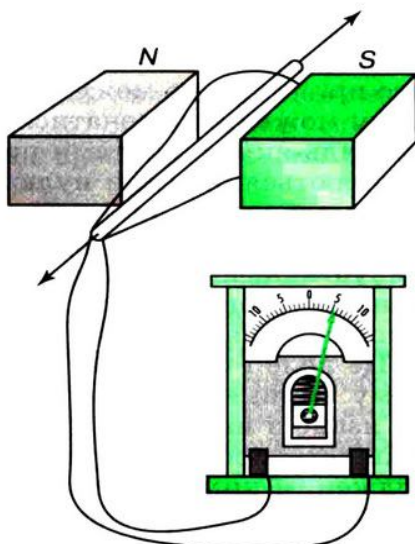
Для виникнення індукційного струму в замкнутому провіднику має значення не лише зміна магнітного поля. Важливо ще, як індукція цього поля спрямована відносно поверхні, охоплюваної замкнутим провідником (контуром). Якщо в досліді (мал. 1) провідник переміщати вздовж ліній магнітної індукції, то струм у провіднику не виникає. Не виникає індукційний струм і тоді, коли котушка рухається поступально в однорідному магнітному полі вздовж ліній індукції. В цьому легко переконатися, якщо невелику котушку переміщати всередині довгого соленоїда (мал. 4). В той же час просте вмикання і вимикання струму в соленоїді, якщо всередині закріплена котушка, викликає виникнення в ній індукційного струму. Звідси зробимо ще один висновок: причиною виникнення в замкнутому провіднику індукційного струму є зміна кількості ліній магнітної індукції, які пронизують площу, обмежену цим контуром. І чим швидше змінюється ця кількість, тим більшої сили виникає струм. У цьому легко переконатися на такому простому досліді.

Візьмемо рамку з великою кількістю витків тонкого і гнучкого дроту. Різко змінимо площу рамки, вміщеної в сильному магнітному полі (мал. 5). Увімкнутий в коло рамки гальванометр і в цьому випадку показує наявність електричного струму. Індукція магнітного поля тут постійна.





Мал. 4



Мал. 5

Змінюється лише площа, обмежена рамкою, внаслідок чого змінюється кількість ліній магнітної індукції, що пронизують контур. А ви знаєте, що добуток модуля магнітної індукції  $\vec{B}$  на площу  $S$  контуру, перпендикулярної до цієї площі, називається магнітним потоком. Таким чином, можна зробити висновок, що під час зміни магнітного потоку через площу, обмежену будь-яким замкнутим провідним контуром, в останньому виникає індукційний електричний струм.

- ?
1. В яких випадках у замкнутому провіднику, який міститься в магнітному полі, виникає індукційний струм?
  2. Замкнуте металеве кільце рухається в однорідному магнітному полі поступально. Чи виникає струм у кільці? Чому?
  3. Рама автомобіля є замкнутим контуром. Чи виникатиме в ній індукційний струм під час руху машини? Магнітне поле Землі поблизу її поверхні вважати однорідним.

## § 2 — ІНДУКЦІЙНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

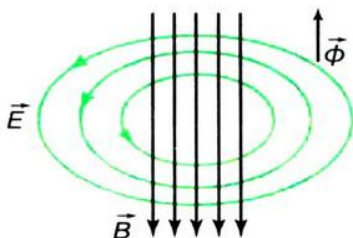
Під час будь-якої зміни магнітного поля в замкнутому провіднику, який міститься в цьому полі, виникає електричний струм. Пригадаємо, за яких умов у замкнутому провіднику може існувати електричний струм. Крім наявності рухомих зарядів, має існувати електричне поле, яке б забезпечувало їх упорядкований рух. У замкнутому про-



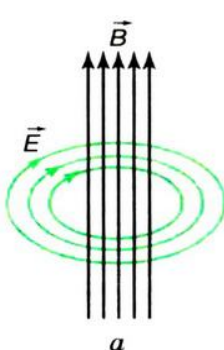
віднику під час змін магнітного потоку через площу, обмежену цим провідником, електричний струм спостерігається, але його причиною не може бути стаціонарне електричне поле. В цьому можна переконатися, вимірявши різницю потенціалів між будь-якими точками провідника. Ці різниці потенціалів виявляються рівними нулю. Не може привести заряди в рух і магнітне поле, оскільки воно не діє на нерухомі заряди (хаотичний тепловий рух ми не враховуємо). Отже, маємо припустити, що під час зміни індукції магнітного поля, яке пронизує контур замкнутого провідника, навколо цього змінного поля виникає так зване *індукційне електричне поле*. Це поле і викликає струм у замкнутому провіднику. При цьому виникнення індукційного електричного поля ніяк не пов'язане з наявністю в даній частині простору провідника. Наявність провідника лише дає змогу виявити це поле за збудженим ним електричним струмом.

Таким чином, **змінне магнітне поле супроводжується виникненням у навколишньому просторі індукційного електричного поля**. Як воно виникає індукційне електричне поле і які воно має властивості?

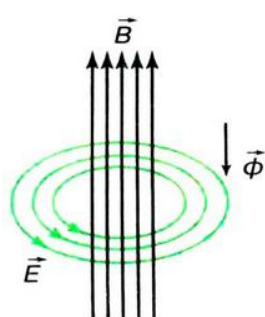
Зрозуміло, що це електричне поле багато в чому відрізняється від відомого електростатичного поля. Пригадаємо, що електростатичне поле пов'язане з електричними зарядами, і його лінії напруженості починаються і закінчуються на цих зарядах. Внаслідок цього воно не може підтримувати замкнуте переміщення вільних електронів чи інших носіїв заряду, тобто привести до виникнення ЕРС. Індукційне електричне поле створює ЕРС у замкнутому контурі, отже, його робота з переміщення електричних зарядів замкнутим шляхом не дорівнює нулю. Це означає, що лінії напруженості індукційного електричного поля є замкнутими лініями — вони ніби охоплюють лінії індукції магнітного поля (мал. 6).



Мал. 6



а



б

Мал. 7

Замкнутістю ліній напруженості індукційне електричне поле відрізняється від електростатичного поля. Тому це поле називають також *вихровим електричним полем*. На малюнку 7 зображено вихрове електричне поле, яке виникає під час зміни магнітного потоку: а) під час зростання потоку і б) під час зменшення.

З малюнка 7 видно, що лінії напруженості електричного і індукції магнітного полів лежать у взаємно перпендикулярних площинах. Дослідження показали, що вектор індукції магнітного поля  $\vec{B}$  у кожній точці простору перпендикулярний до напруженості  $\vec{E}$  індукованого ним вихрового електричного поля. Напрямок ліній напруженості індукційного поля збігається з напрямком індукційного струму. Сила, яка діє з боку вихрового електричного поля на заряд  $q$ , дорівнює

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Якою ж величиною характеризують індукційне електричне поле? По-перше, напруженістю поля, тобто відношенням сили, з якою поле діє на заряд, до значення цього заряду. По-друге, роботою, яку виконує поле (точніше, сила, яка діє з боку поля на заряд) під час переміщення в ньому електричного заряду.

Ще раз звернемо увагу на принципову відмінність між індукційним електричним полем і електростатичним полем нерухомих зарядів. Під час переміщення зарядів в електростатичному полі *робота поля на замкнутому шляху дорівнює нулю*. Проте це не стосується індукційного поля. Розглянуті вище досліди показали, що в замкнутому провіднику, вміщеному в змінне магнітне поле, виникає електричний струм. Отже, в ньому переміщуються заряди. Якщо провідник має опір, він нагрівається, — при цьому виконується робота. Між тим у замкнутому контурі зі струмом відсутнє джерело, яке б могло виконувати цю роботу. Отже, її виконує індукційне поле, і *робота індукційного поля на замкнутому шляху не дорівнює нулю*. Ця робота дорівнює ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i$ , помноженій на значення заряду, який переміщається.

Вихрове електричне поле може виникати не лише в провідниках, а й у просторі, де їх немає. Збуджене змінним магнітним полем вихрове електричне поле може діяти на окремі заряджені частинки у вакуумі, як, наприклад, у прискорювачі електронів — бетатроні. За час оберту електрона замкнуте вихрове електричне поле виконує роботу з прискорення електрона, збільшення його кінетичної енергії.

Явище збудження (індукування) змінним магнітним полем вихрового електричного поля використовується в одній

з найпоширеніших електротехнічних машин — трансформаторі. Таким чином, фундаментальне положення про те, що будь-яка зміна в часі магнітного поля індукує вихрове електричне поле, підкріплене тепер не лише експериментами, а й практичним його використанням.

### § 3 — ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Ви знаєте, що для існування струму в замкнутому колі на вільні заряди мають діяти сторонні сили. Відношення роботи цих сторонніх сил, виконаної під час переміщення заряду вздовж замкнутого кола, до заряду переміщеної частинки ми називали електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму. Природно й тепер відношення роботи переміщення заряду по замкнутому шляху в індукційному електричному полі до заряду переміщеної частинки назвати електрорушійною силою індукції (ЕРС індукції). Таким чином, під час зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром, у контурі на вільні заряди починають діяти сторонні сили, дія яких характеризується ЕРС індукції. ЕРС індукції є енергетичною характеристикою індукційного електричного поля, тоді як силовою характеристикою виступає напруженість поля, тобто відношення сили, з якою поле діє на заряд, до значення цього заряду.

Аналіз дослідів, описаних у § 1, а також багатьох інших показує, що ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через площу, обмежену контуром замкнутого провідника:

$$\mathcal{E}_i = k \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|. \quad (3.1)$$

Формулу (3.1) не можна вивести з уже відомих законів, які описують електричні і магнітні явища. Вона виражає фундаментальний закон природи — **основний закон електромагнітної індукції**. Часто цей закон називають також *законом Фарадея*.

Закон електромагнітної індукції формулюється саме для ЕРС, а не індукційного струму. При такому формулюванні закон виражає суть явища, що не залежить від властивостей провідників, в яких збуджується індукційний струм. Для виникнення струму провідник має бути замкнутим. Сила цього струму залежить не тільки від швидкості зміни магнітного потоку, а й від опору провідника. Під час змін магнітного потоку індукується не ЕРС, а вихрове електричне поле. ЕРС — фізична величина, яка кількісно характеризує це індукційне поле.



Множник  $k$  у (3.1) — коефіцієнт пропорційності, який залежить лише від вибору системи одиниць вимірювання. У СІ магнітний потік вимірюється у веберах (Вб), а час — у секундах. Враховуючи, що вебер = вольт·секунда, ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i$  дістанемо у вольтах, якщо прийняти  $k = 1$ .

Тоді основний закон електромагнітної індукції запишеться:

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|. \quad (3.2)$$

Цікаво порівняти ЕРС гальванічного елемента і ЕРС індукції. У випадку гальванічного елемента сторонні сили виконують роботу всередині елемента; у випадку ж збудження ЕРС індукції сторонні сили діють у всіх точках контуру, площа якого пронизується змінним магнітним потоком.

За (3.2) визначається ЕРС індукції при одному обході замкнутої кривої, наприклад ЕРС, яка виникає тоді, коли в змінному магнітному полі вміщено лише один виток. Якщо ж у змінне поле внести котушку з  $n$  витків, то і ЕРС індукції буде в  $n$  раз більша.

$$\text{Тоді} \quad \mathcal{E}_i = n \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|. \quad (3.3)$$

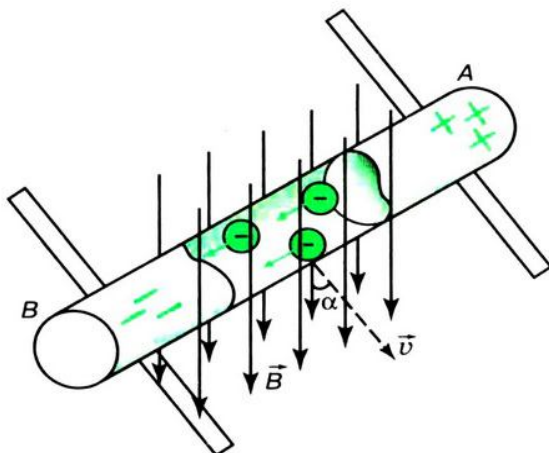
Формула (3.2) виражає закон електромагнітної індукції в загальному вигляді. Вона застосовна і до нерухомих контурів, і до провідників, які рухаються в магнітному полі. Швидкість зміни магнітного потоку в формулі може бути зумовлена як зміною магнітної індукції з часом, так і рухом контуру в магнітному полі (або його деформацією).

ЕРС індукції створює в замкнутому контурі опором  $R$  індукційний електричний струм. Він, як і будь-який електричний струм, підкоряється закону Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{1}{R} \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|. \quad (3.4)$$

Розглянемо тепер, як можна пояснити виникнення ЕРС індукції у випадку руху провідників у магнітному полі, яке не змінюється з часом. Нехай в однорідному магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$  рівномірно рухається прямий металевий провідник завдовжки  $l$  (мал. 8). Для спрощення припустимо, що швидкість провідника  $\vec{v}$  перпендикулярна до самого провідника і утворює з вектором індукції магнітного поля  $\vec{B}$  кут  $\alpha$ . Разом з провідником зі швидкістю  $\vec{v}$  переміщаються позитивні йони і вільні електрони.

Оскільки вони рухаються в магнітному полі, то на кожен йон і електрон діє сила Лоренца  $F_{\text{л}} = evB \sin \alpha$ . Якщо йони під впливом сили Лоренца не втрачають стійкої рівноваги у



Мал. 8

вузлах кристалічної решітки, то електрони провідника зміщуються до одного його кінця  $B$ , залишаючи на другому кінці  $A$  надмір позитивних зарядів. Такий розподіл зарядів триває доти, поки розділені заряди не створять всередині провідника електростатичне поле (напрявлене від  $A$  до  $B$ ), в якому на електричні заряди провідника діятиме сила, рівна за значенням, але протилежна силі Лоренца. Отже, зміщення електронів до кінця  $B$  припиниться, якщо  $F_e = F_{\text{Л}}$ . Оскільки  $F_e = eE = e \frac{U}{l}$ , а  $F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha$ , маємо  $e \frac{U}{l} = Bve \sin \alpha$ , звідки  $U = Blv \sin \alpha$ .

Робота сили Лоренца і робота сил електростатичного поля з переміщення одиничного позитивного заряду вздовж провідника (від  $B$  до  $A$ ) рівні за значенням і протилежні за знаком. Перша робота є ЕРС, яка виникає під час руху провідника  $AB$  в магнітному полі, друга — різницею потенціалів між кінцями  $B$  і  $A$  провідника, тобто  $\mathcal{E}_i = U$ . Таким чином,

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha. \quad (3.5)$$

ЕРС, яка виникає в провіднику під час його руху в магнітному полі, прямо пропорційна його довжині, швидкості руху, магнітній індукції і синусу кута між векторами швидкості і магнітної індукції.

Якщо провідник, який рухається в магнітному полі, замкнути на гальванометр (утворити замкнуте електричне коло), гальванометр покаже виникнення в колі струму. Напрямок струму в прямолінійному провіднику під час руху в магнітному полі можна визначити за правилом *правої руки*: якщо праву руку розмістити вздовж провідника так, щоб

лінії магнітної індукції входили в долоню, а відігнутий великий палець показував напрям руху провідника, то витягнуті чотири пальці вкажуть напрям струму в провіднику.

1. Поясніть природу сторонніх сил, які зумовлюють виникнення ЕРС індукції в нерухомому провіднику. 2. Якими величинами характеризується індукційне електричне поле? 3. У чому полягає зміст явища електромагнітної індукції? 4. Яка природа сторонньої сили, що зумовлює виникнення ЕРС у рухомому провіднику? 5. Чи виникає ЕРС індукції на кінцях сталеві осі автомобіля під час його руху?

## Вправа 1

1. Яка ЕРС індукції збуджується в контурі, якщо магнітний потік через площу, обмежену ним, за 0,01 с рівномірно змінюється на  $5 \cdot 10^{-3}$  Вб?

2. В однорідному магнітному полі з індукцією  $B = 5 \cdot 10^{-2}$  Тл перпендикулярно до ліній індукції поля розміщений плоский виток з дроту. Площа контуру витка  $S = 200$  см<sup>2</sup>. Виток приєднано до гальванометра. При повороті витка на кут  $\alpha = 60^\circ$  через гальванометр пройшов заряд  $q = 2 \cdot 10^{-3}$  Кл. Визначте опір витка.

3. Обчисліть середню ЕРС індукції, яка виникає під час розмикання кола обмотки електромагніту протягом  $\Delta t = 10^{-3}$  с, якщо індукція магнітного поля  $B = 2$  Тл, поперечний переріз осердя  $S = 30$  см<sup>2</sup>, кількість витків у обмотці  $n = 1,5 \cdot 10^3$ .

4. Визначте різницю потенціалів, яка виникає на кінцях крил літака під час горизонтального польоту, зі швидкістю  $v = 1200$  км/год, якщо розмах крил літака  $l = 40$  м. Вертикальна складова індукції магнітного поля Землі  $B = 5 \cdot 10^{-5}$  Тл.

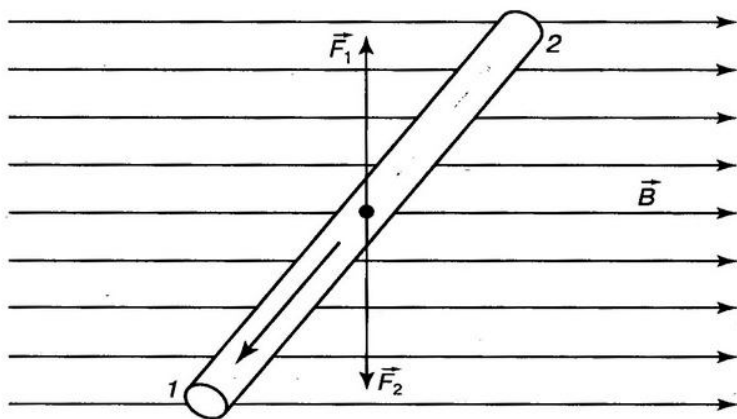
5. Провідник завдовжки  $l = 0,5$  м рухається зі швидкістю  $v = 10$  м/с перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля. Визначте індукцію магнітного поля, якщо на кінцях провідника виникає різниця потенціалів  $U = 0,02$  В.

## § 4 — ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Спостерігаючи на дослідах електромагнітну індукцію, ми переконалися, що індукційний струм у провіднику чи котушці може мати два протилежні напрями, тобто ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i$  може бути як позитивною, так і негативною. Який напрям матиме індукційний струм, залежить від того, що відбувається з магнітним потоком через поверхню, охоплену замкнутим контуром, — зростає він чи спадає. З'ясуємо цей зв'язок.

Нехай у постійне і однорідне магнітне поле вміщено замкнутий провідний контур, одна сторона якого (на малюнку 9 її зображено у вигляді прямого провідника) переміщається





Мал. 9

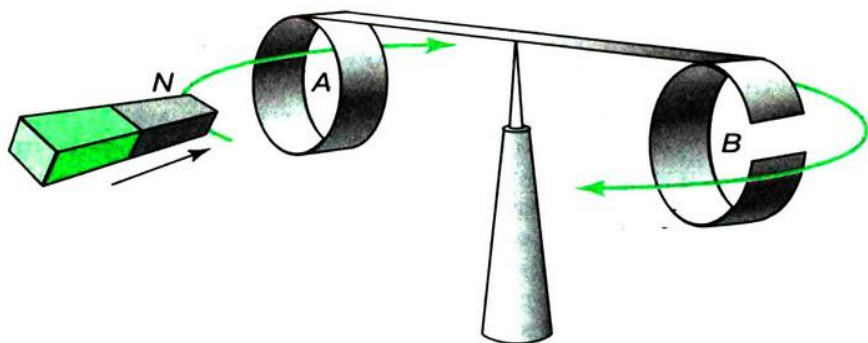
перпендикулярно до ліній магнітної індукції зі швидкістю  $\vec{v}$ . У провіднику під час руху виникає ЕРС індукції і індукційний струм, напрям якого можна було б визначити за правилом правої руки. Однак ми скористаємося цим прикладом, щоб сформулювати загальне правило визначення напрямку індукційного струму, застосовного в усіх випадках.

У даному прикладі можливі два напрями індукційного струму — до нас і від нас. Дослідимо обидві можливості.

Припустимо, що індукційний струм спрямований до нас (стрілка 1). Тоді на провідник діяла б сила Ампера  $F_2$ , напрямлена вздовж вектора швидкості (в цьому легко переконатися, скориставшись правилом лівої руки), і провідник не треба було б переміщати в цьому напрямі. Він сам рухався б з прискоренням. Однак це неможливо, тому що порушувався б закон збереження енергії. Адже кінетична енергія провідника зростала б сама собою і одночасно виникав би індукційний струм, для чого теж потрібні затрати енергії. Очевидно, ми помилилися, припустивши, що індукційний струм спрямований до нас.

Нехай індукційний струм спрямований від нас (стрілка 2). У цьому випадку сила Ампера спрямована проти руху провідника, і щоб він рухався рівномірно, тобто підтримувалась стала ЕРС індукції і був постійним індукційний струм, до провідника слід прикласти зовнішню силу. Ця сила має виконувати роботу з подолання сили Ампера. Під час виконання роботи енергія зовнішніх тіл перетворюється в енергію індукційного електричного поля.

Таким чином, можна зробити висновок, що збуджуваний у замкнутому провіднику індукційний струм має такий на-



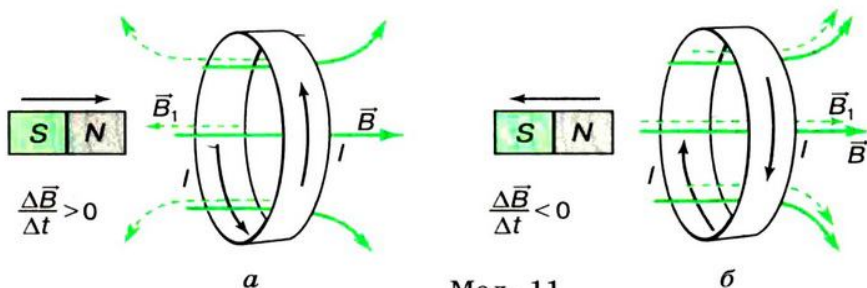
Мал. 10

прям, що створюване ним магнітне поле протидіє причині, яка викликає появу ЕРС індукції.

Таку дію індукційного струму можна продемонструвати за допомогою легкої стрічки з алюмінію з двома кільцями — суцільним *A* і розрізаним *B* — зрівноваженої на вістрі (мал. 10). У разі наближення магніту до розрізаного кільця ніяких змін положення стрічки не відбувається. Це й зрозуміло: в розрізаному кільці індукційний струм не виникає, отже, відсутнє і магнітне поле, яке б взаємодіяло із зовнішнім магнітним полем. При наближенні до суцільного кільця (незалежно від того, яким полюсом наближати магніт) воно завжди відштовхується. Навпаки, віддалення магніту завжди викликає притягання до нього кільця.

Відштовхування чи притягання кільця магнітом залежить від напрямку індукційного струму. Тому закон збереження енергії дає змогу сформулювати правило, яке визначає напрям індукційного струму в будь-якому випадку.

Чим відрізняються два розглянуті досліди: наближення магніту до кільця і його віддалення? В першому випадку магнітний потік крізь кільце зростає (мал. 11, *a*), а в другому — зменшується (мал. 11, *б*). У навколишньому просторі збуджується вихрове електричне поле, яке в кільці збуджує



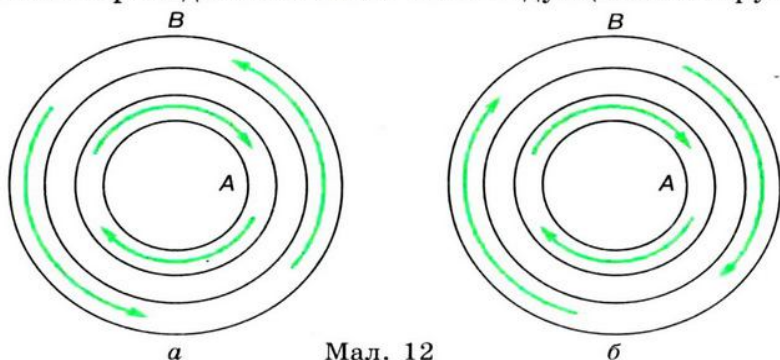
Мал. 11

індукційний струм. Оскільки в першому випадку кільце відштовхує магніт, вектор  $\vec{B}_1$  індукції магнітного поля, створеного індукційним струмом в кільці, спрямований проти вектора індукції магнітного поля постійного магніту. Іншими словами, магнітний потік індукційного струму прагне компенсувати зміну магнітного потоку постійного магніту, тобто прагне утримати магнітний потік через кільце незмінним. У другому випадку напрям індукційного струму порівняно з першим змінюється на протилежний. Напрямок вектора індукції  $\vec{B}_1$  індукційного струму також змінюється на протилежний. І в цьому випадку магнітний потік індукційного струму в кільці також прагне компенсувати зменшення магнітного потоку, створеного постійним магнітом.

Отже, ми підійшли до загального правила визначення напрямку індукційного струму: **індукційний струм у замкнутому контурі має такий напрям, що створений ним магнітний потік через площу, обмежену контуром, прагне компенсувати ту зміну магнітного потоку, яка викликає даний струм.** Це правило називається *правилом (іноді законом) Ленца*.

Застосовуючи правило Ленца, легко визначати напрям індукційного струму в будь-якому випадку. Наприклад, розглянемо випадок утворення індукційного струму в зовнішній котушці (мал. 12) під час вмикання струму (стрілками показані напрями струмів). У цьому разі магнітне поле всередині соленоїда зростає. Відповідно індукційний струм у зовнішній котушці обирає такий напрям, щоб його магнітне поле перешкоджало цьому зростанню. Це означає, що індукційний струм спрямовується проти струму джерела. *(Самостійно визначте напрям індукційного струму в котушці у разі розмикання кола.)*

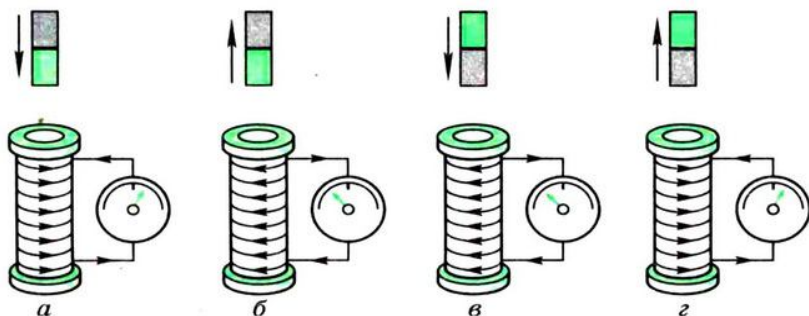
Правило Ленца є виявом закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах. Енергія індукційного струму в провіднику дорівнює тій роботі, яка виконується з подолання протидії магнітного поля індукційного струму.



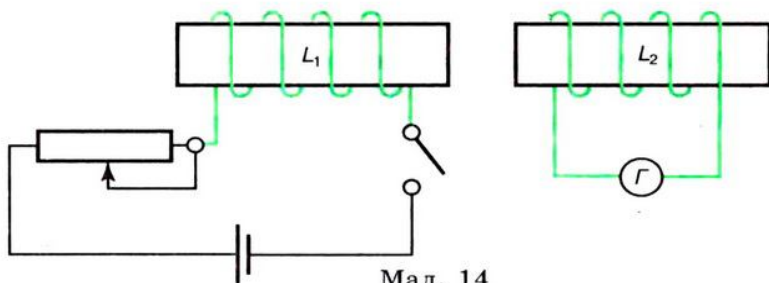
Мал. 12



1. У котушку вставляють і витягують з неї прямий магніт (мал. 13). Визначте напрям індукційного струму в показаних на малюнку чотирьох випадках (на шкалі нуль позначено рискою). 2. Визначте напрям індукційного струму в котушці (мал. 14) у таких випадках: 1) у котушці  $L_1$  вмикають струм; 2) у котушці  $L_1$  вимикають струм; 3) в котушці  $L_1$  сила струму збільшується; 4) котушку  $L_2$  відсовують від котушки  $L_1$ ; 5) в котушку  $L_1$  вставляють стальне осердя. 3. Прямий постійний магніт падає крізь замкнуте металеве кільце. Чи падатиме він з прискоренням вільного падіння? Чи зміниться відповідь, якщо кільце буде розрізаним? 4. На стальне осердя електромагніту надіте алюмінієве кільце (мал. 15). Чому під час вмикання струму кільце підстрибує вгору?



Мал. 13



Мал. 14



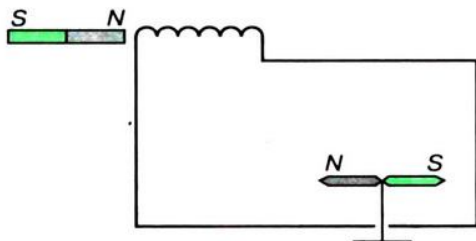
Мал. 15

## Вправа 2

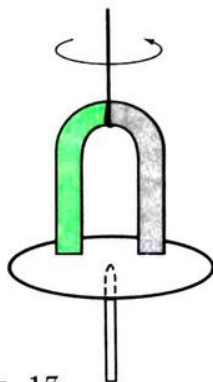
1. Як рухати магніт (мал. 16), щоб повернути стрілку північним полюсом до спостерігача?

2. У короткозамкнуту котушку вставляють постійний магніт: один раз швидко, а другий — повільно. Чи однаковий заряд пройде котушкою та чи однакова кількість теплоти виділяється в ній в обох випадках?

3. Підвісьте магніт на нитці над диском з алюмінієвої фольги (мал. 17), здатним обертатися навколо осі, яка проходить через його центр. Розкрутіть магніт. Чому диск обертається і в який бік?



Мал. 16

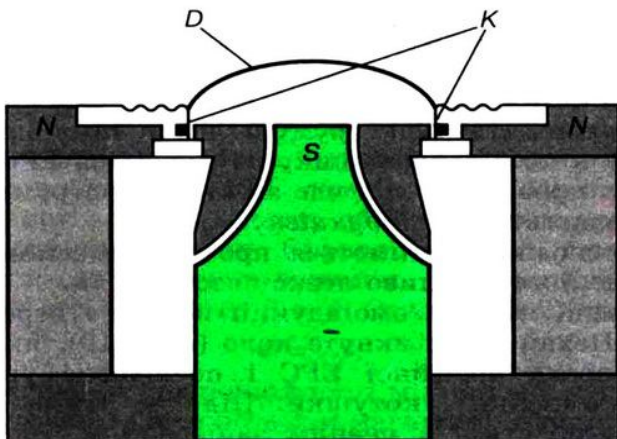


Мал. 17

## § 5 — ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ МІКРОФОН

Тісний взаємозв'язок і взаємообумовленість змінних електричних і магнітних полів має не лише принципове, а й велике практичне значення. Так, відкриття закону електромагнітної індукції уможливило створення потужних генераторів електричного струму, систем передачі електроенергії (проводами і без проводів) на величезні відстані. Явище електромагнітної індукції дає змогу прискорювати заряджені частинки в кільцевих вакуумних камерах, розміщених у швидкозмінних магнітних полях.

На використанні явища електромагнітної індукції ґрунтується дія багатьох пристроїв для передачі людської мови, музики та зображень на відстань. Зокрема, це явище використане в будові і дії електромагнітного мікрофона для систем звукопідсилення і звукозапису. Електродинамічні мікрофони бувають двох типів — котушкового і стрічкового. Серед високоякісних студійних мікрофонів найпоширеніші з рухомою котушкою (мал. 18). У них з діафрагмою  $D$ , яка коливається під дією змінного звукового тиску, зв'язана котушка  $K$ , розміщена в кільцевому проміжку сильного магніту  $NS$ .



Мал. 18

Як же працює цей мікрофон? Якщо на діафрагму не падають звукові хвилі, вона, а разом з нею і котушка, не рухаються в магнітному полі і у витках котушки не збуджується індукційний струм. Звукові хвилі, падаючи на діафрагму, спричиняють її коливання. Разом з діафрагмою в проміжку магніту перпендикулярно до ліній його індукції коливається котушка і в її витках виникає ЕРС та індукційний струм. Збуджувана в котушці ЕРС індукції змінюватиметься як за значенням, так і за знаком. Таким чином, звукові хвилі в мікрофоні збуджують змінний струм, який передається проводами до звукопідсилювальної і звукозаписуючої апаратури та апаратури, в якій коливання електричного струму знову перетворюються в звукові.

Електродинамічний мікрофон з рухомою котушкою має порівняно невеликі розміри, надійний в експлуатації.

В електродинамічному мікрофоні стрічкового типу роль діафрагми і в той же час рухомого провідника в магнітному полі відіграє легенька, дуже тонка, гофрована металева стрічка, яка вільно висить між полюсами сильного магніту. Звуковий тиск, діючи на стрічку, змушує її коливатись у магнітному полі і в стрічці індукується ЕРС індукції. Стрічковий мікрофон конструктивно простий, має добру частотну характеристику, проте розміри його порівняно великі і форма не зовсім зручна.

## § 6 — САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ

Явище електромагнітної індукції спостерігається у всіх випадках, коли змінюється магнітний потік через контур.

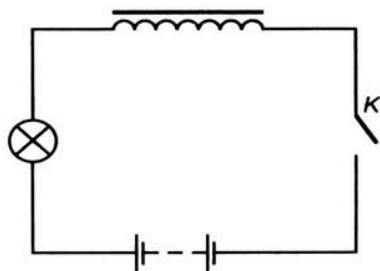


Однак провідник зі струмом перебуває у власному магнітному полі і якщо це поле змінюється, в провіднику має збуджуватися ЕРС індукції. Власне магнітне поле такого провідника залежить від сили струму в ньому, тому в разі зміни сили струму в колі в провіднику збуджується ЕРС. Виникнення ЕРС в провіднику під час зміни сили струму в ньому самому називається *самоіндукцією*.

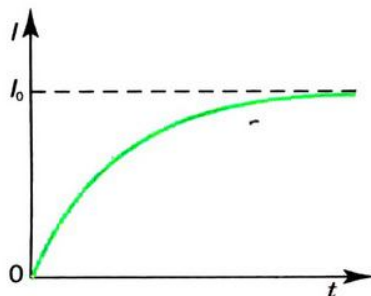
Далі в основному йтиметься про явище самоіндукції в котушках, де його особливо легко спостерігати.

В існуванні явища самоіндукції неважко переконатися на досліді. Нехай є розімкнуте коло (мал. 19), яке складається з джерела постійної ЕРС і послідовно увімкнутих вимикача, лампочки і котушки. Під час замикання кола лампочка загоряється з певним запізненням, що пояснюється виникненням в котушці ЕРС самоіндукції. За правилом Ленца в разі зростання сили струму в колі напруженість вихрового електричного поля спрямована проти напруженості електричного поля джерела. Отже, в цьому випадку самоіндукція перешкоджає зростанню сили струму в колі і певне значення сили постійного струму  $I_0$  встановлюється в колі не відразу, а поступово, з часом (мал. 20).

Для спостереження явища самоіндукції під час розмикання кола зручно скористатися схемою, показаною на малюнку 21. При розмиканні кола вимикачем  $K$  залишається замкнутим коло котушки і лампочки. Оскільки сила струму в котушці під час розмикання вимикача швидко зменшується (мал. 22), в ній виникає ЕРС самоіндукції, яка сповільнює швидкість зменшення сили струму. Котушка на певний час стає джерелом енергії, яке підтримує силу струму в лампочці. В момент розмикання кола сила струму в лампочці спадає до нуля і, змінивши напрям, стрибком зростає до значення, яке може значно перевищити силу струму в лампочці до розмикання. Тому лампочка в момент розмикання кола може яскраво спалахнути і навіть перегоріти.



Мал. 19



Мал. 20

Струми самоіндукції можна спостерігати у вигляді іскри або навіть дуги між проводом і трамвайною дугою, між ножами рубильників під час їх розмикання тощо.

Оскільки самоіндукція — окремий випадок явища електромагнітної індукції, закон Фарадея (3.2) можна застосовувати і для визначення ЕРС самоіндукції. Пригадаємо, що магнітний потік через площу, обмежену контуром струму, пропорційний силі струму. Справді,  $\Phi = BS$ , а магнітна індукція поля, створюваного струмом, пропорційна у всіх випадках силі струму, тобто  $B \propto I$ . Отже, можна твердити, що

$$\Phi = LI, \quad (6.1)$$

де  $L$  — коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі і створюваним нею потоком магнітної індукції через цей контур.

Коефіцієнт  $L$  називається *індуктивністю провідника*, або його *коефіцієнтом самоіндукції*. Індуктивність провідника в даному середовищі визначається його розмірами і формою. Індуктивність прямолінійного провідника незначна, проте вона зростає, якщо з нього зробити виток. Індуктивність котушки зростає пропорційно кількості її витків.

Запишемо формулу для обчислення ЕРС самоіндукції:

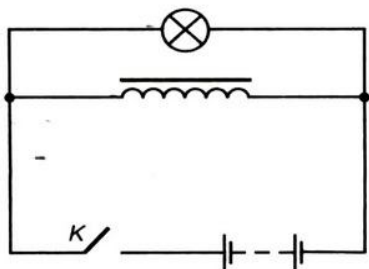
$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Якщо форма контуру не змінюється,  $L = \text{const}$  і тоді

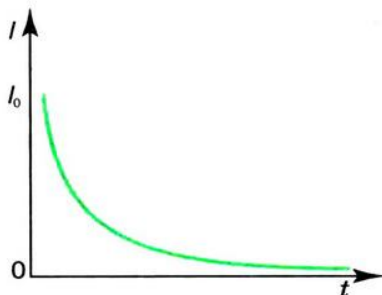
$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (6.2)$$

Таким чином, ЕРС самоіндукції в колі пропорційна швидкості зміни сили струму в цьому колі.

Якщо  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 1$ ,  $|\mathcal{E}_c| = L$ , тобто індуктивність — це фізична



Мал. 21



Мал. 22



величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с.

За одиницю індуктивності в СІ приймають генрі (Гн). З (6.2) видно, що генрі — це індуктивність провідника, в якому при зміні сили струму на 1 А за 1 с виникає ЕРС самоіндукції 1 В:

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Індуктивність провідника можна обчислити за (6.2), вимірявши на досліді величини  $\mathcal{E}_c$ ,  $\Delta I$  і  $\Delta t$ .

Індуктивність контуру можна розглядати як міру його інертності відносно змін сили струму в котушці.

ЕРС самоіндукції, яка виникає під час замикання і розмикання кола, може бути в деяких випадках досить значною. Чим більша індуктивність кола, тим більша ЕРС і сила струму самоіндукції. Ось чому у разі вимикання рубильників, які розмикають електричні кола з потужними електромагнітами, електродвигунами, трансформаторами та іншими пристроями з великою індуктивністю, між їх ножами пролітає електрична іскра, яка іноді може перейти в дуговий розряд і зіпсувати рубильник. Причиною цього є виникнення в колі настільки великої ЕРС самоіндукції, що між ножами рубильника пробивається повітряний проміжок. Для розмикання таких кіл користуються масляними вимикачами і вживають інших застережних заходів. У лініях електропередач, навантажених великою індуктивністю, для екстреного вимикання передбачені спеціальні автоматичні вимикачі, розміщені в окремих приміщеннях без людей і забезпечених іскрогасними пристроями. Під час вимикання потужних електродвигунів для запобігання виникненню великих ЕРС самоіндукції часто спочатку зменшують силу струму в колі, а потім повністю вимикають струм. З цієї ж причини не можна подачу електроенергії у великому цеху, де працює багато верстатів, вимикати загальним рубильником. Слід спочатку вимкнути верстати, а потім вимкнути загальний рубильник, інакше може виникнути небезпека пробивання ізоляції обмоток електродвигунів.

- ? 1. В який момент іскрить рубильник: під час замикання чи розмикання кола? Чому? 2. Неонову лампу, розраховану на 127 В, вмикають паралельно обмотці електромагніту переривного пристрою. Переривник працює від акумуляторної батареї. Поясніть, чому неонові лампи загоряються, хоча напруга батареї всього 4,5 В. 3. Чому відмикання від мережі живлення потужних електродвигунів здійснюють плавно і повільно за допомогою реостата? 4. Правилами техніки безпеки забороняється



виконувати монтажні перемикання в електричних колах, коли вони перебувають під напругою 30 В. Чому таке перемикання особливо небезпечне, якщо в коло увімкнуті котушки індуктивності (трансформатори, дроселі тощо)?

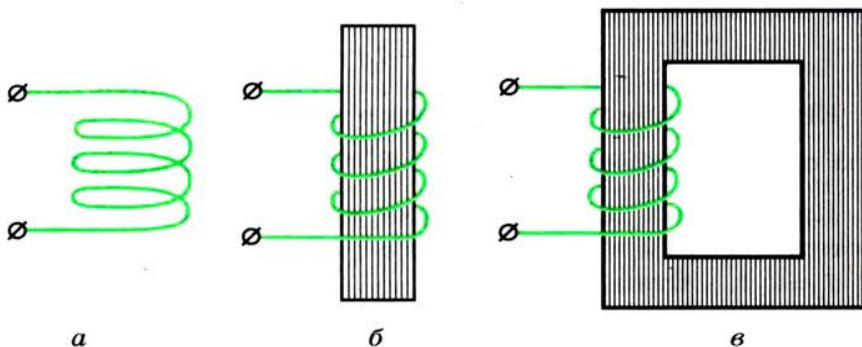
### Вправа 3

1. У котушці індуктивністю  $L = 0,4$  Гн виникає ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E}_c = 20$  В. Визначте середню швидкість зміни сили струму в котушці.

2. Середнє значення ЕРС самоіндукції, яка виникає в соленоїді у разі зміни сили струму в ньому на  $\Delta I = 6$  А за  $\Delta t = 0,2$  с, дорівнює  $\mathcal{E}_c = 3$  В. Визначте індуктивність соленоїда.

3. Котушка діаметром  $d = 0,4$  м міститься в змінному магнітному полі. Під час зміни індукції поля на  $\Delta B = 127,4$  Тл за  $\Delta t = 2$  с в обмотці котушки збуджується ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E}_c = 25$  В. Скільки витків має котушка?

4. Кількість витків у трьох обмотках, а також довжина їх провідів однакова (мал. 23). Який з цих провідників має найбільшу і який найменшу індуктивність?



Мал. 23

## § 7 — ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Магнітне поле нерозривно зв'язане з електричним струмом: воно виникає, змінюється і зникає зі зміною сили струму. Отже, під час замикання кола частина енергії джерела струму завжди витрачається на створення магнітного поля. Тому воно повинно мати енергію, що дорівнює роботі, витраченій струмом на його створення. Саме енергією магнітного поля пояснюється явище електромагнітної індукції, зокрема самоіндукції. У разі замикання кола з джерелом постійної ЕРС сила струму не відразу досягає максимального значення

(яке визначається законом Ома), а певний час зростає, оскільки частина енергії джерела витрачається в цей час на створення магнітного поля. Досягнувши максимального значення, сила струму в колі не змінюватиметься. При цьому стає постійним і магнітне поле струму, а його енергія не змінюється. Джерело струму витрачає енергію лише на підтримання сталої сили струму, і ця частина енергії перетворюється у внутрішню енергію провідників, тобто витрачається на їх нагрівання. Під час розмикання кола магнітне поле струму зникає, однак, згідно із законом збереження енергії, його енергія перетворюється в енергію струму самоіндукції, який підсилює струм, що вимикають.

Таким чином, **явище електромагнітної індукції ґрунтується на взаємних перетвореннях енергій електричного струму і магнітного поля.**

Нехай у котушці з індуктивністю  $L$  сила струму зростає від нуля до максимального значення  $I$  за час  $\Delta t$ . Під час зростання сили струму в колі джерело виконує роботу проти індукційного електричного поля, яке протидіє наростанню сили струму. Енергія створеного магнітного поля дорівнюватиме цій роботі, тобто

$$W_m = -A = -\mathcal{E}_i q = -\mathcal{E}_i I_0 \Delta t.$$

ЕРС індукційного електричного поля  $\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ . Оскільки сила струму змінюється від 0 до  $I$ , то  $\Delta i = I$  і тому  $\mathcal{E}_i = -L \frac{I}{\Delta t}$ .

Припустимо, що сила струму в колі рівномірно зростає протягом часу  $\Delta t$  від 0 до  $I$ , тоді середнє значення сили струму  $I_c = \frac{1}{2} I$ . Отже,

$$W_m = L \frac{I}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} I \Delta t = \frac{1}{2} L I^2. \quad (7.1)$$

Незважаючи на те, що під час виведення цієї формули було зроблено ряд спрощень, ми дістали точний вираз для енергії магнітного поля.

1. Електромагніт вмикають у коло постійного струму. Чому максимальна сила струму в колі встановлюється не відразу?
2. Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що затрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?

## ВИСНОВКИ

Під час будь-якої зміни потоку магнітної індукції через площу, обмежену замкнутим провідним контуром, у ньому виникає ЕРС індукції, що дорівнює за модулем швидкості зміни потоку магнітної індукції:  $|\mathcal{E}_i| = \left| -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ . Головним у явищі електромагнітної індукції є процес збудження змінним в часі магнітним полем вихрового електричного поля.

Індукційний струм у замкнутому контурі має такий напрям, що створений ним потік магнітної індукції через площу, обмежену контуром, прагне компенсувати ту зміну потоку магнітної індукції, яка викликає даний струм. У цьому полягає суть правила Ленца, яке є наслідком закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах.

Окремим випадком електромагнітної індукції є самоіндукція — виникнення ЕРС у провіднику, зумовлене зміною сили струму в цьому ж провіднику. ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в цьому ж колі:  $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ .

Магнітне поле котушки зі струмом має енергію:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2.$$



## МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ

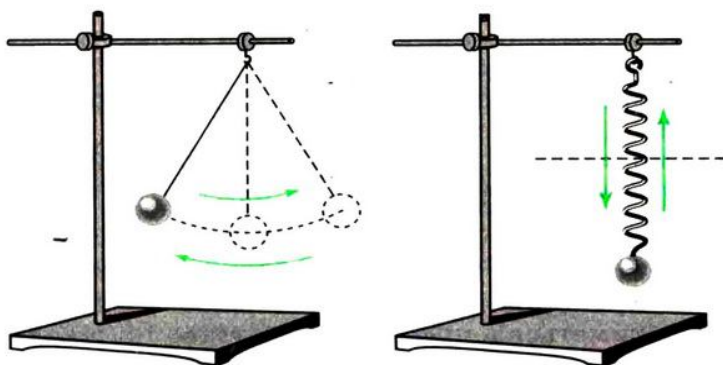
У техніці й повсякденному житті ми на кожному кроці стикаємося з коливальними рухами: коливаються мости під дією потягів і машин, які по них рухаються; коливаються (вібрують) оброблювані на токарних і фрезерних верстатах деталі; вібрає фундамент швидкохідної турбіни в такт з обертами -головного вала, погойдуються гілки дерев під дією вітру, коливається атом у кристалічній решітці тощо. Важлива особливість коливальних рухів — їх періодичність, тобто точна або наближена повторюваність руху тіл через рівні інтервали часу. Мінімальний інтервал часу, через який відбувається повторення руху тіла, називають *періодом коливань*  $T$ . Кількість коливань, здійснених за одиницю часу, називають *частотою коливань*  $\nu$ . Легко зрозуміти, що частота — величина, обернена до періоду:  $\nu = \frac{1}{T}$ . У фізиці й техніці широко використовується поняття *колової (циклічної) частоти*, що визначає кількість коливань, які відбуваються за  $2\pi$  секунд. Зв'язок між циклічною частотою  $\omega$ , частотою  $\nu$  та періодом коливань задається виразом:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Пристрої, в яких можуть здійснюватися коливання, називають *коливальними системами*. Будь-яка коливальна система має положення рівноваги. Нерухома система обов'язково перебуває в такому положенні. Сама по собі система не може вийти з положення рівноваги; для цього необхідний вплив зовнішньої сили.

## § 8 — ВІЛЬНІ ТА ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ

У коливальній системі, виведеній з положення рівноваги і залишеній саму собі, під дією внутрішніх сил виникають *вільні коливання*. Коливання тягарця, підвішеного на пружині чи на довгій нитці (мал. 24), — це приклад вільних коливань. Після виведення такої системи з положення рівно-

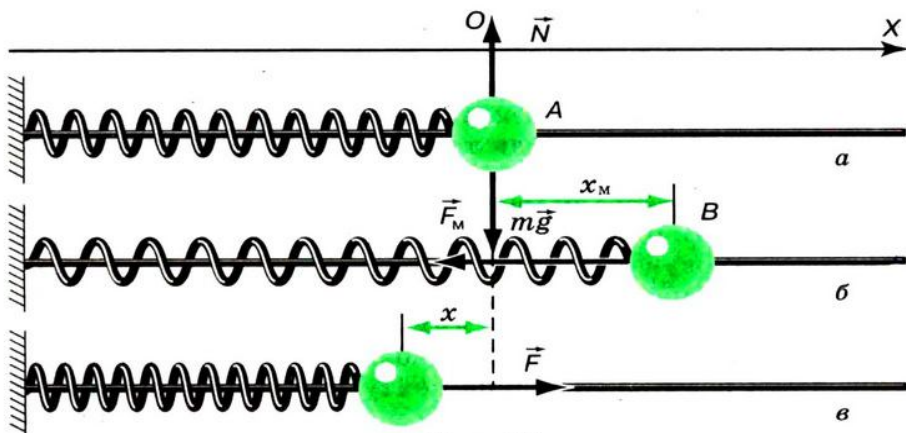


Мал. 24

ваги виникають умови, за яких тіла коливаються без впливу зовнішніх періодично змінних сил.

Коливання під дією зовнішніх сил, які періодично змінюються, називають *вимушеними коливаннями*. Вимушені коливання здійснюють поршень у циліндрі двигуна внутрішнього згоряння і ніж електробритви, паровий молот і голка швейної машини, струна гітари і фундамент швидкохідної турбіни, серце людини і кузов залізничного вагона, крила літака в польоті і різець стругального верстата тощо.

З'ясуємо, які властивості повинна мати система, щоб у ній могли виникнути вільні коливання, і за яких умов вони можуть виникнути. Розглянемо рух горизонтального пружинного маятника. Це пружина, один кінець якої жорстко закріплений, а на другому є кулька з наскрізним отвором (мал. 25). Вона може ковзати без тертя вздовж горизонтального стержня. В стані рівноваги (спокою) кулька перебуває в положенні *A* (мал. 25, *a*). Сила тяжіння кульки  $m\vec{g}$  компенсується реакцією



Мал. 25

стержня  $\vec{N}$ :  $m\vec{g} + \vec{N} = 0$ . Якщо відтягнути кульку вправо від положення рівноваги  $A$  до положення  $B$  (мал. 25, б) і потім відпустити її, то вона здійснюватиме коливання навколо положення рівноваги  $A$ .

З'ясуємо причину цих коливань. Зміщуючи кульку вправо, ми розтягуємо пружину на  $x_m$ , при цьому виникає сила пружності пружини  $\vec{F}$ , яка прагне повернути кульку до положення рівноваги. Ця сила згідно з законом Гука пропорційна деформації пружини і напрямлена вліво. Під дією сили  $\vec{F}$  кулька рухатиметься з прискоренням вліво і її швидкість зростатиме. Сила  $\vec{F}$  зменшуватиметься, оскільки зменшується деформація пружини. Досягнувши положення рівноваги  $A$ , кулька не зупиниться, хоча в цьому положенні на неї не діятиме сила (пружина не розтягнута); рухаючись по інерції, вона пройде положення рівноваги і почне стискати пружину. В результаті виникає сила пружності, яка напрямлена вже вправо і гальмує рух кульки (мал. 25, в). Ця сила, а отже, і напрямлене вправо прискорення зростають за модулем прямо пропорційно модулю зміщення  $x$  кульки відносно положення рівноваги. А швидкість зменшується доти, поки в крайньому лівому положенні не перетвориться на нуль. Після цього під дією сили пружності кулька почне рухатися з прискоренням вправо; по інерції вона знову пройде положення рівноваги і знову опиниться в  $B$ , здійснивши таким чином одне повне коливання. Далі все повторюватиметься.

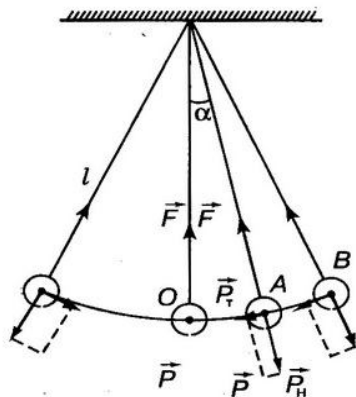
Отже, причинами коливань масивної кульки на пружині є сила пружності, яка виникає під час розтягу і стискання пружини, та інерція кульки.

Якби не існувало тертя, рух кульки не припинився б ніколи. Однак тертя (зокрема, опір повітря) є, причому напрям сили опору і під час руху кульки і вправо, і вліво весь час протилежний напрямку швидкості. Тому тертя гальмує рух кульки, і розмах її коливань поступово зменшується доти, поки рух не припиниться. Якщо тертя незначне, затухання стає помітним лише після того, як кулька здійснить багато коливань. І якщо нас цікавить рух кульки протягом не дуже великого інтервалу часу, затуханням її коливань можна нехтувати. В цьому випадку вплив сили опору на рух можна не враховувати.

Аналогічні процеси відбуваються під час коливань простого маятника — масивної кульки, підвішеної на довгій нитці. Якщо розміри кульки набагато менші за довжину нитки, цими розмірами можна нехтувати і розглядати кульку як матеріальну точку. Розтягом нитки також можна нехтувати, оскільки він дуже малий. Можна нехтувати і масою



нитки порівняно з масою кульки. Таким чином, замість реального фізичного маятника-кульки певного розміру на нитці, яка, звичайно, трохи деформується під час руху і має масу, можна розглядати просту модель: матеріальну точку, підвішену на нерозтяжній невагомій нитці. Така модель маятника називається *математичним маятником*. Підвішена на довгій тонкій нитці маленька кулька поводить себе практично так само, як і математичний маятник.



Мал. 26

Виведемо маятник з положення рівноваги  $O$  до точки  $B$  (мал. 26) і відпустимо його — він коливатиметься. Розглянемо причину цих коливань.

Коли маятник перебуває в спокої у положенні  $A$ , сила тяжіння кульки  $\vec{P}$  і сила пружності нитки  $\vec{F}$  діють на кульку під кутом одна до одної. Розкладемо силу тяжіння  $\vec{P}$  на дві складові: нормальну  $\vec{P}_n$ , напрямлену вздовж нитки, і тангенціальну  $\vec{P}_t$ , напрямлену перпендикулярно до нитки по дотичній до траєкторії кульки. Сила пружності нитки  $\vec{F}$  і складова  $\vec{P}_n$  сили тяжіння перпендикулярні до швидкості маятника і надають йому так званого *нормального*, або *доцентрового*, прискорення, напрямленого до центра дуги кола — траєкторії маятника. Робота цих сил дорівнює нулю, і тому згідно з теоремою про кінетичну енергію вони не змінюють модуля швидкості маятника. Їх дія зумовлює лише безперервну зміну напрямку швидкості, так що в будь-який момент часу швидкість напрямлена по дотичній до дуги кола.

Тангенціальна складова  $\vec{P}_t$  сили тяжіння створює так зване *тангенціальне прискорення*, яке характеризує зміну модуля швидкості. Під дією складової  $\vec{P}_t$  маятник починає рухатися по дузі кола вниз і швидкість його зростає. В міру руху маятника тангенціальна складова  $\vec{P}_t$  сили тяжіння, напрямлена до положення рівноваги, зменшується і в момент, коли маятник проходить через положення рівноваги, вона перетворюється на нуль. Внаслідок інертності маятник рухатиметься далі, піднімаючись угору. При цьому складова  $\vec{P}_t$  вже буде напрямлена проти швидкості. Тому швидкість маятника зменшується, і тим швидше, чим більший кут між ниткою і вертикаллю. Адже із збільшенням кута ця складо-

ва сили тяжіння зростає. В момент зупинки маятника у верхній точці його тангенціальне прискорення максимальне і напрямлене в бік положення рівноваги. Далі швидкість маятника збільшується, і він знову рухається до положення рівноваги. Пройшовши його, він повертається в початкове положення, здійснивши одне повне коливання. Звичайно, це можливо тоді, коли сила опору незначна і її роботою протягом невеликого інтервалу часу можна нехтувати. Далі все знову повторюється.

Розглянувши різні приклади вільних механічних коливань, можна виділити умови їх виникнення:

1) сили, які діють на тіло, або хоча б одна з них, мають залежати від координат. В одному певному положенні тіла у просторі, яке називають положенням рівноваги, рівнодійна всіх сил, що діють на тіло, має дорівнювати нулю. Якщо тіло вивести з положення рівноваги, рівнодійна всіх сил не повинна дорівнювати нулю і бути напрямленою до положення рівноваги;

2) сили тертя в коливальній системі мають бути мізерно малими.

?

1. Що таке коливальна система? В якому положенні перебуває коливальна система в спокої? 2. Які коливання називають вільними? Наведіть приклади вільних коливань, бажано не згаданих у тексті. 3. Які коливання називають вимушеними? Навести приклади таких коливань. 4. За яких умов у коливальній системі виникають вільні коливання?

## § 9 — РІВНЯННЯ РУХУ ТІЛА, ЯКЕ КОЛИВАЄТЬСЯ ПІД ДІЄЮ СИЛ ПРУЖНОСТІ І ТЯЖІННЯ

Ми розглянули якісно умови виникнення вільних механічних коливань під дією сил пружності й тяжіння. Кількісно процес таких коливань можна описати, скориставшись законами Ньютона. Нагадаємо, що згідно з другим законом Ньютона добуток маси тіла  $m$  на прискорення  $\vec{a}$  дорівнює рівнодійній  $\vec{F}$  усіх прикладених до тіла сил:

$$m\vec{a} = \vec{F}.$$

Запишемо рівняння руху для пружинного маятника (див. мал. 25). Рух кульки маятника здійснюється під дією сили пружності  $\vec{F}$  пружини. Ця сила завжди пропорційна зміщенню кульки від положення рівноваги і напрямлена до

нього. Зміщення ж  $x$  кульки відлічується від положення рівноваги, тобто напрямлене протилежно силі. Отже,

$$F = -kx,$$

де  $k$  — жорсткість пружини.

Рівняння руху кульки запишеться як  $ma = -kx$ , звідки

$$a = -\frac{k}{m}x. \quad (9.1)$$

Оскільки маса  $m$  і жорсткість  $k$  є сталими величинами, їх відношення  $\frac{k}{m}$  теж є сталою величиною. Ми дістали рівняння коливань тіла під дією сили пружності. Воно дуже просте: прискорення тіла завжди прямо пропорційне зміщенню і протилежно йому напрямлене.

Найважливішим є те, що такі самі рівняння описують вільні коливання в різних коливальних системах.

Вище ми встановили, що значення сили, яка повертає підвішену на нерозтяжній нитці кульку до положення рівноваги, залежить від кута відхилення маятника від цього положення. Встановимо дану залежність математично.

Ми знаємо, що у разі відхилення маятника від положення рівноваги на маятник діє повертальна сила — тангенціальна складова  $\vec{P}_T$  сили тяжіння, надаючи кульці маятника тангенціального прискорення  $\vec{a}_T$ . Тангенціальна складова  $\vec{P}_T$  завжди напрямлена в бік, протилежний збільшенню зміщення кульки маятника. Зміщення кульки від положення рівноваги можна характеризувати кутом  $\alpha$  відхилення нитки від вертикалі і довжиною дуги  $s = OA$  (див. мал. 26), взятої із знаком «+», якщо кулька зміщується від положення рівноваги  $O$  вправо, і зі знаком «-», якщо вона зміщується вліво. Очевидно, що  $s = \alpha l$ .

Тангенціальна складова сили тяжіння

$$P_T = -P \sin \alpha = -mg \sin \alpha.$$

Значення тангенціальної складової взято із знаком «-» тому, що  $P_T$  і  $\alpha$  мають протилежні знаки.

Згідно з другим законом Ньютона  $ma_T = P_T$ ,

або  $ma_T = -mg \sin \alpha$ , звідки  $a_T = -g \sin \alpha$ .

Досі ми вважали, що кути відхилення нитки маятника від вертикалі можуть бути якими завгодно. Надалі розглядатимемо випадки, коли відхилення маятника від положення рівноваги настільки малі ( $3-5^\circ$ ), що синус кута можна вважати пропорційним значенню самого кута. Якщо кут вимірювати в радіанах,  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Отже,

$$a_T = -g\alpha.$$



Підставивши замість  $\alpha$  вираз  $\frac{s}{l}$ , дістанемо

$$a_{\tau} = -\frac{g}{l}s. \quad (9.2)$$

Це рівняння збігається з рівнянням руху кульки на пружині (9.1). Тут лише замість координати  $x$  стоїть довжина дуги  $s$ , а коефіцієнт пружності залежить не від жорсткості пружини і маси кульки, а від прискорення вільного падіння і довжини нитки. Однак знову прискорення (тепер тангенціальне) прямо пропорційне зміщенню (визначається дугою) кульки від положення рівноваги. Таким чином, ми дійшли важливого висновку, що *рівняння руху кульки на пружині і маятника однакові*. Зміщення кульки на пружині і маятника від положень рівноваги змінюються з часом за одним і тим самим законом, хоч сили, які зумовлюють коливання, мають різну фізичну природу.

## § 10 — ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

Знаючи, як пов'язані між собою прискорення і координата тіла, яке коливається, можна за допомогою математичного аналізу знайти залежність координати від часу. Ми ж встановимо вид функції  $f(t)$ , яка виражає залежність зміщення  $x$  від часу  $t$ , розглядаючи зв'язок між коливаннями маятника і рухом кульки по колу.

На малюнку 27 показано коливання кульки, яка ковзає вздовж осі  $OX$ , під дією сили пружності пружини  $F = -kx$ . Коливання кульки можна розглядати як проекцію колового руху кульки на вісь  $OX$ . Нехай  $A$  — рухомий радіус допоміжного кола, який відповідає найбільшому відхиленню кульки від положення рівноваги. Якщо обертати кульку по колу з такою кутовою швидкістю  $\omega$ , щоб проекція її руху збігалася з рухом кульки під дією сили пружності пружини, то її миттєве положення визначиться рівністю

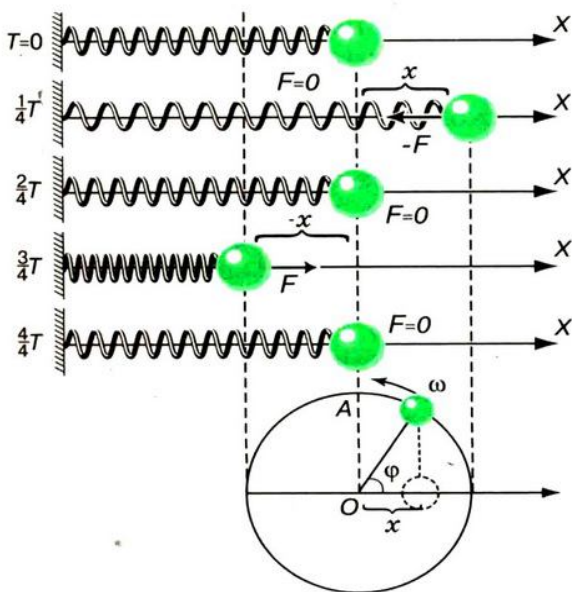
$$x = A \cos \varphi.$$

Під час обертання рухомого радіуса із сталою кутовою швидкістю  $\omega$  кут  $\varphi$  між радіусом і віссю  $OX$  зростає прямо пропорційно часу:

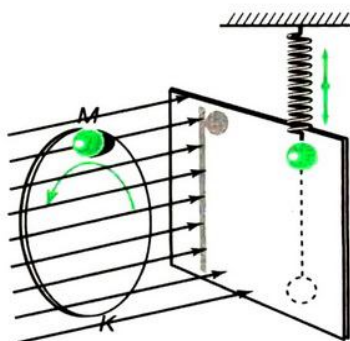
$$\varphi = \omega t.$$

Проекція  $x$  рухомого радіуса на вісь  $OX$  змінюватиметься за законом:

$$x = A \cos \varphi = A \cos \omega t. \quad (10.1)$$



Мал. 27



Мал. 28

Аналогічно можна також порівняти коливання тіні кульки, закріпленої на диску, який обертається із сталою кутною швидкістю  $\omega$ , і кульки пружинного маятника (мал. 28). Можна дібрати таку швидкість обертання диска, що рух тіні кульки на екрані повністю збігатиметься з рухом кульки пружинного маятника. Так само можна показати, що проекція рухомого радіуса диска  $OM$  на вертикальний діаметр змінюватиметься за законом:

$$x = A \sin \varphi = A \sin \omega t. \quad (10.2)$$

Проекції рухомого радіуса в обох описаних випадках можна розглядати як координати кульки, яка обертається по колу.

Таким чином, в зазначених випадках координата тіла, яке здійснює вільні коливання, змінюється з часом за законом синуса чи косинуса.

**Періодичні зміни фізичної величини залежно від часу, які відбуваються за законом синуса або косинуса, називають гармонічними коливаннями.**

Гармонічно можуть змінюватися різні фізичні величини: координата, швидкість, прискорення тощо. Спочатку розглядатимемо гармонічні коливання координати. Надалі ознайомимось з гармонічними змінами інших величин.

Важливою характеристикою коливального руху є *амплітуда*. Амплітудою гармонічних коливань називають модуль

найбільшого зміщення тіла (коливальної системи) від положення рівноваги. На малюнку 26 амплітудою коливання маятника є дуга  $OB$ , а на малюнках 27 і 28 — зміщення, що дорівнює радіусу відповідного кола.

Амплітуда може мати різні значення залежно від того, наскільки ми зміщуємо тіло від положення рівноваги в початковий момент часу, і від того, яка швидкість надається при цьому тілу. Тобто амплітуда визначається початковими умовами. Вона дорівнює множинику при синусоїдальній (10.2) чи косинусоїдальній (10.1) функції, яка відповідає даному коливальному процесу.

У гармонічних коливаннях координати коливного тіла, його швидкість і прискорення також змінюються гармонічно. Швидкість і прискорення тіла в коливальному русі теж можна визначати як проекції швидкості і прискорення тіла, яке рівномірно обертається по колу. Модуль швидкості руху кульки по колу  $v$  весь час сталий, а проекція вектора швидкості (або швидкість руху проекції кульки на вертикальний діаметр) з часом змінюється (мал. 29). Вона дорівнює  $v$  лише в точці  $O$ , а в усіх інших менша за  $v$  і перетворюється на нуль у точках  $A$  і  $B$ . Швидкість  $v_0 = \omega r$  тіла, що обертається, в точці  $M$  утворює з діаметром  $AB$  кут  $\varphi = \omega t$ , тоді її проекція на цей діаметр дорівнює:

$$v = \omega r \cos \varphi = \omega r \cos \omega t = v_0 \cos \omega t. \quad (10.3)$$

Таким чином, миттєва швидкість у гармонічних коливаннях змінюється з часом гармонічно. Найбільше значення  $v_0 = \omega r$  вона має в момент проходження положення рівноваги. Нульове значення швидкості у гармонічному коливанні має тіло в положенні максимального відхилення від положення рівноваги, коли  $\omega t = \frac{1}{2}\pi$ .

Прискорення  $a_0 = \omega^2 r$  у проекції на діаметр  $AB$  має напрям, протилежний напрямку зміщення  $x$  (див. мал. 29), тому миттєве значення прискорення

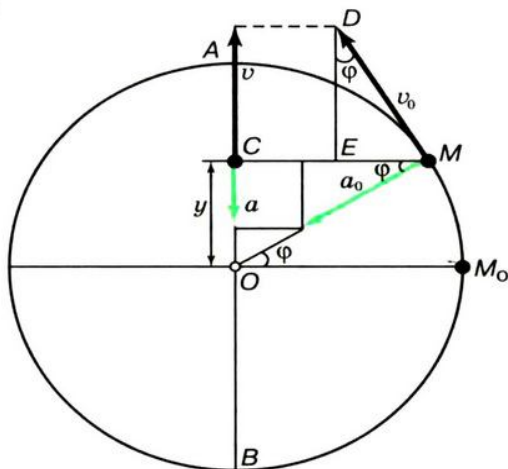
$$a = -\omega^2 r \sin \varphi = -\omega^2 r \sin \omega t = -a_0 \sin \omega t. \quad (10.4)$$

Однак  $r \sin \omega t = x$ , тому

$$a = -\omega^2 x. \quad (10.5)$$

Таким чином, прискорення у гармонічних коливаннях тіла змінюється, як і координата, гармонічно (за законом синуса), однак у будь-який момент часу прискорення і координата мають протилежні знаки. Прискорення і координата одночасно стають максимальними за модулем, однак мають протилежні знаки. Якщо збільшувати зміщення (координата





Мал. 29

ту) тіла, коливання сповільнюється, а якщо зменшувати зміщення, то прискорюється. В момент досягнення зміщенням найбільшого додатного значення прискорення набуває найбільшого від'ємного значення і навпаки.

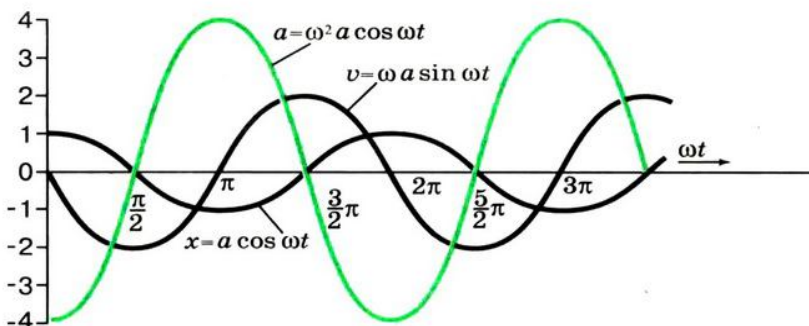
З'ясуємо зміст величини  $\omega$  в гармонічному коливанні (в коливаннях це вже, звичайно, не кутова швидкість). Через інтервал часу, який дорівнює періоду  $T$ , тобто при збільшенні аргументу синуса чи косинуса в рівняннях (10.4) і (10.3) на  $\omega T$ , рух повторюється і синус чи косинус набуває попереднього значення. А з курсу математики ви знаєте, що період синуса (косинуса) дорівнює  $2\pi$ .

Отже, величина  $\omega$  — це число коливань тіла, але не за секунду, а за  $2\pi$  секунд. Її називають *коловою* (або *циклічною*) *частотою*. Частоту вільних коливань називають *власною частотою* коливальної системи.

- ?
1. Які коливання називають гармонічними? 2. Як пов'язані прискорення і координата у гармонічних коливаннях? 3. Як змінюється з часом швидкість у гармонічних коливаннях?

## § 11 — ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ КОЛИВАНЬ

Вивчення законів коливань полегшується в багатьох випадках побудовою *графіків* коливань, тобто малюнків, які дають наочне уявлення про характер коливань залежно від часу. Дістати такий графік можна побудовою за точками графіка функції (10.1) — (10.4). Для цього на горизонтальній осі в обраному масштабі відкладають час або про-

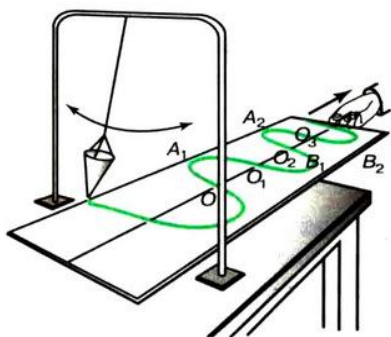


Мал. 30

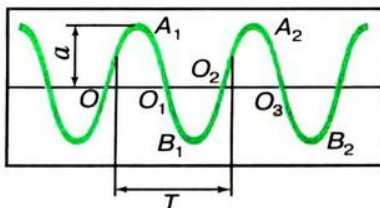
порційне йому значення  $\omega t$ , виражене в радіанах, а на вертикальній осі — значення зміщення, координати, швидкості, прискорення тощо. Отримані криві залежно від закону коливання відповідно є синусоїдами чи косинусоїдами.

На малюнку 30 показано графіки зміщення (координати), швидкості і прискорення тіла, що коливається. Слід пам'ятати, що ці графіки зображають залежність зміни відповідних величин від часу, а не їх зміни у просторі.

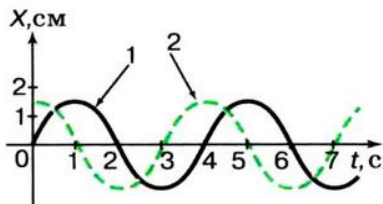
Графік коливання можна записати реєструючим приладом. Графік коливань маятника можна дістати зовсім просто. Для цього до тонкої довгої нитки замість суцільного тягарця підвісимо лійку, заповнену дрібним піском (мал. 31). Нижній край лійки має невеликий отвір. Наповнимо лійку піском і закриємо випускний отвір. Приготуємо паперову стрічку, вкриту шаром клею. Відхилимо маятник так, щоб він здійснював коливання у площині рамки і рівномірно переміщатимемо стрічку в напрямі, перпендикулярному до площини коливання маятника. Падаючий пісок запише на стрічці синусоїду (мал. 32).



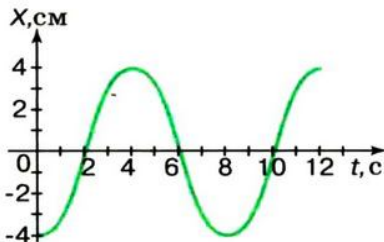
Мал. 31



Мал. 32



Мал. 33



Мал. 34

Записана падаючим піском синусоїда дає можливість судити про період коливання  $T$ , тобто про тривалість одного повного коливання маятника. Мірою періоду може слугувати відрізок  $OO_2$  на горизонтальній осі (див. мал. 31), яку називатимемо *віссю часу*. Неважко помітити, що за той час, поки паперова стрічка пройшла шлях  $OO_2$ , маятник здійснив одне повне коливання.

Припустимо, що стрічка рухається зі швидкістю 10 см/с. Отже, стрічка проходить 1 см за 0,1 с. Якщо відрізок  $OO_2$  має довжину 16 см, стрічка пройшла цю відстань за 1,6 с. За цей час маятник здійснив одне повне коливання, отже, період коливання дорівнює 1,6 с. Щоб користуватися графіком коливання, слід знати масштаб часу.

Способів записування коливань у фізиці опрацьовано дуже багато. Найпоширеніший сучасний прилад для вивчення коливань — електронний осцилограф, із застосуванням якого ви ознайомитеся пізніше, вивчаючи електричні коливання.

**?** Визначте амплітуди і періоди гармонічних коливань, графіки яких зображені на малюнках 33 і 34.

## § 12 — ФАЗА КОЛИВАНЬ

Ми ознайомилися з основними величинами, які характеризують гармонічні коливання: амплітудою коливань  $X_m$  (або  $A$ ), періодом  $T$ , частотою коливань  $\nu$  і циклічною частотою  $\omega$ . Залишається розглянути ще одну важливу величину — *фазу*.

Рівняння (10.2), (10.3) і (10.4) дають змогу визначити миттєві значення координати, швидкості і прискорення гармонічного коливання тоді, коли час відлічується від моменту проходження коливним тілом положення рівноваги. Про два коливання однакової амплітуди й частоти, під час яких коливні точки не одночасно досягають максимального відхи-



лення, кажуть, що вони мають різні фази. З'ясуємо, що ж таке фаза коливання.

Згідно з рівняннями (10.2), (10.3) і (10.4) для заданої амплітуди гармонічних коливань координата, швидкість чи прискорення коливного тіла в будь-який момент часу однозначно визначаються аргументом синуса чи косинуса  $\varphi = \omega t$ . Аргумент, що стоїть під знаком синуса чи косинуса, називають фазою коливань, які описуються цими функціями. Фаза визначає для заданої амплітуди стан коливальної системи в будь-який момент часу.

Оскільки  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , то  $\varphi = \omega t = 2\pi \frac{t}{T}$ . Відношення  $\frac{t}{T}$  показує, яка частина періоду минула з моменту початку коливань. Будь-якому значенню часу, вираженому в частках періоду, відповідає значення фази, виражене в радіанах. Так, через час  $t = \frac{1}{4}T$  (чверть періоду)  $\varphi = \frac{1}{2}\pi$ , через півперіоду  $\varphi = \pi$ , після цілого періоду  $\varphi = 2\pi$  і т. д.

Розглянемо, як записується рівняння гармонічного коливання тіла, якщо відлік часу коливання починається в момент найбільшого зміщення тіла. Згідно з рівнянням (10.2), максимального зміщення тіло досягне за чверть періоду ( $\frac{1}{4}T$ ). Якщо час почати відлічувати від цього моменту, зміщення запишеться як

$$x = X_m \sin\left(t + \frac{1}{4}T\right) = X_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right) = X_m \cos \omega t. \quad (12.1)$$

Гармонічні коливання (10.2) і (12.1) відрізняються за фазою на  $\frac{1}{2}\pi$  або в одиницях часу на  $\frac{1}{4}T$ . Графіки цих гармонічних коливань показані на малюнку 33.

Для визначення різниці фаз двох коливань обидва ці коливання слід виразити через одну й ту саму тригонометричну функцію (або синус, або косинус).

Гармонічне коливання з довільною фазою описується рівнянням:

$$x = X_m \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ або } x = X_m \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де  $\omega t + \varphi_0$  — фаза коливання, а  $\varphi_0$  — початкова фаза, яка характеризує стан коливальної системи в початковий момент часу (якщо  $t = 0$ ).

Порівняємо рівняння (10.2), (10.3) і (10.4). Можна сказати, що гармонічне коливання швидкості випереджає коливання координати за фазою на  $\frac{1}{2}\pi$ , а гармонічне коливання прискорення випереджає зміни координати на  $\pi$  (перебува-

ють у протифазі). На малюнку 30 порівнюються графіки гармонічних коливань координати, швидкості й прискорення.

**Задача.** Координата тіла, виміряна в метрах, гармонічно змінюється з часом так:  $x = 0,05 \sin\left(\frac{1}{2} \pi t + \frac{1}{4} \pi\right)$ . Чому дорівнюють амплітуда коливань  $X_m$ , циклічна частота  $\omega$ , період  $T$ , частота  $\nu$  і початкова фаза коливань  $\phi_0$ ? Визначити фазу коливань  $\phi_t$  і координату коливного тіла  $x_t$  у момент часу  $t = 0,5$  с.

**Р о з в' я з а н н я.** Запишемо рівняння гармонічних коливань у загальному вигляді  $x = X_m \sin(\omega t + \phi_0)$  і порівняємо його з даним в умові. З порівняння видно, що  $X_m = 0,05$  м;  $\omega = \frac{1}{2} \pi \text{ с}^{-1}$ ,  $\phi_0 = \frac{1}{4} \pi$ . Період коливань визначимо із співвідношення

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ або } T = \frac{2\pi}{\frac{1}{2}\pi} = 4 \text{ с.}$$

Частота коливань

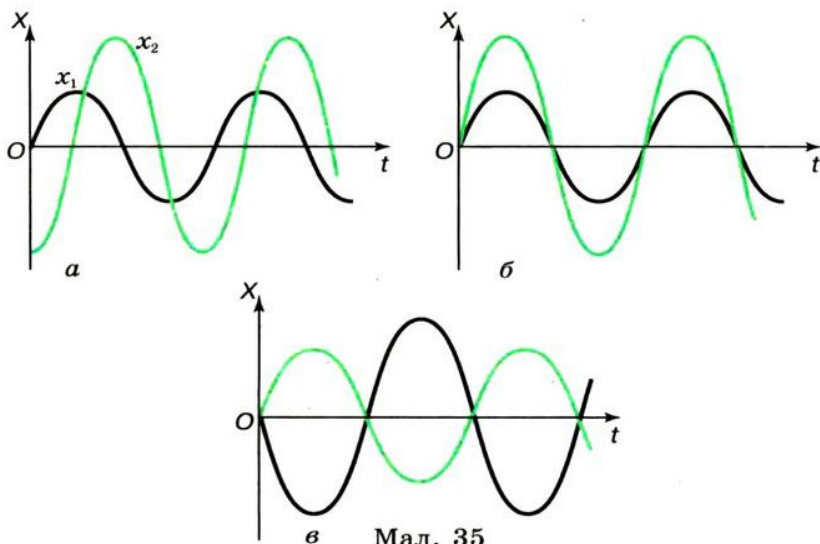
$$\nu = \frac{1}{T}, \text{ або } \nu = \frac{1}{4} \text{ с}^{-1} = 0,25 \text{ Гц.}$$

Якщо  $t = 0,5$  с, то

$$\phi_t = \frac{1}{2} \pi \cdot 0,5 + \frac{1}{4} \pi = \frac{1}{2} \pi;$$

$$x_t = 0,05 \sin \phi_t = 0,05 \sin \frac{\pi}{2} = 0,05 \text{ м.}$$

Значення  $x_t$  збігається з амплітудою коливань.



1. Яку фізичну величину називають фазою коливання? Що вона характеризує? 2. Порівняйте графіки гармонічних коливань однакової частоти (мал. 35). Що можна сказати про зсув фаз цих коливань?

## Вправа 4

1. Запишіть рівняння гармонічного коливання руху з амплітудою 0,02 м, періодом коливання 0,01 с і початковою фазою коливання, що дорівнює нулю.

2. Координата тіла, виміряна в метрах, змінюється з часом так:  $x = 0,02 \sin\left(\omega t + \frac{1}{4}\pi\right)$ . Чому дорівнює амплітуда коливання тіла? Визначте фазу коливання і координату тіла в моменти часу  $t = 0$ ,  $\frac{1}{2}T$  і  $\frac{1}{8}T$ .

## § 13 — МАТЕМАТИЧНИЙ МАЯТНИК

Ми встановили, що для невеликих відхилень маятника від положення рівноваги його коливання є гармонічними. Рівняння руху математичного маятника

$$a = -\frac{g}{l}x.$$

З іншого боку, розглядаючи рух проекції тіла, яке рівномірно обертається по колу, на діаметр кола, ми дістали для рівняння руху проекції вираз

$$a = -\omega^2 x.$$

Порівнюючи ці рівняння, дістанемо  $\omega^2 = \frac{g}{l}$ . Однак  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , тоді  $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$ , звідки

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Ми дістали формулу для визначення періоду коливань математичного маятника. Цю формулу було виведено і перевірено на дослідах голландським фізиком Христіаном Гюйгенсом (1629—1695), тому її часто називають *формулою Гюйгенса*.

Період коливань математичного маятника залежить лише від прискорення сили тяжіння в даному місці Землі і від довжини маятника. Період не залежить від амплітуди коливань і від маси підвішеного тягарця, що легко перевірити на дослідах з різними маятниками. Слід лише пам'ятати, що розміри тягарця мають бути малими порівняно з довжиною



підвісу і що малим має бути також кут відхилення маятника від вертикалі. Залежність періоду коливань математичного маятника від прискорення вільного падіння теж можна виявити. Для цього треба виміряти довжину маятника і експериментально визначити період його коливань.

Залежність періоду коливань математичного маятника від прискорення сили тяжіння використовується для точних вимірювань прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Річ у тому, що прискорення вільного падіння в різних місцях земної поверхні на одній і тій самій географічній широті є неоднаковим і залежить, хоча й незначно, від густини порід, з яких складаються верхні шари земної кори. Наприклад, у районі Кривого Рогу, де залягають залізні руди, прискорення сили тяжіння дещо більше за середнє значення для цієї широти. Навпаки, в районах газових і нафтових родовищ прискорення сили тяжіння виявляється дещо меншим за середнє для цієї широти. Тому за результатами вимірювань прискорення сили тяжіння можна виявити райони залягання корисних копалин — залізної руди, нафти, газу тощо.

Оскільки прискорення сили тяжіння на різних планетах різне, то й період коливань математичного маятника неоднаковий. Так, математичний маятник, період коливань якого на Землі становить 1 с, на Місяці коливатиметься з періодом 2,45 с, а на Юпітері, де прискорення сили тяжіння дорівнює  $25 \text{ м/с}^2$ , — з періодом  $\approx 0,63 \text{ с}$ .

**Задача 1.** Математичний маятник завдовжки 0,995 м здійснює 120 коливань за 4 хв. Визначити період коливань маятника і прискорення сили тяжіння для даної місцевості.

**Розв'язання.** Період дорівнює часові одного коливання, тобто  $T = \frac{t}{N}$ , або  $T = 2 \text{ с}$ . Прискорення сили тяжіння визначимо з формули періоду коливань маятника:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}, \text{ або } g \approx 9,81 \text{ м/с}^2.$$

**Задача 2.** Два математичних маятники почали коливатися одночасно. За час  $N_1 = 15$  коливань першого маятника, другий здійснив  $N_2 = 10$  коливань. Знайти відношення довжин маятників.

**Розв'язання.** Період дорівнює часу одного коливання, тобто  $T_1 = \frac{t_1}{N_1}$  і  $T_2 = \frac{t_2}{N_2}$ . З іншого боку, період мате-

матичного маятника  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ . Тому можна записати  $\frac{t_1}{N_1} = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}$  і  $\frac{t_2}{N_2} = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}$ .

За умовою задачі маятники здійснюють  $N_1$  і  $N_2$  коливань

за однаковий час, тобто  $t_1 = t_2 = t$ . Тоді попередні вирази можна записати

$$\frac{t}{N_1} = 2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g}} \quad \text{і} \quad \frac{t}{N_2} = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}.$$

Поділивши перше рівняння на друге, дістанемо:

$$\frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}, \quad \text{звідки} \quad \frac{l_1}{l_2} = \frac{N_2^2}{N_1^2} = \frac{4}{9}.$$

Ми знаємо, що рівняння гармонічних коливань пружинного маятника масою  $m$  має вигляд:  $a = -\frac{k}{m}x$ , де  $k$  — жорсткість пружини. З іншого боку, прискорення під час гармонічних коливань з циклічною частотою  $\omega$  визначається в будь-який момент часу виразом:  $a = -\omega^2 x$ . З цих двох виразів можна встановити зв'язок між циклічною частотою  $\omega$ , жорсткістю  $k$  тіла, яке деформується, і його масою  $m$ :

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \quad \text{або} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Врахувавши зв'язок між циклічною частотою  $\omega$  і періодом коливань  $T$ :  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , для періоду коливань пружинного маятника дістанемо:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ .

Гармонічні коливання пружинного маятника виникають під дією сили пружності. Період і частота такого маятника не залежать від прискорення сили тяжіння, а лише від його маси і жорсткості пружини. Даний маятник здійснюватиме коливання з однаковим періодом і частотою в будь-якій точці земної поверхні, на іншій планеті або в міжпланетному кораблі. Ця властивість пружинного маятника може бути, очевидно, використана для порівняння мас різних тіл. Для прикладу розглянемо принцип будови **м а с м е т р а** — приладу для вимірювання маси космонавта в умовах невагомості. Масметр — це коливальна система, яка складається з двох пружин і крісла, в якому закріплюється космонавт. Космонавт, сидючи в кріслі, виводить його з положення рівноваги і починає вільно коливатися. Частота коливань космонавта вимірюється спеціальним приладом — частотоміром:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \text{звідки} \quad m = \frac{k}{4\pi^2 \nu^2} = \frac{k}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{\nu^2}.$$

Оскільки  $\frac{k}{4\pi^2}$  — величина стала,  $m = \frac{C}{\nu^2}$ .

Шкалу частотоміра градуюють не в герцах, а в кілограмах.

1. Яка коливальна система називається математичним маятником? 2. За якої умови коливання математичного маятника можна вважати гармонічними? 3. Від чого залежить період коливань математичного маятника? 4. Як зміниться період коливання маятника, якщо його довжину подвоїти? потроїти? 5. Як і чому зміниться період коливання залізної кульки, підвішеної на нитці, якщо під нею помістити магніт?

## Вправа 5

1. Два математичні маятники однакової довжини відхилили від положення рівноваги в один і той самий бік так, що їх нитки утворили з вертикаллю кути  $4^\circ$  і  $2^\circ$ . Маятники відпустили одночасно і в цей момент увімкнули секундомір. Яким є числове значення початкової фази коливань кожного маятника? Чи одночасно маятники проходять положення рівноваги? Яка різниця фаз коливань маятників у довільний момент часу?

2. Дайте відповідь на запитання попередньої задачі, якщо маятники відхилили у протилежні боки від положення рівноваги.

3. Визначте довжину математичного маятника, період коливання якого на широті Одеси дорівнює  $1\text{ с}$  ( $g = 9,8077\text{ м/с}^2$ ).

4. За якою з формул:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g-a}}$  чи  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g+a}}$  слід обчислювати період коливань математичного маятника, підвішеного до стелі ліфта: 1) під час рівноприскореного піднімання; 2) під час рівносповільненого піднімання; 3) під час рівноприскореного опускання; 4) під час рівносповільненого опускання ліфта?

5. Космічний корабель під час умикання двигунів рухається з певним прискоренням. Яким чином, скориставшись математичним маятником, підвішеним у кабіні, можна визначити прискорення  $\vec{a}$  корабля?

## § 14 — ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАННЯХ

Щоб підвішене до пружини тіло почало коливатися, йому слід надати певної енергії. Потягнувши тіло вниз, змістимо його на відстань  $x$ . У цей час виконується робота  $A = \frac{1}{2}kx^2$  по збільшенню потенціальної енергії пружно розтягнутої пружини. Якщо тіло відпустити, воно рухатиметься до положення рівноваги, швидкість його зростатиме, і кінетична енергія збільшуватиметься за рахунок зменшення потенціальної енергії деформованої пружини. В положенні рівноваги ( $x = 0$ ) потенціальна енергія дорівнює нулю, зате кінетична енергія тіла максимальна. Таким чином, під час коливань тіла на пружині завжди відбуваються періодичні взаємні перетворення його кінетичної і потенціальної енергій.



Аналогічно відбуваються взаємні перетворення потенціальної і кінетичної енергій під час коливань математичного маятника. Під час коливань маятника його механічна енергія  $E$  є сумою потенціальної  $E_{\text{п}}$  і кінетичної  $E_{\text{к}}$  енергій кульки. Потенціальна енергія визначається висотою піднімання кульки над найнижчим рівнем, який відповідає положенню рівноваги.

Кінетична енергія, як завжди, дорівнює  $\frac{1}{2}mv^2$ .

Вважатимемо, що потенціальна енергія маятника в найнижчому положенні кульки дорівнює нулю. Тому, коли маятник проходить положення рівноваги, його механічна енергія складається з однієї лише кінетичної енергії. З іншого боку, коли маятник перебуває в крайніх положеннях, кулька має лише потенціальну енергію. Внаслідок симетрії руху маятника в обидва боки від положення рівноваги потенціальна енергія кульки в обох крайніх положеннях однакова.

Сила натягу нитки не виконує роботи з переміщення кульки, оскільки її напрям завжди перпендикулярний до вектора швидкості кульки. Тому до кульки можна застосувати закон збереження енергії тіла. Згідно з цим законом сума кінетичної і потенціальної енергій кульки у всіх точках її траєкторії однакова і дорівнює значенням потенціальної енергії в крайніх положеннях і значенню кінетичної енергії в положенні рівноваги. Зрозуміло, що все це справедливо лише для коливань за відсутності затухання (тобто за відсутності сил тертя).

Повна механічна енергія під час коливань тіла на пружині чи математичного маятника дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2.$$

І кінетична, і потенціальна енергії періодично змінюються в часі, причому в ті моменти, коли кінетична енергія максимальна, потенціальна енергія перетворюється на нуль, і навпаки. Однак повна механічна енергія замкнутої коливальної системи, в якій відсутні сили опору, залишається згідно з законом збереження енергії незмінною. Вона дорівнює або потенціальній енергії в момент максимального відхилення від положення рівноваги, або ж кінетичній енергії в момент, коли тіло проходить положення рівноваги.

Таким чином, гармонічні коливання, які виникли в коливальній системі, стійкі і тривають як завгодно довго, якщо на коливальну систему не діють зовнішні сили (за рахунок роботи яких енергія системи могла б зростати) і в коливальній системі відсутні сили тертя та інші сили опору, які могли б призвести до розсіювання енергії системи.

## § 15 — ЗАТУХАННЯ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

У розглянутих випадках вільних коливань тіла: математичного маятника, тягарця на пружині тощо — припускалося, що тіло, яке коливається, не зустрічає на своєму шляху жодних перешкод. За таких ідеальних умов його гармонічні коливання можуть тривати необмежено довго.

За реальних умов рухові тіла, яке здійснює вільні коливання, завжди перешкоджають різні опори, які сповільнюють коливання і сприяють їх затуханню. Наприклад, тертя коливного тіла по інших тілах, до яких воно дотикається, внаслідок шорсткості поверхонь.

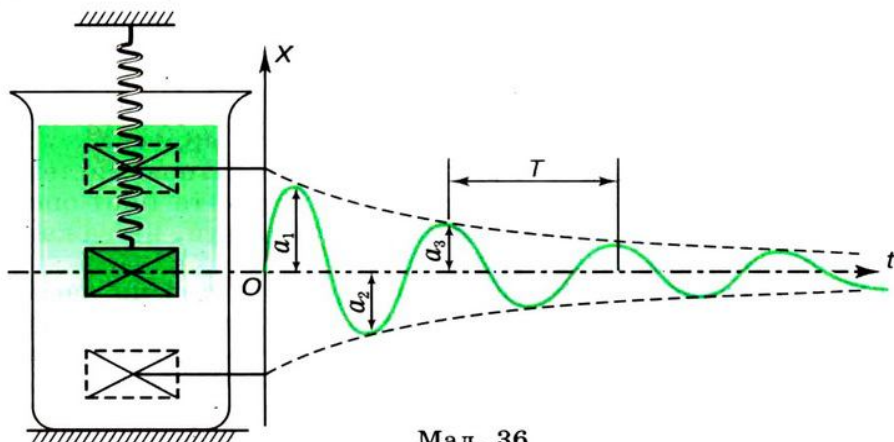
Затухання коливань настає також внаслідок опору повітря, води чи іншого середовища, в якому здійснюються коливання. Тертя між частинками пружного тіла (пружини ресор), яке є джерелом відновлюючої сили пружності, також сприяє затуханню вільних коливань.

Розглянемо докладніше випадок, коли тіло коливається в середовищі, яке чинить протидію його рухові.

На тіло з боку середовища діє сила, що залежить від швидкості тіла і напрямлена в бік, протилежний напрямку руху тіла. Прикладом може бути тягарець, підвішений на пружині в посудині з рідиною (мал. 36).

Якщо опір рідини великий порівняно з відновлюючою силою пружності, коливальний рух тіла в такому середовищі взагалі неможливий. Тіло, виведене з положення рівноваги, прагнучим зайняти положення спокою, підходячи до цього положення поступово, без коливань.

Якщо ж сила опору мала порівняно з силою пружності, тіло, виведене з положення рівноваги, почне здійснювати в рідині затухаючий коливальний рух.



Мал. 36

Дослідно і теоретично встановлено, що амплітуда затухаючих коливань (див. графік на мал. 36) з часом зменшується.

Важливо зауважити, що невеликий опір середовища мало змінює період власних коливань тіла, однак інтенсивно гасить ці коливання. Так, опір, для якого кожен наступний розмах удвічі менший за попередній, змінює період коливань лише на 2,4 %. Однак навіть у разі невеликого опору вільні коливання швидко затухають.

Затухаючі коливання поширені в природі, використовуються в різних галузях техніки. Затухання коливань у багатьох випадках — бажане і корисне явище, в інших — небажане й шкідливе. У першому випадку затухання коливань прагнуть створити і підтримувати за допомогою відповідних механізмів і пристосувань. Маються на увазі поглиначі коливань фундаментів і машин (амортизатори), поглиначі бічного коливання кораблів, повітряні й рідинні заспокоювачі коливань тощо.

У другому випадку прагнуть, навпаки, усунути затухання засобами, які зменшують вплив тертя й опору середовища, використанням змащення, заміни тертя ковзання тертям кочення за допомогою роликових підшипників тощо.

## § 16 — ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ

Реальні вільні механічні коливання завжди супроводжуються перетворенням частини механічної енергії у внутрішню. Тому амплітуда власних коливань поступово зменшується — коливання затухають. Тим часом нерідко доводиться спостерігати коливальні процеси незмінної або ж майже незмінної амплітуди. В цих процесах втрата механічної енергії поповнюється від зовнішнього джерела. Одним з видів таких незатухаючих коливань є так звані *вимушені коливання*. На відміну від вільних, вимушені коливання здійснюються коливальною системою під дією деякої зовнішньої (змушуючої) сили, яка періодично змінюється з часом (у найпростішому випадку за законом синуса).

Робота цієї зовнішньої сили над коливальною системою періодично поповнює втрати енергії на тертя та інші опори. Поповнення енергії не дає коливанням затухати, незважаючи на дію сил опору.

Під впливом періодичної сили будь-яке тіло чи система здійснюватиме коливання. Так, під дією змінних аеродинамічних сил коливаються будівлі, мости, заводські труби та інші споруди, корпус і фундамент машини під час обертання незрівноваженого ротора, кораблі на хвилях, фундамент під стругальним верстатом, корпус теплохода чи літака під час



роботи двигунів, мембрана гучномовця, залізничний міст, по якому йде потяг, тощо. У всіх цих випадках на тіло діють періодичні сили, які змінюються з певною частотою.

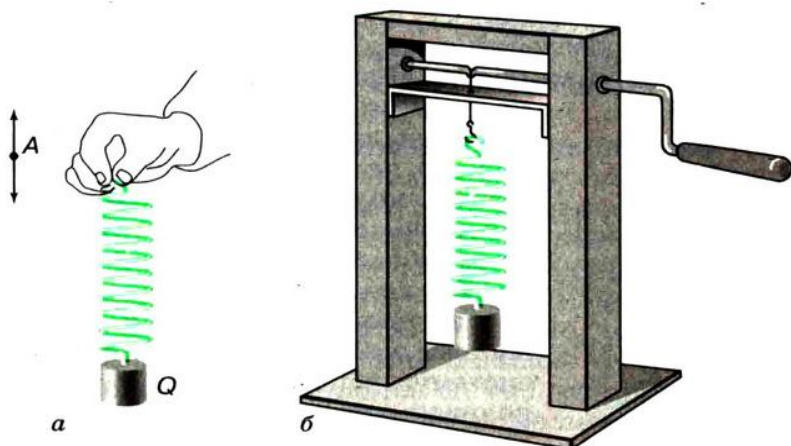
Особливий інтерес становлять вимушені коливання в системі, здатній здійснювати вільні коливання. Нехай на таку систему діє зовнішня (змушуюча) сила, яка змінюється за законом синуса:

$$F = F_0 \sin \omega t,$$

де  $\omega$  — колова частота змушуючої сили. Вона зовсім не обов'язково має дорівнювати власній коловій частоті коливальної системи  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , яку позначимо тепер  $\omega_0$ .

Дослід показує, що через короткий інтервал часу від початку дії зовнішньої сили рух системи стає гармонічним з частотою, яка дорівнює частоті змушуючої сили. Інакше кажучи, через певний час у системі встановлюються вимушені коливання з частотою змушуючої сили:  $x = X_m \sin(\omega t + \varphi)$ . Зазначимо без доведення, що при цьому амплітуда зміщення  $X_m$  залежить від  $\omega$  і  $F_0$ , а фазовий зсув  $\varphi$  — від  $\omega$ .

Розглянемо, як залежить амплітуда зміщення вимушених коливань від частоти змушуючої сили. Амплітуду  $F_0$  змушуючої сили для спрощення вважатимемо однією й тією самою для всіх частот  $\omega$ . Вимушені коливання в системі, яка має власну частоту коливань  $\omega_0$ , розглянемо на досліді. Підвісимо на пружині тягарець (мал. 37, а). Верхній кінець А пружини можна рукою змушувати рухатися періодично вгору і вниз, внаслідок чого тягарець здійснюватиме вимушені коливання. Значно зручніше рух верхнього кінця А пружини викликати обертанням колінчастого вала (мал. 37, б). Під час



Мал. 37

обертання вала тягарець здійснює вимушені коливання, частота яких залежить від частоти зовнішньої сили, тобто від частоти обертання вала. Обертатимемо вал з такою частотою, щоб частота коливань тягарця була значно меншою від частоти власних коливань тягарця. Ми побачимо, що тягарець коливається з частотою обертання вала і амплітуда коливань тягарця незначна. Почнемо поступово збільшувати частоту обертання вала. Амплітуда коливань тягарця поступово зростає і за частоти, яка збігається з частотою власних коливань тягарця, стає найбільшою. Якщо далі збільшувати частоту обертання вала, амплітуда швидко зменшується і за частоти, яка значно перевищує власну, знову стає малою.

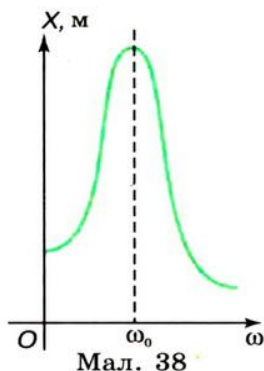
Якщо ви уважно придивитесь до коливань тягарця, напевне помітите, що їх частота точно дорівнює частоті коливань кінця *A* пружини, тобто частоті зміни зовнішньої змущуючої сили.

## § 17 — РЕЗОНАНС

Досліди показують, що коли у коливальній системі встановляться вимушені коливання, їх частота завжди дорівнює частоті зовнішньої змущуючої сили, однак реакція коливальної системи на вплив сили істотно залежить від частоти. Найяскравіше виражена реакція на вплив сили, частота змін якої збігається з власною частотою коливальної системи (незначною розбіжністю цих частот за наявності тертя нехтуємо). В цьому ми переконалися на досліді (див. мал. 37, б). Графік залежності амплітуди вимушених коливань тягарця від частоти змущуючої сили показано на малюнку 38. З графіка добре видно, що максимальна амплітуда вимушених коливань буде за частоти, яка збігається з власною частотою коливальної системи  $\omega_0$ . Проведений дослід показує, що зі зміною частоти змущуючої сили амплітуда коливань змінюється. Вона відносно

невелика, якщо частота вимушених коливань значно відрізняється від власної (більша чи менша). Якщо частоти вимушених коливань збігаються з власною частотою коливальної системи, то амплітуда вимушених коливань максимальна.

Це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань у випадку, коли частота зміни зовнішньої сили, яка діє на систему, збігається з частотою вільних коливань, називається *резонансом* (від лат. *resonans* — той, що відгукується), а відповідна частота — *резонансною частотою*.



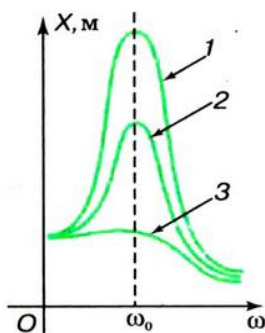
Пояснити явище резонансу найпростіше на основі таких міркувань. Під час резонансу створюються найсприятливіші умови для передавання енергії від зовнішнього джерела періодично змінної сили до коливальної системи, в якій можуть виникати вільні коливання. В коливальній системі, в якій не виникають вільні коливання, резонанс не спостерігається.

Під час резонансу зовнішня (змушуюча) сила надає енергію коливальній системі в такт з власними її коливаннями і амплітуда вимушених коливань зростає. Це пояснюється тим, що під час резонансу зовнішня сила співнапрявлена із швидкістю, а не в напрямі зміщення системи. Інакше кажучи, відповідно до (10.3) і (10.5) зовнішня сила збігається за фазою зі швидкістю коливань, випереджаючи зміщення на  $\frac{1}{2}\pi$  або на чверть періоду. Внаслідок цього зовнішня сила весь час сприяє внутрішній повертаючій силі, що виникає в системі, у поверненні системи до положення рівноваги. Зовнішня сила протягом усього періоду коливань виконує лише додатну роботу. Отже, в цьому випадку надходження енергії від зовнішнього джерела, яке створює періодичну силу, до коливальної системи буде максимальним і амплітуда коливання набуде найбільшого можливого для неї за даних умов значення.

Якщо частота змін зовнішньої сили  $\omega$  не дорівнює частоті власних коливань системи  $\omega_0$ , то зовнішня сила виконує додатну роботу лише протягом деякої частини періоду вимушених коливань. Протягом другої частини періоду сила напрямлена проти швидкості і виконує від'ємну роботу. Отже, в цьому випадку коливальна система поповнюватиметься енергією за період в меншій кількості і відповідно невеликою буде амплітуда коливань, які встановляться в системі. При цьому зовнішня сила випереджатиме зміщення за фазою не на чверть періоду, а на якусь іншу частину — більшу або меншу за чверть періоду змін сили.

Амплітуда вимушених коливань під час резонансу залежить не лише від значення зовнішньої змушуючої сили, а й від тертя в коливальній системі. Із збільшенням зовнішньої сили, природно, зростає і амплітуда вимушених коливань. Вона набуває під час резонансу такого значення, для якого додатна робота зовнішньої сили повністю компенсує втрати енергії системою внаслідок тертя. Очевидно, що чим менше тертя в коливальній системі, тим більшою буде амплітуда вимушених коливань для однієї й тієї самої зовнішньої сили. Залежність амплітуди вимушених коливань від частоти для трьох коливальних систем з різними силами тертя і для однієї й тієї самої амплітуди зовнішньої сили показано на





Мал. 39

малюнку 39. Крива 1 відповідає системі з мінімальною силою тертя, а крива 3 — з максимальною. З цих графіків видно, що чим менше тертя в системі, тим сильніше зростає амплітуда вимушених коливань з наближенням системи до резонансу. Якщо тертя мале, резонанс чітко виражений, а якщо велике — то нечітко. Якщо частота змін змущуючої сили в системі далека від резонансної, амплітуда коливань мала і майже не залежить від сили опору в системі. Якщо тертя таке велике, що в системі не

виникають вільні коливання, резонанс взагалі не спостерігається.

У коливальній системі з малим тертям навіть для невеликих зовнішніх змущуючих сил амплітуда вимушених коливань може зрости настільки, що це призведе до руйнування системи. Відомо багато випадків руйнування споруд внаслідок роботи малопотужних двигунів, які збуджували вимушені коливання на частоті, що збіглася з частотою власних коливань споруд. Класичним прикладом катастрофічного зростання амплітуди під дією невеликих змінних зовнішніх сил вже давно стало руйнування мостів під ритмічними кроками солдатів. Так, у кінці XIX століття завалився підвісний Анжерський міст над річкою Луарою, коли по ньому проходив батальйон французької піхоти. З кожним кроком солдатів міст розгойдувався дедалі сильніше, ланцюги не витримали напруження і міст обвалився. Ви також знаєте, що відхилити навантажену гойдалку від положення рівноваги буває важко, але підштовхуючи незначною силою в такт коливанням, можна розгойдати її дуже сильно. Однак зрозуміло, що ця велика амплітуда встановиться не відразу, а після більш чи менш тривалого часу дії зовнішньої сили, яка має надати системі достатню енергію.

1. У чому полягає явище резонансу? 2. Накресліть і поясніть графіки залежності амплітуди вимушених коливань від частоти змін змущуючої сили для двох значень сили опору. 3. Чим визначається амплітуда коливань під час резонансу? 4. Чому дорівнює під час резонансу зсув фаз між зміщенням і силою? між швидкістю і силою?

## § 18 — ВИКОРИСТАННЯ РЕЗОНАНСУ В ТЕХНІЦІ І ПОДОЛАННЯ ЙОГО

Будь-яке пружне тіло: міст, станина машини, її вал, корпус корабля чи крила літака є коливальною системою і характеризується власними частотами коливань. Робота багатьох машин, механізмів, верстатів, будинків та інших споруд супроводжується виникненням сил, які періодично змінюються і за напрямом, і за значенням. Так, у поршневих машинах, до яких належать двигуни внутрішнього згоряння і парові машини, внаслідок зворотно-поступального руху деяких частин (наприклад, поршня), вихлопу газу чи пари виникають збуджуючі періодичні сили. Ротори турбін, вали машин тощо практично неможливо центрувати абсолютно точно. Тому під час обертання ротора чи вала на нього діє незрівноважена періодична сила, збуджуючи коливання. Якщо частота змін напряму сили збігається з власною частотою вільних коливань машини, то амплітуда коливань машини може зрости настільки, що це призведе до її руйнування, хоча напруження в матеріалі і не перевищує межі міцності у разі статичних навантажень. Річ у тім, що залізо, сталь та інші матеріали у випадку змінних навантажень швидше чи повільніше втрачають міцність, після чого раптово руйнуються.

Вимушені коливання може здійснювати не лише машина в цілому, а й, що небезпечніше, окремі її частини: диски і лопатки турбін, крила й оперення літаків, колінчасті вали двигунів, лопасті гвинтів пароплавів тощо. Подібні коливання, якщо не вжити запобіжних заходів, внаслідок виникнення резонансу можуть стати причиною розладу роботи механізму, його руйнування, а іноді й небезпечних аварій. Статистика свідчить, що близько 80 % руйнувань і аварій у машинобудуванні є наслідком неприпустимих резонансних коливань. Тому інженери прагнуть так конструювати ту чи іншу установку, машину або споруду, щоб не виникало різких резонансних явищ ні в установці чи машині, ні в її окремих частинах.

Шкідливі прояви резонансу доводиться долати під час обробки металів різанням. За певних режимів різання на металорізальних верстатах збуджуються коливання інструменту й оброблюваної деталі, що є шкідливим і для верстатів, і для оброблюваних виробів. Якщо не усунути причину виникнення цих коливань, погіршується якість обробки деталей, точність виготовлення виробів, швидше зношується верстат тощо.

У будівельній справі також багато уваги приділяють запобіганню виникнення резонансу. У будівлях, в яких вста-

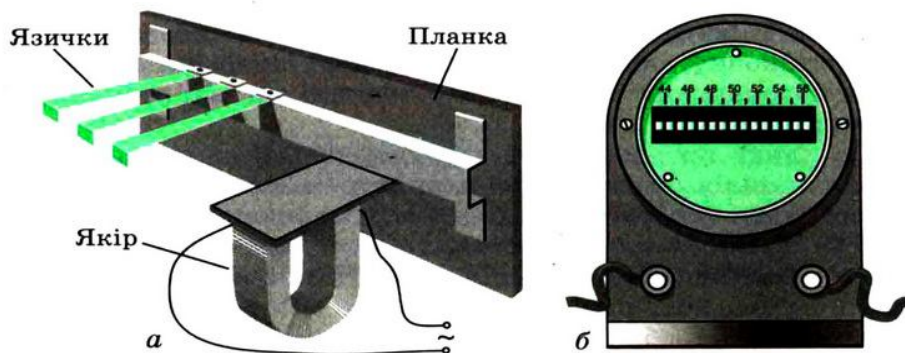


новлені швидкохідні машини, двигуни й верстати, фундаменти й перекриття мають бути споруджені так, щоб виключити можливість збудження коливань з частотою, яка дорівнює або близька до частоти коливань машини.

Надзвичайно важливим є запобігання виникнення резонансу під час конструювання й експлуатації всіх видів сучасного транспорту. Наприклад, власна частота коливань корпусу теплохода чи крил літака має суттєво відрізнитися від частоти коливань, які можуть бути збуджені обертанням колеса турбіни, гребного гвинта чи пропелера. Відомі випадки, коли доводилося перебудовувати гігантські океанські лайнери лише тому, що частота власних коливань корпусу корабля збігалася з частотою змін змушуючої сили, що виникала під час роботи двигунів.

Зрозуміло, що явище резонансу буває і корисним, коли необхідно мати в системі якомога більші коливання (в музичних інструментах, гучномовцях тощо). Людське вухо сприймає звуки внаслідок резонансу коливань у вушній раковині. Особливо широко явище резонансу використовується в радіотехніці для підсилення коливань. Резонанс дає змогу відокремити сигнали даної радіостанції від сигналів інших одночасно працюючих радіостанцій. З цими застосуваннями резонансу ви ознайомитеся пізніше.

Явище резонансу використовується в будові ч а с т о т о м і р і в — приладів для вимірювання частоти змінного струму, а також для вимірювання частоти механічних коливань системи. Частотомір складається з набору «язичків» — пружних пластинок, прикріплених гвинтами до спільної планки (мал. 40). Кожна пластинка має певну власну частоту коливань, яка залежить від її пружних властивостей, довжини й маси. Пружини добираються так, щоб їх власні



Мал. 40



частоти утворювали ряд цілих чисел. До спільної планки прикріплюється також якір, розміщений над полюсом електромагніту. Якщо по обмотці електромагніту пропускати змінний струм, якір почне коливатися і спричинить тим самим коливання прикріплених пластинок. І лише та пластинка, власна частота коливань якої збігається з частотою коливань планки (настроєна в резонанс), матиме більшу амплітуду коливань. Це і дає змогу визначити частоту змінного струму.

Цей самий прилад може бути використаний і для вимірювання частоти механічних коливань машини чи механізму. Для цього слід прикріпити планку частотоміра до тієї частини машини, коливання якої треба дослідити. Пластинка, частота власних коливань якої найбільшча до частоти коливань машини, потрапить у резонанс, і в пластинці виникнуть значні коливання, які легко помітити.

## **§ 19 — ПОНЯТТЯ ПРО АВТОКОЛИВАННЯ**

Ми з'ясували, що будь-яка коливальна система, виведена зі стану рівноваги і залишена сама собі, здійснює коливання завжди з однією й тією самою частотою, характерною для даної системи. Ці власні коливання через наявність сил тертя з часом затухають, оскільки енергія, надана системі під час виведення її зі стану рівноваги, весь час витрачається, перетворюючись, зокрема, у внутрішню енергію. Щоб коливання були незатухаючими, необхідно якимось чином поповнювати енергію системи. Найпростіший спосіб поповнення, наприклад, енергії фізичного маятника — це періодично підштовхувати його. Однак такий спосіб не завжди зручний. Звичайно коливальну систему забезпечують додатковим пристроєм, за допомогою якого вона від джерела енергії сама поповнює витрачену на тертя енергію. У такому разі система здійснює незатухаючі коливання доти, поки не вичерпається запас енергії джерела. Причому надходження енергії від джерела регулюється самою системою. Коливальні системи, здатні до саморегулювання, називають *автоколивальними*, а коливання, які в них виникають, — *автоколиваннями*.

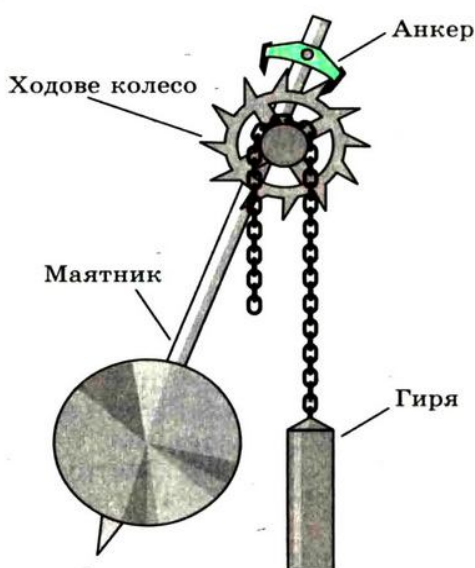
Автоколивальні системи поширені у техніці й природі. Прикладами автоколивальних систем можуть бути годинникові механізми, двигуни внутрішнього згоряння і парові машини, відбійні молотки, духові музичні інструменти, легені й серце, лампові й напівпровідникові генератори електричних коливань тощо.

Будь-яка коливальна система (незалежно від її конструкції) складається з трьох основних частин: власне коли-

вальної системи, джерела енергії та клапана, який керує надходженням енергії з джерела (схема 1).

Розглянемо як приклад найпростішої автоколивальної системи механізм звичайного годинника — «ходиків» (мал. 41). Маятник годинника забезпечено зігнутим рівноплечим важелем-анкером, з яким зчеплене ходове колесо. Воно приводиться в рух гирею, підвішеною до ланцюжка, перекинутого через зубчасте колесо, насаджене на спільну вісь з ходовим колесом. Маятник здійснює незатухаючі коливання завдяки тому, що змушує ходове колесо у відповідні моменти підштовхувати себе за рахунок енергії, яка передається під час опускання гирі. В наручних і настільних годинниках замість гирі застосовують заводну пружину, а замість маятника — балансір (мал. 42). Він має форму симетричного тіла, яке здійснює коливання навколо вертикальної осі завдяки пружності спіральної пружини, яка закручується й розкручується.

Схема 1



Мал. 41

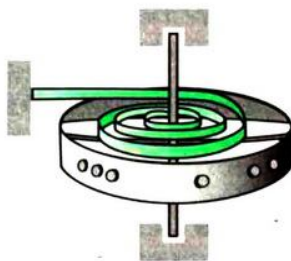


У годинникових механізмах коли-  
вальною системою є маятник або  
балансир; джерелом енергії — піднята  
вгору ги́ря або закручена пружина;  
клапаном — анкер, який дає мож-  
ливість ходовому колесу прокрутитися  
на один зубець за один півперіод.

Якщо маятник нерухомий, піднята  
ги́ря чи заведена пружина не можуть  
привести в обертання ходове колесо —  
цьогому заважають зубці анкера. Якщо  
маятнику надати невеликого імпульсу  
вправо, то зубець колеса, вийшовши зі зчеплення (зісков-  
знувши з зубця анкера), підштовхне маятник у напрямі його  
руху. Ходове колесо повернеться на певний кут і впреться  
своїм зубцем у правий зубець анкера. Під час зворотного  
руху маятника ходове колесо виходитиме зі зчеплення з  
правим плечем анкера і в момент зісковзування підштовхне  
маятник знову по ходу його руху. І так двічі за кожен період  
маятник дістає від піднятої ги́рі чи закрученої пружини  
необхідну кількість енергії для підтримання незатухаючих  
коливань. Коливання маятника продовжуватимуться доти,  
поки не буде витрачено всю потенціальну енергію піднятої  
ги́рі чи закрученої пружини. У цьому разі амплітуда коли-  
вань маятника підтримується незмінною.

Слід зауважити одну важливу властивість автоколиваль-  
них систем. Якщо маятник перебуває в спокої, то не  
рухається й ходове колесо. Як тільки маятник почне коли-  
вальний рух, починає стрибкоподібно обертатися й ходове  
колесо, підштовхуючи маятник у той бік, в який він рухався  
у момент поштовху. Маятник здійснює незатухаючі коливан-  
ня, змушуючи механізм підштовхувати себе у відповідні  
моменти. Механізм штовхає маятник, а маятник чинить  
зворотну дію на механізм. Коливаннями маятника керує сам  
маятник. Таким чином, у коливальній системі існує так  
званий *зворотний зв'язок*: маятник передає свої коливання  
ходовому колесу, а ходове колесо повертає назад ці коливання  
маятнику у вигляді поштовхів, які сприяють руху маятника.

Другою характерною особливістю автоколивальних  
систем є така. Надходження енергії через клапан після вста-  
новлення автоколивань точно дорівнює її втраті. Якщо в по-  
чатковий момент амплітуда коливань така, що втрата енергії  
більша, ніж її надходження через клапан, то амплітуда змен-  
шується доти, поки не встановиться рівність втрати і надход-  
ження енергії. Навпаки, якщо амплітуда мала і надходження  
енергії перевищує її витрачання, амплітуда зростає.



Мал. 42



Таким чином, амплітуда і частота автоколивань, які встановлюються, визначаються лише параметрами самої системи. Це відрізняє автоколивання від власних коливань, для яких амплітуда задається початковим відхиленням.

З цією властивістю пов'язана третя характерна особливість більшості автоколивальних систем, яку теж можна розглянути на прикладі годинникового механізму. Від маятника в механізм надходять слабкі коливання, а повертаються назад значно сильніші, тобто механізм їх підсилив за рахунок енергії джерела і повернув маятнику. Це дуже важлива обставина для автоколивальної системи. Якщо під впливом деякого випадкового поштовху система хоча б дуже мало відхилиться від положення рівноваги, це відхилення зростатиме — відбувається так зване *самозбудження автоколивань*.

Якщо втрати на тертя в автоколивальній системі малі, то надходження енергії, необхідної для підтримання коливань незмінними, також мале. Автоколивання відбуваються майже так само, як власні коливання. Вони близькі за формою до гармонічних, а частота їх майже збігається з власною частотою коливальної системи.

У той час, як частота змушених коливань збігається з частотою зовнішньої сили, а амплітуда коливань залежить від амплітуди цієї сили, частота й амплітуда автоколивань визначаються властивостями самої системи. Автоколивання відрізняються і від вільних коливань тим, що, *п о - п е р ш е*, вони не затухають з часом, і, *п о - д р у г е*, їх амплітуда не залежить від значення початкового короткочасного впливу («поштовху»), який збуджує коливання.

## ВИСНОВКИ

Пристрої, в яких можуть здійснюватися коливальні процеси, називають коливальними системами. Коливання, які виникають у системах під дією внутрішніх сил після виведення системи із положення стійкої рівноваги за відсутності зовнішніх періодичних сил, називають вільними коливаннями.

Вільні коливання, які виникають у коливальних системах з малим тертям, практично є гармонічними.

Гармонічним є коливання тіла, під час якого його прискорення прямо пропорційне миттєвому зміщенню, однак протилежно напрямлене:

$$a = -\omega^2 x.$$

Для гармонічних коливань характерні такі властивості:

а) повертаюча внутрішня сила пропорційна зміщенню

системи від положення стійкої рівноваги і напрямлена в бік рівноваги;

б) зміщення, швидкість і прискорення змінюються за гармонічним законом (синусоїдальним чи косинусоїдальним);

в) гармонічні коливання тривають безкінечно.

Коливання тіла на пружині є гармонічним коливанням з частотою

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Частота вільних коливань залежить від параметрів коливальної системи, амплітуда — від наданої коливальної системи енергії.

У випадку вільних коливань кінетична й потенціальна енергії тіла періодично змінюються, однак повна механічна енергія в системі без сил тертя залишається незмінною.

У разі невеликих відхилень математичного маятника від положення рівноваги його коливання є гармонічними з періодом  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$

Вільні коливання в системах з тертям затухають і не є гармонічними. Щоб зробити коливання незатухаючими, слід поповнювати енергію системи. В цьому випадку коливання будуть вимушеними. Частота таких коливань дорівнює частоті змін зовнішньої періодично змінної сили.

Амплітуда вимушених коливань залежить від амплітуди і частоти змушуючої зовнішньої сили.

Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, якщо частота змін зовнішньої сили, що діє на систему, збігається з частотою власних (вільних) коливань, називають резонансом, а відповідну частоту — резонансною частотою.

Якщо всередині коливальної системи, здатної здійснювати коливання, є джерело енергії і система сама може регулювати надходження енергії до тіла, яке коливається, для компенсації втрат на тертя, то в такій системі можуть виникати незатухаючі коливання. Таку систему називають автоколивальною, а коливання, які в ній виникають, автоколиваннями.

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ**

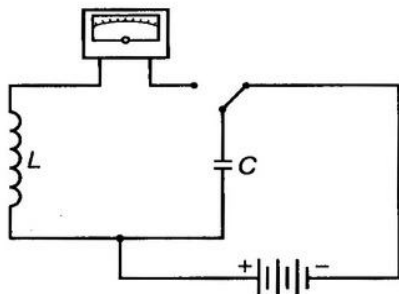
Завдяки явищу самоіндукції можливі коливання електричного заряду, сили струму, напруги та інших величин, які характеризують електричні кола. Ці коливання є електромагнітними і мають багато спільного з механічними коливаннями.

Здавалося б, коливання маятника нічим не нагадують розряд конденсатора через котушку індуктивності. Однак насправді це не так. Механічні і електромагнітні коливання підлягають однаковим фізичним законам. Це виявляється, якщо цікавитися не предметом коливання (тягарець на пружині чи сила електричного струму в колі), а процесом здійснення коливання. Відомо, що під коливанням слід розуміти будь-яку періодичну зміну деякої величини, тобто таку зміну, за якої значення цієї величини через певний інтервал часу — період — повторюється. Однаковим законам підлягають також хвильові процеси різної природи.

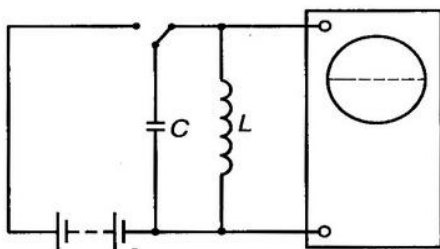
**§ 20 — ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ В КОНТУРІ**

Змінні електричні і магнітні поля не можуть існувати окремо одне від одного, оскільки в просторі, де існує змінне магнітне поле, збуджується електричне поле і навпаки. Одночасні періодичні зміни пов'язаних між собою електричного і магнітного полів називають *електромагнітними коливаннями*. Таким чином, щоб одержати електромагнітні коливання, треба мати електричне коло, в якому енергія електричного поля могла б перетворюватися в енергію магнітного поля і навпаки. Оскільки магнітне поле зосереджене переважно в котушках, а електричне — в конденсаторах, найпростіше коло для утворення електромагнітних коливань має складатися з конденсатора й котушки. Таке коло називають *коливальним контуром*. Активний опір провідників, з яких виготовлено коливальний контур, має бути малим, інакше електромагнітні коливання не виникатимуть в контурі.





Мал. 43



Мал. 44

Щоб одержати електромагнітні коливання в контурі, достатньо зарядити конденсатор і замкнути його на котушку (мал. 43). Під час розряджання конденсатора в колі виникає електричний струм, сила якого з часом зростає, і виникає зв'язане зі струмом магнітне поле. В момент повного розрядження напруженість електричного поля конденсатора дорівнюватиме нулю, а індукція магнітного поля струму досягне максимуму. В наступний момент часу магнітне поле струму почне слабнути, внаслідок чого в котушці індукуватиметься струм, спрямований (згідно з правилом Ленца) так само, як і струм розрядки конденсатора. Конденсатор перезаряджатиметься. Потім конденсатор знову розряджатиметься, викликаючи появу струму і пов'язаного з ним магнітного поля. Таким чином, у контурі виникнуть електромагнітні коливання, під час яких відбуватиметься періодична зміна різниці потенціалів обкладок конденсатора і сили струму в контурі і одночасно — електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки.

Якщо електромагнітні коливання можна одержати просто, то спостерігати їх значно складніше. Адже безпосередньо не видно ні перезарядки конденсатора, ні зростання сили струму в котушці, ні виникнення магнітного чи електричного полів. До того ж відбуваються електромагнітні коливання з дуже великою частотою, яка значно перевищує частоту механічних коливань.

Спостерігати і досліджувати електромагнітні коливання зручно за допомогою відомого вам з курсу фізики 10-го класу електронного осцилографа (мал. 44). Зарядимо конденсатор  $C$  від джерела постійного струму і замкнемо його на котушку індуктивності  $L$ , паралельно якій увімкнено електронний осцилограф. На екрані дістанемо криву залежності заряду (або сили струму в колі) від часу — осцилограму коливань заряду (або сили струму). Амплітуда цих коливань швидко зменшується, тобто коливання швидко затухають.

Розглянуті нами електромагнітні коливання дістали назву *власних*, або *вільних*, коливань, оскільки вони здійснюються вільно, тобто без впливу зовнішньої (змушуючої) сили. Частоту вільних коливань називають *власною частотою* коливального контуру. Власні коливання є затухаючими; амплітуда їх з часом зменшується. Причиною затухання є те, що енергія струму перетворюється у внутрішню енергію проводів (оскільки вони мають опір) і йде на випромінювання електромагнітних хвиль.

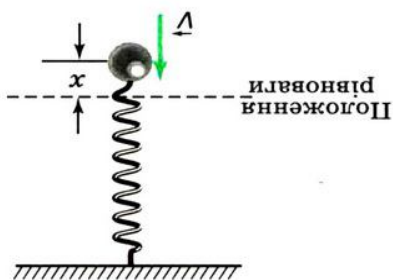
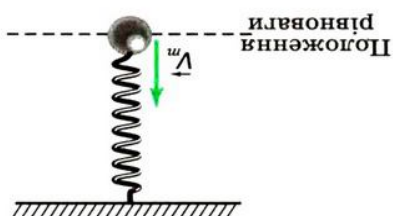
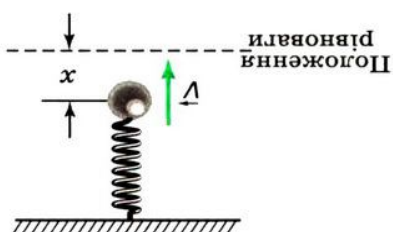
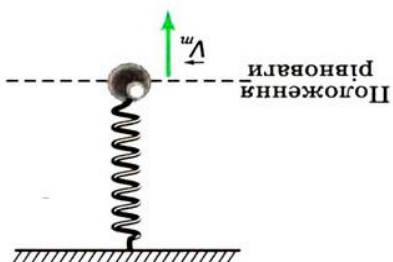
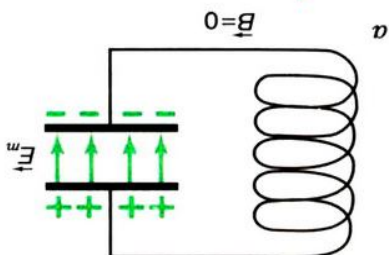
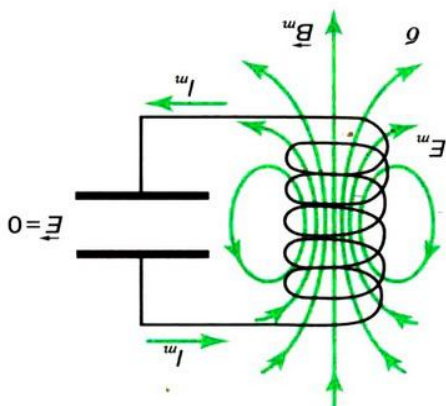
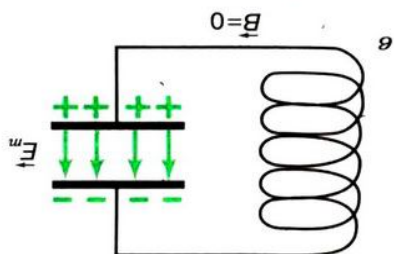
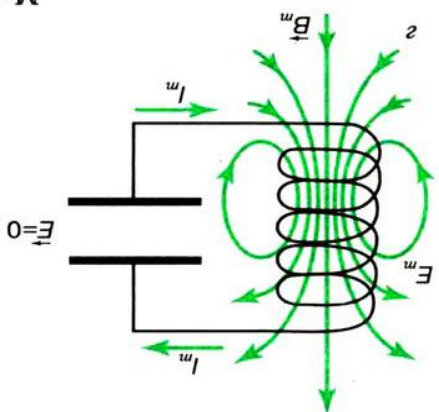
## § 21 — ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Розглянемо механізм виникнення коливань у контурі. Щоб отримати вільні коливання в механічній коливальній системі, необхідно надати цій системі енергії від побічного джерела. У процесі коливань ця енергія періодично перетворюється з потенціальної в кінетичну і навпаки. Щоб коливальний контур вивести зі стану електричної рівноваги, також необхідно цій коливальній системі надати певної енергії. Найпростіше це зробити, зарядивши конденсатор. Зарядження конденсатора аналогічне відхиленню маятника від положення рівноваги, а енергія електричного поля зарядженого конденсатора аналогічна потенціальній енергії деформованої пружини або піднятого тягарця маятника.

Припустимо, що активний опір контуру дуже малий і ним можна знехтувати (ідеальний контур). Для наочності порівнюватимемо процеси в контурі з коливаннями тягарця на пружині.

Якщо конденсатор заряджено до різниці потенціалів  $U_m$ , то його заряд дорівнює  $q_m = CU_m$ . У цьому стані енергія електричного поля максимальна і дорівнює  $\frac{1}{2}CU_m^2$ , сила струму в контурі дорівнює нулю, магнітне поле в котушці індуктивності відсутнє (енергія магнітного поля дорівнює нулю). Цей стан (мал. 45, а) еквівалентний стану пружинного маятника, коли ми розтягнули пружину на  $x$ , надали механічній коливальній системі потенціальної енергії  $\frac{1}{2}kx^2$ , але тримаємо тягарець рукою, не даючи йому можливості рухатися.

Зрозуміло, що такий електричний стан в коливальному контурі не може залишатися незмінним, подібно тому, як пружина не може залишатися в деформованому стані після припинення дії зовнішньої сили. Конденсатор почне розряджатися і в колі потече струм. При цьому в котушці виникне потік магнітної індукції. Зростання цього потоку спричинить





появу електрорушійної сили самоіндукції  $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ , яка дорівнює різниці потенціалів на пластинах конденсатора. Енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а енергія магнітного поля котушки зростає. Цей процес аналогічний перетворенню потенціальної енергії деформованої пружини в кінетичну енергію руху тягарця.

Коли потенціали пластин зрівнюються (мал. 45, б), сила струму в котушці матиме максимальне значення, тому що немає причин для подальшого її зростання. З цього моменту сила струму зменшується. До того ж зменшується і магнітний потік, а тому в котушці виникає електрорушійна сила самоіндукції, яка прагне перешкодити зменшенню потоку індукції і сили струму. Таким чином, хоча конденсатор розрядився, струм у колі йде, заряджаючи конденсатор у зворотному напрямі. При цьому енергія магнітного поля котушки перетворюється в енергію електричного поля конденсатора. Так само й тягарець у положенні рівноваги має максимальну швидкість і за інерцією продовжує рухатися, стискаючи пружину; кінетична енергія руху тягарця перетворюється в потенціальну енергію пружини.

Коли сила струму зменшиться до нуля, конденсатор виявиться перезарядженим. На верхній пластині виникне негативний заряд, а на нижній — позитивний. Якщо втрат енергії в контурі немає, різниця потенціалів і заряд конденсатора дорівнюватимуть початковим, але з протилежним знаком. Електричний стан контуру в цей момент показано на малюнку 45, в. Під час коливань тягарця цьому моменту відповідає зупинка його в крайньому верхньому положенні, коли потенціальна енергія максимальна.

Далі конденсатор починає знову розряджатися і в контурі виникає струм зворотного напрямку, енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а магнітного в котушці — зростає. В певний момент часу конденсатор розрядиться, сила струму досягне максимального значення і енергія магнітного поля буде максимальною (мал. 45, г). Це відповідає проходженню тягарцем положення рівноваги. Потім струм самоіндукції заряджатиме конденсатор, і коливальна система повернеться у вихідне положення. Далі весь процес повторюватиметься і в колі відбуватимуться електромагнітні коливання.

Наголосимо ще раз, що максимальна енергія  $\frac{1}{2} CU_m^2$ , нагромаджена в конденсаторі, у процесі коливань перетворюється в енергію магнітного поля в котушці  $\frac{1}{2} LI_m^2$ . Остання набуває максимального значення через чверть періоду після початку розряджання конденсатора, тобто в момент,

коли сила струму в колі максимальна. За наступну чверть періоду під час зменшення сили струму ця енергія поступово перетворюється в енергію електричного поля. Процес перетворення одного виду енергії в інший повторюватиметься доти, поки в колі відбуватимуться коливання.

1. Опишіть процеси, які відбуваються в коливальному контурі після того, як йому було надано певну кількість електричної енергії. 2. Чи відбуватимуться електромагнітні коливання в контурі, якщо надати енергію котушці індуктивності, а не конденсатору? 3. Чи можуть виникнути електромагнітні коливання в контурі, який складається з конденсатора і резистора? 4. Чи виникнуть такі коливання в контурі, який складається з котушки індуктивності й резистора? 5. Де зосереджена енергія під час вільних коливань у контурі через  $\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$  і  $\frac{3}{4}$  періоду після початку розряджання конденсатора?

## § 22 — РІВНЯННЯ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ У КОНТУРІ

Ми розглянули явища в коливальному контурі з якісного боку і порівняли їх з механічними коливаннями тягарця під дією пружної сили. Дивовижна схожість перебігу електромагнітних і механічних коливань виявляється в тому, що для фізичних величин, які характеризують механічні коливання, можна вказати величини-аналоги, які характеризують електромагнітні коливання:

Електромагнітні величини	Механічні величини
Електричний заряд $Q$	Координата $x$
Сила струму $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$	Швидкість $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$
Швидкість зміни сили струму $\frac{\Delta i}{\Delta t}$	Прискорення $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$
Величина, обернена до ємності $\frac{1}{C}$	Жорсткість пружини $k$
Індуктивність $L$	Маса тягарця $m$
Опір $R$	Коефіцієнт тертя $\mu$
Енергія електричного поля конденсатора $\frac{Q^2}{2C}$	Потенціальна енергія пружної деформації $\frac{1}{2} kx^2$
Енергія магнітного поля котушки $\frac{1}{2} LI^2$	Кінетична енергія руху тягарця $\frac{1}{2} mv^2$

Порівняння енергії електричного поля  $\frac{Q^2}{2C}$  з потенціальною енергією пружної деформації  $\frac{1}{2} kx^2$  і енергії магнітного поля  $\frac{1}{2} Li^2$  з кінетичною енергією  $\frac{1}{2} mv^2$  тягарця, відображене на малюнку 45, настановлює на припущення, що й електромагнітні коливання в контурі мають відбуватися за гармонічним законом. Переконаємося в правильності цього припущення і одночасно визначимо період електромагнітних коливань у контурі з ємністю  $C$  та індуктивністю  $L$ .

У початковий момент часу ( $t = 0$ ) заряд на обкладках конденсатора дорівнює  $Q$ ; під час розряджання конденсатора в контурі виникає електричний струм  $i$ , який викликає в котушці ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ . Згідно з законом Ома для повного кола в будь-якому замкнутому контурі сума спадів напруг дорівнює сумі ЕРС, які діють у цьому контурі. В даному випадку спад напруги на опорі  $R$  дорівнює  $iR$ , а на конденсаторі  $-U = \frac{Q}{C}$ . Єдиною ЕРС у контурі буде  $\mathcal{E}_i$ . Отже, рівняння для процесів у контурі таке:

$$-L \frac{\Delta i}{\Delta t} = iR + \frac{Q}{C}. \quad (22.1)$$

Враховуючи, що  $i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q'$ , а  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta t} = Q''$ , дістанемо диференціальне рівняння коливань заряду  $Q$  у контурі:

$$-LQ'' = Q'R + \frac{Q}{C}, \text{ або } Q'' + \frac{R}{L}Q' + \frac{Q}{LC} = 0. \quad (22.2)$$

У даному коливальному контурі зовнішня ЕРС відсутня, тому розглядувані коливання є вільними.

Розв'язання рівняння (22.2) у загальному вигляді, тобто знаходження залежності значення заряду від часу, становить певні труднощі. Необхідною умовою виникнення в контурі коливань є незначний опір цього контуру, тому можна вважати, що  $R = 0$ . Тоді

$$Q'' = -\frac{1}{LC}Q, \text{ або } Q'' + \frac{1}{LC}Q = 0. \quad (22.3)$$

Відомо, що рівняння такого виду описують гармонічні коливання фізичної величини, в даному випадку електричного заряду. Саме рівняння називають диференціальним рівнянням гармонічних коливань. Розв'язком цього рівняння є функція

$$Q = Q_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (22.4)$$



де  $Q_m$  — амплітуда коливань заряду конденсатора з циклічною частотою

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (22.5)$$

Усі величини і закономірності, встановлені для гармонічних коливань у механіці, зберігають свій зміст і в електромагнітних коливаннях. Зокрема, період  $T$  коливань, тобто тривалість одного повного коливання, пов'язаний з циклічною частотою  $\omega$  залежністю  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , звідки

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (22.6)$$

Формула для періоду вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі була теоретично введена в 1853 р. англійським фізиком В. Томсоном і називається *формулою Томсона*. Вона показує, що період коливань зростає із збільшенням ємності й самоіндукції контуру. Це пояснюється тим, що під час збільшення індуктивності контуру сила струму повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А чим більша ємність контуру, тим більше часу потрібно для перезаряджання конденсатора.

Якщо у (22.6) індуктивність вимірювати в генрі, а ємність у фарадах, то період вимірюватиметься в секундах.

Виходячи із зв'язку між періодом коливань  $T$  і частотою  $\nu$ , визначимо власну частоту коливань у контурі:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (22.7)$$

З цієї формули видно, що для отримання в контурі коливань високої частоти ємність й індуктивність контуру мають бути достатньо малими.

Аргумент косинуса в (22.4) називають *фазою* електромагнітного коливання, а кут  $\phi$  — *початковою фазою*. Фаза коливання визначає стан коливального процесу, значення заряду конденсатора в коливальному контурі в кожен даний момент часу. Наприклад, у певний момент часу  $t_1$  фаза коливання  $\omega t_1 + \phi$  дорівнює  $2\pi$ . Це означає, що в цей момент часу заряд конденсатора максимальний ( $\cos 2\pi = 1$ ). Якщо в момент часу  $t_2$  фаза дорівнює  $\frac{1}{2}\pi$ , то  $Q = \frac{1}{2}Q_m$ , тобто конденсатор наполовину розрядився.

Фаза несе в собі більше відомостей про коливання заряду, ніж, наприклад, значення заряду конденсатора в певний момент часу. Якщо задано значення заряду  $Q_1$ , ми знаємо, наскільки заряджений (або розряджений) конденсатор, проте нічого не знаємо про напрям коливального процесу —

відбувається розрядження чи зарядження конденсатора. Якщо задати фазу коливань  $\omega t_1 + \varphi = \frac{7}{4}\pi$ , тим самим задається і значення заряду конденсатора  $Q_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} Q_m$ , і напрям коливального процесу — йде зарядження конденсатора. Фаза від заданого моменту зростатиме, отже, зростатиме і значення заряду. Знання фази дає змогу за (22.4) обчислювати миттєве значення заряду конденсатора.

Сила струму в коливальному контурі теж здійснює гармонічні коливання:

$$i = Q' = -Q_m \omega \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{1}{2}\pi\right), \quad (22.8)$$

де  $I_m = \omega Q_m$  — амплітуда сили струму.

Напруга на конденсаторі

$$u_c = \frac{Q}{C} = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega t + \varphi) = U_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (22.9)$$

де  $U_m = \frac{Q_m}{C}$  — амплітуда напруги.

З (22.8) і (22.9) виходить, що коливання сили струму  $i$  випереджають за фазою коливання заряду  $Q$  і напруги  $u$  на  $\frac{1}{2}\pi$ , тобто коли сила струму досягає максимального значення  $I_m$ , заряд  $Q$  і напруга  $u$  перетворюються на нуль і навпаки. Цей зв'язок ми встановили під час розгляду послідовних стадій коливального процесу і на основі міркувань.

1. Яку роль відіграють індуктивність і ємність у коливальному контурі? 2. Від чого залежить період вільних електромагнітних коливань у контурі? 3. Чи зміниться частота електромагнітних коливань у контурі, якщо в котушку ввести залізний стержень? якщо збільшити відстань між пластинами конденсатора? 4. Як зв'язані амплітуди коливання заряду і сили струму під час розрядження конденсатора через котушку?

## Вправа 6

1. Параметри двох коливальних контурів  $C_1 = 1,6 \cdot 10^{-10}$  Ф,  $L_1 = 5 \cdot 10^{-3}$  Гн і  $C_2 = 10^{-10}$  Ф,  $L_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  Гн. Як слід змінити ємність  $C_2$ , щоб настроїти контури в резонанс?

2. Увімкнутий у коливальний контур конденсатор заповнили діелектриком з діелектричною проникністю  $\varepsilon = 4$ . У скільки разів змінилась частота власних коливань контуру?

3. Коливальний контур містить котушку індуктивністю  $L = 10^{-4}$  Гн і конденсатор, ємність якого можна змінювати від  $C_1 = 10^{-10}$  Ф до  $C_2 = 4 \cdot 10^{-10}$  Ф. Активний опір контуру дуже малий. В яких межах може змінюватися період коливань контуру?

4. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю  $L = 4 \cdot 10^{-4}$  Гн і конденсатора електроємністю  $C = 4 \cdot 10^{-10}$  Ф. Визначте амплітудне значення сили струму в контурі, якщо амплітудне значення напруги  $U_m = 100$  В.

5. Як вплине на вільні електромагнітні коливання в контурі збільшення активного опору котушки при незмінних решти параметрів?

## § 23 — ЗАТУХАЮЧІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. АВТОКОЛИВАННЯ

Вільні коливання, розглянуті в попередніх параграфах, є певною ідеалізацією. Реальний коливальний контур завжди чинить певний опір електричному струмові. Тому частина наданої контуру енергії безперервно перетворюється у внутрішню енергію проводів. Крім того, як ми пізніше дізнаємося, частина енергії випромінюється в навколишній простір. Це означає, що вільні електромагнітні коливання в контурі практично завжди є затухаючими. Чим більший опір контуру, тим швидше відбувається затухання. Якщо опір контуру дуже великий, коливання можуть і не виникнути — конденсатор розрядиться, а перезарядження його не відбудеться.

З метою технічного використання електромагнітних коливань необхідно, щоб ці коливання існували тривалий час, тобто потрібно зробити їх незатухаючими. Для цього енергію, яку втрачає контур, слід увесь час поповнювати від побічного джерела. З подібною задачею ви вже зустрічалися, коли розглядали способи отримання незатухаючих механічних коливань.

Щоб дістати незатухаючі електромагнітні коливання, достатньо у коливальний контур увімкнути джерело змінної ЕРС. Вона викликатиме в контурі вимушені коливання заряду (сили струму і напруги) з частотою, що дорівнює частоті змін ЕРС джерела. Під час вимушених коливань енергія підводиться до контуру безперервно, внаслідок чого ці коливання не затухають. Таке джерело змінної ЕРС, яке підтримує незатухаючі електромагнітні коливання в реальному контурі, називають *генератором електромагнітних коливань*.

Особливо важливі і широко вживані так звані електромагнітні автоколивання — незатухаючі коливання, які підтримуються в коливальній системі не за рахунок періодичного зовнішнього впливу, а в результаті здатності коливальної системи самій регулювати надходження енергії від постійного зовнішнього джерела. Такі системи назива-



ються автоколивальними. Добре відомим вам прикладом механічної автоколивальної системи є звичайний годинник з маятником.

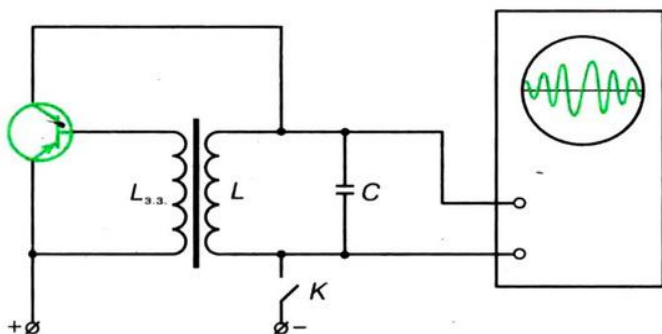
В автоколивальних системах незатухаючі електричні коливання виникають під дією процесів, які відбуваються всередині системи, і для їх підтримання не потрібно жодних зовнішніх впливів. До складу автоколивальних систем входить джерело енергії, достатньо енергомістке, щоб втрати енергії за кілька коливань були значно меншими за повний запас енергії джерела. У випадку електричних автоколивань таким джерелом може бути акумуляторна батарея чи інше джерело ЕРС. Це джерело періодично вмикається самою системою і в неї вводиться певна енергія, щоб компенсувати втрати на нагрівання провідників. У результаті коливання стають незатухаючими.

Оскільки коливання в автоколивальних системах встановлюються під впливом процесів, які відбуваються всередині системи, вони виникають самочинно (самозбудження), під дією випадкових малих впливів, які виводять систему з рівноваги. Виникаючі малі коливання самочинно наростають, і врешті-решт у системі встановлюються коливання, властивості яких (частота, амплітуда, фаза тощо) визначаються властивостями самої системи і не залежать від початкових умов. Цим автоколивання принципово відрізняються від вимушених електромагнітних коливань, частота яких збігається з частотою зовнішньої ЕРС, а амплітуда коливань залежить від амплітуди цієї ЕРС.

## **§ 24 — ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЧИХ КОЛИВАНЬ**

Електричні автоколивальні системи надзвичайно широко використовуються в сучасній техніці для одержання незатухаючих електромагнітних коливань високої частоти. Принцип дії цих систем значною мірою збігається з принципом дії механічних автоколивальних систем. Електрична автоколивальна система містить коливальний контур, підсилювач коливань і джерело електричної енергії (батарею). Між коливальним контуром і підсилювачем має існувати зворотний зв'язок — коливання з контуру передаються у підсилювач, підсилюються за рахунок джерела енергії і повертаються назад у коливальний контур. Дуже важливо, щоб коливання, які передаються від підсилювача в контур, збігалися за фазою з коливаннями у самому контурі.

Існує багато автоколивальних систем як з електронними лампами, так і з транзисторами. На малюнку 46 показано

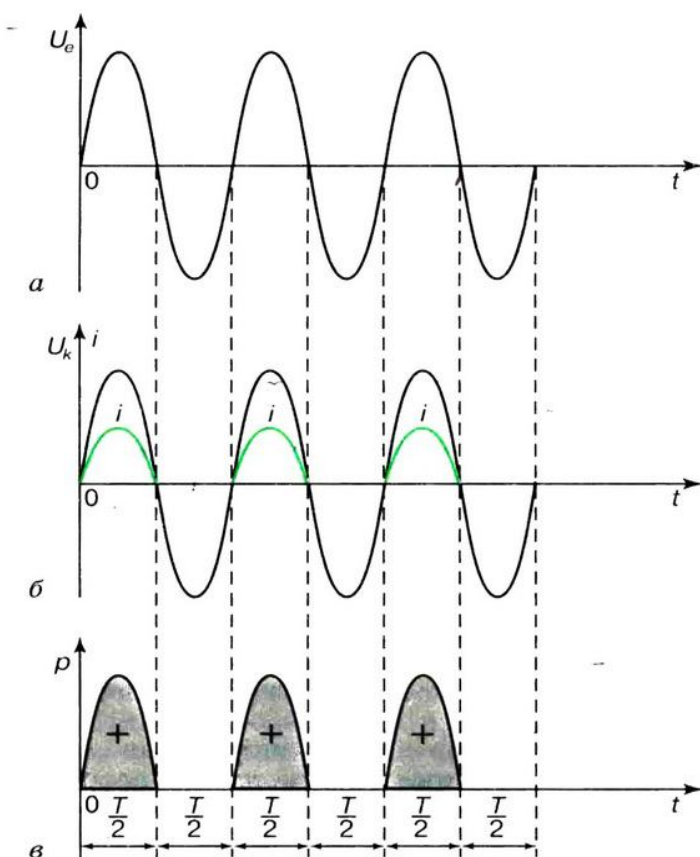


Мал. 46

спрощену схему електричної автоколивальної системи — автогенератора електромагнітних коливань на транзисторі. Коливальний контур  $LC$  приєднаний до джерела постійної ЕРС послідовно з транзистором. В емітер — базове коло транзистора — приєднана котушка  $L_{з.з.}$ , індуктивно пов'язана з коливальним контуром. Цю котушку називають *котушкою зворотного зв'язку*. Паралельно коливальному контуру увімкнутий електронний осцилограф для спостереження електромагнітних коливань. Генератор живиться від джерела постійної напруги.

Працює автогенератор на транзисторі так. Під час вмикання джерела живлення через транзистор проходить імпульс струму  $i$ , який заряджає конденсатор контуру. В результаті в коливальному контурі виникають вільні електромагнітні коливання. Змінний струм, проходячи котушкою контуру, індукуює на кінцях котушки зворотного зв'язку змінну напругу  $u_e$  (мал. 47, а). Ця напруга подається на емітерний перехід транзистора. Внаслідок цього через транзистор проходять імпульси сили струму, тривалість яких залежить від режиму роботи транзистора. На малюнку 47, б показані імпульси сили струму, які тривають протягом півперіоду генерованих коливань. У перший півперіод коливання, коли емітерний перехід вмикається в прохідному напрямі, в колекторному колі транзистора йде струм. За напрямом він збігається зі струмом у котушці контуру. В результаті сила струму в котушці наростає і відбувається підзарядка конденсатора, тобто компенсуються втрати енергії в контурі.

У наступний півперіод, коли струм у контурі змінить напрям, на емітерний перехід транзистора з котушки зворотного зв'язку подається напруга протилежного знаку. Емітерний перехід вмикається в запірному напрямі, що призводить



Мал. 47

до зникнення струму в колекторі, тобто до закриття транзистора. Коливальний контур протягом півперіоду від'єднується від джерела напруги.

У наступний півперіод процес повторюється. Таким чином, роль транзистора зводиться до вмикання і вимикання джерела постійної напруги, за рахунок енергії якого у контурі підтримуються незатухаючі коливання. На малюнку 47, в заштриховані площі пропорційні енергії, яка надходить у контур за кожен період коливань.

Може здатися, що з кожним періодом амплітуда коливань в контурі зростатиме нескінченно. Так би воно й було, якби сила струму емітера могла безмежно зростати у разі збільшення напруги на емітерному переході. Проте внаслідок насичення в транзисторі амплітуда коливань не може зростати до нескінченності, встановиться цілком певне її значення для даного режиму роботи генератора. Ампліту-



да автоколивань повністю визначається параметрами автоколивальної системи.

Щоб коливання, які почалися в контурі після замикання колекторного кола, перетворилися в незатухаючі, необхідно, щоб у колі емітера коливання збігалися за фазою з коливаннями в контурі. Адже вони можуть виявитися і в протифазі і тоді автоколивання не виникнуть.

Генератори незатухаючих коливань на транзисторах надійні в роботі, мають високий ККД, можуть працювати від малопотужних джерел живлення за надзвичайно низьких напруг на колекторі, дають змогу широко варіювати частоту, інтенсивність і форму коливань.

1. Накресліть схему транзисторного автогенератора і поясніть принцип утворення в ньому незатухаючих коливань. 2. Яку роль відіграє транзистор у схемі генератора?

## § 25 — ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. ЗМІННИЙ СТРУМ

Вільні електромагнітні коливання завжди затухають за той чи інший час і тому дуже рідко застосовуються на практиці. Незатухаючі коливання, які можуть тривати як заведено довго, навпаки, дістали величезне практичне застосування. З одним способом збудження в колі незатухаючих електромагнітних коливань, так званих автоколивань, ви вже ознайомилися. Не менш важливе значення у техніці мають коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється.

Такі незатухаючі коливання називаються *вимушеними електромагнітними коливаннями*.

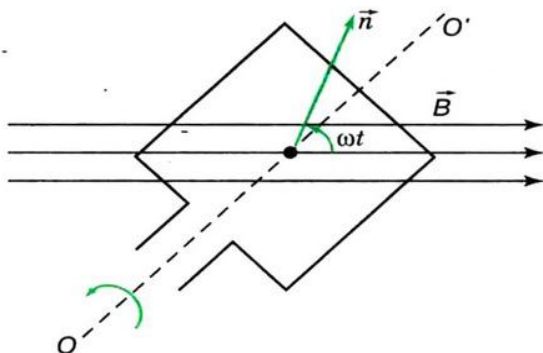
Прикладом вимушених електромагнітних коливань є звичайний змінний струм, який широко застосовується для освітлення, приведення в рух верстатів, механізмів і машин. Якщо електричне коло під'єднати до джерела змінної ЕРС, на електрони в провіднику діятиме змінна сила, під дією якої вони почнуть переміщатися. При цьому рух електронів точно повторює характер змін ЕРС. Змінний струм — це по суті вимушені коливання електричних зарядів у провіднику під дією прикладеної змінної ЕРС.

Змінний струм за характером змін сили струму може бути найрізноманітнішим. Найбільш важливими є струми, сила яких змінюється за гармонічним законом, тобто за законом синуса чи косинуса. Саме такі змінні струми виробляють генератори на електростанціях, з такими струмами в

багатьох випадках доводиться мати справу в радіотехніці. Тому надалі вивчатимемо лише такі змінні струми.

Для одержання в колі змінного струму, сила якого змінюється синусоїдально, необхідно увімкнути в коло джерело ЕРС, яка періодично змінюється синусоїдально:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ , де  $\mathcal{E}_0$  — амплітудне значення ЕРС,  $\omega$  — циклічна частота змінної ЕРС.

Розглянемо звичайний спосіб одержання синусоїдальної ЕРС, який використовується в техніці для вироблення змінного електричного струму. Плоский прямокутний контур (рамка) обертається навколо осі  $OO'$ , перпендикулярної до ліній індукції магнітного поля (мал. 48). Нехай магнітне



Мал. 48

поле є однорідним: індукція  $\vec{B} = \text{const}$  і контур обертається рівномірно з кутовою швидкістю  $\omega = \text{const}$ . Тоді магнітний потік  $\Phi$ , який пронизує контур у будь-який момент часу  $t$ , дорівнюватиме:

$$\Phi = BS \cos \varphi = BS \cos \omega t,$$

де  $S$  — площа, обмежена контуром, а  $\varphi = \omega t$  — кут повороту контуру, який відлічується від початкового положення контуру, за якого  $B \perp S$ .

Під час обертання контуру потік  $\Phi$  періодично змінюється. У зв'язку з цим у контурі виникає періодично змінна ЕРС індукції, яка, згідно з законом електромагнітної індукції дорівнює:

$$\mathcal{E}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = \Phi' = - (BS \cos \omega t)' = BS \omega \sin \omega t,$$

оскільки  $(\cos \omega t)' = - \sin \omega t$ .

Максимальне значення цієї ЕРС, яке настає для  $\sin \omega t = 1$ , дорівнює  $\mathcal{E}_m = BS \omega$ , тому

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_m \sin \omega t. \quad (25.1)$$

Отже, коли в однорідному магнітному полі рівномірно обертається провідний контур, в ньому збуджується електро-  
рушійна сила, яка змінюється за законом синуса. Під час  
замикання цього контуру на зовнішнє коло, в колі йтиме  
синусоїдальний змінний струм

$$i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin(\omega t + \varphi) = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де  $I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}$  — максимальне значення сили струму в колі,  $R$  —  
активний опір контуру і зовнішньої частини кола,  $\varphi$  — зсув  
фази між коливаннями сили струму і ЕРС. Причини виник-  
нення зсуву фаз розглянемо пізніше.

Змінний струм є гармонічним коливанням, тому назви  
характеристик механічного коливального процесу зберіга-  
ються і за характеристиками змінного струму. А саме:  $\mathcal{E}_m$  на-  
зивається амплітудою електрорушійної сили,  $I_m$  — амплі-  
тудою сили струму,  $\omega$  — коловою (циклічною) частотою,  
 $\omega t$  — фазою струму. Змінний струм характеризується також  
періодом  $T$  і частотою струму  $\nu$  — причому  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ .

## Вправа 7

1. Миттєве значення ЕРС синусоїдального струму для фази  $60^\circ$  становить 120 В. Визначте амплітудне значення ЕРС. В початковий момент  $\mathcal{E}_0 = 0$ .

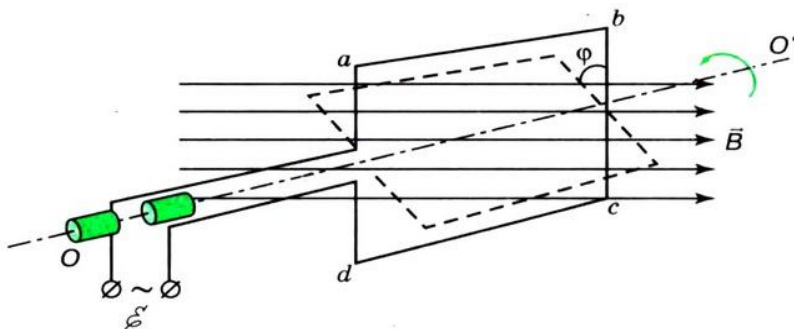
2. Амплітуда сили змінного струму  $I_m = 20$  мА, частота  $\nu = 10^3$  Гц. Визначте миттєве значення сили струму через  $t = 10^{-4}$  с від його нульового значення. В початковий момент  $I_0 = 0$ .

3. ЕРС змінного струму задана рівнянням  $\mathcal{E} = 100 \sin 20\pi t$ . Знайдіть максимальне значення ЕРС, її значення для фази  $\frac{1}{6}\pi$ , ча-  
стоту й період струму.

## § 26 — ГЕНЕРАТОР ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглянутий у попередньому параграфі принцип одер-  
жання ЕРС лежить в основі будови більшості технічних  
індукційних генераторів змінного струму. Якщо виток, зоб-  
ражений на малюнку 48, розріжемо і кінці його з'єднаємо з  
кінцями зовнішнього кола за допомогою двох ізольованих  
одне від одного кілець, якими ковзають щітки зовнішнього  
кола (мал. 49), дістанемо схему найпростішого генератора.  
Збуджувані в послідовно з'єднаних витках ЕРС додаються.  
Тому для одержання великої ЕРС у промислових генерато-





Мал. 49

рах контур, який обертається у магнітному полі, складають з послідовно з'єднаних витків дроту, намотаного на феромагнітне осердя. Тоді ЕРС, збуджена у такому генераторі, дорівнює

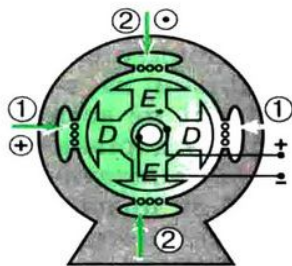
$$\mathcal{E}_i = nBS\omega \sin \omega t. \quad (26.1)$$

Існує багато різних типів індукційних генераторів. Однак ми не розглядатимемо деталі їх конструкцій, а обмежимося лише принципами їх будови. Кожен генератор складається з двох основних частин: електромагніту (або постійного магніту), який створює магнітне поле, і обмотки в якій індукуються змінна ЕРС (у розглянутій на малюнку 49 схемі генератора це обертова рамка).

Із (26.1) видно, що для збільшення ЕРС необхідно збільшувати магнітний потік  $\Phi$  через витки. Тому магнітну систему генераторів роблять майже замкнутою, такою, що складається з двох залізних осердь: зовнішнього кільцеподібного нерухомого і внутрішнього обертового осердя, а повітряний зазор між ними доводять до мінімальних розмірів. Генератор має, як правило, дві обмотки, одна з яких розміщується в пазах нерухомого осердя (статора) з внутрішнього боку, а друга розміщена в пазах обертового осердя (ротора). Одна з обмоток використовується для створення магнітного поля, а друга є робочою обмоткою, в якій індукуються змінна ЕРС.

У розглянутій вище схемі генератора (див. мал. 49) ротором (щоправда, без залізного осердя) була дротяна рамка. Магнітне поле створювалося нерухомим постійним магнітом — статорм. Зрозуміло, що можна зробити й навпаки — обертати магніт, а рамку залишити нерухомою. У великих сучасних генераторах обертається саме електромагніт, який є ротором, тоді як обмотки, в яких збуджується ЕРС, вклені в пазах статора і залишаються нерухомими.

На малюнку 50 показана магнітна система сучасного генератора змінного струму. В циліндричній порожнині статора, виготовленого із спеціальної електротехнічної сталі, обертається постійний магніт (у малопотужних генераторах) або електромагніт (у потужних). Обмотка, в якій збуджується ЕРС індукції, вкладається у вигляді послідовно з'єднаних рамок у спеціальні пази статора. Причому магнітна система генератора конструюється так, щоб під час обертання електромагніту індукція магнітного поля змінювалася за законом  $B = B_m \cos \varphi$ , де  $\varphi = \omega t$  — кут, утворений вектором  $\vec{B}$  з площиною рамки. Тоді в рамці збуджується ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i = \omega BS \sin \omega t$ .



Мал. 50

Нині налагоджено виробництво сучасних генераторів змінного струму потужністю 200, 300, 500 і 800 МВт.

?

1. Який принцип роботи генераторів змінного струму? 2. Яким чином добиваються збільшення ЕРС індукції в обмотці статора? 3. Поясніть виникнення в нерухомих обмотках статора ЕРС індукції.

## § 27 — ДІЮЧІ ЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ І СИЛИ СТРУМУ

У колі змінного синусоїдального струму напруга і сила струму весь час змінюються. Виникає питання, яке значення сили струму чи напруги прийняти за характеристику цього струму. Середні значення сили струму і напруги за період дорівнюють нулю і не можуть бути їх характеристиками. Можна, звичайно, користуватися амплітудними значеннями, але з ряду міркувань в електротехніці і радіотехніці користуються переважно не амплітудними значеннями сили струму і напруги, а так званими *діючими*. Ознайомимося з даними поняттями і встановимо зв'язок між діючими й амплітудними значеннями. Найзручніше це зробити, розглядаючи потужність, яка виділяється в провіднику під час проходження змінного струму.

Під час проходження по колу змінний струм промислової частоти (50 Гц) нагріває провідник, наприклад волосок електричної лампи чи спіраль електроплитки. Сила струму і напруга в колі змінюються і до того ж порівняно швидко —

50 раз на секунду. Тому кількість виділеної енергії також дуже швидко змінюється з часом. Цих змін ми не помічаємо, оскільки за великої частоти змінного струму волосок чи спіраль не встигають охолонути за моменти часу, коли сила струму дорівнює нулю.

Виділювана в колі потужність також змінюється з часом. Але, як правило, у всіх випадках нам слід знати середню потужність струму на ділянці кода за великий інтервал часу, який включає багато періодів. Для цього досить знайти середню потужність за один період (у наступні періоди в колі виділяється така сама кількість енергії). Середня за період потужність змінного струму дорівнює відношенню сумарної енергії, яка надійшла в коло за період, до тривалості періоду.

Пригадаємо, що потужність у колі постійного струму визначається за формулою  $P = IU$ . Протягом дуже малого інтервалу часу силу й напругу змінного струму можна вважати постійними. Тому миттєва потужність у колі змінного струму виражається формулою

$$p = iu. \quad (27.1)$$

Визначимо середнє значення потужності за період. Для цього перетворимо (27.1), підставляючи вираз для сили струму  $i = I_m \cos \omega t$  і  $u = U_m \cos \omega t$ :

$$p = I_m U_m \cos^2 \omega t.$$

Відомо, що  $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t)$ . Тоді

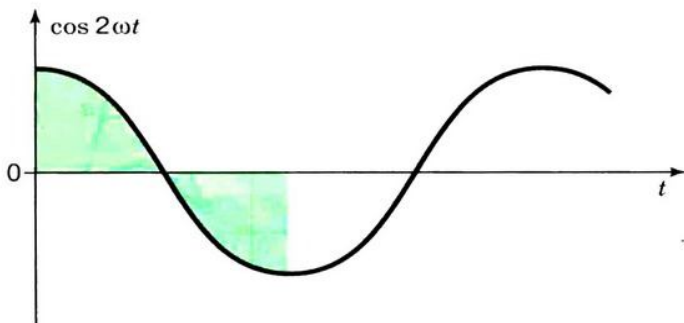
$$p = \frac{1}{2} I_m U_m (1 + \cos 2\omega t) = \frac{1}{2} I_m U_m + \frac{1}{2} I_m U_m \cos 2\omega t. \quad (27.2)$$

Середнє за період значення  $\cos 2\omega t$  дорівнює нулю, оскільки протягом кожного півперіоду ця функція пробігає ряд додатних значень, а протягом наступного півперіоду пробігає такий самий ряд від'ємних значень (мал. 51). Тому середня потужність за період дорівнює першому членові у (27.2):

$$\bar{p} = \frac{1}{2} I_m U_m.$$

Порівнюючи вираз для середньої потужності змінного струму з виразом для постійного струму  $P = IU$ , побачимо, що вони збігатимуться, якщо змінний струм характеризувати не амплітудними значеннями, а значеннями в  $\sqrt{2}$  раз меншими, тобто





Мал. 51

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ і } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (27.3)$$

Значення  $I$  і  $U$  дістали назву *діючих значень* відповідно *сили струму* і *напруги*.

Шкали вимірювальних приладів змінного струму (амперметри і вольтметри) проградуйовані саме в діючих значеннях. У паспортах електротехнічних машин, апаратів і приладів змінного струму вказані також діючі значення сили струму і напруги.

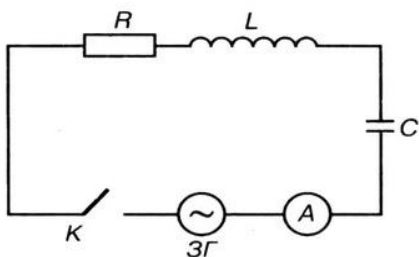
?

1. Чому ми не помічаємо мигтіння лампочок, увімкнутих в освітлювальну мережу змінного струму? 2. В освітлювальних мережах змінного струму застосовуються напруги 220 і 127 В. Які амплітудні значення напруги в цих мережах? 3. Амперметр, увімкнутий в коло змінного струму, показує 1 А. Яке амплітудне значення сили цього струму?

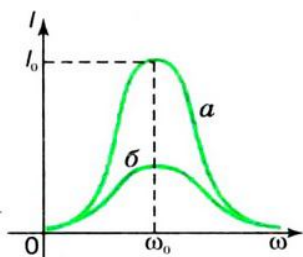
## § 28 — ЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАНС

Вивчаючи вимушені механічні коливання, ми встановили дуже важливу їх особливість, яка виявляється в явищі резонансу. Чи не спостерігається подібне явище і в електричних вимушених коливаннях?

Вивчимо залежність вимушених електричних коливань (змінного електричного струму в колі) від частоти зміни ЕРС генератора. Складемо електричне коло з послідовно увімкнутих активного опору  $R$ , котушки індуктивності  $L$ , конденсатора  $C$  і амперметра змінного струму  $A$ . Під'єднаємо це коло до звукового генератора  $ЗГ$  (мал. 52). З'ясуємо, як залежить сила струму в колі від зміни його частоти. Замкнемо вимикач  $K$  і, підтримуючи постійною напругу, яку виробляє генератор, простежимо за силою струму в колі під час зміни ча-



Мал. 52



Мал. 53

стоти коливань у широких межах. За найнижчої частоти, яку виробляє 3Г (близько 20 Гц), сила струму в колі незначна. Зі збільшенням частоти вона спочатку дуже повільно, потім швидше зростає. За певної частоти сила струму досягає максимуму. Позначимо цю частоту  $\omega_0$ . Далі сила струму починає спочатку швидко, а потім повільніше зменшуватися і за досить великої частоти майже дорівнює нулю. Якщо цю залежність зобразити графічно, відкладаючи вздовж осі ординат силу струму  $i$ , а вздовж осі абсцис — частоту  $\omega$ , то дістанемо криву  $a$  (мал. 53). Як і для механічних вимушених коливань у даному випадку за деякої частоти ЕРС сила струму в колі має найбільше значення. Явище різкого зростання сили струму за певної частоти називається *електричним резонансом*. Частота  $\omega_0$  називається *резонансною частотою*.

З'ясуємо, як впливають на електричний резонанс активний опір  $R$ , індуктивність  $L$  і ємність  $C$ . Збільшимо опір  $R$ , залишаючи незмінними  $L$  і  $C$ . Змінюючи частоту, спостерігатимемо за силою струму. Виявимо, що і в цьому випадку має місце резонанс за тієї самої частоти  $\omega_0$ , але виражений він менш чітко, ніж у попередньому випадку, і максимальна сила струму менша. Графічно залежність сили струму від частоти у цьому випадку зображена кривою  $b$  (мал. 53).

Цей дослід переконує у тому, що резонансні явища в електричних колах виражені тим чіткіше й сильніше, чим менший активний опір кола. Порівнюючи електричний резонанс з механічним, бачимо, що активний опір в електричних колах має таке саме значення, як і *тертя* в механічних системах.

Замінімо котушку індуктивності, залишаючи незмінними  $R$  і  $C$ . Візьмемо, наприклад, котушку більшої індуктивності  $L$ . Резонансна частота в цьому випадку стане меншою. Так само можна показати, що і ємність конденсатора впливає на резонансну частоту: із збільшенням ємності в колі резонансна частота зменшується. Отже, резонансна частота електричного кола залежить від індуктивності котушки і

ємності конденсатора і не залежить від значення активного опору  $R$ :

$$\nu_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (28.1)$$

$$\text{і } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (28.2)$$

Резонансна частота обернено пропорційна кореню квадратному з добутку індуктивності  $L$  на ємність  $C$  кола. Якщо  $L$  вимірювати в генрі, а  $C$  — в фарадах, то  $\omega_0$  вимірюватиметься в  $\text{с}^{-1}$ .

1. У чому полягає зміст електричного резонансу? 2. Від яких параметрів кола залежить резонансна частота контуру?

## § 29 — ТРАНСФОРМАТОР

Однією з важливих переваг електричної енергії є зручне і просте передавання її від генератора до споживача. Проте воно пов'язане із значними втратами в проводах внаслідок їх нагрівання. Потужність струму, яка йде на нагрівання проводів, дорівнює  $P_{\text{вт}} = I^2 R$ , де  $I$  — сила струму в лінії,  $R$  — опір проводів лінії.

Ця формула вказує на два можливі шляхи зменшення теплових втрат у проводах лінії передач: 1) зменшення опору проводів; 2) використання струму меншої сили. Істотно зменшити опір проводів лінії можна лише за рахунок збільшення їх поперечного перерізу. А це веде до збільшення вартості ліній, тому такий спосіб зменшення втрат неприйнятний. На практиці ефективно зменшення втрат енергії на нагрівання проводів досягається зменшенням сили струму.

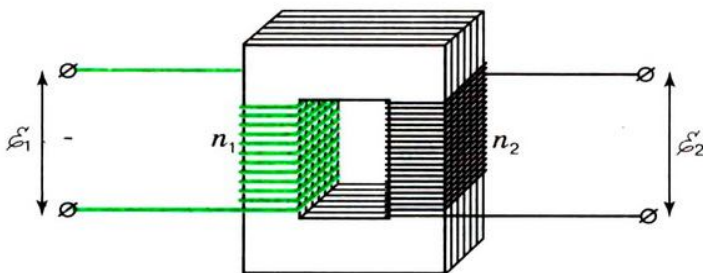
Нехай, наприклад, необхідно передати електроенергію потужністю  $10^5$  кВт по лінії, опір якої  $R = 50$  Ом (такий опір має двопровідна лінія передачі з мідного дроту діаметром 1 см завдовжки приблизно 150 км), з втратами на нагрівання проводів лінії 1 % ( $P_{\text{вт}} = 10^3$  кВт). У цьому випадку по-

тужність має передаватися струмом силою  $I = \sqrt{\frac{P_{\text{вт}}}{R}} \approx 140$  А.

Отже, напруга в лінії має бути  $U = \frac{P}{I} \approx 700\,000$  В.

Цей приклад показує, що для передачі великої потужності за допомогою порівняно слабких струмів напруга має бути дуже високою. Однак конструювати генератори (а також різні споживачі електричної енергії), розраховані на високі напруги, дуже складно, оскільки необхідно забезпечити





Мал. 54

добру ізоляцію обмоток, не кажучи вже про те, що широке споживання електричної енергії за такої високої напруги взагалі неприпустиме через небезпеку враження людини струмом. Тому електричні генератори будують на напругу 6—25 тисяч вольт, а потім цю напругу підвищують за допомогою трансформаторів. У місцях споживання електроенергії струм високої напруги перетворюють в струми низької напруги (110 В, 220 В, 380 В і т. д.).

Розглянемо будову і принцип дії трансформатора. В найпростішому випадку трансформатор складається з двох котушок (обмоток), надітих на замкнуте залізне осердя (мал. 54). Одна з обмоток — первинна — вмикається до джерела змінної напруги. Під час проходження цієї обмоткою змінного струму в осерді виникає змінний магнітний потік  $\Phi$ , який збуджує у кожному витку первинної обмотки ЕРС самоіндукції, що дорівнює  $\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$ . Оскільки магнітний потік існує практично лише всередині осердя і однаковий у всіх перерізах, в кожному витку вторинної обмотки виникає ЕРС індукції, рівна також  $\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$ .

Отже, якщо первинна обмотка має  $n_1$  витків, а вторинна  $n_2$ , то ЕРС індукції в обмотках прямо пропорційні кількості витків у них:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k. \quad (29.1)$$

Відношення  $k$  називають *коефіцієнтом трансформації*. Коефіцієнт трансформації визначається у разі холостого ходу трансформатора, тобто під час розімкнутого кола вторинної обмотки.

При холостому ході (коли до кінців вторинної обмотки не увімкнено навантаження) в первинній обмотці йде так званий струм холостого ходу. Сила струму  $I_0$  холостого ходу мала (становить приблизно 5 % номінальної сили струму),

внаслідок чого спад напруги в первинній обмотці малий і ЕРС самоіндукції в первинній обмотці дорівнює напрузі на затискачах кола  $\mathcal{E}_1 \approx U_1$ . Коло вторинної обмотки розімкнуте, внаслідок чого в ньому немає струму, напруга на затискачах вторинної обмотки дорівнює індукованій у ній ЕРС ( $U_2 = \mathcal{E}_2$ ). Тому

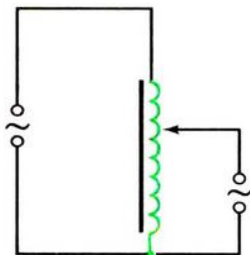
$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (29.2)$$

*Коефіцієнтом трансформації трансформатора називається відношення напруги на затискачах первинної обмотки до напруги на затискачах його вторинної обмотки під час холостого ходу.* В підвищувальному трансформаторі коефіцієнт трансформації  $k < 1$  (відповідно  $n_2 > n_1$ ), у знижувальному  $k > 1$ . Один і той самий трансформатор може працювати і як підвищувальний, і як знижувальний, залежно від того, яка обмотка використовується як первинна.

Увімкнемо тепер до вторинної обмотки коло, яке споживає електроенергію, або, як кажуть, навантажимо трансформатор. У вторинній обмотці виникне змінний струм  $I_2$  (такої самої частоти). Цей струм створює в осерді магнітний потік, спрямований за правилом Ленца назустріч потоку первинної обмотки. Послаблення магнітного потоку в осерді веде до зменшення ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E}_1$  в первинній обмотці, що (за постійної  $U_1$ ) викликає зростання сили струму в первинному колі. Це збільшення сили струму веде до збільшення магнітного потоку, ЕРС індукції і сили струму у вторинній обмотці. Але збільшення сили струму у вторинній обмотці супроводжується збільшенням сили струму самоіндукції і, отже, зменшенням магнітного потоку (який щойно зростає). Зменшення магнітного потоку в первинній обмотці веде до зменшення ЕРС самоіндукції, нового збільшення сили струму в первинній обмотці і магнітного потоку і т. д.

Зрештою за постійного навантаження встановлюються певний магнітний потік  $\Phi$ , ЕРС індукції  $\mathcal{E}_2$  у вторинній обмотці і сила струму  $I_1$  у первинній обмотці.

У випадку навантаження трансформатора відбувається передача енергії з первинної обмотки у вторинну. За законом збереження і перетворення енергії потужність струму у вторинному колі менша за потужність у первинному на значення втрат потужності в трансформаторі:  $P_2 = P_1 - \Delta P$ . Оскільки ККД трансформатора дуже близький до 1, для наближених розрахунків можна знехтувати втратами потужності в трансформаторі і вважати  $P_2 \approx P_1$ , або  $I_2 U_2 \approx I_1 U_1$ . Звідси знайдемо



Мал. 55

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{k}. \quad (29.3)$$

Різні за розмірами і потужністю трансформатори широко використовуються у різних галузях електротехніки і на виробництві.

Для кіл невеликої потужності іноді вторинною обмоткою трансформатора роблять частину первинної обмотки або, навпаки, первинною обмоткою — частину вторинної. В цьому випадку трансформатор називають *автотрансформатором* (мал. 55). Один з контактів автотрансформатора часто роблять рухомих, що дає змогу плавно змінювати вихідну напругу.

?

1. На якому принципі ґрунтується робота трансформатора? Чи можна трансформувати постійний струм? 2. Що таке коефіцієнт трансформації? 3. Як здійснюється передача електроенергії на великі відстані?

## Вправа 8

1. Трансформатор з коефіцієнтом трансформації  $k = 10$  знижує напругу з 10 000 В до 800 В. При цьому у вторинній обмотці йде струм силою  $I_2 = 2$  А. Визначте опір вторинної обмотки. Втратами енергії в первинній обмотці знехтувати.

2. Для трансляції радіопередач застосовують трансформатор, який знижує напругу до 30 В. Визначте споживану трансформатором потужність, якщо його ККД  $\eta = 95\%$  і до нього ввімкнені  $n = 380$  гучномовців, через кожний з яких проходить струм силою  $I = 8$  мА.

3. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації  $k = 24$  увімкнено в коло з напругою 120 В. Вторинну котушку трансформатора під'єднано до приладу, яким проходить струм силою  $I = 0,5$  А. Визначте опір приладу, якщо опір вторинної котушки трансформатора  $R_2 = 2$  Ом.

4. Первинна обмотка силового трансформатора для живлення кіл радіоприймача має  $n_1 = 1200$  витків. Яку кількість витків повинна мати вторинна обмотка трансформатора для живлення волоска розжарення кенотрона (необхідна напруга  $U_2 = 3,5$  В і сила струму  $I_2 = 1$  А), вважаючи, що опір цієї обмотки  $R_2 = 0,1$  Ом, а напруга в колі  $U = 120$  В?



## **§ 30 — ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ. ПЕРЕДАЧА І ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Рівень розвитку продуктивних сил суспільства, здатність виробляти матеріальні блага і створювати кращі матеріальні умови для життя визначаються рівнем виробництва і споживання енергії, насамперед електричної. Електрична енергія має дві чудові якості: вона може бути передана проводами на великі відстані з порівняно малими втратами і може легко перетворюватися в інші види енергії: механічну (двигуни), внутрішню (електронагрівні прилади), світлову (лампи розжарювання), хімічну (зарядка акумуляторів). Ось чому виробництво, передача, розподіл і використання електричної енергії має величезне значення.

Виробляється електрична енергія на електростанціях в основному за допомогою розглянутих вище індукційних генераторів. Тепер існують три основні типи електростанцій: теплові (ТЕС), гідроелектричні (ГЕС) і атомні (АЕС).

На теплових електростанціях енергія, яка виділяється під час спалювання різних видів палива: вугілля, газу, нафти, торфу, горючих сланців, за допомогою електрогенераторів, що приводяться в обертання паровими і газовими турбінами або двигунами внутрішнього згоряння, перетворюється в електричну енергію.

На гідроелектростанціях (ГЕС) відбувається перетворення потенціальної енергії піднятої греблею води в електричну енергію. Ротори електрогенераторів приводяться в обертання гідравлічними турбінами. Потужність ГЕС залежить від створюваної греблею різниці рівнів води (напору) і від маси води, яка проходить через турбіни станції за секунду (витрата води).

В останні роки все більшу роль в електроенергетиці відіграють атомні електростанції (АЕС). Принцип їх дії ґрунтується на використанні внутрішньої енергії, яка виділяється в ядерних реакторах внаслідок регульованої ланцюгової реакції поділу ядер Урану або Плутонію. З будовою і роботою АЕС ви ознайомитеся пізніше.

Споживачі електричної енергії є скрізь. У зв'язку з цим під час промислового споживання електричної енергії може виникнути запитання: що вигідніше? Передавати вироблену в одному місці на великій електростанції електроенергію на значні відстані чи будувати маленькі електростанції біля кожного споживача. Очевидно, однозначної відповіді на всі випадки дати не можна. У наш час вигідніше будувати великі електростанції і передавати енергію на великі відстані з

мінімальними втратами. Ви вже знаєте, що для цього енергію треба передавати за високої напруги.

Генератори потужних теплових, атомних або гідроелектростанцій виробляють змінний струм частотою 50 Гц і напругою 6—20 тисяч вольт. Його за допомогою підвищувальних трансформаторів у кілька прийомів перетворюють у струм з напругою в 110, 220, 400, 500 чи 800 тисяч вольт і подають у лінії передач. Цими лініями струм надходить до місць споживання електроенергії, де за допомогою трансформаторів напруга знижується. Тут будують спеціальну трансформаторну підстанцію, на якій напруга звичайно знижується до 35 тисяч вольт. Від неї електроенергія розподіляється по окремих районах споживання, в кожному з яких є своя трансформаторна підстанція, яка знижує напругу до 3000—6000 В або 10 000 В. Від цих районних підстанцій енергія розподіляється між пунктами споживання (заводи, ферми, житлові будинки тощо). В кожному такому пункті є свій трансформатор, який знижує напругу до потрібного споживачам значення.

## **§ 31 — ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Сучасне виробництво електроенергії супроводжується забрудненням навколишнього середовища, масштаби якого в майбутньому можуть стати загрозливими.

Електроенергія, яку виробляють на ГЕС, дешевша, ніж електроенергія, яку виробляють електростанції інших типів. Однак будівництво ГЕС на рівнинних річках призводить до затоплення великих територій. Значна частина площі водойм, що утворюються, — мілководдя. В літній час за рахунок сонячної радіації в них активно розвивається водяна рослинність, відбувається так зване «цвітіння» води. Зміна рівня води, яка подекуди доходить до повного висушування, веде до загибелі рослинності.

Основними виробниками електричної енергії в найближчому майбутньому будуть теплові електростанції — тепер на них виробляється понад 80 % всієї електроенергії. Перевага ТЕС у тому, що вони можуть бути розміщені на будь-якій території, працюють практично на всіх видах мінерального палива і виробляють не лише електричну, а й внутрішню енергію (гарячу воду для опалення і водозабезпечення, пару для технічних потреб). Таке комплексне вироблення електричної і внутрішньої енергії сприяє підвищенню коефіцієнта використання енергії палива до 60—70 %.

Подальший розвиток теплоенергетики стримується тим, що ТЕС є одним з головних забруднювачів навколишнього середовища продуктами згоряння.



Навіть під час спалювання природного газу, що не містить шкідливих речовин, у продуктах горіння є оксид нітрогену (II), який в атмосфері перетворюється в шкідливий діоксид нітрогену. Сучасні ТЕС конденсаційного типу обладнуються дуже високими трубами (250—350 м) для розсіювання шкідливих домішок в атмосфері: сірчистого ангідриду, сірчаного ангідриду, оксидів Нітрогену, частинок летючої золи та ін. Для золоуловлювання використовуються мокрі скрубери та електрофільтри. Для уникнення викидів сполук Сульфуру паливо попередньо очищають від них, здійснюють його газифікацію та очищення димових газів.

Крім того, турбіни ТЕС і водяну пару, яка відпрацювала в паровій турбіні, треба охолоджувати проточною водою. З цієї причини ТЕС доводиться будувати неподалік від великих водойм. Спускання підігрітої води у водойми призводить до їх теплового забруднення.

До недавніх серйозних аварій на АЕС, насамперед на Чорнобильській АЕС у 1986 році, яка спричинила значне радіоактивне забруднення великої частини території України, атомна енергетика розвивалася швидкими темпами. На Україні споруджувалися одна за одною атомні електростанції. Аналіз аварій на АЕС показав, що вжиті раніше заходи безпеки недостатні і мають бути посилені.

Серйозним недоліком атомної енергетики є радіоактивність використовуваного палива і продуктів його поділу. Це вимагає створення захисту від різного типу радіоактивних випромінювань, що значно підвищує вартість енергії, яку виробляють атомні електростанції.

Ще одним недоліком атомних електростанцій є теплове забруднення води, тобто її нагрівання. Коефіцієнт корисної дії атомних електростанцій нині становить близько 30 %, що значно нижче за коефіцієнт корисної дії ТЕС.

Зростання масштабів споживання електричної енергії, загострення проблем охорони навколишнього середовища значно активізували пошуки більш екологічно чистих способів одержання електричної енергії. У всьому світі проводяться дослідження способів освоєння термоядерної енергії, прямого безмашинного перетворення внутрішньої і хімічної енергії в електричну: магнітогідродинамічні, термоелектричні і термоелектронні генератори, паливні елементи тощо. Інтенсивно розробляються способи використання непаливної відновлюваної енергії — сонячної, вітрової, геотермальної, енергії хвиль, припливів та відпливів тощо.



Періодичні зміни заряду, сили струму й напруги називають електромагнітними коливаннями. За наявності в колі коливального контуру періодично змінної електрорушійної сили в ньому виникають вимушені електромагнітні коливання. Період вільних коливань у контурі прямо пропорційний квадратному кореневі з ємності та індуктивності контуру:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  (формула Томсона).

Основне рівняння, яке описує вільні електромагнітні коливання в контурі, має вигляд:  $-L \frac{\Delta i}{\Delta t} = iR + \frac{Q}{C}$ . Якщо опір контуру  $R$  дуже малий, рівняння спрощується:  $L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -\frac{Q}{C}$ .

Електромагнітні коливання високої частоти можна дістати за допомогою транзисторного або лампового генератора, що є автоколивальною системою, в якій виробляються незатухаючі коливання за рахунок енергії джерела постійної напруги.

Важливим прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний струм. У середній школі вивчаються вимушені електричні коливання, які відбуваються в колах під дією напруги, що гармонічно змінюється з частотою  $\omega$  синусоїдально чи косинусоїдально:  $u = U_m \cos \omega t$ . Сила струму в цьому колі визначається за формулою:  $i = I_m \cos (\omega t + \varphi)$ .

На активному опорі електромагнітна енергія генератора повністю перетворюється в інші види енергії. Коливання сили струму на цьому опорі збігаються за фазою з коливаннями напруги, а амплітуда сили струму визначається рівністю:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Різке зростання амплітуди вимушених коливань сили струму в коливальному контурі з малим активним опором — резонанс — відбувається, якщо збігається частота зовнішньої змінної напруги з власною частотою коливального контуру.

Перетворення змінного струму певної частоти, під час якого напруга підвищується або зменшується в кілька разів практично без втрат потужності, здійснюється за допомогою трансформаторів. Трансформатор характеризується коефіцієнтом трансформації:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

## МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ. ЗВУКОВІ ХВИЛІ

Від кинутого в озеро каменя розходяться кругові хвилі (мал. 56). Якщо ви потягнете вгору і вниз за кінець шнура, прокладеного прямо на столі, по ньому теж побіжать хвилі (мал. 57). Хвилі на воді і хвилі, які біжать по шнуру, — це два наочних приклади хвильового руху. Звук теж поширюється у вигляді хвиль, і світло є електромагнітними хвилями. Пізніше ви дізнаєтеся, що елементарні частинки речовини електрони і протони певним чином теж подібні до хвиль. Отже, вивчення хвильових явищ є дуже важливим, оскільки вони поширені в багатьох галузях фізики. В даному розділі ми зосередимо увагу на вивченні *механічних хвиль*, тобто хвиль, які поширюються лише в речовині, наприклад хвилі на воді чи хвилі в натягнутій струні.

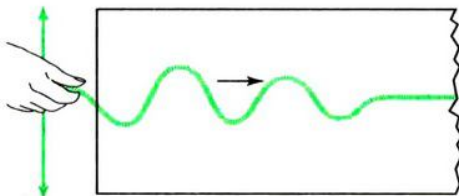
Джерелами хвиль — чи то морських, чи в струні, землетрусів (сейсмічних) чи звукових у повітрі є коливання.

### § 32 — ПОШИРЕННЯ КОЛИВАНЬ У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглядаючи в попередніх параграфах коливальний рух різних систем, ми говорили про причини й закономірності коливального руху, про те, як зробити коливання незатухаючими, і зовсім не цікавилися питанням, а що ж відбувається з середовищем (наприклад, з повітрям), в якому відбуваються ці коливання.



Мал. 56



Мал. 57



Важливою властивістю суцільних середовищ є їх здатність передавати механічний рух. Тіло, що коливається, періодично зміщує частинки середовища, які містяться в безпосередній близькості до нього. Збудження коливань частинок середовища в одному місці викликає вимушені коливання частинок сусідніх, ті в свою чергу збуджують коливання наступних і так далі.

Процес поширення коливань у просторі з часом називають *хвилею*.

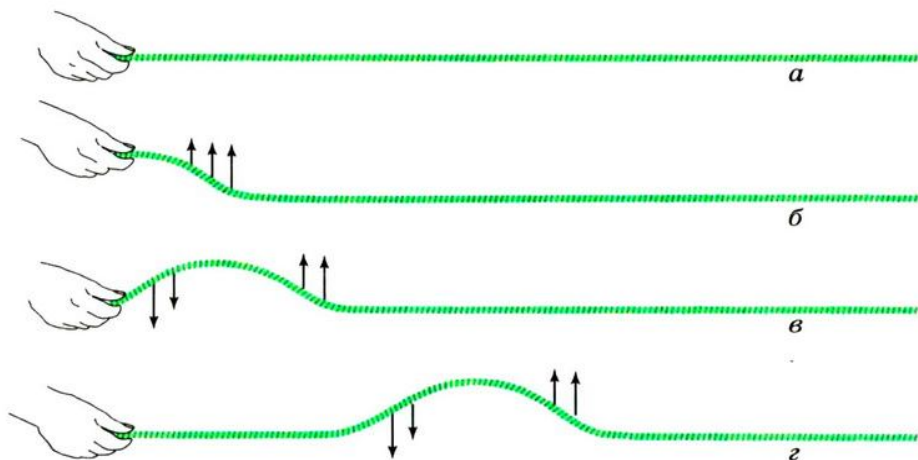
Процеси поширення хвиль тісно пов'язані з коливальними. По суті, хвиля переносить звичайно саме коливальний рух: або періодичний (зокрема — гармонічний), або затухаючий, або яскраво виражений аперіодичний. Механічні хвильові процеси неможливі за відсутності суцільного середовища, в якому поширюється, або, як ще кажуть, *біжить* хвиля. Хвилі іншої природи — електромагнітні, які ви вивчатимете пізніше, — можуть поширюватися і у вакуумі: вони є процесом поширення електромагнітного поля.

Спостерігаючи за набігаючими на берег хвилями, ви, можливо, задумувалися над запитанням: чи приносять хвилі воду до берега? Ні, хвилі насправді не переносять речовину, якою вони поширюються. Звичайно, це не слід плутати з ударом хвиль, коли внаслідок взаємодії хвилі з берегом її вже не можна розглядати як простий хвильовий рух. Так само і вітер може прибивати плаваючі предмети до берега чи зносити їх у море. Хвилі, що біжать по воді, очевидно, мають швидкість. Однак кожна частинка води при цьому здійснює лише коливання відносно положення рівноваги. Це легко спостерігати на листку, що плаває на поверхні ставка. Листок не рухається вперед разом з хвилею, а гоїдається-вгору і вниз: такий самий рух здійснює і вода. Аналогічно хвиля по шнурі біжить вправо, однак кожна ділянка шнура тільки коливається туди й назад. Це загальна властивість хвиль: хвилі можуть поширюватися середовищем на великі відстані, однак саме середовище (вода, шнур) здійснює лише обмежений рух.

Хоча природа хвиль різна і поширюються вони по-різному, однак закономірності, якими характеризується їх поширення, і явища, що під час цього спостерігаються, мають між собою багато спільного. Оскільки пружні хвилі і хвилі на поверхні рідини найбільш наочні, то ознайомлення з основними властивостями хвильових процесів почнемо з розгляду цих хвиль.

Візьмемо довгий гумовий шнур (мал. 58, а) і швидким рухом руки вгору-вниз змусимо один кінець шнура здійснювати вимушені коливання у вертикальній площині (мал. 58, б, в, г). Рука тягне кінець шнура вгору, а оскільки кінцева

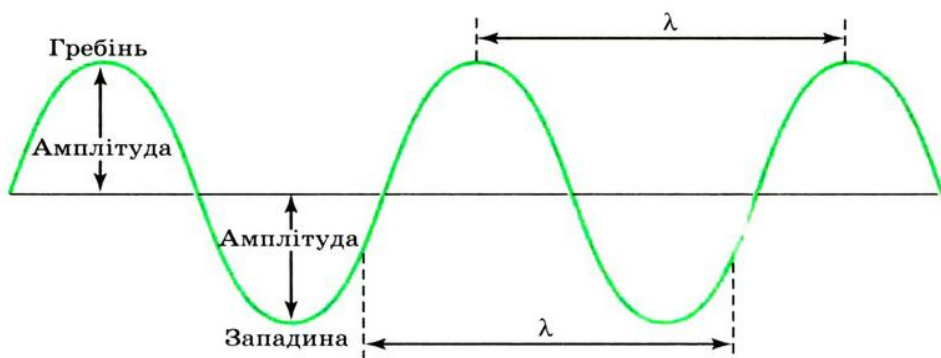




Мал. 58

ділянка шнура пов'язана з сусідніми, то їм також передається сила, яка діє вгору, і вони починають рухатися вгору. Одна за одною послідовні ділянки шнура піднімаються вгору, і вздовж шнура рухається назовні «горб» хвилі. Тим часом рука, яка тримає кінець шнура, опускається у початкове положення вниз, і ділянки шнура, що досягли верхньої точки руху, в тій самій послідовності повертаються назад. Таким чином, джерелом поширення хвильового імпульсу є збудження, а його поширення зумовлене силами взаємодії між сусідніми ділянками шнура.

Аналогічно створюються й поширюються хвилі на воді. На малюнку 58 коливання кінця шнура створюються рукою. Хвилі на воді можна збудити будь-яким коливним предметом, поміщеним на поверхню води, в тому числі й рукою. Джерелом коливань може бути й сама вода, збуджена вітром або кинутим в неї предметом (камінцем, палицею, м'ячем). Вібруючий камертон і «шкіра» барабана збуджують звукові хвилі у повітрі; як ми переконаємося пізніше, коливання електричних зарядів породжує світлові хвилі. І взагалі, майже кожен предмет під час свого коливання породжує хвилі. Якщо джерело рухається синусоїдально, здійснюючи гармонічні коливання, то й хвиля, у випадку пружного середовища, матиме форму синусоїди як у просторі, так і в часі. Інакше кажучи, якщо зробити миттєву фотографію хвильового руху в деякий момент часу, хвиля матиме вигляд графіка функції синус чи косинус. Якщо ж розглядати рух середовища в деякому одному місці протягом тривалого часу (наприклад, спостерігати коливання поверхні води між дво-



Мал. 59

ма близько прив'язаними човнами), то ця невелика ділянка води рухатиметься вгору-вниз, здійснюючи гармонічне коливання, яке описується синусоїдальною функцією часу.

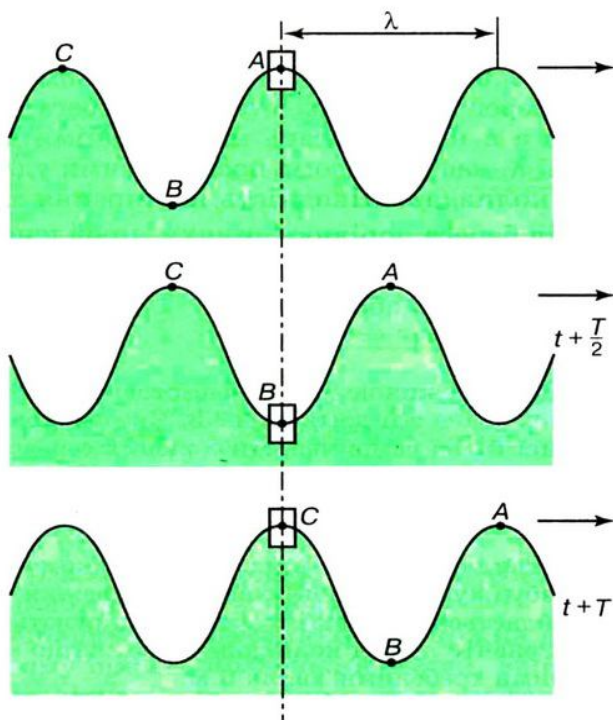
### § 33 — ДОВЖИНА ХВИЛІ. ШВИДКІСТЬ ХВИЛІ

На малюнку 59 показані основні параметри, якими характеризують періодичну синусоїдальну хвилю. Вищі точки хвильового руху називають *гребенями*, а нижчі — *западинами*. Амплітуда — це максимальна висота гребеня чи глибина западини, виміряна відносно нульового рівня (або положення рівноваги); повний розмах коливань від гребеня до западини дорівнює подвійній амплітуді.

Відстань між двома сусідніми гребенями називають *довжиною хвилі*  $\lambda$ . Довжина хвилі дорівнює відстані між будь-якими двома послідовними однаковими за висотою точками хвилі (або відстані між найближчими точками, які коливаються в однакових фазах).

Синусоїдальні хвилі характеризуються ще частотою хвилі  $\nu$ , під якою розуміють частоту коливань частинок середовища (частота коливань поплавця на поверхні хвилі). Частота хвилі дорівнює кількості гребенів хвилі, які проходять через дану точку за одиницю часу (або кількості повних коливань).

*Швидкістю хвилі*  $v$  називають швидкість, з якою переміщається гребінь хвилі. Швидкість хвилі слід відрізнити від швидкості частинок самого середовища. Наприклад, швидкість хвилі, яка біжить по шнуру на малюнку 58, напрямлена вздовж шнура, тоді як швидкості частинок шнура напрямлені перпендикулярно до нього. За період, протягом якого поплавець здійснить одне коливання, тобто опуститься з гребеня в западину і знову підніметься на гребінь, хви-



Мал. 60

ля просунеться на відстань  $\lambda$  (мал. 60), і швидкість хвилі дорівнюватиме:

$$v = \frac{\lambda}{T}, \text{ або } v = \lambda \nu.$$

Припустимо, наприклад, що довжина хвилі 5 м, а частота 3 Гц. При цьому за одну секунду через дану точку пройдуть три гребені хвилі, які містяться один від одного на відстані 5 м; перший гребінь (або будь-яка інша фіксована точка хвилі) переміститься за секунду на 15 м, отже, швидкість хвилі дорівнюватиме 15 м/с.

Під час виникнення хвиль їх частота визначається частотою коливань джерела хвиль, а швидкість залежить від властивостей середовища, в якому ці хвилі поширюються. Тому хвилі однієї і тієї самої частоти мають різну довжину в різних середовищах. Оскільки довжина хвилі  $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$ , вона більша в середовищі, в якому більша швидкість поширення коливань, причому, в стільки разів, у скільки більша швидкість. Наприклад, довжина звукової хвилі у воді більша, ніж у повітрі, в 4,24 рази.



**Задача 1.** Катер, проходячи по озеру, утворив хвилю, яка дійшла до берега через 1 хв. Відстань між двома сусідніми «горбами» хвилі 1,5 м, а інтервал часу між двома послідовними ударами об берег 2 с. Яка відстань від берега до катера?

**Р о з в' я з а н н я.** Відстань між сусідніми «горбами» є довжиною хвилі  $\lambda$ , час між двома послідовними ударами об берег є періодом коливань. Швидкість поширення хвилі  $v = \frac{\lambda}{T}$ , тоді відстань від берега дорівнює шляху, пройденому хвилею за 1 хв:

$$s = vt = \frac{\lambda}{T} t, \text{ або } s = 45 \text{ м.}$$

? 1. Що називають довжиною хвилі? частотою хвилі? 2. Як швидкість хвилі пов'язана з її довжиною? 3. Чи однаковою є довжина хвиль однієї й тієї самої частоти в різних середовищах?

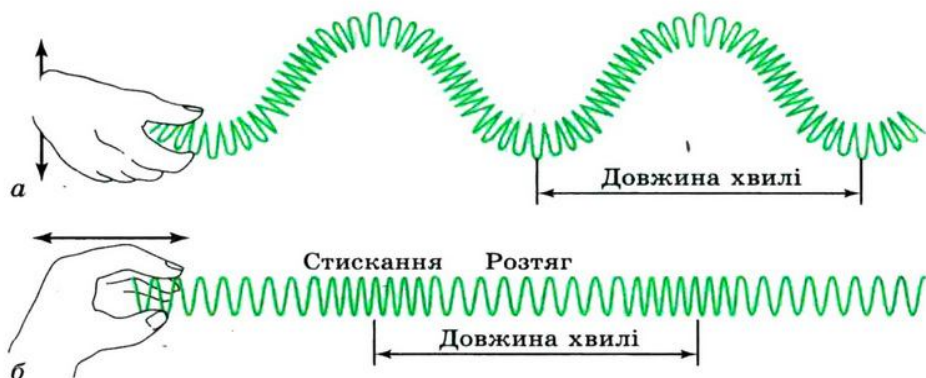
## Вправа 9

1. Визначте швидкість звуку в матеріалі, в якому коливання з періодом 0,01 с збуджують звукову хвилю завдовжки 10 м.

2. Човен гойдається на хвилях, які поширюються зі швидкістю 1,5 м/с. Визначте період коливань човна, якщо відстань між двома найближчими гребенями хвиль 6 м.

## § 34 — ПОПЕРЕЧНІ І ПОЗДОВЖНІ ХВИЛІ

Хвилі можуть поширюватися на великі відстані, а частинки середовища здійснюють коливання лише в обмеженій області простору. Коли хвиля рухається по шнурі, припустимо, зліва направо, ділянки шнура коливаються вгору і вниз, тобто в напрямі, **п е р п е н д и к у л я р н о м у** (або поперечному) до руху самої хвилі (див. мал. 58). Така хвиля називається *поперечною*. Однак не всяка хвиля є поперечною. Коливання можуть відбуватися і **в з д о в ж** напрямі поширення хвилі. Тоді хвиля називається *поздовжньою*. У поздовжній хвилі частинки середовища коливаються в **т о м у с а м о м у н а п р я м і**, в якому поширюється хвиля. Поздовжні хвилі легко спостерігати в м'якій розтягнутій пружині, по чергово стискаючи і розтягуючи один її кінець, як показано на малюнку 61, б (порівняйте з поперечними хвилями на малюнку 61, а). По пружині переміщуються ділянки стискання й розрідження. *Ділянки стискання* — це ті, в яких витки пружини зближуються один з одним, а *ділянки розтягу* — ті, в яких вони розходяться. Ділянки стискання і розтягу відповідають гребеням і западинам поперечної хвилі.



Мал. 61

Важливим прикладом позовжньої хвилі є звукова хвиля у повітрі. Наприклад, коливання мембрани барабана створює позмінно стискання й розрідження у прилеглих ділянках повітря (мал. 62), завдяки чому створюється позовжня хвиля, яка поширюється в повітрі.

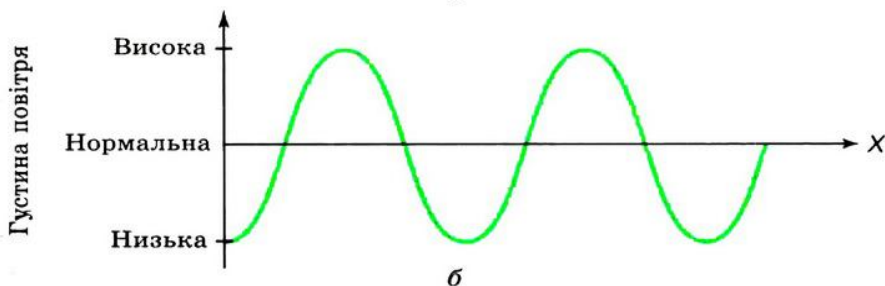
Як і у випадку поперечних хвиль кожна ділянка середовища, по якому біжить позовжня хвиля, здійснює дуже невеликі за амплітудою коливання, тоді як сама хвиля може поширюватися на значні відстані. До позовжньої хвилі також застосовні поняття довжини хвилі, частоти і швидкості. Довжина хвилі — це відстань між двома сусідніми ділянками стискання (або розтягу), а частота — це кількість стискань, які проходять за одиницю часу через дану точку.



Мал. 62



*a*



*б*

Мал. 63

Швидкість хвилі — це швидкість, з якою рухається ділянка стисання (розтягу); вона дорівнює добутку довжини хвилі на її частоту

Поперечну хвилю (мал. 63, *a*) можна подати графічно як залежність густини повітря (або кількості витків пружини) від координати  $x$ , як показано на малюнку 63. Ми часто користуватимемося таким графічним зображенням, оскільки воно наочно показує, що відбувається в середовищі. Зауважте, що залежність на малюнку 63, *б* дуже схожа на поперечну хвилю.

Поздовжні хвилі — це, насамперед, хвилі в рідинах і газах, у тому числі й звукові хвилі у цих середовищах. Наприклад, людська мова передається у повітрі за допомогою поздовжніх хвиль. Поперечні хвилі в газах і рідинах існувати не можуть, оскільки вони викликають зміни не об'єму частинок, а форми. Однак рідини і гази не чинять опору змінам форми. Тому поперечні зміщення в цих середовищах не приводять до виникнення повертаючої сили, а отже, і до виникнення поперечних хвиль. Разом з тим, поздовжні хвилі, пов'язані одночасно зі зміною об'єму і форми частинок, у газах і рідинах існують, тому що ці середовища протидіють зміні об'єму.

Поширення коливань супроводжується передаванням енергії коливань від однієї точки середовища до іншої. Наприклад, під час руху катера він збуджує на поверхні озера хвилі, яким передає частину своєї енергії. Дійшовши до берега, ці хвилі передають отриману від катера енергію



камінцям на березі, очеретові тощо. Енергія коливань гітарної струни переноситься звуковими хвилями і сприймається вухом або мікрофоном. Енергія, яку переносить хвиля, дорівнює сумі кінетичної енергії коливань частинок і потенціальної енергії пружної деформації середовища.

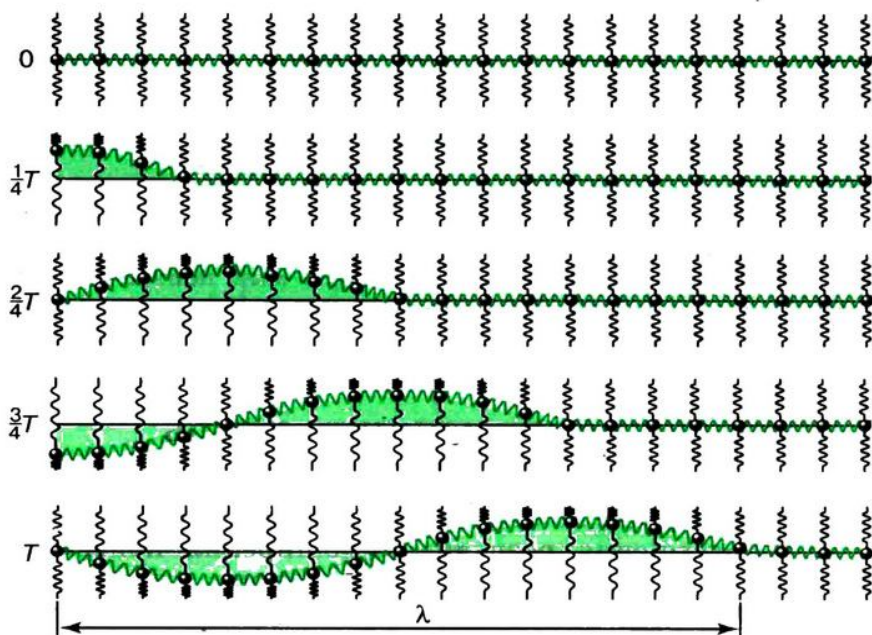
1. Які хвилі називають поперечними? Наведіть приклади поперечних хвиль.
2. Чи можливі поперечні хвилі в рідинах і газах?
3. У чому полягають відмінності між поперечними і поздовжніми хвилями? Наведіть приклади поздовжніх хвиль.
4. Чому хвиля переносить енергію?

### **§ 35 — ПОШИРЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХВИЛЬ В ОДНОРІДНОМУ СУЦІЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Розглянемо процес поширення механічних хвиль докладніше. Для полегшення розглянемо поширення поперечної пружної хвилі в однорідному одномірному середовищі, моделлю якого може бути ряд пружно пов'язаних між собою частинок (пружний гумовий шнур). Якщо кінець шнура змусити коливатися, то шнуром побіжить поперечна хвиля. Кожна частинка шнура має масу і пружність. Під час деформації шнура в будь-якому його перерізі виникають сили пружності. Ці сили прагнуть повернути шнур у початковий стан. Внаслідок інертності частинка коливного шнура не зупиняється в положенні рівноваги, а минає його, продовжуючи рухатися доти, поки сили пружності не зупинять цю частинку в момент максимального відхилення від положення рівноваги.

Замінімо реальний шнур ланцюжком однакових кульок, пов'язаних між собою пружинками (мал. 64). Кульки перебувають на однаковій відстані одна від одної. Якщо відхилити ліву крайню кульку від положення рівноваги вгору, пружинка деформується і на другу кульку почне діяти сила, змушуючи її відхилитися в той самий бік, що й першу. Внаслідок інертності рух другої кульки відбуватиметься узгоджено з рухом першої. Її рух, повторюючи рух першої кульки, запізнюватиметься в часі.

Якщо першу кульку змусити коливатися з періодом  $T$ , то друга кулька теж почне коливатися слідом за першою, однак з певним відставанням за фазою. Третя кулька під впливом сили пружності, викликаной рухом другої кульки, також почне коливатися, ще сильніше відстаючи за фазою, і т. д. Нарешті, всі кульки здійснюватимуть вимушені коливання з однаковою частотою, однак з різними фазами. При цьому по



Мал. 64

ряду кульок побіжить поперечна хвиля завдовжки  $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$ . На малюнку 64 кожний наступний рядок дає положення кульок через  $\frac{1}{4}$  періоду коливань.

Під дією змушуючої сили крайня кулька з розглянутого вище ряду кульок починає коливатися. Очевидно, що якась інша кулька, яка міститься від першої на відстані  $y$  в напрямі поширення коливання, почне коливатися пізніше, коли до неї дійде початок збудження, яке поширюється по ланцюжку кульок. Нехай швидкість поширення збудження по ланцюжку кульок дорівнює  $v$ . Якщо коливання першої кульки здійснюються за законом

$$x = X_m \sin \omega t,$$

то кулька, яка перебуває від першої на відстані  $y$ , коливатиметься за тим самим законом, однак у момент часу  $t$  її зміщення дорівнює тому, яке мала перша кулька в момент часу  $t - \frac{y}{v}$ . Отже, кульки ланцюжка зміщуються за законом:

$$x = X_m \sin \omega \left( t - \frac{y}{v} \right). \quad (35.1)$$

Це рівняння називають рівнянням *біжучої хвилі*. Воно визначає зміщення частинок середовища від положення рівноваги як функцію часу  $t$  і її відстані  $y$  від джерела збудження.

Введемо в це рівняння замість частоти період ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ):

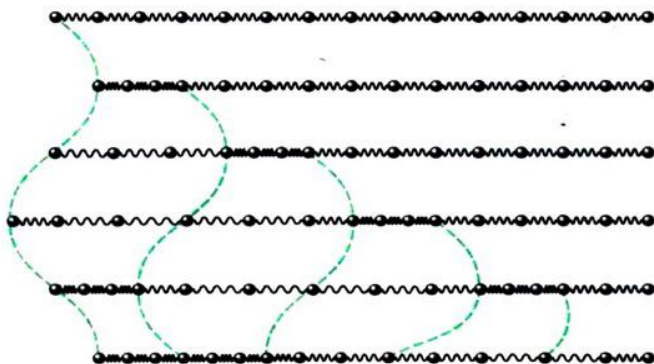
$$x = X_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{y}{vT} \right). \quad (35.2)$$

Якщо зафіксувати певне значення часу  $t$ , рівняння (35.1) і (35.2) покажуть розподіл зміщень частинок уздовж напрямку поширення хвиль залежно від відстані  $y$ . Зміщення частинок, які перебувають одна від одної на відстані  $y = vT$ , в один і той самий момент часу  $t$  будуть, як видно з рівності (35.2), однакові, тобто частинки коливаються в однаковій фазі. Відстань, пройдена хвилею за один період, дорівнює довжині хвилі  $\lambda = vT$ , тому рівність (35.2) може бути такою:

$$x = X_m \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right). \quad (35.3)$$

Частинки середовища коливаються з однаковою амплітудою, проте точка, яка перебуває на відстані  $y_1$  від початкової, має відносно неї зсув фаз  $\frac{2\pi y_1}{\lambda}$ . На відстані однієї довжини хвилі фаза коливання змінюється на  $2\pi$ .

На моделі пружного тіла, яке складається з однакових кульок, пов'язаних пружинками, можна спостерігати процес поширення поздовжніх хвиль (мал. 65). Якщо штовхнути крайню ліву кульку вправо вздовж ряду кульок, вона почне коливатися, наблизиться до сусідньої кульки, приведе її також у коливальний рух та передасть коливальний рух наступній кульці і т. д. У результаті всі кульки поступово поч-



Мал. 65



нуть коливатися, однак не одночасно, а так, що кожна наступна кулька починатиме коливання дещо пізніше за попередню, тому коливатися вони будуть з одним і тим самим періодом, але з різними фазами. На малюнку 65 кожен наступний рядок дає положення кульок через  $\frac{1}{4}$  періоду коливання. В результаті зміщень кульок під час коливання від їх середніх положень спочатку утворюється згущення кульок, а за ним настає розрідження. На малюнку 65 пунктирними лініями зображені графіки коливань кульок 1, 4, 7, 10 і 13.

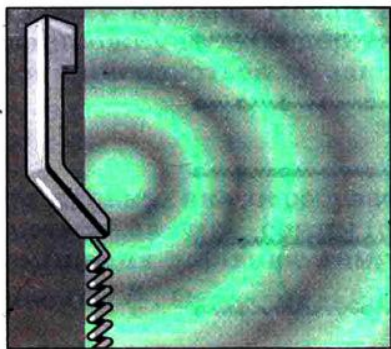
## § 36 — ЗВУКОВІ ХВИЛІ

Поняття про звук звичайно асоціюється у нас зі слухом і отже, з фізіологічними процесами у вухах, а також з психічними процесами у нашому мозку (там переробляються відчуття, що надходять до органів слуху). Крім того, під звуком ми розуміємо фізичне явище, яке впливає на наші вуха, а саме поздовжні хвилі.

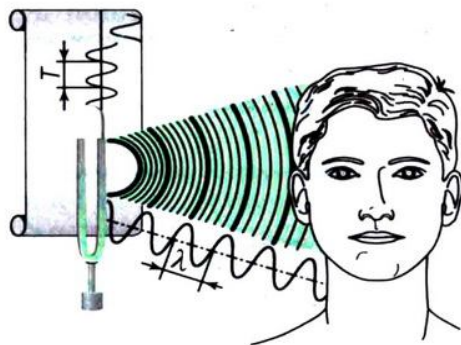
Звукові хвилі в середовищі створюються завжди тілом, яке коливається. Наприклад, коливання мембрани телефону створює у прилеглому шарі повітря послідовні згущення і розрідження, які поширюються у всі боки. На малюнку 66 наведено фотографію поверхонь звукових хвиль, випущених телефонною трубкою. Ви бачите, що хвилі розходяться від приймальної частини трубки колами. Схожість цієї картини з картиною хвиль на поверхні води цілком очевидна.

Під час вивчення звукових явищ дуже часто як джерелом звуку користуються камертоном. Якщо по ньому вдарити м'яким молоточком або провести смичком, камертон зазвучить. Коливання його можна записати (мал. 67).

Наше вухо сприймає у вигляді звуку коливання, частота яких лежить у межах від 16—20 до 20 000 герц. Такі коли-



Мал. 66



Мал. 67

вання називають *акустичними*. Розділ фізики, який вивчає способи збудження звукових хвиль, їх поширення і взаємодію з середовищем, називають *акустикою*. Проте сьогодні акустика займається й тими механічними хвилями, які не сприймаються вухом людини і можуть поширюватися не лише в повітрі, а й у будь-якому іншому середовищі.

Пружні хвилі з частотою, нижчою за 16 Гц, називають *інфразвуком*. Джерелами інфразвуку є землетруси, удари грому, виверження вулканів, а також хвилі, які виникають під час вібрацій масивних верстатів, компресорів та іншого устаткування. Останнє джерело може бути особливо небезпечним для робітників, тому що вплив інфразвукових хвиль — хоч їх і не чути — може призвести до шкідливих наслідків для людського організму. Ці низькочастотні хвилі спричиняють явища резонансного типу, які супроводжуються рухом і подразненням внутрішніх органів людини.

Звукові хвилі з частотами, що перевищують 20 000 Гц, називають *ультразвуком*. Багато тварин сприймають ультразвукові частоти. Наприклад, собаки можуть чути звуки до 50 000 Гц, а кажани — до 100 000 Гц. Ультразвукові хвилі мають широке застосування у медицині та інших галузях науки й техніки.

Будь-яке тіло (тверде, рідке чи газоподібне), що коливається із звуковою частотою, створює в навколишньому середовищі звукову хвилю. В рідинах і газах звукові хвилі можуть бути лише поздовжніми.

Необхідною умовою для передавання звуку від коливного тіла до приймача (зокрема, до нашого вуха) є існування пружного середовища між вібратором і приймачем. Найчастіше звукові хвилі досягають наших вух повітрям. Проте вони можуть поширюватися і в інших речовинах. Повітря не має якихось особливих переваг порівняно з іншими речовинами в розумінні можливості поширення в ньому звукових хвиль. Удари двох камінців один об одного аквалангіст може чути, перебуваючи під водою, оскільки коливання передаються до вуха водою. Якщо прикласти вухо до землі, можна почути наближення потяга або автомобіля. В цьому випадку земля не впливає безпосередньо на ваші барабанні перетинки. Однак поздовжню хвилю, яка поширюється в землі, називають звуковою хвилею, оскільки її коливання приводять до коливань повітря в зовнішньому вусі. Справді, поздовжні коливання, які поширюються в будь-якому матеріальному середовищі, часто називають звуковими.

Очевидно, звук не може поширюватися за відсутності речовини. Щоб переконатися в цьому, електричний дзвінок





Мал. 68



Мал. 69

слід помістити під ковпак повітряного насоса (мал. 68). У міру відкачування повітря з-під ковпака звук слабне, поки не припиниться зовсім. Тому космонавт на планеті, де практично немає атмосфери, не почує ні потужного ревіння реактивних двигунів, ні гуркоту виверження вулкана (мал. 69) тощо, але відчує вібрацію поверхні планети.

Погано проводять звук такі матеріали, як повсть, скло-вата, пористі панелі, пресований корок і т. д. Ці матеріали використовують для звукоізоляції, тобто для захисту приміщень від сторонніх звуків.

1. Яка фізична природа звуку? 2. В яких межах частоти лежать звукові коливання, які ми чуємо? 3. Поздовжні чи поперечні коливання в звукових хвилях у повітрі? у воді? у твердому тілі?

## § 37 — ШВИДКІСТЬ ЗВУКУ

Звукові хвилі, подібно до всіх інших хвиль, поширюються зі скінченною швидкістю, яку називають швидкістю звуку, тобто на поширення звукових коливань від джерела потрібен певний час. Це підтверджується багатьма спостереженнями над поширенням звуку. Наприклад, блискавку ми бачимо раніше, ніж чуємо гуркіт грому. Те саме можна помітити, спостерігаючи з великої відстані гру у волейбол чи вибивання килима. Ви бачите удар по м'ячу чи килиму, а звук від удару дійде через певний час. І чим далі від нас міститься джерело звуку (мисливець, грозовий розряд, волейболіст тощо), тим більше часу минає між моментом виникнення звуку і його сприйманням нами. Якщо відстань до джерела звуку в кілька кілометрів, це запізнення може



становити 10 і навіть більше секунд. Ці та інші факти вказують на те, що звук поширюється не миттєво і що швидкість поширення його значно менша за швидкість поширення світла (300 000 км/с). Знаючи відстань до джерела звуку  $l$  і вимірявши час  $t$ , який потрібен звукові, щоб подолати цю відстань, можна обчислити швидкість звуку:

$$v = \frac{l}{t}.$$

У різних речовинах і за різних умов швидкості звуку неоднакова. Скажімо, у повітрі за температури  $0^\circ\text{C}$  швидкість дорівнює 333 м/с, а за температури  $20^\circ\text{C}$  — 343 м/с; у воді — відповідно 1407 м/с і 1484 м/с. У газах і рідинах може існувати лише один тип хвиль — поздовжні хвилі, коливальні зміщення частинок в яких орієнтовані в напрямі поширення хвилі. У твердих тілах можуть існувати хвилі обох типів, і кожному з них відповідає своє значення швидкості звуку, яке залежить, звичайно, і від властивостей середовища. Наприклад, швидкості поздовжніх хвиль у сталі, міді й алюмінії дорівнюють відповідно 5400 м/с, 4560 м/с і 6320 м/с, а швидкості поперечних хвиль — 3220 м/с, 2250 м/с і 3100 м/с.

- ?
1. Від чого залежить швидкість звуку в повітрі?
  2. Чому для твердих тіл вказують два значення швидкості звуку?
  3. Чи можуть космонавти, виходячи у відкритий космос або висаджуючись на Місяць, спілкуватися між собою за допомогою звукової мови?

## Вправа 10

1. Мисливець почув луна здійсненого ним пострілу через 4,5 с. На якій відстані перебуває поверхня, від якої відбивається звук? Температура повітря  $20^\circ\text{C}$ .

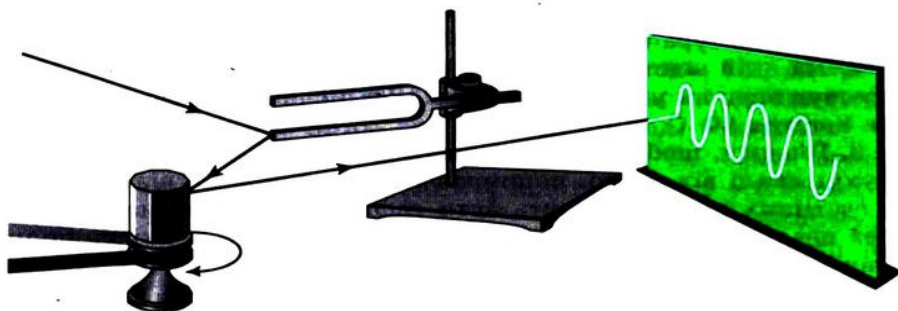
2. На якій відстані від спостерігача виникла блискавка, якщо він почув перший удар грому через 10 с після її спалаху. Температура повітря  $20^\circ\text{C}$ .

3. Геологи, щоб розвідати глибинні породи, часто вдаються до вибуху, хвилі від якого, поширюючись на глибину, відбиваються від густіших порід і можуть бути зафіксовані знову на поверхні через певний час після вибуху. Чому дорівнює швидкість поширення вибухової хвилі в земній корі, якщо хвиля повернулась через 22 с після вибуху, а тверда порода виявилась на глибині 55 км?

## § 38 — МУЗИКАЛЬНІ ЗВУКИ І ШУМИ. ГУЧНІСТЬ І ВИСОТА ЗВУКУ

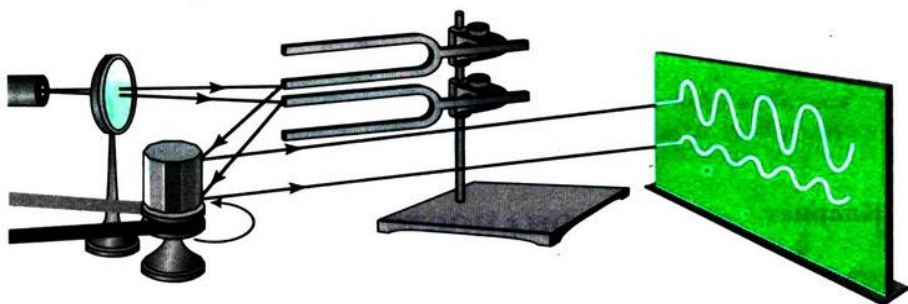
Звук, створений різними джерелами, викликає в нашій свідомості різні відчуття, згідно з якими ми й характеризуємо різні звуки. Залежно від цього ми говоримо про сильні й слабкі звуки, високі й низькі тощо. Зміст цих слів нам зрозумілий, хоча коли задуматися над ними, то чіткості тут немає. Запитайте у свого товариша, що означає сильний звук, відповідь буде розпливчастою. Говорячи про сильні й слабкі звуки, про високі й низькі, ми спираємося на наші суб'єктивні відчуття, і цього нам виявляється цілком достатньо, щоб обходитися в повсякденному житті. Зрозуміло, що для наукового опису звукових явищ не можна користуватися виключно якісними суб'єктивними уявленнями і міркуваннями. Характеристики звуку необхідно пов'язати з певними фізичними характеристиками, які не залежать від особливостей сприймання звуку людиною. Зокрема важливо з'ясувати, чим з погляду фізики відрізняються музикальні звуки від шуму і чому такими несхожими можуть бути музикальні звуки між собою?

Чистий музикальний звук можна дістати за допомогою камертона. Простежимо за різним звучанням камертона. Для цього виконаємо такий дослід. На торцевій частині ніжки камертона закріпимо легеньке дзеркальце. Візьмемо дзеркальний барабан, пристрій, здатний його обертати, і освітлювач. Розмістимо їх, як показано на малюнку 70. Світловий промінь, відбившись від дзеркальця на ніжці камертона і дзеркального барабана, дає на екрані світлу пляму. Змусимо камертон звучати, ударивши злегка по ньому гумовим молоточком. Пляма на екрані «витягнеться» у вертикальну лінію. Це відбувається тому, що камертон здійснює



Мал. 70





Мал. 71

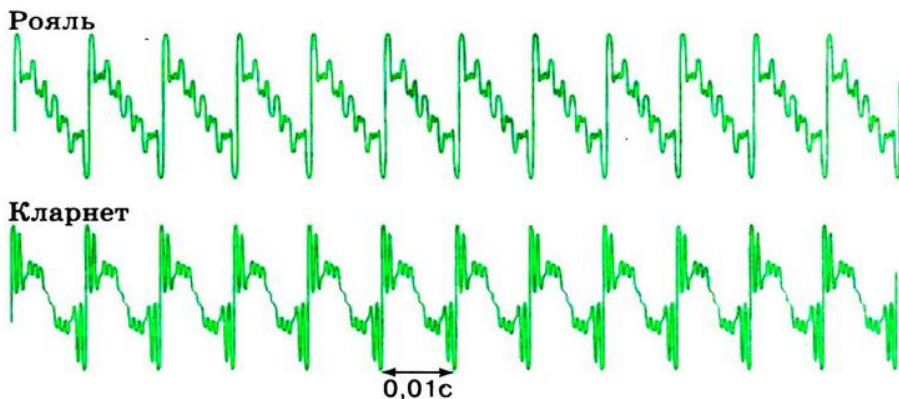
коливання, а разом з ним і дзеркальце, закріплене на його ніжці. Якщо тепер змусити промінь одночасно переміщатися в горизонтальному напрямі обертанням дзеркального барабана, на екрані ми побачимо розгортку в часі коливань камертона, дуже близьку до синусоїди. Звідси можна зробити висновок, що коливання ніжок камертона дуже близькі до гармонічних.

Звукові коливання, які відбуваються за гармонічним законом, сприймаються людиною як певний музикальний тон (або просто тон).

Сприймаючи музикальні звуки, людина розрізняє їх за висотою. З'ясуємо, з чим пов'язана висота звуку. Візьмемо два камертони і здійснимо розгортку в часі їх коливань (мал. 71). Порівнюючи частоту коливань камертонів з висотою звучання, ми переконаємося, що більш високому звукові відповідає більша частота коливань. Таким чином, висота звуку визначається частотою коливань. Коливання високої частоти сприймаються як звуки високого тону, звуки низької частоти — як звуки низького. Підтягуючи струну гітари, ми збільшуємо частоту її вільних коливань, а отже, робимо звук більш високим. Діапазон звукових коливань, який відповідає зміні частоти коливань у два рази, називають *октавою*. Наприклад, тон «ля» першої октави відповідає частоті 440 Гц, тон «ля» другої октави — частоті 880 Гц.

Важливою суб'єктивною оцінкою інтенсивності звуку є його *гучність*. Звернемо увагу в описаному вище досліді (див. мал. 70) на амплітуду коливань камертона. Ударимо по камертону сильніше. Ми почуємо сильніший звук. Амплітуда коливань на екрані зростає. Отже, якщо звук сильніший, більшою буде й амплітуда коливань у звуковій хвилі. Однак слід пам'ятати, що гучність звуку залежить і від його частоти. Може виявитися, що звук більшої інтенсивності однієї частоти сприймається нами як менш гучний, ніж звук малої інтенсивності іншої частоти.





Мал. 72

Звукові коливання, які не є гармонічними, на слух мають ще одну якість, крім висоти і гучності, а саме: специфічний відтінок, який називають *тембром*. За різним тембром ми легко розпізнаємо звук голосу, свист, звучання струни рояля, скрипки, флейти, гармонії тощо, хоч би ці звуки і мали однакову висоту і гучність. Наприклад, якщо на фортепіано, а потім на гобої беруть ноту однакової гучності й однієї висоти (припустимо, «до» першої октави), то дістають звуки, які істотно відрізнятимуться. Ми ніколи не сплутаємо звук фортепіано і гобою. Відрізнити звук одного інструмента від іншого нам допомагає тембр звуку. За тембром ми можемо пізнавати голоси різних людей. З чим пов'язаний тембр звуку, з якою особливістю коливань?

На малюнку 72 показано осцилограми звукових коливань, створюваних роялем і кларнетом, причому для тієї самої ноти, тобто для звуку однієї висоти, що відповідає періоду в 0,01 с. Осцилограми показують, що період в обох коливаннях однаковий, проте вони дуже відрізняються за своїм складом. Обидва звуки складаються з однакових гармонічних коливань (тонів), але в кожному з них ці тони мають різні амплітуди і фази. Найнижчий тон у складному музикальному звукові називають *основним*, він має таку саму частоту, як і складний звук. Решту простих тонів, що мають удвічі, втричі, вчетверо і т. д. більші частоти, називають *вищими гармонічними тонами*, або *обертонами*.

Якість звуку визначається наявністю обертонів — їх кількістю і відносними амплітудами. В різних музичних інструментах відносні амплітуди різних обертонів виявляються неоднаковими. Саме це надає звукові кожного інструмента характерної для нього якості, або тембру. Чим більше в звуковому коливанні обертонів, тим багатший тембр звуку.

Шум є складною сумішшю величезної кількості гармонічних коливань з різними частотами.

?

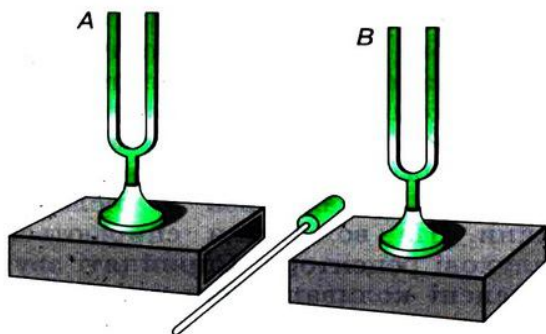
1. Які характеристики звуку ви знаєте? 2. Чим відрізняється гучність звуку від його висоти? 3. Від чого залежить тембр звуку?

## § 39 — АКУСТИЧНИЙ РЕЗОНАНС

Звукові хвилі, зустрічаючись з будь-яким тілом, викликають вимушені коливання цього тіла. Якщо частота власних вільних коливань тіла збігається з частотою звукової хвилі, то умови для передавання енергії від звукової хвилі до тіла виявляються найкращими — тіло стає акустичним резонатором. Амплітуда вимушених коливань при цьому досягає максимального значення — спостерігається *акустичний резонанс*.

Якщо перед відкритим роялем взяти якийсь тон, після припинення його звучання можна чути звучання струн рояля: це резонують струни, що мають однаковий період коливань з узятим тоном. Поставимо поряд два однакові камертони *A* і *B*, повернувши отвори резонаторних ящиків, на яких вони закріплені, назустріч один одному (мал. 73). Ударивши гумовим молоточком по камертону *A*, приведемо його в коливання, а потім приглушимо пальцями. Ми почуємо звук, що його створює другий камертон *B*, відгукуючись на коливання камертона *A*. Змінимо період коливання камертона *B*, надівши на його ніжку маленьку муфточку. Повторюючи дослід, виявимо, що тепер камертон *B* уже не відгукується на коливання камертона *A*.

Звукові хвилі, утворені камертоном *A*, дійшовши до камертона *B*, збуджують вимушені коливання його з частотою, яка дорівнює частоті коливань камертона *A*. Якщо частота коливань камертона *B* така сама, як і камертона *A*, то має



Мал. 73

місце резонанс: камертон *В* сильно розгойдується. Якщо ж частота камертона *В* інша, вимушені його коливання будуть настільки слабкими, що звуку ми не почуємо.

Акустичним резонансом широко користуються в музичних інструментах. Для збільшення інтенсивності звуку, збуджуваного джерелом, використовують об'ємні коливальні системи, настроєні в резонанс з джерелом. Наприклад, камертон у руці звучить ледь чуто (правда, зате довго), однак, якщо поставити його на кришку настроєного на частоту камертона дерев'яного ящика з однією відкритою стінкою, то звучання камертона значно посилюється. При цьому час звучання, звичайно, скорочується.

Звук струнних інструментів буде дуже тихим, якщо збуджується лише за допомогою коливання струн, оскільки струни занадто тонкі для того, щоб стискати й розріджувати великі об'єми повітря. Тому в струнних інструментах застосовують своєрідний механічний підсилювач — резонатор, роль якого виконує дека. Підсилювальна дія дека ґрунтується на тому, що в контакт з повітрям приводиться значно більша поверхня. Під час коливань струн дека теж коливається. Оскільки площа дека, що стикається з повітрям, значно більша за поверхню струни, вона може створювати інтенсивнішу звукову хвилю і, таким чином, підсилювати звук.

Акустичними резонаторами є труби духових інструментів і органа. В цьому випадку звук збуджується резонансними коливаннями стовпа повітря всередині труби.

Акустичні резонатори є і в наших голосовому та слуховому апаратах. Так, джерелами звуку в голосовому апараті є голосові зв'язки. Вони починають коливатися завдяки продуванню повітря з легень і збуджують звук, основний тон якого залежить від їх натягу. Цей звук багатий обертонами. Гортань підсилює ті обертони, частота яких близька до її власної частоти. Далі звукові хвилі потрапляють у порожнину рота. Для вимови кожної приголосної необхідні особливе положення губ, язика і певна форма резонаторної порожнини в роті.

Вухо є винятково чутливим приймачем звуку, який працює в дуже широкому діапазоні частот і амплітуд. Чутливість вуха така, що ми сприймаємо звук уже коли тиск звукової хвилі дорівнює  $10^{-6}$  Па. Основною частиною слухового апарата є мембрана, розміщена в порожнині, заповненій рідиною. Мембрана складається з численних волоконців різної довжини. На волоконця спираються сприймальні клітини — слухові рецептори. Сприйняті звукові хвилі збуджують резонансні коливання окремих волоконців. Під їх дією в рецепторах виникає збудження, яке передається слуховим нервом у головний мозок.



## ВИСНОВКИ

Будь-яке тіло (тверде, рідке чи газоподібне), яке коливається із звуковою частотою, створює в навколишньому середовищі звукову хвилю. Звукові хвилі з частотами від 16 до 20 000 Гц впливають на органи слуху людини, викликають слухові відчуття і їх називають чутними звуками. Звукові хвилі з частотами, меншими за 16 Гц, називають інфразвуками, а з частотами понад 20 000 Гц — ультразвуками.

Звукові хвилі поширюються із скінченною швидкістю, яка є неоднаковою в різних середовищах і для різних умов.

Звукові коливання, які відбуваються за гармонічним законом, сприймаються людиною як певний музикальний тон. Коливання високої частоти сприймаються як звуки високого тону, низької частоти — як звуки низького тону.

Голосність звуку залежить від його інтенсивності, тобто визначається амплітудою коливань у звуковій хвилі.

Музикальні звуки з одним і тим самим основним тоном відрізняються тембром, який визначається наявністю обертонів — їх частотами й амплітудами.

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

**§ 40 — ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ**

Вивчені електричні і магнітні явища переконують в існуванні між ними глибокого взаємного зв'язку. Будь-який рух заряджених частинок — електронний струм в металах чи йонний в електролітах, упорядковане переміщення «дірок» у напівпровідниках, електронний промінь у вакуумі, поступальний рух зарядженого тіла тощо — завжди є джерелом магнітного поля. Якщо струм постійний, постійне й магнітне поле (вектор магнітної індукції не змінюється ні за модулем, ні за напрямом).

Явище електромагнітної індукції переконливо доводить, що змінне магнітне поле породжує в просторі вихрове електричне поле. У свою чергу, змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле.

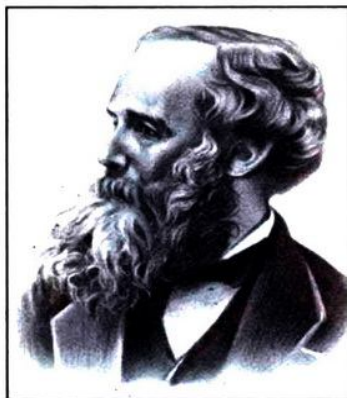
Таким чином, електричне і магнітне поля не існують поодиноці, незалежно одне від одного. Не може існувати змінне магнітне поле, щоб одночасно у просторі не виникло змінне електричне поле. І навпаки, змінне електричне поле не може існувати без магнітного.

Аналіз різноманітних дослідів з електричним і магнітним полями підтверджує висновок, що поодиноці ці поля не існують. Існує лише їх єдність — *електромагнітне поле*. Його не можна знищити переходом у жодну систему відліку. Воно існує реально, тобто незалежно від наших знань про нього. Залежно від того, в якій системі відліку вивчаються електромагнітні процеси, виявляються ті чи інші сторони єдиного цілого — електромагнітного поля. Електричне й магнітне поля є окремими випадками електромагнітного поля, а не його складовими частинами. Електромагнітне поле — одне з первинних фундаментальних понять, а тому його не можна розділити на дрібніші поняття — складові частини.

**§ 41 — ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ  
І ШВИДКІСТЬ ЇХ ПОШИРЕННЯ**

Взаємозв'язок електричного і магнітного полів обумовлює поширення електромагнітного поля в просторі. Уявимо

Джеймс  
МАКСВЕЛЛ  
(1831—1879)

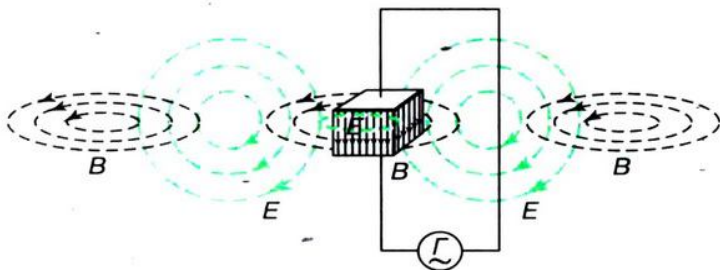


Видатний англійський вчений. Створив теорію електромагнітного поля і зробив висновок про його поширення у вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю світла. Розробив електромагнітну теорію світла. Йому належать великі відкриття і в інших галузях фізики, зокрема в галузі молекулярно-кінетичної теорії газів.

собі, що провідником йде змінний електричний струм. Тоді навколо цього провідника існує змінне магнітне поле  $\vec{B}$  (мал. 74). Це поле, в свою чергу, веде до утворення змінного електричного поля  $\vec{E}$  в сусідніх ділянках простору. Потім змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, яке викликає знову появу змінного електричного поля тощо. В результаті, поширюючись на все нові ділянки простору, електромагнітне поле переміщується з областей, де воно щойно існувало. Швидкість поширення електромагнітного поля дорівнює приблизно 300 000 км/с.

Отже, електромагнітне поле може існувати самостійно, не будучи зв'язаним із зарядами й струмами. А це є переконливим доказом матеріальності електромагнітного поля. У матеріальності електромагнітного поля переконує і той факт, що воно має певну енергію.

Поширення у просторі електромагнітного поля, в якому напруженість електричного й індукція магнітного полів змінюються періодично, називається *електромагнітною хвилею*. Вектори напруженості  $\vec{E}$  і магнітної індукції  $\vec{B}$  в електромагнітній хвилі в будь-якій точці простору завжди взаємно



Мал. 74





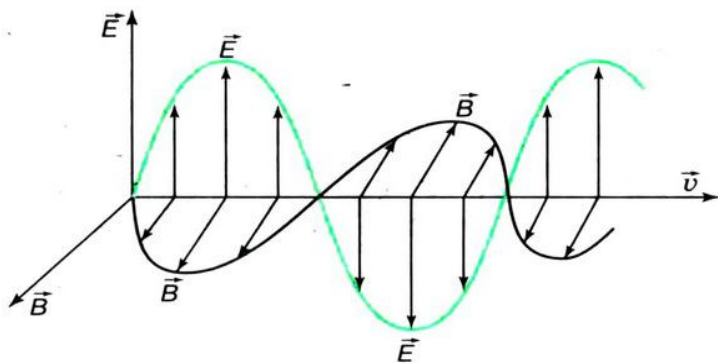
Генріх  
ГЕРЦ  
(1857—1894)

Видатний німецький фізик, який у 1886 р. експериментально довів існування електромагнітних хвиль і дослідив їх властивості. Він встановив тотожність основних властивостей електромагнітних і світлових хвиль. У 1886 р. учений вперше спостерігав фотоэффект.

перпендикулярні, оскільки лінії напруженості електричного поля охоплюють лінії індукції магнітного поля. Крім того, вони перпендикулярні й до напрямку поширення хвиль (до вектора швидкості  $\vec{v}$ ). Отже, електромагнітні хвилі — п о п е р е ч н і. Гармонічна електромагнітна хвиля графічно зображається у вигляді двох синусоїд, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 75). Одна синусоїда відображає коливання вектора напруженості  $\vec{E}$  електричного поля, а друга — вектора індукції  $\vec{B}$  магнітного поля (обидва вектори коливаються в однаковій фазі).

Швидкість електромагнітних хвиль виявилась рівною швидкості поширення світла у вакуумі. Цей результат дав можливість англійському фізику Д. Максвеллу висловити припущення, що світло є окремим випадком поширення електромагнітного поля. Це припущення пізніше дістало експериментальне підтвердження.

Існування електромагнітних хвиль і їх властивості були теоретично передбачені Максвеллом у шестидесятих роках



Мал. 75

XIX ст. і лише в 1886 р. електромагнітні хвилі були вперше експериментально добуті і вивчені німецьким фізиком Г. Герцем. За допомогою тонких експериментів Герц виявив і дослідив відбивання, заломлення, інтерференцію, дифракцію і поляризацію електромагнітних хвиль. Він довів, що у всіх випадках електромагнітні хвилі поведуться як видиме випромінювання, закономірності якого на той час були добре вивчені. Дуже важливим результатом дослідів Герца було визначення швидкості поширення електромагнітних хвиль, яка виявилася рівною швидкості світла. Це було ще одним підтвердженням теорії Максвелла.

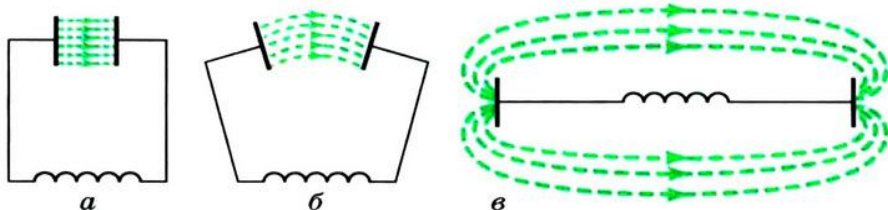
1. Опишіть процес поширення електромагнітного поля в просторі. 2. Що таке електромагнітна хвиля? Як спрямовані в ній вектори напруженості електричного  $\vec{E}$ , індукції магнітного  $\vec{B}$  полів і швидкість поширення хвилі  $\vec{v}$ ? 3. Зобразіть графічно гармонічну електромагнітну хвилю. В яких фазах коливаються вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$ ?

## § 42 — УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

Джерелом електромагнітних хвиль може бути будь-який електричний коливальний контур або провідник, в якому проходить змінний електричний струм, оскільки для збудження електромагнітних хвиль необхідно створити у просторі змінне електричне або відповідно змінне магнітне поле. Проте випромінююча здатність джерела визначається його формою, розмірами і частотою коливань. Наприклад, провідники, якими проходить промисловий змінний струм (частота 50 Гц), теж випромінюють електромагнітні хвилі. Та виявити ці хвилі надзвичайно складно, оскільки їх інтенсивність мізерна. Виявити електромагнітні хвилі можна лише тоді, коли вони мають велику амплітуду коливань напруженості електричного й індукції магнітного полів.

Напруженість електричного поля, яке виникає під час зміни магнітного поля, як і індукція магнітного поля, яке виникає під час зміни електричного поля, тим більша, чим швидше відбувається зміна магнітного поля в першому випадку і електричного — в другому. Отже, необхідною умовою утворення *інтенсивних* електромагнітних хвиль є *висока частота електромагнітних коливань* у провіднику (порядку десятків тисяч і мільйонів герц). Коливання такої частоти, як відомо, можна дістати в коливальному контурі за допомогою генератора незатухаючих коливань. Однак звичайний коливальний контур з котушки індуктивності й

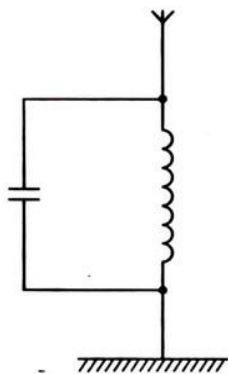




Мал. 76

конденсатора дуже погано випромінює електромагнітні хвилі. Це пояснюється тим, що в даному контурі електричне поле фактично зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне — всередині котушки індуктивності.

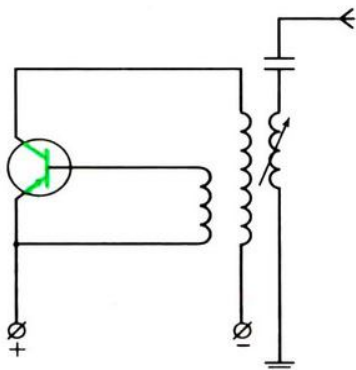
Щоб коливальний контур добре випромінював електромагнітні хвилі, необхідно збільшити об'єм простору, в якому він створює електромагнітне поле. Для цього контур необхідно розгорнути (зробити відкритим), розсунувши пластини конденсатора на якомога більшу відстань. Послідовні фази одержання такого відкритого коливального контуру показано на малюнку 76 (а, б, в). Електричне і магнітне поля, зображені лініями електричної напруженості і магнітної індукції, в нерозгорнутому контурі займають дуже маленький об'єм між обкладками конденсатора і всередині котушки. В розгорнутому (відкритому) контурі електричне поле заповнює весь навколишній простір, і зміна цього поля з часом створює змінне у просторі магнітне поле, яке в свою чергу створює змінне електричне поле. Обидва ці процеси взаємозв'язані і утворюють електромагнітну хвилю, яка поширюється в просторі. Відкритий коливальний контур (мал. 76, в) називають ще *електричним вібратором*. Наявність на кінцях вібратора пластин не обов'язкова. Вібратор є найпростішим випромінювачем електромагнітних хвиль.



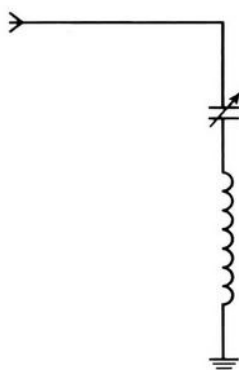
Мал. 77

Коливальний процес у відкритому коливальному контурі (вібраторі) відбувається аналогічно процесу в закритому коливальному контурі. За допомогою коливального контуру можна дістати електромагнітне випромінювання необхідної потужності, не розсовуючи обкладок конденсатора. З цією метою один бік контуру слід заземлити, а до другого підключити натягнутий вертикально провід, залишивши його верхній кінець вільним (мал. 77). В результаті змінні електричне і магнітне поля охоплюють простір





Мал. 78



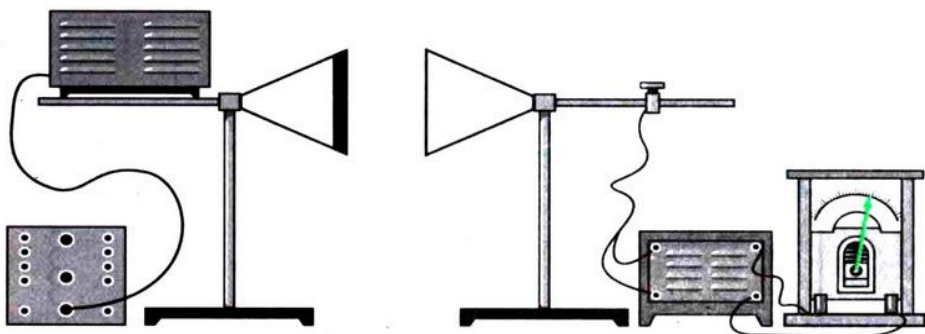
Мал. 79

між вертикальним проводом і землею і потужність випромінювання такого контуру сильно зростає. Такий пристрій називають *антенною*, а коливальний контур, забезпечений антенною, — *відкритим*.

Для безперервного випромінювання у простір електромагнітних хвиль вібратором чи антенною необхідно створювати в них незатухаючі електромагнітні коливання. Це можна зробити, здійснивши індуктивний зв'язок між вібратором і котушкою індуктивності високочастотного генератора (мал. 78). У вібраторі індукватиметься струм високої частоти, яка збігається з частотою коливань струму в генераторі. Амплітуда коливань у вібраторі буде найбільшою, якщо частота власних коливань збігатиметься з частотою генератора (резонанс). При цьому буде максимальною й інтенсивність випромінюваних вібратором електромагнітних хвиль. Тому завжди добиваються, щоб вібратор був настроєний у резонанс з генератором електричних коливань.

Отже, щоб дістати інтенсивні електромагнітні хвилі, необхідно мати генератор незатухаючих коливань і випромінювач хвиль (вібратор або антену). Випромінювач має бути якимсь чином зв'язаний з генератором (наприклад, індуктивно), щоб електричні коливання від генератора передавались до нього.

Приймання електромагнітних хвиль здійснюється за допомогою таких самих відкритих коливальних контурів — вібраторів або антен, подібних до випромінювального контуру (мал. 79). Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі у приймальному контурі виникають електромагнітні коливання. Для доброго приймання необхідно, щоб приймальний коливальний контур був настроєний у резонанс з передавальним контуром, тобто щоб власна частота



Мал. 80

коливань контуру приймальної антени була близькою до частоти коливань контуру передавальної антени. Налаштування приймального контуру в резонанс здійснюється конденсатором змінної ємності або котушкою змінної індуктивності.

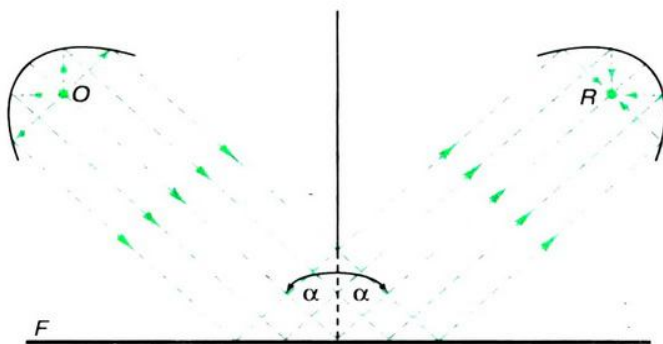
1. Чому необхідною умовою утворення інтенсивних електромагнітних хвиль є висока частота електромагнітних коливань, які створюють поле? 2. Чому закритий коливальний контур погано випромінює електромагнітні хвилі? 3. Як можна здійснити безперервне випромінювання електромагнітних хвиль?

### § 43 — ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

Для кращого розуміння різноманітних застосувань електромагнітних хвиль необхідно хоча б коротко ознайомитися з деякими їх властивостями. Сучасне шкільне обладнання дає можливість порівняно легко вивчити на дослідах основні властивості електромагнітних хвиль. Для цього є спеціальний комплект апаратури, який складається з генератора надвисокої частоти (НВЧ), приймача хвиль і ряду допоміжних пристосувань.

Для здійснення напрямленого випромінювання і приймання електромагнітних хвиль використовують спеціальні рупорні антени прямокутного перерізу.

Встановимо на столі на однаковій висоті генератор і приймач антенами один до одного (мал. 80) і доможемо доброї чутності звуку в гучномовці. Помістимо між антенами пластину з діелектрика і зауважимо, що гучність дещо зменшилась. Якщо замінити діелектрик металевою пластинною, приймання хвиль припиняється. Це свідчить про те, що хвилі відбиваються провідником. Кут відбивання електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, дорівнює ку-

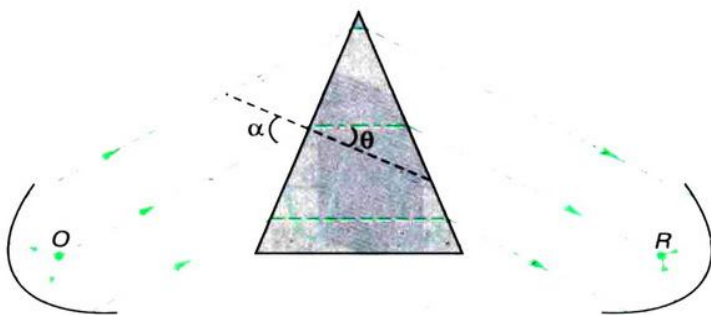


Мал. 81

тові падіння. В цьому легко переконатися, розмістивши антени під однаковими кутами до металевої пластини  $F$  (мал. 81). Звук зникає, якщо забрати пластину або повернути її на деякий інший кут.

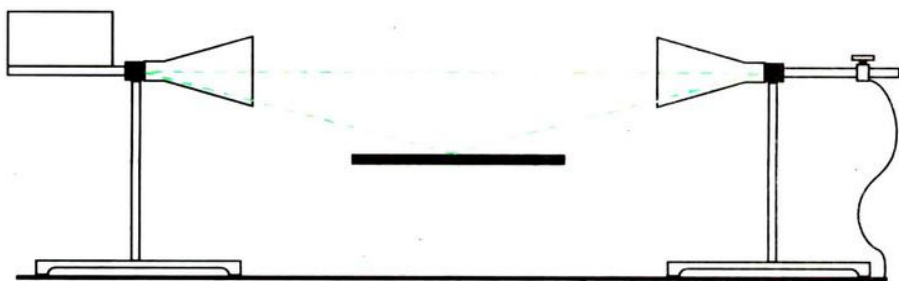
Електромагнітні хвилі зазнають заломлення на межі діелектрика. Якщо помістимо на місце пластини трикутну призму з діелектрика (мал. 82), наприклад, з парафіну, під час повертання призми спостерігатимемо зникнення й появу звуку.

За допомогою генератора можна спостерігати й найважливіші хвильові явища — інтерференцію і дифракцію електромагнітних хвиль. Інтерференцію, зокрема, можна спостерігати так. Генератор і приймач розміщують один проти одного (мал. 83) і потім знизу підносять металеву пластину. При цьому спостерігається почергове послаблення і посилення звуку, що пояснюється інтерференцією двох хвиль, з яких одна поширюється безпосередньо від антени генератора, а друга — після відбивання від пластини.



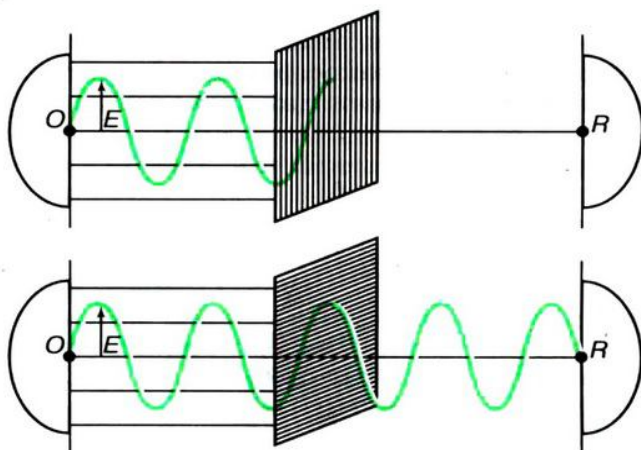
Мал. 82





Мал. 83

На досліді можна також переконатися у поперечності електромагнітних хвиль. Для цього між генератором і приймачем розміщують решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 84). Повертаючи решітку, спостерігають підсилення й послаблення сигналу аж до повної його відсутності. Приймання відсутнє тоді, коли електричний вектор  $\vec{E}$  падаючої електромагнітної хвилі паралельний стержням. У цьому випадку в стержнях збуджуються струми і решітка відбиває падаючі хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо ж вектор  $\vec{E}$  перпендикулярний до стержнів, струми в них не збуджуються і електромагнітна хвиля проходить крізь решітку.



Мал. 84

## § 44 — ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ. ГУСТИНА ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Можливість виявлення електромагнітних хвиль вказує на те, що їх поширення супроводжується перенесенням енергії електромагнітного поля. Енергія електромагнітної хвилі складається з енергії  $W_e$  електричного і енергії  $W_m$  магнітного полів:  $W = W_e + W_m$ .

Нагадаємо, що енергія електричного поля зарядженого конденсатора дорівнює  $W_e = \frac{1}{2} CU^2$ , а енергія магнітного поля соленоїда —  $W_m = \frac{1}{2} LI^2$ . Перетворимо ці формули так, щоб енергія виражалась через величини, які характеризують ці поля, — напруженість  $\vec{E}$  електричного поля й індукцію  $\vec{B}$  магнітного.

Підставимо у формулу для  $W_e$  вираз ємності плоского конденсатора  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$  і різниці потенціалів між обкладками  $U = Ed$ :

$$W_e = \frac{\epsilon\epsilon_0 SE^2}{2} d = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 V, \quad (44.1)$$

де  $V = dS$  — об'єм конденсатора.

Розділивши (44.1) на об'єм  $dS$ , зайнятий електричним полем, дістанемо енергію, яка припадає на одиницю об'єму, тобто густину енергії електричного поля:

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon\epsilon_0 E^2. \quad (44.2)$$

Ця формула справедлива і для випадку змінних електричних полів.

Так само перетворимо формулу для енергії магнітного поля довгого соленоїда. Індуктивність такого соленоїда:

$$L = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l},$$

де  $n$  — кількість витків соленоїда,  $l$  — його довжина,  $S$  — площа поперечного перерізу,  $\mu$  — магнітна проникність речовини осердя соленоїда.

Якщо соленоїдом йде струм силою  $I$ , індукція магнітного поля всередині соленоїда  $B = \mu_0 \mu \frac{nI}{l}$ , звідки  $I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu n}$ . Підставивши значення  $L$  та  $I$  у формулу для  $W_m$ , дістанемо:

$$W_m = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} lS = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V, \quad (44.3)$$

де  $V = lS$  — об'єм соленоїда. Поділимо (44.3) на об'єм, зайнятий магнітним полем, і дістанемо густину енергії магнітного поля:

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}. \quad (44.4)$$

Густина енергії електромагнітної хвилі складається з густини енергії електричного поля і густини енергії магнітного поля:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2. \quad (44.5)$$

Оскільки енергія і густина енергії електромагнітної хвилі є функціями напруженості електричного поля і індукції магнітного поля, вона передається у просторі зі швидкістю поширення поля. Поширення енергії можна описати, вводячи поняття *густини потоку енергії* або *густини потоку випромінювання*.

Густиною потоку випромінювання називають добуток густини енергії  $w$  електромагнітної хвилі на швидкість  $v$  її поширення:

$$J = wv = v \left( \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right). \quad (44.6)$$

Густина потоку випромінювання чисельно дорівнює енергії, яка переноситься електромагнітною хвилею за одиницю часу через одиницю площі, перпендикулярну до напрямку, в якому поширюється енергія.

?

1. Які факти свідчать про перенесення енергії електромагнітними хвилями? 2. Який фізичний зміст густини потоку випромінювання?

## § 45 — ВИНАЙДЕННЯ РАДІО

Властивості електромагнітних хвиль вперше були експериментально вивчені Г. Герцем. Результати цих дослідів дуже зацікавили фізиків усього світу, які почали їх повторювати, шукати шляхи вдосконалення випромінювача і приймача електромагнітних хвиль. Виникають думки про можливість використання цих хвиль для зв'язку і навіть для передавання енергії без проводів.

У 1894 р. російському вченому О. С. Попову вдалося створити такий приймач, основні принципові особливості будови якого збереглися і в сучасній радіоприймальній апаратурі.

Схема створеного О. С. Поповим приймача показана на малюнку 85. У ньому електромагнітні хвилі сприймав (реєстрував) спеціальний прилад — когерер. Дія когерера ґрунтується на властивості металевих порошків злипатися





ку, а в 1897 р. дістав патент (в Англії) на застосування електромагнітних хвиль для бездротового зв'язку (О. С. Попов свого винаходу не патентував). Схема приймача Марконі була такою ж, як і схема приймача Попова.

Г. Марконі проведена велика робота з удосконалення приладів для радіозв'язку. Зокрема, в 1902 р. він здійснив радіозв'язок через Атлантичний океан. Його діяльність відіграла значну роль в розвитку радіотехніки, зокрема в поширенні радіо як засобу зв'язку, і була відзначена в 1909 р. Нобелівською премією.

Важливим етапом у розвитку радіозв'язку стало створення в 1913 р. лампового генератора незатухаючих електромагнітних коливань. У наступні роки зусиллями багатьох видатних вчених і інженерів радіотехніка перетворилася в надзвичайно широку і різноманітну галузь техніки.

## **§ 46 — ПРИНЦИП РАДІОТЕЛЕФОННОГО ЗВ'ЯЗКУ. АМПЛІТУДНА МОДУЛЯЦІЯ І ДЕТЕКТУВАННЯ**

Найпростіша система радіотелеграфного зв'язку, яка була запропонована Г. Марконі і О. С. Поповим і широко застосовувалась понад двадцять років, полягала у відправці серій затухаючих електромагнітних коливань, добутих у коливальному контурі з іскровим розрядником. Цю систему істотно поліпшено після винайдення генератора незатухаючих електромагнітних коливань. Увімкнувши в коло генератора телеграфний ключ, можна було передавати сигнали з коротких і більш тривалих імпульсів електромагнітних хвиль.

Здійснити передачу мови і музики, тобто радіотелефонний зв'язок, виявилось значно важче. На перший погляд може здатися, що бажаючи передати мову чи музику, можна за допомогою належного підсилення послати їх в антену і передати на велику відстань. Насправді ж таким способом передати сигнали не можна. Річ у тім, що коливання звукової частоти — це порівняно повільні коливання (від 100 Гц до кількох тисяч герц). А ми знаємо, що інтенсивність випромінювання електромагнітних хвиль низької частоти дуже мала. Виникає суперечність. З одного боку, високочастотні хвилі добре випромінюються, але не містять потрібної інформації (мова або музика) і в приймальній антені збуджують чисто гармонічні коливання, тобто дають інформацію лише про те, працює передавач чи ні. З іншого боку, електромагнітні коливання низької (звукової) частоти кола мікрофона містять потрібну інформацію, але дуже слабо випромінюються.



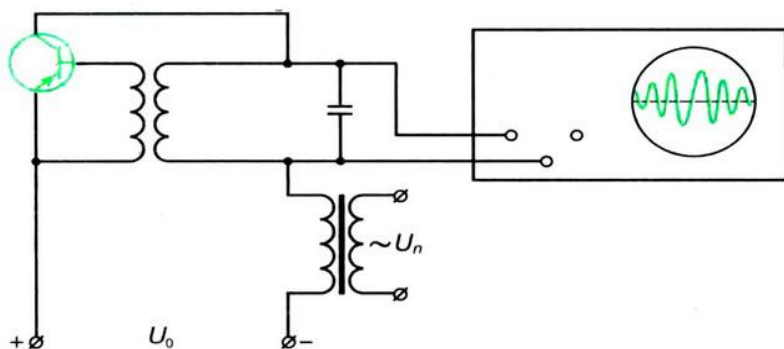
Ця суперечність була розв'язана дуже дотепним способом. Він полягає в тому, що для передачі енергії електромагнітної хвилі використовують високочастотні коливання, а коливання низької частоти застосовують лише для зміни високочастотних коливань, або, як прийнято говорити, для їх м о д у л я ц і ї. На приймальній станції з цих складних коливань за допомогою спеціальних методів знову виділяють коливання низької частоти, які після підсилення подають на гучномовець. Цей процес виділення інформації з прийнятих модульованих коливань дістав назву д е м о д у л я ц і ї, або д е т е к т у в а н н я коливань.

Модуляцію коливань можна здійснювати, змінюючи їх амплітуду, частоту або фазу. Ми обмежимося розглядом найбільш поширеного виду модуляції — амплітудної.

Амплітудна модуляція електромагнітних коливань полягає в тому, що амплітуду коливань електромагнітної хвилі змінюють відповідно до низькочастотного (звукового) коливального процесу, який передається разом з електромагнітною хвилею.

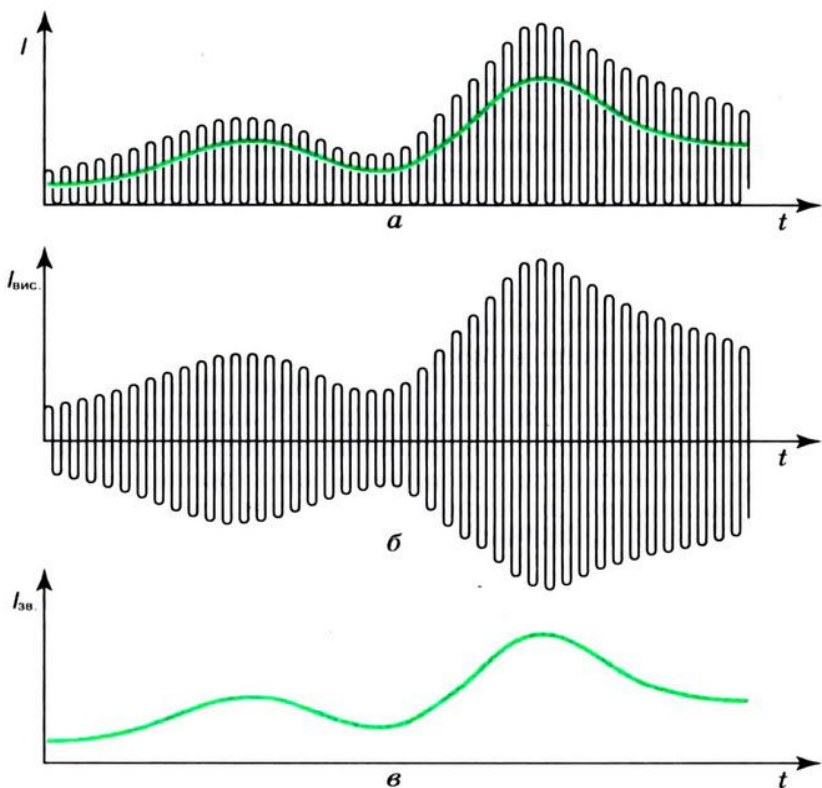
Для здійснення амплітудної модуляції електромагнітних коливань у радіотехніці опрацьовані різні способи. Одним з них є зміна напруги джерела енергії автогенератора. Для цього достатньо увімкнути послідовно з джерелом постійної напруги  $U_0$  джерело, напруга якого  $U_n$  змінюється за певним законом (мал. 86).

У місці приймання сигналів під впливом електромагнітної хвилі передавача в антені приймача збуджуються модульовані струми високої частоти, тотожні струмам в антені передавача, але слабші. Однак ці струми не придатні для безпосереднього одержання сигналу. Якщо, скажімо, під час радіотелефонної передачі ми направимо їх, навіть після



Мал. 86

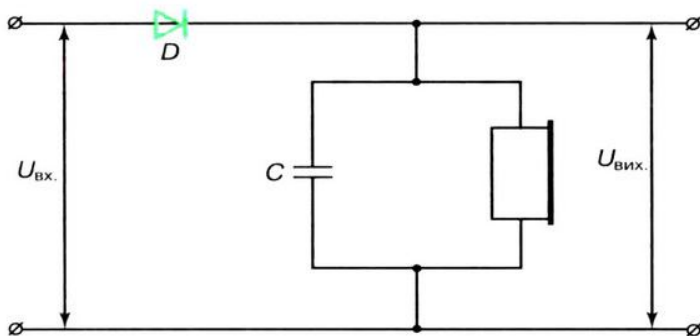




Мал. 87

попереднього підсилення, в гучномовець чи телефон, то не почуємо ніякого звуку. Це станеться, по-перше, тому, що телефонна мембрана має велику масу і не може здійснювати такі швидкі коливання з помітною амплітудою. По-друге, і це головне, коли б ми і скористалися малоінерційним телефоном (що можна зробити), то дістали б хвилі з частотою  $10^5$ — $10^8$  Гц, тоді як наше вухо розрізняє звуки лише за частоти, яка не перевищує 16 000—20 000 Гц.

Тому з модульованих високочастотних коливань у приймачі необхідно виділити низькочастотні звукові коливання. Це роблять так. Модульовані коливання спочатку пропускають через вакуумний чи напівпровідниковий діод — випрямляють їх. Графік коливань сили струму в колі діода матиме вигляд, показаний на малюнку 87, а. Цей струм є сумою випрямлених струмів: високочастотного (мал. 87, б) і струму звукової частоти (мал. 87, в). Оскільки ці струми сильно відрізняються за частотою, їх можна легко відокремити один



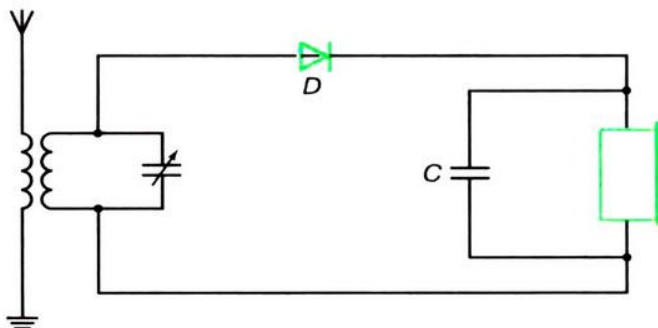
Мал. 88

від одного. Для цього досить увімкнути в коло діода таке розгалуження, щоб одна гілка становила великий опір для високочастотних струмів і малий для низькочастотних, а друга, навпаки, малий опір для високочастотних і великий для струмів звукової частоти. Таким розгалуженням є паралельне з'єднання конденсатора й навантаження (телефона) (мал. 88). Струми високої частоти пройдуть переважно через конденсатор, а низької — через телефон. Отже, найпростіший демодулятор складається з діода, телефона і конденсатора. Мембрана телефона коливатиметься так само, як мембрана мікрофона, і ми почуємо звук, виголошений перед мікрофоном. Невеликі пульсації струмів високої частоти помітно не впливають на коливання мембрани і не сприймаються на слух.

1. Чи можна, перетворивши звукові коливання в електромагнітні, подати їх на антену, і здійснити в такий спосіб передачу по радіо мови чи музики? Чому? 2. У чому полягає принцип радіотелефонного зв'язку? 3. У чому полягає амплітудна модуляція електромагнітних коливань і як її можна здійснити? 4. Чому не можна прийняті електромагнітні коливання після підсилення подати в гучномовець? 5. Як відокремлюють високочастотні коливання від низькочастотних? Намалюйте схему найпростішого демодулятора.

## § 47 — НАЙПРОСТІШИЙ РАДІОПРИЙМАЧ

Приймачі електромагнітних хвиль досить різноманітні. Найпростіший з них — детекторний приймач (мал. 89), який є, по суті, розглянутим вище демодулятором коливань з увімкнутим до нього паралельно коливальним контуром.



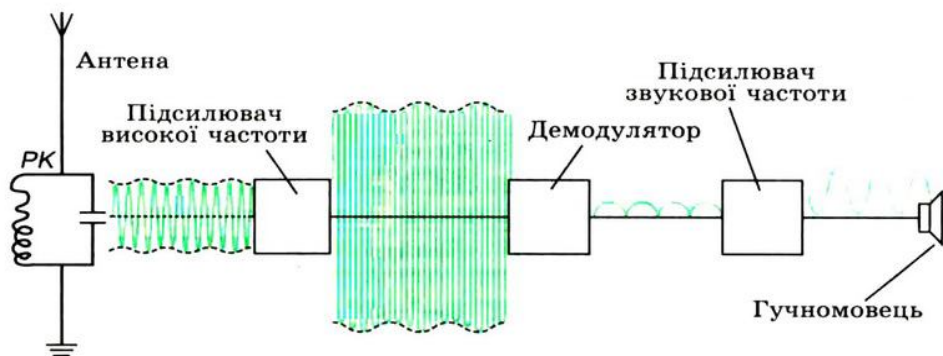
Мал. 89

Електромагнітні хвилі під час надходження створюють в антені і контурі високочастотні модульовані коливання. Якщо конденсатором настроїти контур у резонанс частоті коливань, які слід прийняти, то навіть дуже слабкі хвилі, надходячи, створять помітні модульовані коливання в контурі. Ці коливання потрапляють на демодулятор і за допомогою телефону, зашунтованого конденсатором, розділяються на коливання низької і високої частоти. Коливання низької (звукової) частоти проходять переважно через телефон, мембрана якого коливатиметься так само, як мембрана мікрофона на передавальній станції, і ми почуємо такий самий звук, який був виголошений перед мікрофоном.

– Детекторний приймач дуже простий, надійний, не вимагає джерела живлення, однак він може приймати сигнали лише від близьких або дуже потужних радіостанцій. Більш досконалі приймачі — лампові і транзисторні — зібрані за досить складними схемами.

Таким є приймач прямого підсилення, блок-схему якого наведено на малюнку 90. Електромагнітні хвилі надходять в антену приймача і викликають електромагнітні коливання в резонуючому контурі *РК*. Слабкі коливання високої частоти надходять у підсилювач, а потім у детектор. У детекторі відбувається процес демодуляції — виділення низькочастотної складової коливань. З детектованих коливань виділяється низькочастотна (звукова) складова, яка знову підсилюється і подається на відтворювальний пристрій (динамік, телефон тощо). Резонуючий контур приймача складається з котушки і конденсатора змінної ємності. Це дає можливість досягати збігу частот власних коливань контуру з частотою хвилі, яка випромінюється тією чи іншою радіостанцією, інакше кажучи, налаштовувати приймач на довжину хвилі





Мал. 90

потрібної радіостанції. Однак слід мати на увазі, що найчастіше радіомовні приймачі будують за дещо іншою схемою — так звані *супергетеродинні приймачі*.

## § 48 — РАДІОЛОКАЦІЯ

Явище відбивання електромагнітних хвиль покладено в основу опрацьованого в кінці 30-х років методу виявлення і точного визначення положення предметів (літаків у повітрі, кораблів у морі, закутаних туманом або вночі тощо). Цей метод дістав назву *радіолокації*. Ідея радіолокації така.

Короткі електромагнітні хвилі, завдовжки кілька метрів, дециметрів і навіть сантиметрів, посиляються радіолокаційною установкою дуже короткими імпульсами один за одним через рівні, дуже малі інтервали часу, які значно перевищують тривалість імпульсу. Тривалість сигналу, який посиляється (імпульсу електромагнітних хвиль), становить мільйонні частки секунди. Сигнали повторюються від кількох сот до тисяч разів за секунду (досить часто, але так, щоб одночасно «в дорозі», в межах радіуса огляду радіолокатора, не виявилися два сигнали). Електромагнітні хвилі, зустрічаючи на своєму шляху перешкоду, — літак, корабель тощо, частково розсіюються цими предметами і частково відбиваються. Відбиті хвилі приймаються тією ж радіолокаційною установкою і після підсилення подаються на осцилограф. За інтервалом часу, який пройшов від моменту випромінювання імпульсу і до моменту повернення відбитих об'єктом хвиль, визначається відстань до нього.

Для розшукування невидимих об'єктів антена радіолокатора, подібно до прожектора, має випромінювати гостро



Мал. 91

напрямлений пучок електромагнітних хвиль — радіопромінь, напрям якого можна легко змінити, змінюючи нахил антени і повертаючи її навколо своєї осі. Для одержання гостро напрямленого вузького радіопромменя у випадку дециметрових і сантиметрових хвиль використовують антени у вигляді увігнутих (параболічної форми) металевих дзеркал, у фокусі яких розміщений випромінюючий вібратор. Буваючи на великих аеродромах, ви, безперечно, бачили ці антени — параболічні сітки, які рівномірно обертаються. Для довгих хвиль конструюють складніші антени з певним чином розміщеними вібраторами.

Розглянемо схему будови і принцип дії радіолокатора (мал. 91). Для випромінювання і приймання відбитих хвиль у радіолокаторах використовується одна й та сама антена. Приймання відбитих радіохвиль здійснюється під час пауз у роботі передавача. Для вимірювання відстані до об'єкта в радіолокаторах визначають час, затрачуваний хвилями для руху до об'єкта й назад. Вимірюють цей час за допомогою електронно-променевої трубки. Для цього на горизонтальні пластини трубки подають пилкоподібну напругу, яка надає променеві рівномірного руху в горизонтальному напрямі, причому швидкість переміщення променя по екрану береться такою, щоб він проходив увесь екран якраз за інтервал часу між відправленнями імпульсів. У момент чергового відправлення імпульсу подається й імпульс напруги на вертикально відхиляючі пластини електронно-променевої трубки. Тоді на екрані трубки на прямій лінії розгортки екрана



трубки з'являється вузький вертикальний пік, який фіксує момент відправлення сигналу. Після цього антена радіолокатора переключається на приймання.

Радіосигнал, досягнувши цілі, розсіюється на ній і частково відбивається назад. Відбитий сигнал приймається, підсилюється. На екрані з'являється другий вузький вертикальний пік на певній відстані від першого. Вимірявши відстань  $l$  між обома відмітками на екрані і знаючи швидкість  $v$  горизонтального переміщення променя по екрану, можна визначити час  $t$ , затрачений хвилею на рух до цілі й назад, тобто  $t = \frac{l}{v}$ . З іншого боку, цей же час дорівнює:  $t = \frac{2d}{c}$ , де  $d$  — відстань до об'єкта, а  $c$  — швидкість поширення електромагнітних хвиль. Оскільки швидкість радіохвиль в атмосфері практично стала ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), то  $d = \frac{c}{2v} l$ , тобто, вимірявши відстань між піками  $l$ , можна визначити відстань до об'єкта  $d$ . Це дає можливість градувати шкалу електронно-променевої трубки радіолокатора безпосередньо в кілометрах.

Для визначення напрямку на шуканий об'єкт антену роблять рухомою. Вона повертається в усіх напрямках, і коли її випромінювання падає на об'єкт, виникають розсіяні радіохвилі, які повертаються назад до радіолокатора і реєструються приймачем. Знаючи орієнтацію антени в момент приймання відбитого сигналу (кут з певним напрямком на горизонтальній площині — азимут, кут з горизонтальною площиною — висота), визначають три координати, які описують положення об'єкта. Таким чином, радіолокатор дає можливість визначити не тільки відстань до об'єкта, а й напрям на нього, а у випадку об'єктів у повітрі — навіть висоту їх польоту. Якщо об'єкт переміщається, оператор, повертаючи антену, може невідступно стежити за ним і визначити зміну з часом координат об'єкта, що дає можливість обчислити швидкість і траєкторію руху об'єкта.

Ми розглянули принцип дії одного з типів радіолокаторів, які працюють за імпульсним методом. Нині застосовуються більш складні й досконалі системи радіолокації.

Тепер радіолокація застосовується дуже широко не лише на транспорті й у військовій справі, а й у багатьох інших галузях народного господарства. За допомогою радіолокаторів спостерігають виникнення і рух хмар, політ метеоритів у верхніх шарах атмосфери. Радіолокатори широко використовуються в космічних дослідженнях. На борту кожного космічного корабля обов'язково встановлюється кілька радіолокаторів. Останнім часом радіолокація успішно використовується для точного вивчення руху планет, уточнення



відстаней до них. У 1961—1966 рр. було здійснено радіолокацію Венери, Меркурія, Марса і Юпітера.

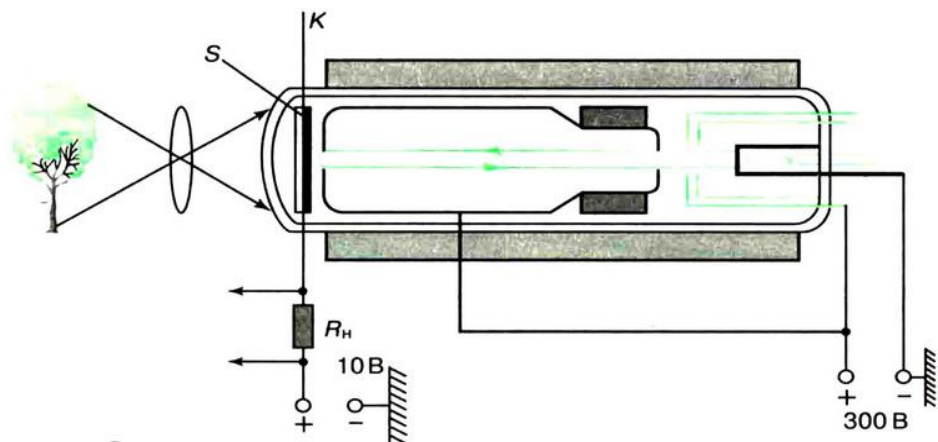
## **§ 49 — ПОНЯТТЯ ПРО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Широкого застосування дістали електромагнітні хвилі в сучасній системі телебачення, тобто передаванні зображень на відстань за допомогою ультракоротких електромагнітних хвиль. Десятки тисяч телевізійних станцій у багатьох країнах світу регулярно ведуть передачі, які дивляться сотні мільйонів глядачів. Однак телебачення — це не лише телемовлення. Телебачення знаходить широке застосування в різних галузях народного господарства і в наукових дослідженнях. Воно дає можливість одночасно спостерігати за основними етапами складних технологічних процесів, за різними ділянками залізничних вузлів і морських портів, дає змогу вчитися віртуозному мистецтву великих хірургів, проникати поглядом в безодні океанів і в глибини космосу.

Ознайомимося коротко з принципами телебачення і роботою основних приладів, які застосовуються в телевізійних установках.

Будь-яка телевізійна система складається з трьох частин: передавача, приймача і каналу зв'язку їх між собою. Призначення передавача полягає в перетворенні за допомогою спеціальних електронно-променевих трубок світлового зображення об'єкта в систему електричних сигналів — відеосигналів. Ці сигнали модулюють потім коливання генератора високої частоти. Модульована електромагнітна хвиля переносить інформацію на великі відстані. Ці хвилі ловляться антеною приймача, в якому здійснюється зворотне перетворення. Високочастотні модульовані коливання детектуються, перетворюються в електричні сигнали, а одержані сигнали перетворюються у видиме зображення. Для передавання руху використовують принцип кіно: зображення рухомого об'єкта (кадри), які трохи відрізняються один від одного, передають кілька десятків раз за секунду.

Передавальна телевізійна камера нагадує фотоапарат, тільки замість фотоплівки в неї вміщено спеціальну електронно-променеву трубку, за допомогою якої здійснюється перетворення зображення об'єкта в серію електричних сигналів. Існує кілька типів таких електронно-променевих трубок — іконоскопи, ортікони, відікони, плюмбікони тощо. Розглянемо одну з найпростіших трубок — відікон. Її будову показано на малюнку 92. Екран цієї електронно-променевої трубки є прозорим сигнальним електродом  $S$ , на який нанесено тонкий шар напівпровідникового фоторезистора



Мал. 92

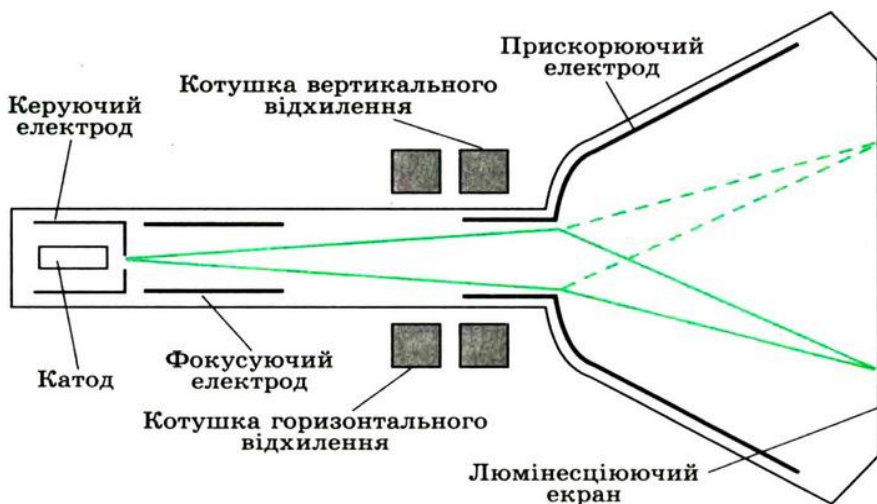
( $K$  — катод). В коло цього електрода увімкнуто резистор навантаження  $R_n$ , з якого й знімається сигнал.

Передаване зображення за допомогою системи лінз проєктується на поверхню фоторезистора. Залежно від освітленості різні місця фоторезистора набувають різної провідності. Створюваний електронною гарматою промінь послідовно пробігає всі елементи одного горизонтального рядка фоторезистора, потім другого і т. д. Переміщення електронного променя по екрану нагадує переміщення нашого погляду по рядках книги. Електронний промінь пробігає по екрану 625 горизонтальних рядків за  $1/25$  секунди. Рухом електронного променя керує магнітне поле надітої на трубку котушки.

Коли електронний промінь досягає поверхні фоторезистора, залежно від електричної провідності даної ділянки (яка, в свою чергу, залежить від освітленості шару) резистором  $R_n$  проходить більшої чи меншої сили струм. Таким чином, напруга на резисторі змінюється пропорційно зміні освітленості вздовж рядка. Так утворюється відеосигнал. Він містить інформацію про зображення предмета. Далі цей відеосигнал підсилюється, а потім, як і у випадку передачі звукових сигналів, використовується для модуляції високочастотних коливань. Модульовані відеосигналом високочастотні коливання подаються в антену і випромінюються нею в простір. Одночасно другий передавач здійснює передачу сигналів звукового супроводу.

Телевізійний приймач перетворює одержаний відеосигнал у видиме зображення на екрані приймальної електронно-променевої трубки — кінескопа (мал. 93). Особливістю будови





Мал. 93

цієї трубки є можливість керування інтенсивністю електронного променя (кількістю електронів у промені), і отже, яскравістю свічення екрана в місці попадання променя. Керування інтенсивністю електронного променя, який малює зображення на люмінесцюючому екрані, здійснюється так. Модульовані електромагнітні хвилі вловлюються антеною і надходять у приймач. Там вони підсилюються, детектуються і відповідні коливання подаються на керуючий електрод трубки. Зміна потенціалу цього електрода змінює інтенсивність електронного променя, яка визначає яскравість свічення точки екрана в момент, коли промінь падає на неї.

Система котушок горизонтального і вертикального відхилення змушує електронний промінь пробігати весь екран кінескопа синхронно з рухом електронного променя екраном передавальної трубки (відікона), тобто електронний промінь у кінескопі також пробігає за  $1/25$  секунди всю площу екрана, прокреслюючи за цей час 625 горизонтальних рядків. Внаслідок цього на екрані кінескопа за  $1/25$  секунди відтворюється весь переданий кадр. Оскільки за секунду змінюється 25 таких кадрів, то як в кіно, окремі зображення сприймаються нашим оком як єдине суцільне рухоме зображення.

Синхронність руху електронних променів екраном у передавальній трубці (відіконі) і приймальних трубках (кінескопах) досягається посиланням спеціальних синхронізуючих сигналів.



Високоякісне телевізійне передавання і приймання можливі лише на ультракоротких хвилях метрового діапазону (10—1 м). На жаль, необхідність використання для телебачення лише ультракоротких хвиль дуже обмежує дальність приймання телепередач.

Ультракороткі хвилі сильно поглинаються поверхнею Землі і проходять крізь йоносферу, не відбиваючись від неї. Тому приймання телевізійних передач можливе лише в межах прямої видимості між передавальною і приймальною антенами. Для збільшення радіуса телемовлення необхідно ці антени піднімати на велику висоту.

Проте, якими б високими не будували вежі телецентрів, передачами можна було б охопити лише обмежені райони. Значно збільшити дальність телепередач дають змогу кабельні і релейні лінії. Телепередачі на великій відстані здійснюються за допомогою штучних супутників Землі.

## **§ 50 — РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ**

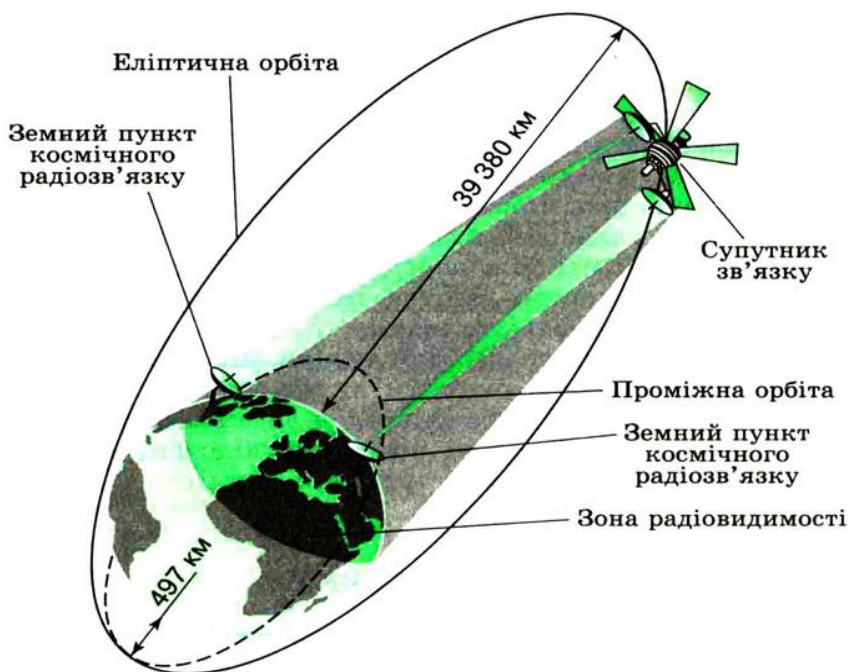
Розвитку і вдосконаленню засобів зв'язку приділяється велика увага в усьому світі. Різні засоби зв'язку (телефон і телеграф, радіо і телебачення, факс, комп'ютер, інтернет тощо) міцно увійшли в повсякденний побут широких мас населення і тепер важко навіть уявити собі життя людини без них. Без добре організованих засобів зв'язку практично неможливо в сучасних умовах керувати народним господарством.

Наша країна вкрита густою мережею кабельних, радіорелейних і повітряних ліній телефонного зв'язку. Телефонний зв'язок дійшов до всіх населених пунктів.

Широко розвинений автоматичний телефонний зв'язок між населеними пунктами, коли абонент, наприклад у Києві, самотійно, не вдаючись до послуг телефоністки, набирає потрібний йому номер у Львові, Харкові, Бердичеві, Таращі чи іншому населеному пункті. Останнім часом почав розвиватися відеотелефонний зв'язок між населеними пунктами. Розмовляючи, співрозмовники бачать один одного на екрані.

Швидкими темпами розвивається телефонний зв'язок у сільській місцевості. Телефонний зв'язок із своїми районними центрами мають практично всі села.

Проте створити надійну систему зв'язку з віддаленими пунктами, будуючи кабельні чи радіорелейні лінії, дуже складно. З віддаленими від центру пунктами зручно зв'язуватися за допомогою штучних супутників Землі. Такі системи космічного зв'язку через штучні супутники зв'язку успішно



Мал. 94

працюють уже багато років (мал. 94). Потужний передавач посиляє на штучний супутник зв'язку радіосигнали, які містять або телефонні повідомлення, або програму телебачення. На супутнику встановлено приймач, який підсилює і перетворює прийняті сигнали і через бортовий передавач ретранслює на Землю. Їх ловлять антенами земних приймальних пунктів і передають на місцеві телевізійні станції.

Досі йшлося про використання космічного зв'язку в земних умовах. Але без надійного радіозв'язку практично неможливе було б освоєння космосу. За допомогою радіо підтримується зв'язок з екіпажами космічних кораблів, здійснюється управління цими кораблями під час безпілотних польотів, передаються з кораблів на Землю показання різної апаратури тощо.

Швидкими темпами розвивається радіозв'язок і телебачення. Створюється розгалужена мережа ультракороткохвильових передавачів, які дають можливість поліпшити обслуговування радіослухачів, оскільки на мовлення на ультракоротких хвилях не впливають індустриальні, атмосферні та інші перешкоди. Розвивається передавальна телевізійна мережа, зростає приймальний парк телевізорів.



Потреби в широко розгалужених, надійно функціонуючих засобах зв'язку дуже великі і незмінно зростатимуть в міру розвитку народного господарства, автоматизації і механізації виробничих процесів, розквіту духовного життя і культурних запитів населення.

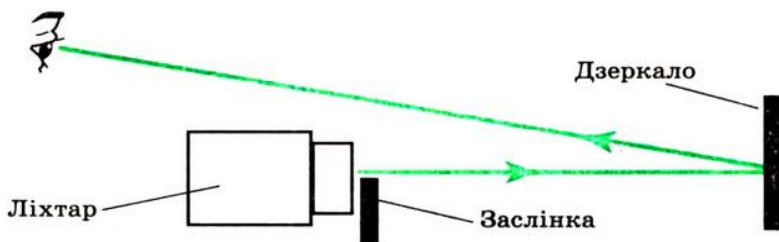
## § 51 — СВІТЛО ЯК ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. ШВИДКІСТЬ СВІТЛА

Випромінювання електромагнітних хвиль відбувається під час вимушених коливань електронів у коливальних контурах (антенах). За допомогою електричних коливальних контурів можна дістати електромагнітні хвилі, частота яких досягає  $10^{12}$  Гц (довжина хвилі кілька міліметрів). Виникає запитання: чи існують електромагнітні хвилі більших частот? Теоретично можуть існувати електромагнітні хвилі, частота яких може змінюватися від нульових до нескінченно великих значень. Детальне вивчення електромагнітних явищ показало, що під час коливань атомів і молекул виникають електромагнітні хвилі, частота яких значно перевищує частоту хвиль, які одержують за допомогою коливальних контурів. Ці хвилі дістали назву *світлових хвиль*. З погляду фізики, світлові хвилі — це електромагнітні хвилі, до яких, крім видимого (неозброєним оком), належать також інфрачервоне і ультрафіолетове проміння (частоти коливань від  $10^{12}$  до  $3 \cdot 10^{16}$  Гц і довжини хвиль від 0,3 мм до  $10^{-2}$  мкм). Видиме проміння має частоти від  $4 \cdot 10^{14}$  Гц до  $7,7 \cdot 10^{14}$  Гц (довжини хвиль від 0,4 до 0,77 мкм).

Світлові хвилі мають усі властивості електромагнітних хвиль, у тому числі з певною швидкістю переносять енергію. Питання про швидкість поширення світла — одне з найбільш важливих, принципових питань всієї фізики. З'ясування того, що швидкість світла є граничною швидкістю поширення будь-яких фізичних збуджень, а також визначення числового значення цієї швидкості дали можливість обґрунтувати електромагнітну природу світла і відіграли важливу роль у створенні теорії відносності.

Швидкість світла можна визначити, вимірявши пройдену світлом за певний час відстань (прямий метод). Перша спроба визначити в такий спосіб швидкість світла належить Г. Г а л і л е ю (1607 р.). На певній відстані від спостерігача розміщалося плоске дзеркало (мал. 95). Відкриваючи заслінку ліхтаря, спостерігач повинен був за годинником визначити, через який час повернеться світло, відбившись від дзеркала. Проте цим способом не вдалося визначити швидкість світла, оскільки при порівняно невеликій відстані до дзеркала час

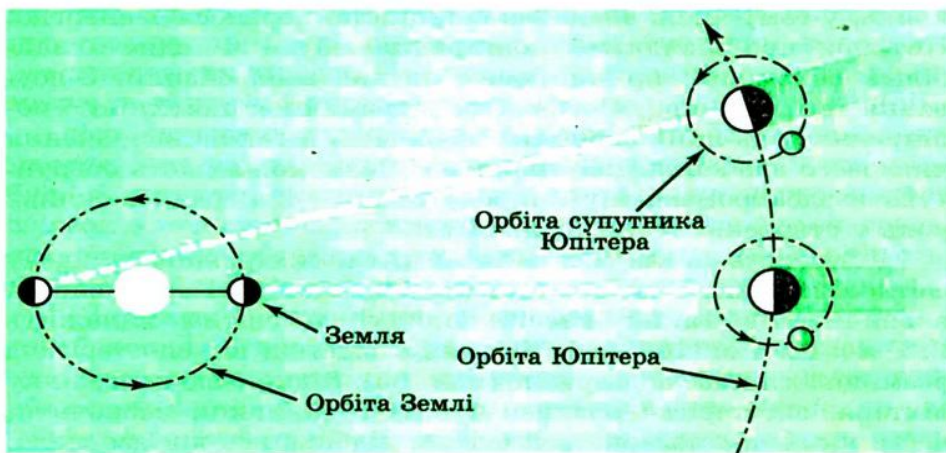




Мал. 95

реакції спостерігача на світло значно перевищував час поширення світла від ліхтаря до дзеркала і назад до спостерігача.

Вперше визначити швидкість світла вдалося датському астроному О л а ф у Р е м е р у в 1676 р. під час вивчення затемнень одного із супутників Юпітера. Супутники обертаються навколо Юпітера і періодично ховаються за ним. Очевидно, що затемнення супутників мають повторюватися строго періодично. Однак Ремер виявив, що коли Земля наближається до Юпітера, інтервали часу між послідовними затемненнями стають коротшими, а коли віддаляється від Юпітера, — довшими порівняно з розрахованим часом. Ремер пояснив це тим, що протягом року змінюється відстань від Землі до Юпітера, а тому світло від супутника Юпітера до Землі йде різний час. Ремер порівняв результати двох спостережень. Одне було виконане в момент, коли відстань між Юпітером і Землею була мінімальною, а друге — коли ця відстань була максимальною (мал. 96). Різниця між фактичним моментом виходу супутника Юпітера із затемнення і роз-



Мал. 96

рахованием значенням виявилася рівною  $t = 1320$  с. Оскільки діаметр земної орбіти навколо Сонця дорівнює  $d = 299$  млн кілометрів, то для швидкості світла Ремер дістав значення:

$$c = \frac{d}{t} = \frac{299\,000\,000\text{ км}}{1320\text{ с}} \approx 227\,000\text{ км/с.}$$

Це значення не дуже точне, оскільки вимірювання Ремера були виконані з великими похибками і, крім того, діаметр земної орбіти на той час був відомий з малою точністю. За сучасними спостереженнями час запізнення затемнення проти розрахованого становить  $t = 996,4$  с, що дає для швидкості світла

$$c = \frac{299\,000\,000\text{ км}}{996,4\text{ с}} \approx 300\,000\text{ км/с.}$$

Однак цінність відкриття Ремера величезна, оскільки він вперше показав, що швидкість поширення світла скінченна.

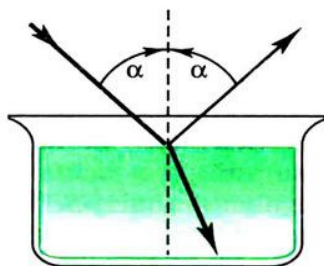
У подальшому швидкість світла вимірювалась багато разів і в різних умовах. Одним з найбільш точних вимірювань швидкості світла був дослід, проведений у 1926 р. американським фізиком А. М а й к е л ь с о н о м.

Тепер існують інші, точніші способи вимірювання швидкості світла. Кілька років тому, скориставшись лазерним випромінюванням, вчені визначили швидкість світла з небаженою досі точністю:  $c = (299\,792\,456 \pm 1,1)$  м/с. Відносна похибка цього вимірювання  $3,5 \cdot 10^{-9}$ .

## § 52 — ЗАКОНИ ВІДБИВАННЯ І ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА

Явища відбивання й заломлення світла вивчалися на дослідах у 8-му класі, там же були сформульовані закони відбивання світла і положення, яким підкоряється заломлення світла. Нагадаємо вивчене, дещо доповнивши й поглибивши його.

Спрямуємо вузький пучок світла на поверхню води (мал. 97). Ми вже знаємо, що пучок світла на межі між повітрям і водою одночасно відбивається і заломлюється. Досліди показують, що у разі зміни напрямку падаючого променя змінюється і напрям відбитого, але обидва вони завжди лежать в одній площині. Саме в цьому і полягає перший закон відбивання світла: промені падаючий і відбитий лежать в одній площині



Мал. 97

з перпендикуляром до відбиваючої поверхні, проведеним з точки падіння променя.

Змінюючи кут падіння променя на воду, помітимо, що при цьому змінюватиметься і кут відбивання. Вимірюючи щоразу кут падіння і кут відбивання, що відповідає йому, можна встановити, що вони завжди дорівнюють один одному. В цьому полягає **другий закон відбивання світла: кут відбивання дорівнює куту падіння.**

Нагадаємо, що кут падіння і відбивання прийнято вимірювати від перпендикуляра, проведеного до поверхні поділу, до відповідного променя.

Під час зміни напрямку падаючого променя змінюється і напрям заломленого променя, але досліди показують, що: **заломлений промінь лежить у тій самій площині, в якій лежать падаючий промінь і перпендикуляр, поставлений у точці падіння променя до межі поділу двох середовищ.** Це є **перший закон заломлення світла.**

Значно складнішим виявилось питання про напрям поширення заломленого променя. Перша спроба знайти зв'язок між кутами падіння й заломлення променів була зроблена відомим александрійським астрономом **К л а в д і є м П т о л е м е є м** ще в II столітті до нашої ери. Однак розв'язати цю проблему вдалося голландському фізику **В. С н е л л і у** с у і незалежно від нього французькому математику і фізику **Р е н е Д е к а р т у** в XVI столітті. Вони встановили, що: **при всіх змінах кутів падіння і заломлення відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для даних двох середовищ є величина стала, яка називається показником заломлення другого середовища відносно першого.**

Математично цей закон можна записати у вигляді такої формули:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n ,$$

де  $n$  — величина, яка залежить від властивостей середовищ, на межі поділу яких відбувається заломлення світла, і називається *показником заломлення* другого середовища відносно першого. Якщо світло заломлюється на межі «вакуум-прозоре середовище», відповідний показник заломлення називають *абсолютним показником заломлення* прозорого середовища.

Оскільки першим середовищем звичайно буває повітря, то прийнято визначати показник заломлення даної речовини відносно повітря. Цей відносний показник заломлення дуже мало відрізняється від абсолютного, оскільки абсолютний показник заломлення повітря дуже близький до одиниці і дорівнює за нормальних умов 1,00029.



З двох речовин *оптично більш густою* називається та, яка має більший абсолютний показник заломлення.

Спрямуємо тепер промінь світла з другого середовища в перше тим напрямом, яким раніше йшов заломлений промінь. Кут падіння в цьому випадку дорівнюватиме  $\gamma$ . Яким напрямом піде заломлений промінь у першому середовищі? Закони заломлення дають можливість легко відповісти на це запитання. Справді, другий закон заломлення в цьому випадку ми повинні записати у вигляді:

$$\frac{\sin \gamma}{\sin x} = n_1,$$

де  $x$  — кут заломлення;  $n_1$  — показник заломлення першого середовища відносно другого, який, очевидно, зв'язаний таким простим співвідношенням з показником заломлення  $n$  другого середовища відносно першого:

$$n_1 = \frac{1}{n}.$$

Підставляючи значення  $n_1$  у записане вище рівняння другого закону заломлення, дістанемо:

$$\frac{\sin \gamma}{\sin x} = \frac{1}{n}, \text{ або } \frac{\sin x}{\sin \gamma} = n.$$

Звідси  $x = \alpha$ , тобто кут заломлення в першому середовищі дорівнює кутові падіння для того випадку, коли світло падало з першого середовища в друге. Таким чином, падаючий і заломлений промені ніби міняються місцями.

---

1. У сонячний день потрібно освітити дно колодязя. Як треба розмістити плоске дзеркало, якщо сонячні промені падають під кутом  $60^\circ$  до земної поверхні?

2. Під яким кутом повинен падати промінь на дзеркало, щоб промені падаючий і відбитий були взаємно перпендикулярними?

3. У кімнаті висить вертикально плоске дзеркало, верхній край якого розміщений на рівні волосся верхньої частини голови людини зросту 182 см. Якої найменшої довжини має бути дзеркало, щоб ця людина бачила себе в дзеркалі на весь зріст?

4. Чи може світло, проходячи з одного прозорого середовища в інше, не заломлюватися?

5. Сонячні промені падають на поверхню води при кутовій висоті Сонця над горизонтом в  $30^\circ$ . Яким буде напрям цих променів у воді після заломлення?

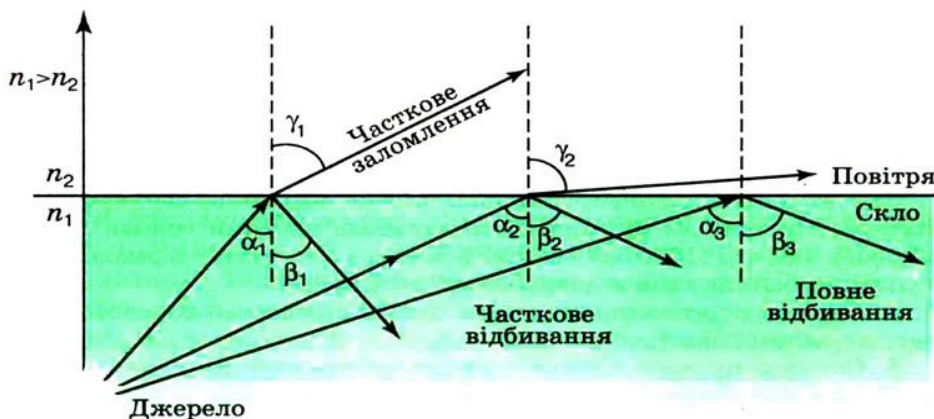
6. Світло падає на плоску скляну пластинку під кутом  $60^\circ$ . Показник заломлення скла 1,5. а) Чому дорівнює кут заломлення для скла? б) Під яким кутом промінь виходить з пластинки?

Цікаве явище виникає тоді, коли світло поширюється з оптично більш густого середовища в менш густе. Ми бачили, що в оптично густішому середовищі промінь світла утворює менший кут з перпендикуляром, проведеним до межі поділу середовищ, ніж промінь, який поширюється в оптично менш густому середовищі. Таким чином, якщо в цьому випадку збільшувати кут падіння, кут заломлення теж зростатиме, причому він буде завжди більшим за кут падіння (мал. 98). Отже, за певного кута падіння заломлений промінь в оптично менш густому середовищі утворюватиме кут  $90^\circ$  з перпендикуляром до межі поділу середовищ, тобто він поширюватиметься вздовж межі поділу. Якщо кут падіння ще збільшити, то в друге (оптично менш густе) середовище промінь взагалі не пройде і повністю відіб'ється в перше. Це явище називається *повним відбиванням* світла, а кут падіння, за якого все світло починає повністю відбиватися в перше середовище, — *граничним кутом* повного відбивання.

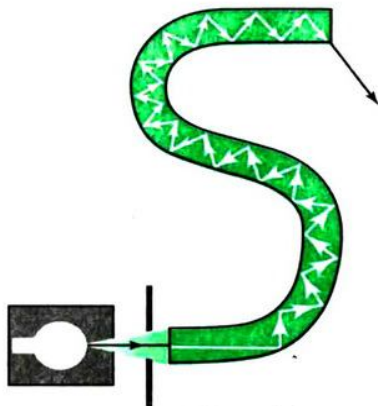
Застосовуючи закон заломлення, легко відшукати зв'язок граничного кута повного відбивання з відносним показником заломлення оптично більш густого середовища. Справді, в нашому випадку закон заломлення запишеться так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_1 = \frac{1}{n},$$

де  $n_1$  — відносний показник заломлення другого (менш густого) середовища;  $n$  — відносний показник заломлення пер-



Мал. 98



Мал. 99

шого середовища. Якщо кут падіння дорівнює граничному, то кут заломлення дорівнює  $90^\circ$ . Отже,  $\sin \gamma = 1$  і

$$\sin \alpha_n = \frac{1}{n}. \quad (53.1)$$

Для скла з показником заломлення  $n = 1,55$  граничний кут повного відбивання наближено дорівнює  $40^\circ$ . Оптичні деталі, дія яких ґрунтується на явищі повного відбивання, використовуються для заміни дзеркал у різних оптичних приладах.

Останнім часом явище повного відбивання світла знайшло застосування в пристроях для передачі зображення предмета без допомоги лінз і дзеркал. Це так звані *світловоди*. Світловод складається з великої кількості тонких (діаметром близько 20 мкм) ниток завдовжки близько 1 м кожна, виготовлених із скла. Ці нитки розташовані щільно одна біля одної і паралельні між собою. На обох торцях світловода взаємне розміщення кінців ниток строго однакове. Кожна нитка оточена тонкою оболонкою із скла, яке має менший показник заломлення, ніж сама нитка.]

Якщо до одного торця світловода притиснути якийсь плоский самосвітний або ж освітлений побічним джерелом світла предмет, світло від кожної маленької частини предмета потрапить в торець однієї з ниток. Оскільки кожна нитка оточена речовиною, оптична густина якої менша за оптичну густину нитки, то світло, потрапивши в неї, зазнає безліч повних відбивань (мал. 99) і вийде з протилежного торця нитки. Таким чином, на другому кінці світловода утворюється зображення предмета, яке буде тим чіткіше, чим менший діаметр кожної нитки.

Світловоди знаходять широке застосування в сучасній техніці і в медицині, особливо тоді, коли шлях світла від



джерела до приймача виявляється криволінійним. У таких ситуаціях світловод завдяки своїй гнучкості замінює досить складну оптичну систему з багатьох лінз і дзеркал. Крім того, світловод має дуже високу світлосилу, тобто втрати світлової енергії на шляху проходження променя невеликі. Так, для огляду внутрішніх органів хворого (шлунок, кишечник тощо) застосовують гастроскоп — тонкий і дуже гнучкий світловод, який вводиться через стравохід чи товсту кишку всередину порожнини, яку слід оглянути. Через один із введених світловодів порожнина освітлюється, а через другий світловод здійснюється огляд (або фотографування) порожнини.

## Вправа 12

1. Чи вийде світловий промінь з води в повітря, якщо кут падіння дорівнює: а)  $45^\circ$ ; б)  $60^\circ$ ?

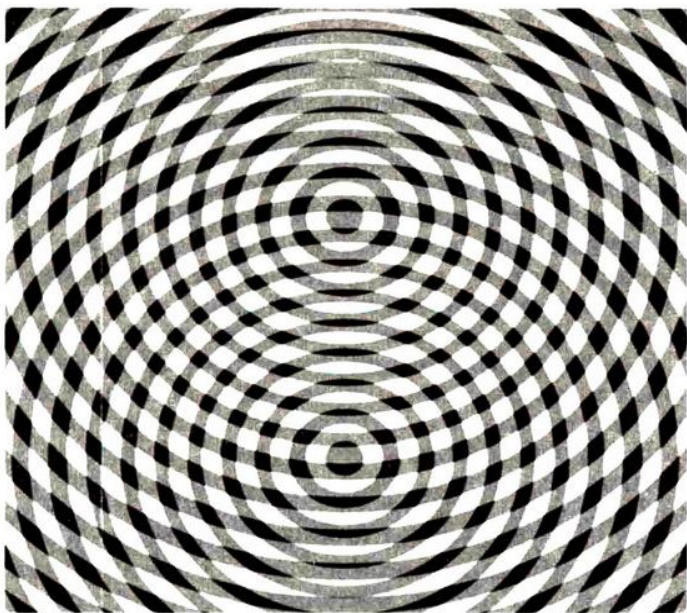
2. Граничний кут повного відбивання для льоду дорівнює  $50^\circ$ . Визначте показник заломлення льоду.

## § 54 — ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ ХВИЛЬ

Досі ми розглядали поширення в тій чи іншій частині простору однієї світлової хвилі. Та часто в одній і тій самій частині простору поширюються одночасно світлові хвилі від двох або кількох джерел світла. Наприклад, коли в кімнаті горить одночасно кілька ламп, окремі світлові хвилі накладаються одна на одну. Що при цьому відбувається? Очевидно в кожній точці простору виникає складне електромагнітне коливання, яке є результатом додавання коливань кожної хвилі окремо.

Найпростіше з'ясувати, що відбувається у разі накладання двох хвиль, на прикладі хвиль на поверхні води. Аналогічне явище спостерігатиметься і у випадку світлових хвиль.

Прикріпимо до коливної пластинки на певній відстані один від одного два стержні, які одночасно будуть ударяти по поверхні води у ванні, створюючи дві кругові хвилі однакової довжини. В результаті накладання цих хвиль на екрані ми побачимо таку картину (мал. 100): в деяких місцях вода спокійна, тобто накладання хвиль від двох джерел веде до ліквідації коливання її поверхні; в інших місцях поверхня води коливається сильніше, ніж у випадку одного джерела — тут накладання хвиль від двох джерел веде до збільшення амплітуди коливань. Зверніть увагу, що місця підсилення і послаблення коливань розміщені на поверхні води не хаотично, а в певному порядку. Така картина чергування



Мал. 100

максимумів і мінімумів коливань називається *інтерференційною картиною*, а явище підсилення коливань в одних точках середовища, де поширюються хвилі, і послаблення в інших, яке є результатом накладання одна на одну хвиль однакової довжини, а отже, однакової частоти, називається *інтерференцією хвиль*.

З'ясуємо походження інтерференційної картини — чому під час накладання хвиль в одних місцях виникає послаблення коливань, а в інших — посилення. Зійшовшись у кожній точці поверхні води, дві хвилі викликають коливання часток води, визначити які для кожного окремого випадку неважко. Результуюче зміщення частинки в будь-який момент часу дорівнює геометричній сумі зміщень, які дістає частинка, беручи участь у кожному із хвильових процесів, що додаються. Нехай в даний момент часу в якомусь місці зміщення поверхні води від однієї та іншої хвилі спрямовані в один бік і максимальні — обидві хвилі приходять у цю точку в однаковій фазі. Якщо хвилі зійдуться гребенями, вода в цій точці сильно підніметься. Через півперіоду ( $\frac{1}{2}T$ ) гребені зміняться западинами, причому в обох хвилях одночасно, оскільки вони мають однаковий період. Поверхня води сильно опуститься. Ще через півперіоду поверхня води знову сильно підніметься і т. д. Таким чином, у даному місці

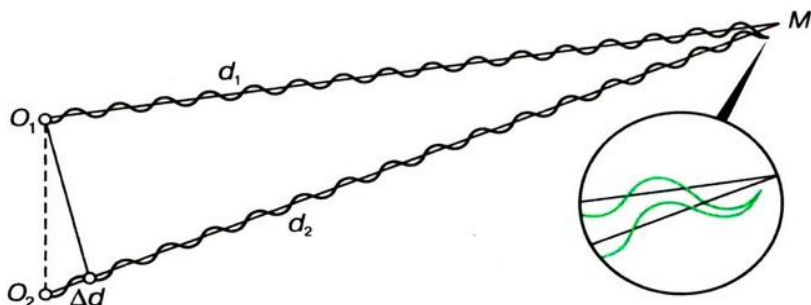


коливання будуть підсилені. В тих місцях, де гребені однієї хвилі сходяться із западинами іншої, тобто куди хвилі приходять в протилежних фазах, коливання будуть максимально послаблювати одне одне. Тут коливання поверхні води будуть слабкими або їх зовсім не буде, якщо амплітуди коливань в обох хвилях однакові.

Ми розглянули випадки, коли коливання джерел хвиль відбуваються в однаковій фазі, тобто гребені (чи западини) виходять з обох джерел одночасно. Аналогічну інтерференційну картину дістанемо і тоді, коли коливання джерел хвиль зсунуті за фазою на певний кут, причому значення цього зсуву весь час залишається незмінним.

Якщо ж фаза коливань одного чи обох джерел змінюється довільно, тоді в кожній точці поверхні води фази коливань то збігаються, то протилежні, коливання то підсилюються, то послаблюються, і розміщення максимумів і мінімумів безперервно змінюються. В цьому випадку спостерігається хаотичне хвилювання поверхні — стійкої інтерференційної картини немає. Так само не буде стійкої інтерференційної картини і тоді, коли частоти коливань (періоди або довжини хвиль) обох хвиль неоднакові. В цьому випадку в кожній точці поверхні підсилення коливань змінюється їх послабленням, потім знову підсиленням і т. д. Чим сильніше відрізняються частоти коливань, тим швидше змінюється розміщення максимумів і мінімумів, і стійкої інтерференції не спостерігається. Таким чином, для спостереження інтерференційної картини необхідно, щоб хвилі мали однакову частоту (період або довжину хвилі) і незмінну різницю фаз в кожній точці простору, де вони накладаються одна на одну. Такі хвилі називають *когерентними*. Отже, **стійка інтерференційна картина спостерігається лише під час накладання когерентних хвиль**.

Для розв'язання питання, в яких фазах зустрінуться в даній точці інтерферуючі хвилі, треба врахувати різницю ходу цих хвиль. Нехай нас цікавить результат накладання хвиль в точці  $M$  (мал. 101), що перебуває на відстані  $d_1$  від



Мал. 101



першого джерела хвиль  $S_1$  і на відстані  $d_2$  від другого джерела  $S_2$ . Відстань  $d_1 - d_2$  називається **геометричною різницею ходу хвиль**. Якщо когерентні джерела хвиль коливалися в однакових фазах, то у разі різниці ходу, що дорівнює цілому числу довжин хвиль або парному числу півхвиль, в точці  $M$  хвилі надходять в однакових фазах. При їх додаванні у точці  $M$  виникає підсилення коливань. Якщо ж різниця ходу дорівнюватиме непарному числу півхвиль, хвилі від  $S_1$  і  $S_2$  надійдуть у цю точку в протилежних фазах і в ній коливання ослабнуть.

Таким чином, умовою максимуму коливань у даній точці є рівність різниці ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, цілому числу довжин хвиль:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (54.1)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$

Умовою мінімуму коливань у даній точці є рівність різниці ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, непарному числу півхвиль:

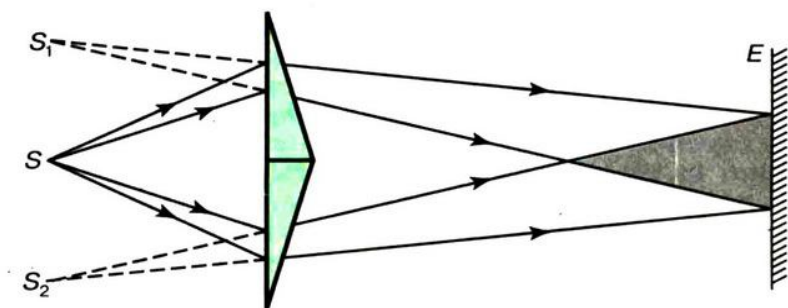
$$\Delta d = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (54.2)$$

## § 55 — ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Якщо світло має хвильові властивості, то накладання двох його пучків може не тільки підсилити, а й ослабити світло. Дослід підтверджує це. Однак постає запитання: як створити умови, необхідні для виникнення інтерференції світлових хвиль? Інакше кажучи, яким чином можна одержати когерентні світлові хвилі?

З повсякденного досвіду ми добре знаємо, що вмикання двох джерел світла, наприклад двох лампочок в одній кімнаті, викликає підсилення світла у всіх точках простору і інтерференція не спостерігається. Неважко зрозуміти, що будь-які два світні тіла (за винятком лазерів, про які йтиметься пізніше) не можуть бути когерентними джерелами світла. Справді, світло, випромінюване світним тілом (наприклад, волоском електролампи), є сукупністю величезної кількості електромагнітних хвиль, які випромінюються окремими атомами чи молекулами. Умови випромінювання цих частинок дуже швидко і хаотично змінюються, а тому швидко й хаотично змінюється фаза коливань. Такі джерела світла некогерентні.

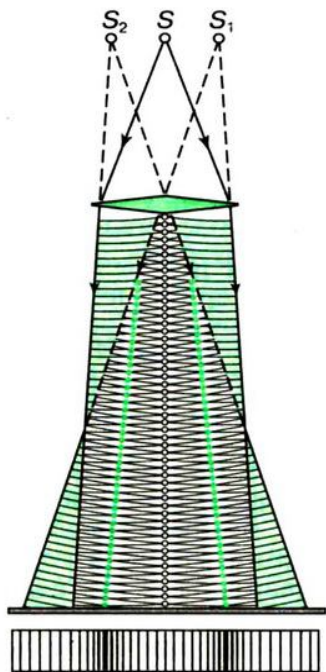
Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: розділяють пучок світла від одного джерела на два чи кілька пучків, які йдуть у різних напрямках, а потім знову зводять і накладають один на одного. Якщо ці



Мал. 102

частини однієї хвилі пройдуть різну відстань, то між ними виникне різниця фаз, зумовлена різницею ходу хвиль, і під час накладання хвиль повинні виникнути інтерференційні явища. Це розділення пучка на два можна здійснити різними способами. Наприклад, за допомогою біпризми (мал. 102). Біпризма — це дві вузькі призми, складені малими основами.

Поставимо перед біпризмою джерело  $S$  монохроматичного випромінювання, тобто випромінювання з однією строго визначеною частотою коливань. Таке випромінювання можна дістати за допомогою світлофільтра, який пропускає світло одного кольору, точніше — однієї частоти коливань. На екрані  $E$  виникне інтерференційна картина. Вона є чергуванням світлих і темних смуг із світлою смугою посередині. Світлі смуги інтерференції мають колір світлофільтра, встановленого перед джерелом світла.

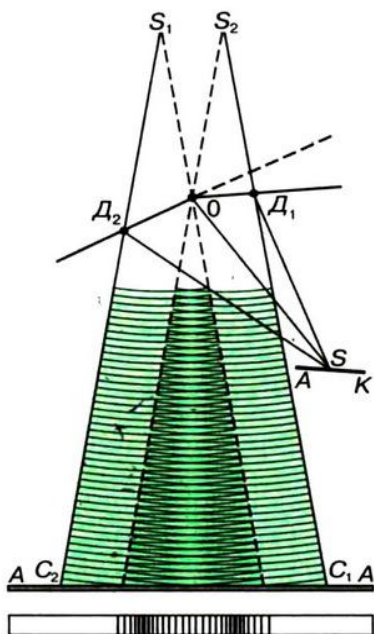


Мал. 103

Пояснюється виникнення інтерференційної картини так. Усі промені, які падають на верхню призму, після заломлення в ній ідуть так, ніби вони вийшли з точки  $S_1$ , яка є уявним зображенням джерела світла  $S$ . Аналогічно промені після заломлення в нижній призмі йдуть так, ніби вони вийшли з точки  $S_2$ . Таким чином, на всій поверхні екрана відбувається накладання когерентних променів, які ніби йдуть від двох уявних і когерентних джерел світла  $S_1$  і  $S_2$  (мал. 103).

Умови максимуму (54.1) і мінімуму коливань (54.2) справедливі і





Мал. 104

для світлових хвиль. Якщо на біпризму спрямувати світло якогось іншого кольору, то спостерігатиметься аналогічна інтерференційна картина, але відстані між світлими і темними смугами будуть іншими. Наприклад, під час освітлення біпризми червоним світлом відстані між смугами виявляються більшими, ніж у разі освітлення зеленим чи синім світлом.

А що спостерігатиметься на екрані, якщо біпризму освітити білим світлом? У цьому випадку теж спостерігатиметься інтерференційна картина: в центрі буде видно білу світлу смугу, а по обидва боки від неї — кольорові смуги, забарвлені всіма кольорами райдуги.

Дістати когерентні світлові пучки можна за допомогою дзер-

кал Френеля, які являють собою два плоскі дзеркала, розміщені під кутом майже  $180^\circ$  одне до одного (мал. 104). Якщо на ці дзеркала спрямувати пучок світла, він роздвоюється дзеркалами і від кожного дзеркала світло поширюється розбіжним пучком. Після відбивання обидва пучки світла накладаються один на одного і інтерферують. На екрані виникає така сама інтерференційна картина, як у випадку, коли б екран освітлювався когерентними джерелами  $S_1$  і  $S_2$ , уявними зображеннями джерела світла  $S$  у дзеркалах.

1. У чому полягає явище інтерференції світла?
2. За якої умови інтерферуючі хвилі підсилюють одна одну? взаємно послаблюють?
3. Що необхідно для одержання стійкої інтерференційної картини?
4. Які хвилі є когерентними?
5. Як можна одержати когерентні світлові хвилі?

## Вправа 13

1. У певну точку простору надходять когерентні промені з оптичною різницею ходу  $2 \cdot 10^{-6}$  м. Визначте, підсилиться чи ослабне світло в цій точці, якщо в неї надходять: а) червоні промені з



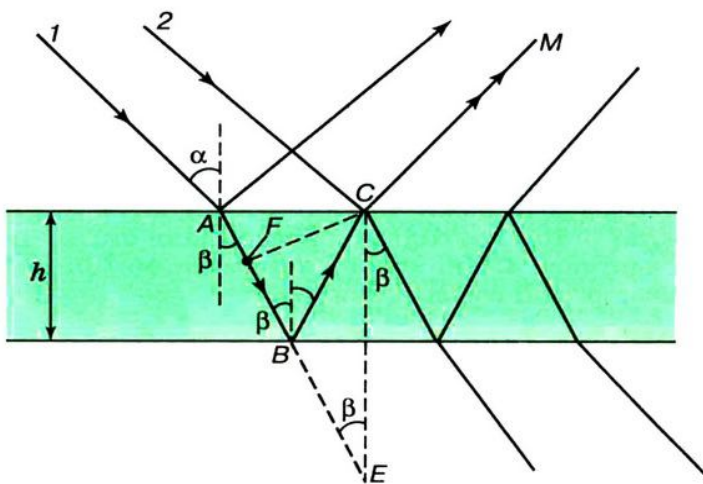
довжиною хвилі  $\lambda_1 = 760$  нм; б) жовті промені з довжиною хвилі  $\lambda_2 = 600$  нм; в) фіолетові промені з довжиною хвилі  $\lambda_3 = 400$  нм.

2. Різниця ходу променів двох когерентних джерел світла, які сходяться в певній точці,  $\Delta d = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м. Що відбуватиметься в цій точці — підсилення чи послаблення світла? Довжина хвилі світла  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м.

## § 56 — ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ В ТОНКИХ ПЛІВКАХ

Інтерференцію світла можна легко спостерігати в природних умовах. Забарвлення тонких прозорих плівок, кольорові розводи на тонких плівках бензину, гасу, олії, красиве забарвлення мильних бульбашок, яке безперервно змінюється — все це результат інтерференції світлових променів у цих плівках.

Спочатку з'ясуємо, як утворюється інтерференційна картина під час освітлення тонкої плоскопаралельної пластинки. Нехай на тонку плоскопаралельну пластинку падає паралельний пучок однорідного (монохроматичного) світла під кутом  $\alpha$  (мал. 105). Промінь 1, падаючи в точку А, частково відіб'ється, а частково заломиться і увійде в пластинку. Цей промінь, дійшовши до протилежної грані пластинки в точці В, знову частково заломиться і вийде з пластинки, а частково відіб'ється в точку С. У точці С промінь знову відіб'ється і частково заломиться, а вийшовши з пластинки, піде в напрямі СМ. Промені 1 і 2 когерентні, оскільки вони виходять з одного джерела світла і під час накладання інтерферують. Результат інтерференції визначається різницею хо-



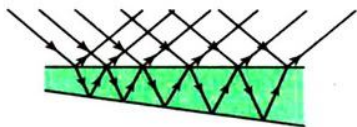
Мал. 105

ду цих променів. Якщо різниця ходу променів дорівнює парному числу півхвиль, то під час накладання пучків вони підсилюватимуть один одного, а якщо непарному, то пучки світла послаблюватимуть один одного. Таким чином, ця пластинка у разі освітлення її однорідним світлом буде або освітленою цим світлом, або темною. Якщо змінювати кут падіння променів, змінюватиметься і різниця ходу променів. Це означає, що у разі повертання пластинки відносно променів вона по чергово здаватиметься то темною, то світлою.

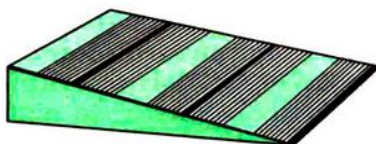
Якщо пластинку освітлювати білим світлом, під час інтерференції променів з однією довжиною хвилі спостерігатиметься підсилення, а для інших довжин хвиль буде послаблення. Тому пластинка здаватиметься спостерігачеві забарвленою в той колір, який близький до кольору променів, що максимально підсилюють один одного. При повертанні пластинки відносно променів її забарвлення змінюватиметься. Аналогічна інтерференційна картина спостерігатиметься і в прохідному світлі.

Розглянута картина спостерігатиметься лише тоді, коли пластинка ідеально однорідна, плоскопаралельна і освітлюватиметься пучком ідеально паралельних променів. Однак у дійсності в пластинці завжди існують неоднорідності, на яких змінюються показник заломлення, товщина плівки. Тому навіть в однорідному світлі ми побачимо вигадливі візерунки світлих і темних смуг.

Розглянемо інтерференцію світла в тонких плівках, товщина яких неоднакова в різних місцях. Візьмемо найпростішу плівку такого типу у формі клина (мал. 106). Якщо освітити таку плівку однорідним світлом, то у відбитому світлі її поверхня вже не здаватиметься рівномірно освітленою або темною, оскільки різниця ходу променів, які інтерферують у різних за товщиною місцях плівки, буде неоднаковою. Періодично зустрічатимуться такі товщини клина, які задовольняють умову взаємного підсилення і послаблення когерентних хвиль. Тому дуже тонка клиноподібна пластинка чи плівка, освітлена паралельним пучком однорідного світла, дає інтерференційну картину у вигляді світлих і темних смуг (мал. 107), розміщених паралельно гострому ребру клина.



Мал. 106



Мал. 107



Під час освітлення клиноподібної плівки білим світлом може виявитися, що в одних місцях плівки найбільше підсилюються світлові хвилі червоного світла, в інших — хвилі синього світла, ще в інших — хвилі зеленого світла і т. д. Тому на плівці виникнуть смуги, забарвлені всіма кольорами райдуги.

Інтерференційну картину на клиноподібній пластинці зручно спостерігати на тонкій мильній плівці. Щоб дістати тонкий клиноподібний шар, досить дротяну рамку опустити в мильний розчин. Внаслідок стікання мильного розчину вниз мильна плівка набуває форми клина.

## Вправа 14

1. Приготуйте мильний розчин, за допомогою скляної трубки або піпетки видуйте мильну бульбашку і простежте за грою кольорів на поверхні бульбашки.

2. Виготовте з дротини невеликий каркас у вигляді прямокутника і, натягнувши його мильною плівкою, простежте за грою кольорів на її поверхні. Якщо у вас знайдеться яке-небудь кольорове скло або забарвлений шматок целофану (краще червоного кольору), поспостерігайте через ці фільтри за інтерференційною картиною на мильній плівці. Замалюйте і опишіть спостережувані явища.

3. Поверхня мильних бульбашок і плівок внаслідок стікання рідини поступово тоншає. Простежте, як при цьому змінюється забарвлення плівок, аж поки вони лопнуть.

4. Нагрійте запаленим сірником лезо бритви, зітріть з нього ганчіркою кіптяву і розгляньте плівку, що утворилася на ньому. Поясніть результат досліду.

## § 57 — ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СВІТЛА

Явище інтерференції світла знаходить різноманітне практичне застосування. За його допомогою можна дуже точно визначати довжини світлових хвиль, здійснювати точні вимірювання лінійних розмірів, контролювати якість шліфування і полірування поверхонь тощо. Зупинимось на трьох застосуваннях інтерференції.

**Просвітлення оптики.** Інтерференція світла у разі відбивання від тонких плівок лежить в основі просвітлення оптики, відкритого українським фізиком О. С м а к у л о ю. Проходження світла крізь кожну заломлюючу поверхню лінзи супроводжується відбиванням приблизно 4 % падаючого світла. В складних об'єктивах кількість лінз може перевищувати десять і сумарна втрата світлового потоку



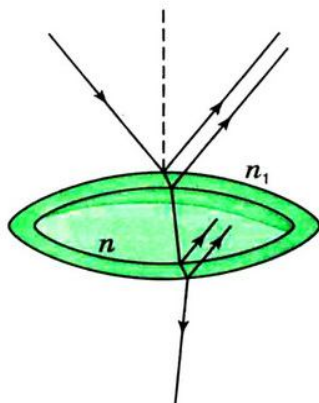
**Олександр  
СМАКУЛА  
(1900—1983)**



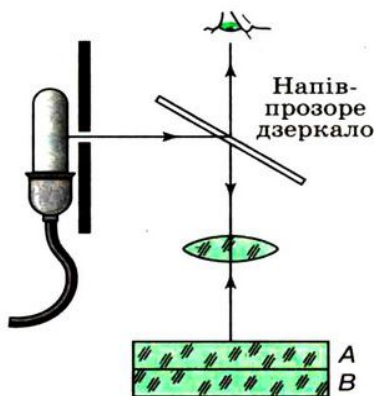
Видатний український фізик, який у 1935 р. відкрив спосіб просвітлення оптики, що спричинило переворот в оптичній, фотографічній та кінематографічній технологіях. Виконав важливі праці з біофізики, здійснив кристалографічні вимірювання органічних кристалів, розробив проекти вирощування монокристалів, запропонував оригінальний метод визначення числа Авогадро.

внаслідок відбивань може досягти помітної величини. Крім того, відбивання від поверхонь лінз веде до виникнення полісків..

Для усунення відбивання світла на кожну вільну поверхню лінзи наноситься тонка плівка речовини (мал. 108) з показником заломлення іншим, ніж у лінзи. У разі проходження світла крізь лінзу відбуватиметься його відбивання як від поверхні лінзи, так і від поверхні плівки. Відбиті хвилі інтерферують. Товщина плівки підбирається так, щоб відбиті від обох поверхонь плівки хвилі гасили одна одну. Гасіння відбитого світла веде до збільшення частки енергії світла, яке проходить крізь лінзу (в цьому і полягає смисл терміна «просвітлення оптики»). Домогтися гасіння відбитих хвиль усіх довжин видимого світла досить складно, тому товщину плівки підбирають так, щоб повністю погасити відбиті хвилі



Мал. 108



Мал. 109

якоїсь частини спектра. Звичайно намагаються погасити відбивання зеленого світла, до якого найбільш чутливі фотоматеріали. В цьому випадку поверхня об'єктива здаватиметься фіолетово-синьою (тому часто таку оптику називають голубою). Нині усі фотоапарати випускаються з просвітленою оптикою.

**Контроль якості поверхонь.** Залежність форми інтерференційних смуг від товщини тонких прозорих плівок використовується для контролю якості шліфування і полірування поверхонь. Якщо на поверхню досліджуваного виробу *В* накласти добре відполіровану скляну пластинку-шаблон *А* (мал. 109), то між цією поверхнею і нижньою поверхнею шаблона утворюється тонка повітряна плівка, в якій можна спостерігати інтерференційну картину. Інтерференційні смуги утворюються у разі відбивання світла від верхніх поверхонь виробу і шаблона. Ці смуги спостерігаються через лінзу чи в мікроскоп. При високій якості обробки поверхні інтерференційні смуги будуть прямолінійними (мал. 110, *а*). Якщо ж на поверхні досліджуваного виробу є якась нерівність, наприклад борозенка або виступ, інтерференційні смуги викривляються (мал. 110, *б*) і за їх виглядом можна зробити висновок про характер дефекту. Вигини інтерференційних смуг ніби окреслюють його контур. Таким методом можна легко виявляти відхилення від площини, які становлять всього  $\frac{1}{10}$  довжини світлової хвилі, тобто близько  $10^{-8}$  м.

**Інтерферометри.** Інтерференційна картина дуже чутлива до різниці ходу інтерферуючих хвиль: мізерно мала зміна різниці ходу порядку частки довжини світлової хвилі викликає істотне зміщення інтерференційних смуг. На цьому ґрунтується дія інтерферометрів — приладів для точного вимірю-



Мал. 110

вання довжини і кутів, а також для визначення показника заломлення прозорих середовищ. У промисловості інтерферометри широко використовуються для контролю якості (гладкості, рівності) шліфованих виробів.

?

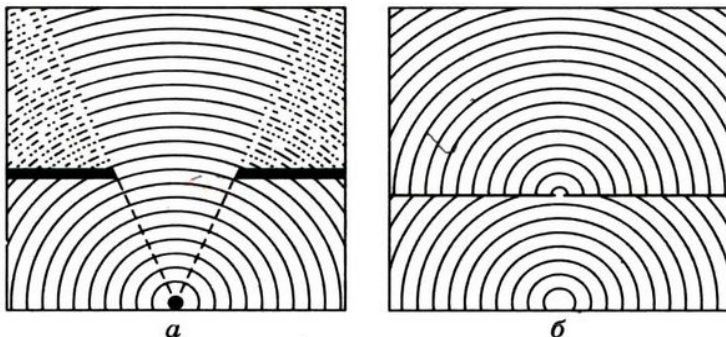
1. Перелічіть основні застосування явища інтерференції.
2. З якою точністю за допомогою інтерференції можна перевірити якість обробки поверхні?
3. Як просвітлюють оптику?

## § 58 — ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Під час вивчення у 8-му класі прямолінійності поширення світла ви на дослідах переконалися, що за непрозорими тілами утворюються чітко окреслені тіні, тобто світло не проникає за краї непрозорих тіл. Однак ці досліди проводились з тілами, розміри яких значно більші за довжину світлової хвилі. Якщо ж на шляху пучка світла поставити невелике непрозоре тіло, розміри якого порівнянні з довжиною світлової хвилі, то світло огинатиме краї цього тіла, відхилятиметься від прямолінійного поширення.

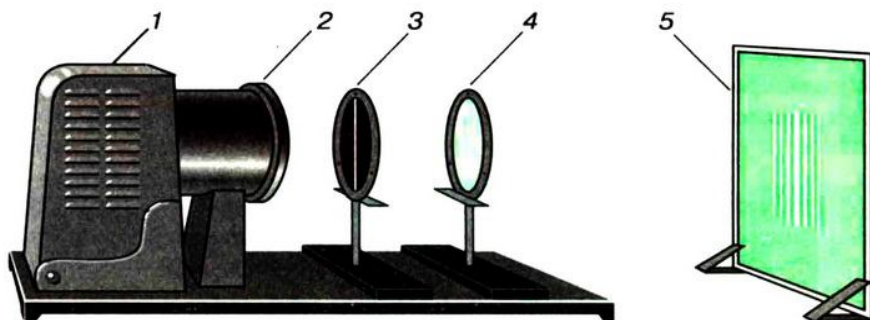
Явище огинання механічними хвилями перешкод ви багато разів спостерігали в житті. Так, хвилі на поверхні озера вільно обходять волосінь і поплавки вудки, рогіз і невеликі камінці, які стирчать з води. Тільки великих розмірів стовпи й камені дають за собою тінь, хвилі за них не проникають. Огинають перешкоди і звукові хвилі. Ми чуємо розмову, яка ведеться за рогом будинку, в лісі добре чуємо звуки музики, що линуть з радіоприймача.

Явище огинання хвилями країв перешкод і відхилення хвиль від прямолінійного поширення називається *ди-*



Мал. 111





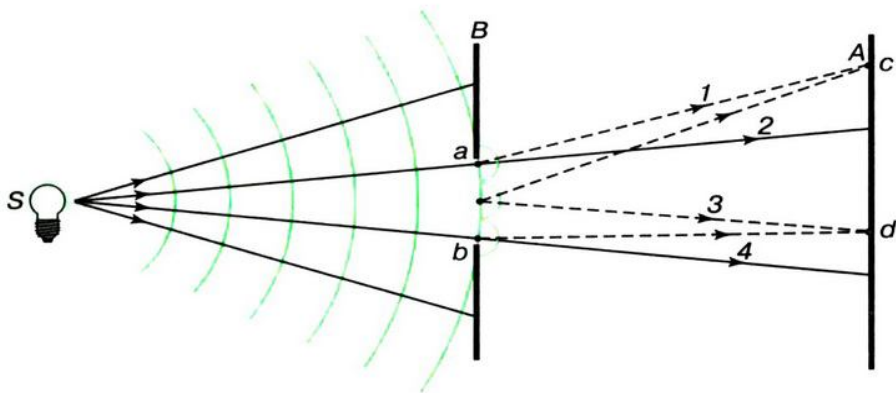
Мал. 112

*фракцією хвиль.* Це явище властиве будь-якому хвильовому процесу такою ж мірою, як і інтерференція.)

Досить зручно спостерігати за явищем дифракції хвиль на поверхні води, поставивши на шляху хвиль екран зі щілиною. Якщо ширина щілини набагато більша за довжину хвилі (мал. 111, а), форма хвильового фронту після проходження через щілину майже не змінюється, а за екраном утворюється тінь. Якщо ширина щілини порівнянна з довжиною хвилі, за щілиною поширюється кругова хвиля так, ніби в отворі екрана міститься джерело хвиль (мал. 111, б).

Оскільки довжина світлової хвилі дуже мала (за звичними для нас масштабами), то в звичайних умовах спостерігати огинання світлом перешкод значно складніше. Для цього ширина перешкод (вузьких екранів, щілин тощо) має бути порядку 1 мм. Поставимо перед проекційним апаратом 1 щілину 2 і світлофільтр 4. Пучок світла, що виходить з цієї щілини, освітлює другу розсувну щілину 3, зображення якої розглядається на екрані 5 (мал. 112). Зменшуватимемо ширину другої щілини. На екрані проти щілини буде видно світлу смугу, ширина якої тим більша, чим вужчою стає щілина, а за світлою смугою чергуються темні й світлі смуги. Якщо повільно змінювати ширину другої щілини, центральна світла смуга змінюється на темну, оточену з обох боків почергово світлими і темними смугами. Колір світлої смуги відповідає кольору використаного світлофільтра. У разі освітлення білим світлом утворена дифракційна картина буде більш розмитою і матиме райдужне забарвлення.

Аналогічна картина спостерігається, якщо замість другої щілини поставити натягнуту на рамку тонку дротину або гладеньку капронову нитку. В цьому випадку в центрі дифракційної картини завжди утворюється світла смуга, а з обох боків її оточують почергово темні й світлі смуги.



Мал. 113

Дифракційні картини нерідко виникають у природних умовах. Наприклад, кольорові кільця навколо джерела світла під час спостереження його крізь туман чи запітніле віконне скло зумовлені дифракцією світла на дуже дрібних краплях води.

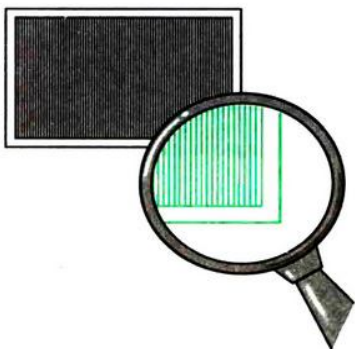
Дифракція світла пояснюється так. Нехай світло від джерела  $S$  падає на екран  $A$  через отвір  $ab$  в екрані  $B$  (мал. 113). Кожну точку ділянки  $ab$  фронту світлової хвилі (яка заповнює отвір) можна розглядати як вторинне джерело світла. Ці джерела світла когерентні, тому промені (хвилі) 1 і 2, 3 і 4 і т. д., які виходять від них, інтерферуватимуть між собою. Залежно від різниці ходу променів на екрані  $A$  в точках  $c$ ,  $d$  і т. д. виникатимуть максимуми і мінімуми освітленості, створюючи дифракційну картину.

1. У чому полягає явище дифракції світлових хвиль і як його можна спостерігати? 2. Пробийте голкою отвір в аркуші картону і подивіться крізь цей отвір на волосок розжарення увімкненої електричної лампочки. Що ви побачите? Як зміниться спостережуване явище, якщо отвір закрити тонкою кольоровою плівкою?

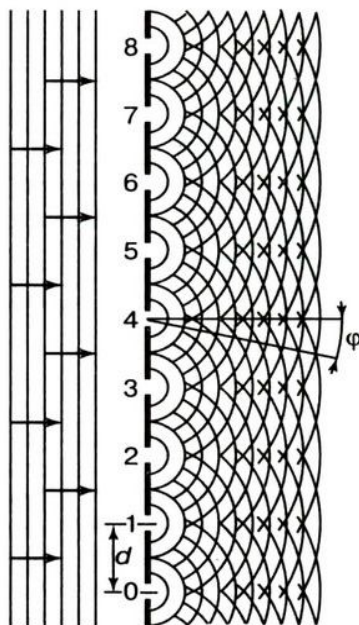
## § 59 — ДИФРАКЦІЙНА РЕШІТКА

Спостереження дифракції від однієї щілини ускладнюються тим, що крізь вузьку щілину проникає дуже мало світла. Щоб дістати яскравішу дифракційну картину, слід пропускати світло крізь кілька паралельних вузьких щілин. У цьому випадку відбуватиметься інтерференція променів, які йдуть від усіх щілин, і найбільша освітленість утворюватиметься в тих місцях екрана, куди від усіх щілин приходи-





Мал. 114



Мал. 115

тимуть промені в однаковій фазі. При великій кількості освітлених щілин на екрані видно яскраві й вузькі світлі лінії на темному фоні. Чим більша загальна кількість щілин і чим густіше вони розташовані, тим яскравіші й вузьчі місця на екрані, в яких промені накладаються з однаковими фазами. Це використовується в будові дифракційних решіток.

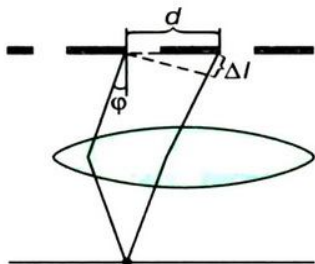
Дифракційна решітка є сукупністю багатьох дуже вузьких щілин, розділених непрозорими проміжками (мал. 114). Решітки виготовляють у вигляді пластинок з прозорої твердої речовини, на поверхні яких алмазним різцем наносяться штрихи, паралельні один одному. Там, де пройшов різець, утворюється шорстка поверхня, яка розсіює промені, а проміжки між штрихами залишаються прозорими, тобто відіграють роль щілин.

Нехай на решітку падає паралельний пучок монохроматичного світла (мал. 115). Всі щілини решітки випромінюють вторинні хвилі в однаковій фазі. Кожна вторинна хвиля поширюється по всіх напрямках, однак можна виділити один певний напрям, який характеризується кутом  $\varphi$ , поставивши за дифракційною решіткою лінзу (або око спостерігача). У фокальній площині цієї лінзи і зберуться всі промені, які йдуть паралельно її оптичній осі, тобто накладуться вто-



ринні хвилі, що виходять із щілин решітки.

Розглянемо, яким буде результат накладання вторинних хвиль, які виходять із щілин дифракційної решітки. Нехай  $a$  означає ширину щілини,  $b$  — ширину непрозорої для світла ділянки між двома щілинами. Величину  $d = a + b$  прийнято називати *періодом*, або *сталю* дифракційної решітки. Оскільки всі щілини містяться одна від одної на однаковій відстані, то різниці ходу променів, які йдуть із двох сусідніх щілин, для даного кута  $\varphi$  однакові для всієї дифракційної решітки і дорівнюють (мал. 116):



Мал. 116

$$\Delta l = d \sin \varphi. \quad (59.1)$$

Отже, різниця ходу залежить від кута  $\varphi$ . Зі зміною кута  $\varphi$  різниця ходу змінюється, відповідно змінюється і результат накладання вторинних хвиль, які йдуть від щілин дифракційної решітки. В напрямках, де різниця ходу двох променів містить ціле число довжин хвиль, спостерігатимуться максимуми освітленості (дифракційні максимуми), тому що в цьому випадку всі вторинні хвилі, накладаючись, підсилюють одна одну. Таким чином, умова спостереження дифракційного максимуму має вигляд:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (59.2)$$

де  $k$  — ціле число.

У тих напрямках, в яких різниця ходу між променями, що виходять із сусідніх щілин решітки, містить непарне число півхвиль, спостерігатимуться мінімуми і умова спостереження дифракційного мінімуму матиме вигляд:

$$d \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (59.3)$$

Вторинні хвилі, які поширюються в цих напрямках, гаситимуть одна одну.

Оскільки положення максимумів і мінімумів залежить від довжини хвилі, дифракційна решітка розкладає біле світло в спектр.

За допомогою дифракційних решіток досліджують дуже точно спектральний склад світла, тобто визначають частоти (або довжини хвиль).

1. Чому штрихи на дифракційній решітці мають розміщуватися щільно один біля одного? Чому їх має бути багато? 2. Чи залежить положення головних максимумів дифракційної картини від кількості щілин решітки?

## Вправа 15

1. Під час виконання лабораторної роботи з визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки були одержані такі дані: відстань від решітки до дифракційної картини на екрані дорівнює  $a = 60$  см, третій максимум спостерігається на відстані  $b = 3,6$  мм від центрального, період решітки  $d = 0,25$  мм. Яке цифрове значення довжини світлової хвилі?

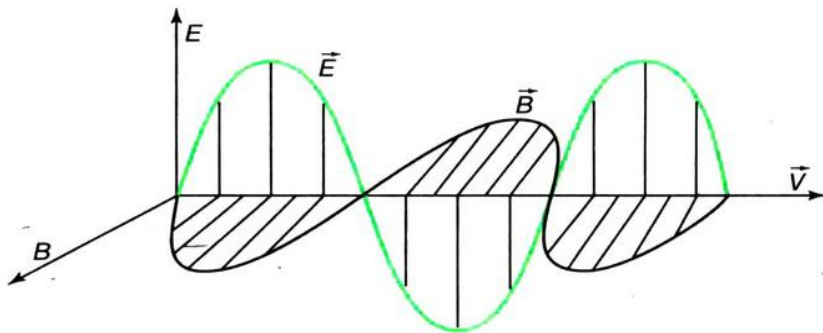
2. Дифракційна решітка освітлена світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-6}$  м. Визначте період решітки, якщо перший максимум спостерігається на відстані 3,6 мм від центрального. Відстань від решітки до дифракційної картини  $a = 1,8$  мм.

3. На дифракційну решітку, період якої  $d = 1,2 \cdot 10^{-5}$  м, падає нормально монохроматична хвиля. Оцініть довжину хвилі  $\lambda$ , якщо кут між спектрами другого і третього порядку  $\Delta\varphi = 2^\circ 30'$ .

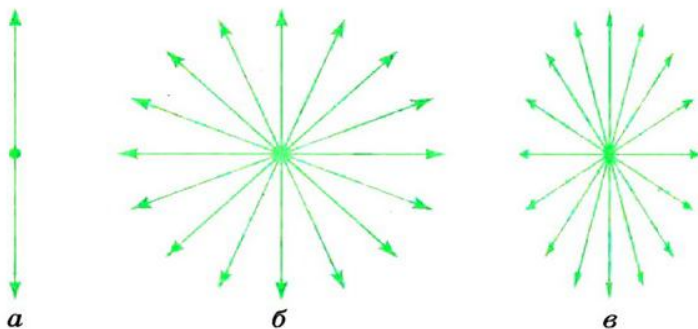
## § 60 — ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Світло — це електромагнітні хвилі. Але які це хвилі: поперечні чи поздовжні? В електромагнітній хвилі коливаються вектори напруженості електричного і індукції магнітного полів, тобто електромагнітна хвиля є сукупністю двох поперечних взаємно перпендикулярних хвиль — **електричної** (утвореної коливанням вектора напруженості електричного поля  $\vec{E}$ ) і **магнітної** (утвореної коливанням вектора магнітної індукції  $\vec{B}$ ).

Промінь (світло), в якого електричні коливання здійснюються весь час в одній і лише в одній площині (мал. 117), на-



Мал. 117



Мал. 118

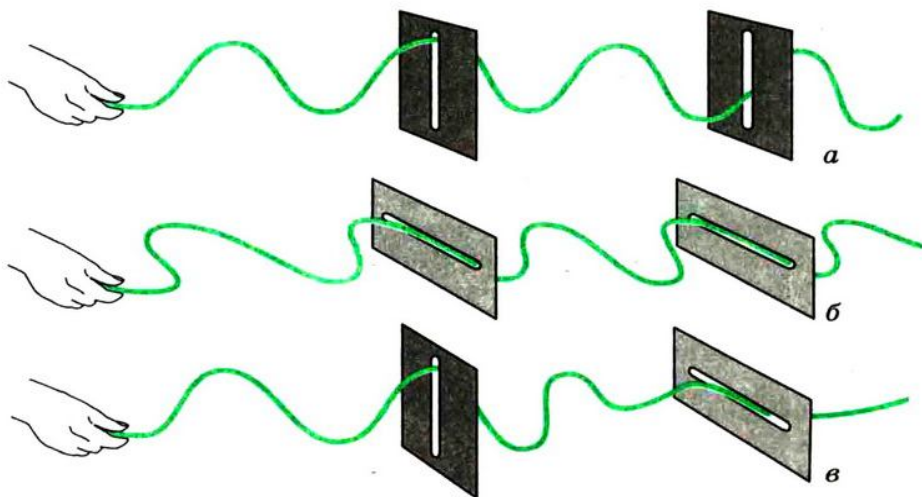
зивається *плоскополяризованим променем* (світлом). Зрозуміло, що при цьому магнітні коливання здійснюються в іншій (перпендикулярній) площині, названій *площиною поляризації*.

Досвід показує, що хімічна, фізіологічна та інші дії світла на речовину обумовлені головним чином електричними коливаннями. Враховуючи це, будемо надалі говорити лише про електричні коливання, а площину, в якій вони здійснюються, називати *площиною світлових коливань*, або просто *площиною коливань*. Тоді промінь плоскополяризованого світла можна схематично зобразити так, як показано на малюнку 118, *а* (промінь перпендикулярний до площини малюнка; вектори відповідають амплітудним значенням напруженості електричного поля  $\vec{E}$ ).

Будь-яке реальне джерело світла складається з безлічі атомів, які випускають світлові хвилі з усіма можливими орієнтаціями площини коливань. Ці хвилі накладаються одна на одну, в результаті будь-якому променю, випущеному природним джерелом світла, відповідатиме безліч різноманітно орієнтованих площин коливання (мал. 118, *б*). Такий промінь (світло) є неполяризованим і називається *природним променем* (світлом). Бувають випадки, коли у світлового променя амплітудні значення вектора  $\vec{E}$  виявляються неоднаковими для різних площин коливання; такий промінь називається частково поляризованим. На малюнку 118, *в* зображено частково поляризований промінь, в якого коливання здійснюються переважно у вертикальній площині. Але як переконатися на досліді в поперечності світлових хвиль?

Явища інтерференції і дифракції не дають відповіді на запитання про напрям коливань у хвилі. Однак для поперечних хвиль характерним є явище поляризації, яким і можна скористатися для доведення поперечності світлових хвиль.





Мал. 119

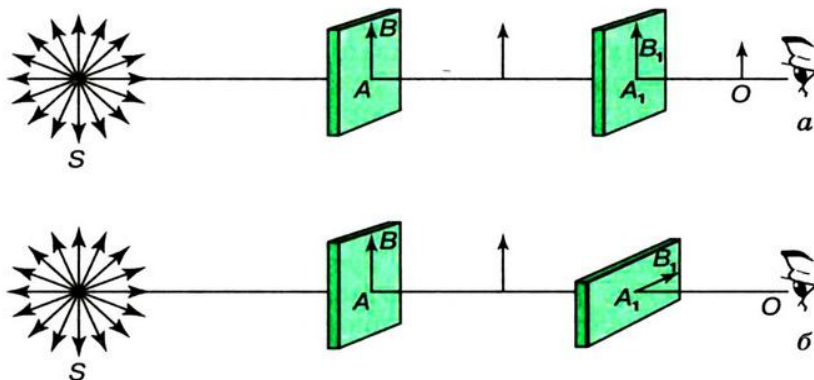
Щоб з'ясувати суть явища поляризації, розглянемо таку механічну аналогію.

Прикладом поперечних механічних коливань можуть бути коливання мотузки, яку розгойдують з одного кінця. Хвилі біжать вздовж неї, а коливання здійснюються в перпендикулярному до неї напрямі. Хвилі, що біжать мотузкою, яку розгойдують у вертикальній площині, вільно проходять крізь вертикальну щілину (мал. 119, а). Це саме спостерігатиметься, коли обидві щілини горизонтальні (мал. 119, б) і мотузку розгойдують у горизонтальній площині. Якщо ж щілини взаємно перпендикулярні (мал. 119, в), коливання припиняються. Легко зрозуміти, що на поширення позовжніх хвиль положення щілини аж ніяк не впливає.

Якщо в поперечних хвилях одночасно відбуваються коливання в різних напрямках у площині, перпендикулярній до променя, щілина пропускатиме хвилі тільки з коливаннями, паралельними їй, тобто перетворюватиме неполяризовані хвилі в плоскополяризовані.

Щоб з'ясувати, чи є світлова хвиля поперечною, слід знайти для світлових хвиль пристрій, який виконував би роль вказаної вище щілини і поляризував неполяризовану світлову хвилю.

Властивості такого роду щілини мають кристали деяких речовин, зокрема кристали турмаліну. Вирізані з них певним чином плоскопаралельні пластинки здатні пропускати світлові коливання лише певного напрямку. Отже, турмалі-



Мал. 120

нові пластинки можна використати для з'ясування поперечності світлових хвиль.

Ми вже знаємо, що природні джерела світла випромінюють неполяризовані хвилі. Для підтвердження цього скористаємося двома турмаліновими пластинками (мал. 120). Оскільки турмалінова пластинка пропускає світлові коливання лише одного напрямку (на малюнку цей напрям показано стрілкою  $AB$ ), то світлова хвиля після проходження першої пластинки виявиться плоскополяризованою. Коливання в цій хвилі здійснюватимуться тільки в одному напрямі — паралельному  $AB$ .

Переконалися в цьому можна за допомогою другої турмалінової пластинки. Якщо розмістити другу турмалінову пластинку так, щоб напрями світлових коливань  $AB$ , які пропускаються першою пластинкою, і  $A_1B_1$ , які пропускаються другою пластинкою, були паралельними один одному, то друга пластинка пропустить без змін світлову хвилю, яка пройшла крізь першу пластинку, і світло потраплятиме в око. Але якщо пластинки розмістити так, щоб напрями коливань  $AB$  і  $A_1B_1$  виявилися перпендикулярними один до одного, то друга пластинка повністю гаситиме коливання, які пройшли крізь першу пластинку. За другу пластинку світло не проходить і око його не бачить. Повертаючи другу пластинку турмаліну навколо променя  $SO$ , ми можемо змінювати інтенсивність світла, яке поширюється в напрямі  $SO$ , від максимального значення (положення  $a$ ) до повного гасіння світла (положення  $б$ ).

Розглянутий дослід підтверджує, що світлові хвилі є поперечними і що у природі існують речовини (турмалін), здатні пропускати світлові коливання лише певного напрямку, тобто здатні поляризувати світло.



В останні роки для поляризації світла широко застосовують так звані поляроїди (поляризаційні фільтри). Поляроїд є прозорою полімерною плівкою товщиною близько 0,1 мм, яка містить велику кількість однаково орієнтованих дрібних штучних кристалів герпатиту.

Поляроїди знаходять широке застосування в різноманітних галузях народного господарства. Згадаємо про цікаве застосування поляроїдів на автотранспорті для захисту водіїв від засліплюючої дії фар зустрічних автомобілів. На вітрове скло і скло фар наклеюються поляроїдні плівки так, що площини їх поляризації утворюють кут  $45^\circ$  з горизонтом і паралельні одна одній. Водій, дивлячись на дорогу крізь поляроїд, бачить відбите світло фар свого автомобіля, тобто бачить освітлену дорогу, оскільки відповідні площини поляризації паралельні, але не бачить світла від фар зустрічного автомобіля, забезпеченого також поляроїдними плівками. Неважко переконатися, що в останньому випадку площини поляризації взаємно перпендикулярні. Завдяки цьому водій захищений від засліплюючої дії фар зустрічного автомобіля.

Розчини деяких речовин повертають площину поляризації світла під час його проходження крізь розчин, причому кут повороту площини поляризації залежить від концентрації речовини в розчині. Ця властивість використовується в так званих поляриметрах — приладах для визначення концентрації речовини. Особливо широко використовуються поляриметри для визначення концентрації цукру в розчині. В цьому випадку їх називають цукрометрами.

У машинобудуванні й будівельній техніці поляризація світла широко використовується для вивчення механічних напруг у прозорих тілах. Якщо паралельно розмістити два поляроїди (аналізатор і поляризатор), вставити між ними прозоре тіло, наприклад, пластину з органічного скла, і освітити їх, на екрані буде видно лише контури пластини. У разі деформації пластини її оптична однорідність порушується і на екрані виникає барвиста картина деформацій. Оскільки в техніці застосовуються звичайно непрозорі матеріали (метали), то дослідження напруг здійснюють на прозорих моделях, а потім роблять відповідний перерахунок на проєктовану конструкцію.

1. Чим відрізняється природне світло від поляризованого?
2. Як можна виявити поляризацію світла?
3. Про що свідчить поляризація світла?
4. Назвіть основні застосування поляризації світла в науці й техніці.

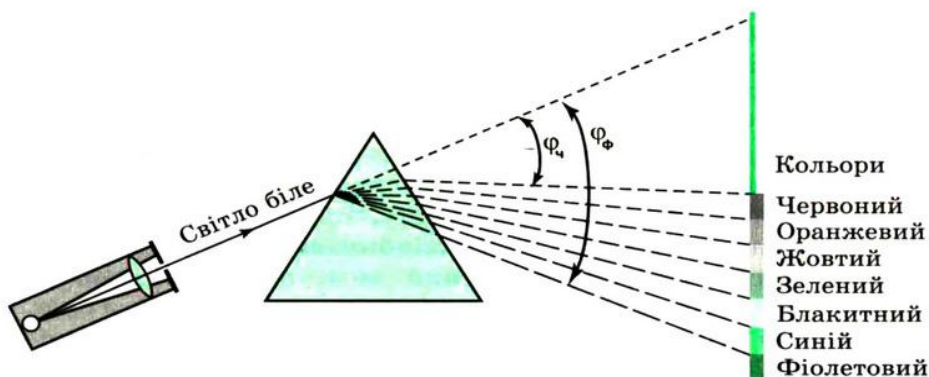


## § 61 — ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

Раніше було встановлено, що заломлення світла на межі поділу двох середовищ пояснюється різницею в швидкостях поширення світла в цих середовищах. Показник заломлення свідчить, у скільки разів швидкість світла в одному середовищі більша чи менша за швидкість світла в іншому середовищі. Явища інтерференції і дифракції свідчать також про те, що кожному кольору світлових променів відповідає певна довжина хвилі. Тоді з відомої формули  $\lambda = \frac{v}{\nu}$  випливає, що швидкість поширення світла в речовині має залежати від частоти світла  $\nu$ . Спробуємо з'ясувати цю залежність на досліді.

Спрямуємо вузький пучок білого світла на одну з граней тригранної призми (мал. 121). Заломлюючись у призмі, пучок дає на екрані видовжене зображення щілини з яскравим райдужним чергуванням кольорів — *спектр*. Крайніми з боку заломлюючого ребра призми виявляються промені червоного світла. Поряд з ними будуть промені оранжеві, потім жовті, далі зелені, блакитні, сині й, нарешті, фіолетові (з боку основи призми).

Поставимо на шляху променів, які пройшли крізь першу призму, другу таку саму призму, розміщену паралельно першій, але із заломлюючим кутом, повернутим у протилежний бік. Ми дістанемо знову пучок білого світла. Такі досліді були проведені у свій час Ісааком Ньютоном, який дійшов висновку, що *біле світло складається із світла різних кольорів*. Ньютон умовно поділив суцільний спектр на сім ділянок різних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій і фіолетовий. Другий важливий



Мал. 121

висновок Ньютона полягав у тому, що світло різного кольору характеризується різними показниками заломлення в даному середовищі. Найбільший показник заломлення в склі мають фіолетові промені, найменший — червоні. Відомо, що різниця в показниках заломлення обумовлена різницею в швидкостях поширення хвиль. Тому можна сказати, що світло різного кольору має різну швидкість поширення в даному середовищі.

Залежність показника заломлення (а отже, і швидкості світла) від його кольору називають *дисперсією світла*.

Розкладанням білого світла на кольори внаслідок заломлення пояснюється виникнення райдуги. Нехай на завислу в повітрі краплю води падає сонячний промінь. На межі повітря — вода відбувається заломлення променів. При певному куті падіння на внутрішній поверхні краплі відбувається повне відбивання променів всередину краплі. Відбиті промені, заломлюючись повторно на межі вода — повітря, виходять з краплі. Оскільки фіолетові промені заломлюються сильніше, ніж червоні, то після виходу з краплі вони розходяться: червоні промені утворюють з падаючим променем кут близько  $43^\circ$ , а фіолетові — близько  $41^\circ$ .

Сонячні промені можна вважати паралельними. Тоді виходить, що від безлічі краплинок, які містяться на поверхні конуса з кутом при вершині  $\alpha_{\text{ч}} = 43^\circ$ , в око спостерігача потраплятимуть червоні промені, а від крапель з поверхні конуса з кутом при вершині  $\alpha_{\text{ф}} = 41^\circ$  — фіолетові. Решта кольорів райдуги розміщується між ними.

Знання складної структури білого світла дає можливість пояснити походження різноманітних барв у природі, кольори різних тіл. Колір непрозорого тіла визначається сумішшю променів тих кольорів, які воно відбиває. Якщо тіло рівномірно відбиває промені всіх кольорів, то у разі освітлення білим світлом воно здається білим. Червоне тіло з падаючого на нього білого світла відбиває головним чином червоні промені, а решту поглинає; голубе тіло відбиває голубі промені і т. д.

Колір прозорого тіла визначається складом того світла, яке проходить крізь нього. Якщо, наприклад, трава й листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх падаючих на них сонячних променів вони відбивають лише зелені, то зелений колір скла обумовлений тим, що воно пропускає промені лише зеленого кольору, а решту поглинає.

Дисперсія світла в прозорій призмі дає можливість дослідити спектральний склад випромінювання різних речовин. Для точного дослідження спектрів використовуються спектральні апарати — прилади, які дають чіткий спектр,

тобто добре розділяють хвилі різної довжини і не допускають (або майже не допускають) перекривання окремих ділянок спектра.

1. Чим пояснюється розкладання білого світла на кольорові промені? 2. Що називається дисперсією світла? 3. На скляну призму спрямуємо промінь червоного чи зеленого світла. Чи спостерігатиметься розкладання цього світла на якісь кольорові промені?

## § 62 — ІНФРАЧЕРВОНЕ ТА УЛЬТРАФІОЛЕТОВЕ ПРОМІННЯ

Випромінюване джерелом світло несе з собою певну енергію, і ця енергія якимось чином розподіляється по хвилях всіх довжин (чи частот), що входять до складу світлового пучка. Які промені несуть на екран більше енергії, а які менше, можна визначити експериментально. Для цього слід за допомогою призми дістати на екрані спектр і, поміщаючи в різні місця спектра чутливий термометр, за його показаннями оцінити кількість поглинутої енергії. Чутливим термометром може бути термopара із спаєм, покритим тонким шаром сажі. Сажа майже повністю поглинає світло будь-якої довжини хвилі, тому такий шар поглинає випромінювання, яке падає на нього, і нагрівається. ЕРС, збуджувана при цьому, вимірюється гальванометром. Чим більше енергії несе випромінювання, тим більша ЕРС виникає в термopарі.

Дослідження спектра білого світла показують, що випромінювана джерелом енергія розподіляється нерівномірно між хвилями різної довжини. Найбільша кількість енергії припадає на червону частину спектра, а найменша — на фіолетову.

Здавалося б, що коли помістити спай термopари за червоний край спектра, де око не бачить жодного променя, він не нагріватиметься. Однак спай нагрівається навіть сильніше, ніж у червоній чи зеленій частині. Це означає, що джерело білого світла також випромінює промені, які не сприймаються оком, довжина хвилі яких більша, ніж у червоних променів. Промені, які містяться в спектрі за червоними, називають *інфрачервоними*. Їх випромінює будь-яке нагріте тіло навіть тоді, коли воно не світиться. Наприклад, батареї опалення в кімнаті випромінюють інфрачервоні промені, які викликають помітне нагрівання навколишніх тіл. Тому інфрачервоні промені часто називають тепловими.



Інфрачервоні промені мають довжину хвилі  $0,76 \cdot 10^{-6}$  м —  $3,5 \cdot 10^{-4}$  м. До речі, інфрачервоні промені сильно поглинаються звичайним склом, тому для їх дослідження слід користуватися лінзами і призмами з кам'яної солі.

Термопара, поміщена за фіолетовий край спектра, так само виявляє підвищення температури, проте дуже незначне. Тому можна зробити висновок, що джерело білого світла випромінює невидимі оком електромагнітні хвилі з довжиною хвилі меншою, ніж у фіолетових. Вони дістали назву *ультрафіолетових*. Ці промені відзначаються сильною хімічною і фізіологічною дією. Якщо за фіолетовий край спектра помістити фотопапір, він швидко чорніє.

Ультрафіолетові промені мають довжину хвиль від  $0,4 \cdot 10^{-6}$  м до  $0,5 \cdot 10^{-8}$  м. Ці промені так само сильно поглинаються звичайним склом, і тому для дослідження їх властивостей слід користуватися кварцовими лінзами і призмами.

Інфрачервоні та ультрафіолетові промені знайшли широке застосування в різних галузях народного господарства. В техніці інфрачервоні промені використовують для сушіння різних матеріалів. Сучасні інфрачервоні сушильні установки на автомобільних заводах являють собою тунелі, на внутрішніх поверхнях яких встановлені інфрачервоні випромінювачі. Змонтований і пофарбований автомобіль повільно рухається тунелем і виходить з нього сухим. Сушіння триває 4—5 хвилин. Але, мабуть, найбільш цікавими застосуваннями інфрачервоних променів є створення приладів нічного бачення, які дають можливість вести спостереження вночі, а також фотографування в інфрачервоних променях.

Довгохвильові ультрафіолетові промені ( $2,8 \cdot 10^{-7}$  м —  $3,2 \cdot 10^{-7}$  м) у невеликих дозах цілком впливають на організм людини. Поглинаючись тканинами, вони не лише сприяють утворенню захисного пігменту, а й посилюють процеси життєдіяльності організму, благотійно впливають на його розвиток і ріст, на центральну нервову систему тощо.

Короткі ультрафіолетові промені мають сильну бактерицидну дію (вбивають бактерії). Тому їх застосовують для дезінфекції повітря в операційних, інфекційних відділеннях лікарень, а також у місцях великого скупчення людей (театри, школи тощо).

Ультрафіолетові промені використовуються і у фотографії для виявлення прихованих написів або стертого тексту, оскільки багато речовин під час поглинання ультрафіолетових променів починають випромінювати видиме світло. Це явище використовується в лампах денного світла та в деяких інших випадках.

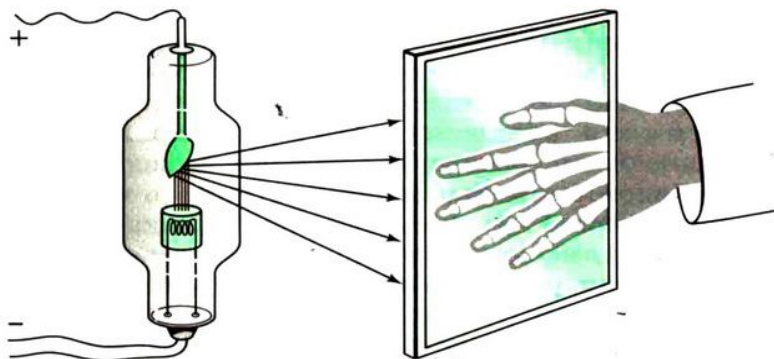
?

1. Як можна виявити інфрачервоні промені? Які їх властивості? 2. Як можна виявити ультрафіолетові промені? Які їх властивості? 3. Чому скляна призма непридатна для одержання спектрів інфрачервоного і ультрафіолетового проміння? Які призми потрібні для вивчення цих променів? -

## § 63 — РЕНТГЕНІВСЬКІ ПРОМЕНІ

У 1895 р. німецький фізик В. Рентген відкрив електромагнітні хвилі, коротші за ультрафіолетові. Вони дістали назву рентгенівських, або *X*-променів. Цікаво зазначити, що досить близько до відкриття цих променів підійшов видатний український фізик І в а н П у л ю й (1845—1918). За 14 років до Рентгена він сконструював електронну трубку, дуже схожу на сучасні рентгенівські, одержав якісні знімки, вивчив ряд властивостей відкритих променів. На жаль, наукове відкриття І. Пулюя не дістало належної оцінки.

Одержують рентгенівські промені за допомогою спеціальних двохелектродних ламп. На мал. 122 схематично показана будова сучасної рентгенівської трубки. У вакуумній трубці розміщені електроди: підігрівний катод і антикатод. Поверхня антикатада скошена, вона не паралельна поверхні катода. Катод приєднують до негативного, а антикатод до позитивного полюсів джерела високої напруги — порядку десятків і сотень тисяч вольт. Випромінювані розжареним катодом рентгенівської трубки електрони прискорюються потужним електричним полем у просторі між катодом і антикатодом і з великою швидкістю ударяються в антикатод.



Мал. 122



**Вільгельм  
РЕНТГЕН  
(1845—1923)**

Німецький фізик. У 1895 р. відкрив короткохвильове електромагнітне випромінювання — рентгенівські промені. Це відкриття мало величезний вплив на подальший розвиток фізики, зокрема привело до виявлення радіоактивності. Перша Нобелівська премія з фізики була присуджена Рентгену. Він сприяв швидкому практичному застосуванню свого відкриття в медицині. Конструкція створеної ним першої рентгенівської трубки лежить в основі сучасних приладів.

При цьому швидкість електрона практично миттєво зменшується до нуля, тобто сповільнення буде дуже великим. Під час такого швидкого гальмування електрон випромінює короткі електромагнітні хвилі (від  $10^{-8}$  м до  $10^{-11}$  м) — рентгенівські промені. Оскільки електрони, які бомбардують антикатод, мають різні швидкості, то під час їх гальмування виникають рентгенівські промені різної довжини хвилі.

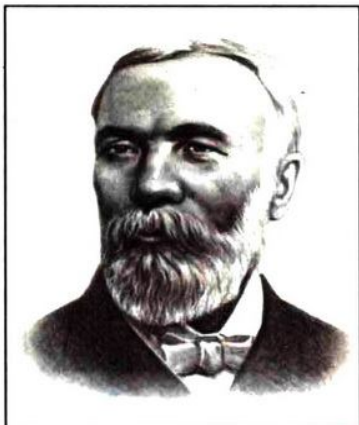
Рентгенівські промені, як і ультрафіолетові та інфрачервоні, невидимі оком, але викликають свічення багатьох речовин і сильно діють на світлочутливі матеріали. Тому для їх дослідження застосовуються спеціальні екрани, які світяться під їх дією, або фотографування.

Рентгенівське проміння має велику проникну здатність відносно багатьох речовин, непрозорих для видимого світла. Воно порівняно вільно проникає крізь речовини, які складаються з атомів з малою атомною масою (дерево, м'язові тканини тощо), але помітно поглинається матеріалами, які складаються з атомів важких елементів (наприклад, метали, кістки тощо). Якщо рентгенівські промені проходять крізь об'єкт з нерівномірним розподілом густини, то на вміщеному за об'єктивом екрані або фотопластинці виникає тіньове зображення об'єкта, на якому розподіл освітленості відповідає розподілу густини речовини в об'єкті. М'язова тканина дає слабку тінь, а кістка — більш сильну.

Завдяки цим властивостям рентгенівські промені широко застосовуються в медицині для виявлення змін в організмі (рентгенодіагностика) і в техніці для виявлення дефектів у деталях машин (рентгенодефектоскопія).



Іван  
ПУЛЮЙ  
(1845—1918)



Видатний український фізик. Здійснив фундаментальні дослідження газорозрядних процесів. Для одержання рентгенівських променів сконструював фосфоресціюючу лампу з розташованим під кутом антикатодом, прототип рентгенівської трубки, і здійснив ґрунтовне дослідження властивостей рентгенівських променів. Значним є внесок І. Пулюя в розвиток електротехніки.

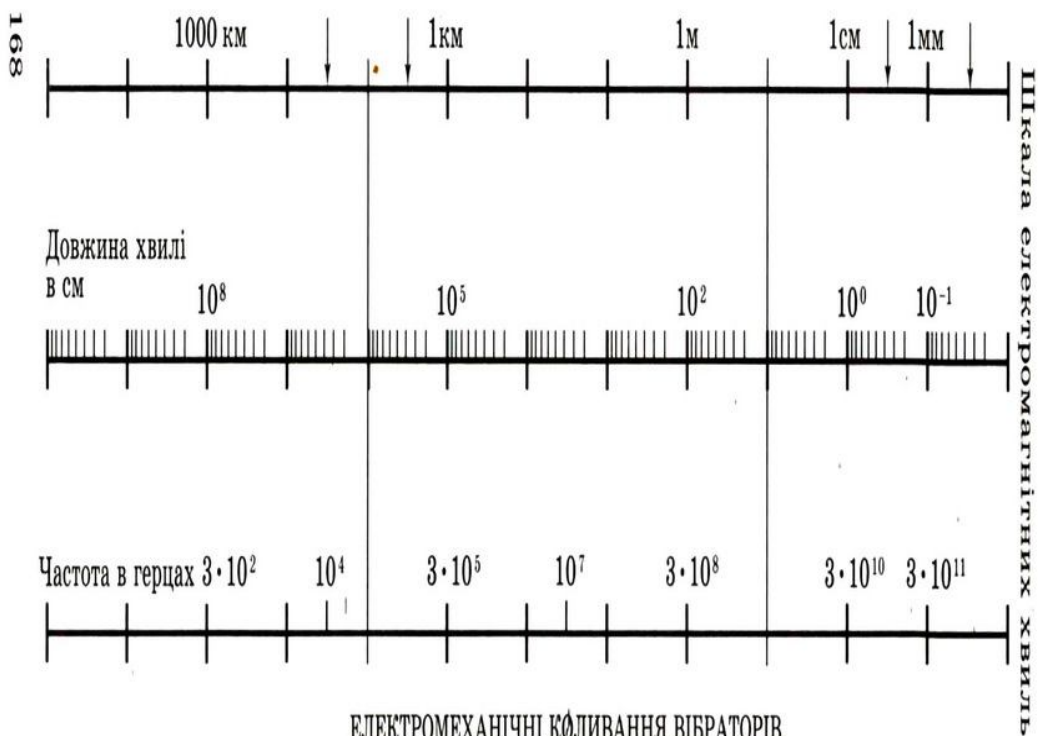
Рентгенівські промені використовуються також у лікуванні злоякісних пухлин, оскільки хворі клітини і тканини організму мають підвищену чутливість до їх дії. Тому відповідною дозою рентгенівського проміння можна стримувати ріст і навіть руйнувати хворі тканини організму (наприклад, злоякісні пухлини), не пошкоджуючи сусідніх здорових тканин.

1. Поясніть принцип збудження рентгенівських променів. 2. Які властивості рентгенівських променів? 3. Чому на рентгенівські трубки подають високу напругу в десятки і сотні тисяч вольт? 4. Які ви знаєте застосування рентгенівських променів?

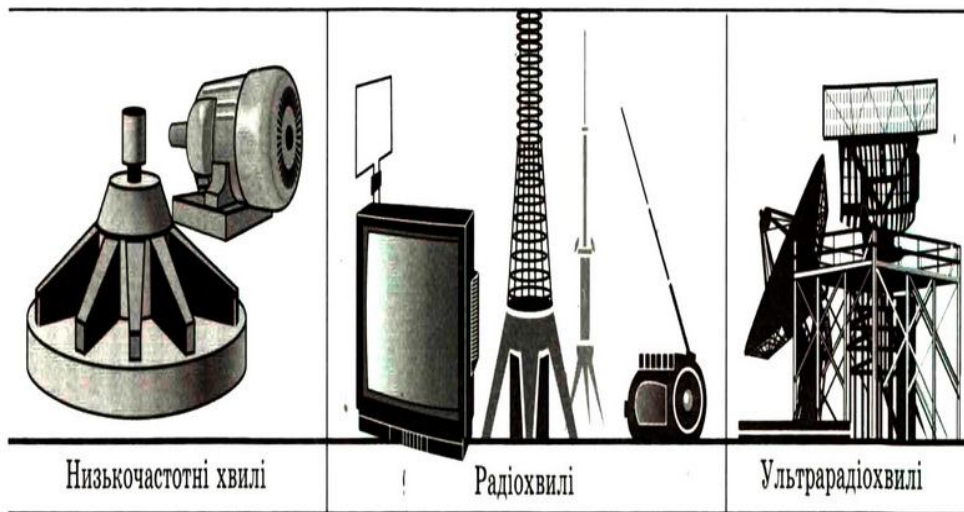
## § 64 — ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

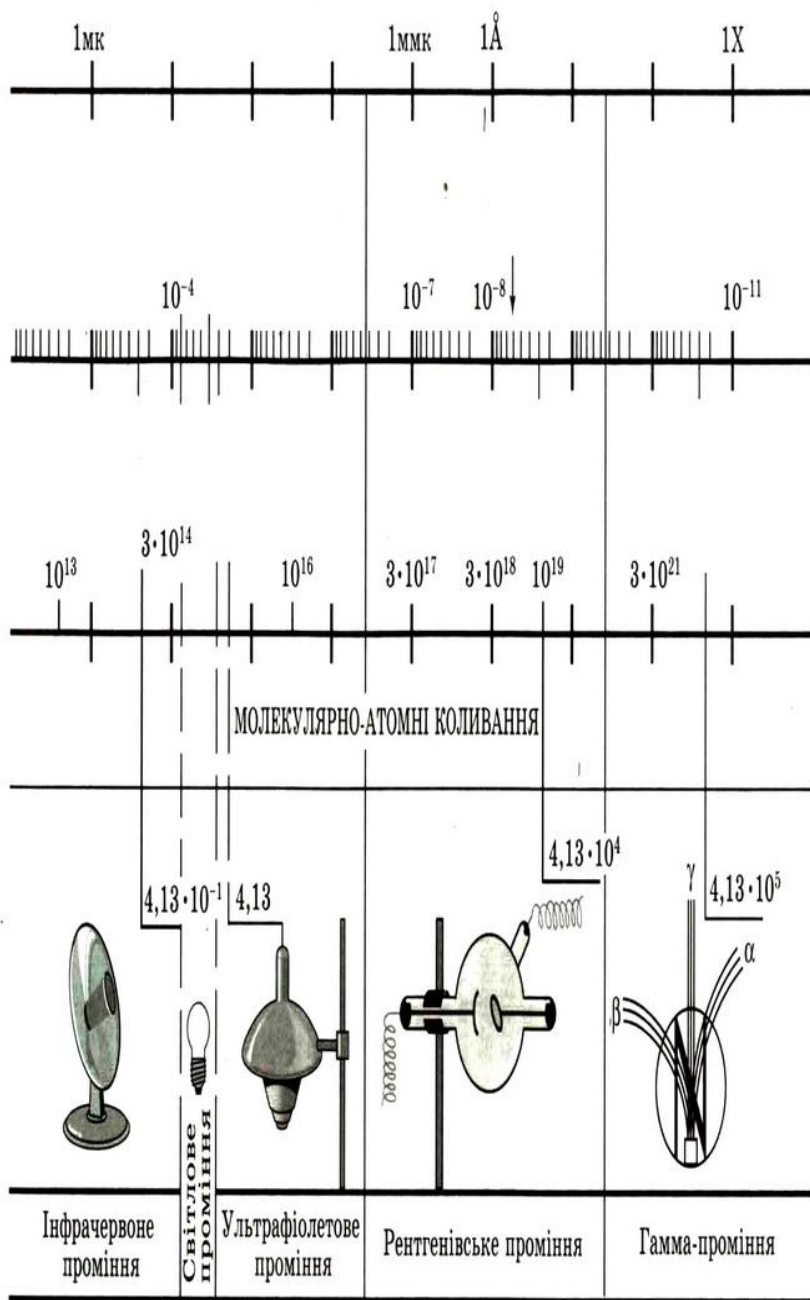
Отже, ми ознайомилися з електромагнітними хвилями різної довжини: від радіохвиль довжиною в сотні кілометрів до рентгенівських променів з довжинами хвиль близько  $10^{-10}$  м. Існують електромагнітні хвилі ще коротші за рентгенівські, так звані гамма-промені, які випромінюються під час радіоактивного розпаду атомних ядер (з цим випромінюванням ми ознайомимося пізніше).

Усі відомі електромагнітні хвилі зображені на малюнку 123, а, б у вигляді шкали електромагнітних хвиль в порядку зменшення довжини. Всі ці хвилі: радіохвилі, інфрачервоні промені, видиме світло, ультрафіолетові, рентгенівські і гамма-промені мають єдину електромагнітну при-



ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ ВІБРАТОРІВ





Мал. 123, б



роду, поширюються зі швидкістю світла. Їх властивості (особливості поширення радіохвиль в атмосфері, колір видимого світла, особливості поглинання інфрачервоних і ультрафіолетових променів, фотохімічна дія світла, проникаюча здатність рентгенівських променів тощо) залежать від довжини хвилі (частоти).

Розподіл електромагнітних хвиль за типами в шкалі зроблено відповідно до способів їх збудження і за методами їх реєстрації та спостереження. Межі за довжиною хвилі між різними типами електромагнітного випромінювання, обрані для побудови шкали, умовні. Між окремими діапазонами шкали електромагнітних випромінювань немає різкої межі. Короткохвильова частина одного діапазону перекриває довгохвильову частину сусіднього. Ті ділянки шкали, де діапазони хвиль різних типів перекривають один одного, показують, що хвилі такої довжини можна одержати двома способами. Наприклад, хвилі завдовжки в 1 мм можна одержати за допомогою радіотехнічних пристроїв (тоді ми їх називаємо радіохвилями) або під час теплового випромінювання тіл (у цьому випадку ми говоримо про інфрачервоне проміння). Зрозуміло, що фізичні властивості цих хвиль однакові, оскільки вони визначаються довжиною хвилі (або частотою), а не методом збудження. Те саме можна сказати про одержання електромагнітних хвиль завдовжки приблизно  $10^{-8}$  м. Їх можна одержати за допомогою тліючого розряду в газах (як ультрафіолетове проміння) або за допомогою рентгенівської трубки.

Видиме світло є окремим випадком електромагнітних хвиль, довжина яких від  $4 \cdot 10^{-7}$  м (фіолетове) до  $7,6 \cdot 10^{-7}$  м (червоне), і займає на шкалі електромагнітних хвиль порівняно вузьку ділянку.

1. Які ви знаєте методи збудження електромагнітних хвиль і способи їх реєстрації? 2. Чи залежать властивості електромагнітних хвиль від методу їх збудження? Наведіть приклади, які підтверджують вашу відповідь.

## ВИСНОВКИ

Електромагнітне поле може існувати самостійно, без зв'язку з електричними зарядами і струмами; поширюється електромагнітне поле зі скінченною швидкістю. Поширення у просторі електромагнітного поля називається електромагнітною хвилею. Реальність існування електромагнітних хвиль експериментально доведена Г. Герцем.

Однією з необхідних умов утворення електромагнітних хвиль достатньої інтенсивності є висока частота коливань електромагнітного поля. Для збільшення інтенсивності випромінювання енергії коливальним контуром у простір слід зробити цей контур відкритим, забезпечивши його антеною і заземленням.

Для здійснення радіотелефонної передачі височастотні коливання на передавальній станції модулюють коливаннями низької частоти, а на приймальній станції з цих складових коливань виділяють коливання низької частоти. При амплітудній модуляції амплітуду коливань електромагнітної хвилі змінюють за законом того звукового процесу, який передається разом з електромагнітною хвилею. Для виділення з модульованих коливань низькочастотних звукових коливань їх пропускають через демодулятор. Найпростіший демодулятор складається з діода і увімкненого до нього паралельного з'єднання конденсатора й телефону.

Найпростіший детекторний радіоприймач є демодулятором коливань з паралельно під'єднаним до нього коливальним контуром. Електромагнітні хвилі створюють у коливальному контурі височастотні модульовані коливання, які за допомогою телефону, зашунтованого конденсатором, розділяються на коливання низької і високої частоти.

Електромагнітні хвилі відбиваються провідниками, зазнають на межі діелектрика заломлення, інтерференції і дифракції.

Явище відбивання радіохвиль використовують для виявлення і точного визначення положення предметів — радіолокації. Посланий радіолокатором імпульс електромагнітних хвиль відбивається від предмета і приймається тим самим радіолокатором. За інтервалом часу між випромінюванням імпульсу і прийманням відбитого сигналу визначають відстань до предмета, а за орієнтацією антени в момент приймання відбитого сигналу можна визначити місцезнаходження предмета.

Світлові хвилі всіх частот поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю.

Накладання двох систем когерентних світлових хвиль веде до утворення інтерференційної картини — встановлення в кожній точці простору постійної освітленості. Для одержання стійкої інтерференційної картини необхідно, щоб джерела світлових хвиль були когерентними і мали однакову частоту коливань. Для одержання когерентних джерел світла застосовують штучний прийом: розділяють пучок світла від одного джерела на два чи кілька пучків, які йдуть в різних напрямках, а потім знову зводять їх і накладають

один на одного. Явище інтерференції світла використовують для просвітлення оптики, для точних вимірювань лінійних розмірів тіл, контролю якості шліфування, полірування поверхонь тощо.

Під час проходження світла крізь вузькі отвори в непрозорих екранах або падіння на вузькі непрозорі предмети спостерігається огинання світлом непрозорих тіл — дифракція.

Явище поляризації світла свідчить про те, що світлові хвилі є поширенням поперечних електромагнітних коливань. Природне світло — це коливання, площини яких рівномірно розподілені в усіх можливих напрямках.

Біле світло складається із світла різних кольорів (частот або довжин хвиль). Залежність показника заломлення світла від частоти коливань (або довжини хвиль) — дисперсія — свідчить про те, що світлові хвилі різної частоти поширюються в речовині з різними швидкостями.

Джерело білого світла, крім електромагнітних хвиль видимої частини спектра, випромінює також невидимі інфрачервоні та ультрафіолетові промені.

Усі види проміння: радіохвилі, видиме світло, інфрачервоні, ультрафіолетові, рентгенівські і гамма-промені мають єдину електромагнітну природу, поширюються зі швидкістю світла. Їх властивості залежать від довжини хвилі (частоти).



## ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Фізичні явища відбуваються у просторі й часі, і завдання фізики полягає у з'ясуванні закономірностей перебігу цих явищ, тобто опису змін, які відбуваються з матеріальними об'єктами — тілами і фізичними полями,— в різних точках простору в послідовні моменти часу. В курсі механіки 9-го класу ви ознайомилися з основними уявленнями про властивості простору й часу, створеними людством на основі багатовікового досвіду повсякденного життя. В механіці припускалося, що простір і час незалежні один від одного, що властивості простору не впливають на рухомі тіла, що простір необмежений, однорідний, евклідовий тощо; що час тече незалежно від наявності і руху матеріальних тіл, що йде час лише від минулого до майбутнього, що різні моменти часу не можна відрізнити один від одного і т. д.

Розвиток електродинаміки і оптики несподівано істотно вплинув на наші уявлення про рух. Дослідження явищ, які відбуваються під час великих швидкостей, близьких до швидкості світла, показали незастосовність до них законів класичної механіки, і на початку XX ст. була створена теорія руху тіл з великими швидкостями — теорія відносності.

**§ 65 — ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ ЕЙНШТЕЙНА**

Під час вивчення фізичних явищ насамперед слід обрати систему відліку, відносно якої визначаються швидкості, прискорення і форма траєкторії рухомих тіл. Вивчаючи механіку, ми переконалися, що всі механічні явища відбуваються однаково в усіх інерціальних системах відліку за однакових початкових умов. Цей висновок дістав назву *механічного принципу відносності*. Його часто формулюють ще так: *жодними механічними дослідними всередині системи не можна встановити, перебуває в спокої інерціальна система чи рухається рівномірно і прямолінійно*. Інакше кажучи, рівномірний прямолінійний рух системи ніяк не впливає на механічні явища в ній. Так,

наприклад, у салоні сучасного пасажирського літака, який летить зі швидкістю 800—1000 км/год всі механічні явища відбуваються так само, як і в літаку, який стоїть на аеродромі.

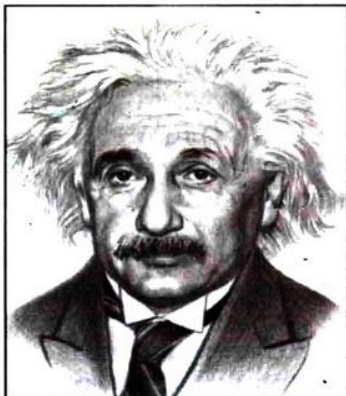
Звідси випливає, що закони Ньютона мають один і той самий вигляд в усіх інерціальних системах відліку. Отже, будь-яка з інерціальних систем відліку може бути взята умовно за нерухому і використана для опису механічних явищ. Нагадаємо, що коли тіло рухається відносно інерціальної системи зі швидкістю  $\vec{u}$ , сама система рухається зі швидкістю  $\vec{w}$  відносно нерухомої системи, то швидкість  $\vec{v}$  тіла відносно нерухомої системи відліку дорівнює  $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$ .

Це співвідношення називають *законом додавання швидкостей Галілея* (або класичним законом додавання швидкостей).

З розвитком електродинаміки виникло запитання: чи поширюється принцип відносності і на електромагнітні явища? Інакше: чи однаково відбуваються електромагнітні процеси (взаємодія зарядів і струмів, явище електромагнітної індукції, поширення електромагнітних хвиль тощо) у всіх інерціальних системах відліку, чи може рівномірний прямолінійний рух системи відліку якось впливати на хід електромагнітних процесів? Під час з'ясування цього несподівано виявились суперечності. З одного боку, експерименти показували, що електромагнітні явища відбуваються в різних інерціальних системах відліку зовсім однаково. З іншого, — виявилось, що швидкість світла не залежить від швидкості руху його джерела, тобто класичний закон додавання швидкостей  $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$  не справджується.

Згідно з механічним принципом відносності, швидкість світла, як і будь-яка інша швидкість, має бути величиною відносною, тобто її значення повинно залежати від швидкості руху системи відліку. Якщо відносно однієї системи відліку швидкість світла дорівнює  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, то відносно будь-якої іншої, яка рухається відносно першої зі швидкістю  $\vec{u}$ , вона має дорівнювати  $\vec{c} + \vec{u}$ . Наприклад, Земля рухається навколо Сонця зі швидкістю  $\vec{u}$ , швидкість світла в системі відліку, зв'язаній з Землею, дорівнює  $\vec{c}$ . Якщо напрям поширення світла збігається з напрямом руху Землі, то швидкість світла в «сонячній» системі відліку має дорівнювати  $c + u$ , а якщо світло і Земля рухаються в протилежних напрямках, то  $c - u$ . Нехай вас не бентежить той факт, що в принципі відносності йдеться про рівномірний прямолінійний рух, а Земля рухається навколо Сонця по еліпсу.

**Альберт  
ЕЙНШТЕЙН  
(1879—1955)**



Видатний фізик ХХ століття. Ним створено вчення про простір і час — спеціальна теорія відносності. Узагальнюючи цю теорію на випадок неінерціальних систем відліку, він побудував загальну теорію відносності, яка є сучасною теорією тяжіння. Вперше дав уявлення про частинки світла — фотони. Його праця з теорії броунівського руху привела до остаточної перемоги молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

Рух Землі на невеликій ділянці орбіти можна вважати рівномірним і прямолінійним, а обидві системи відліку — «земну» і «сонячну» — вважати інерціальними.

Отже, з погляду механіки Ньютона, рух Землі має впливати на швидкість поширення світла. Між тим, численні досліди переконливо свідчили про те, що рух Землі ніяк не впливає на швидкість поширення світла і галілейський закон додавання швидкостей у даному випадку не виконується.

Розв'язання цієї суперечності було дано А. Ейнштейном у створеній ним у 1905 р. теорії відносності, в основі якої лежать два постулати, тобто положення чи принципи, які є результатом узагальнення експериментальних даних. Вони формулюються так.

1. За допомогою будь-яких фізичних дослідів (механічних, електричних, оптичних тощо), виконаних в деякій інерціальній системі відліку, неможливо встановити, перебуває ця система в спокої чи рухається рівномірно і прямолінійно. Інакше кажучи, всі фізичні явища відбуваються в усіх інерціальних системах відліку зовсім однаково і в усіх інерціальних системах відліку фізичні закони мають однаковий вигляд.

2. Швидкість світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних системах відліку і не залежить ні від руху джерела світла, ні від руху спостерігача.

Перший постулат Ейнштейна виражає принцип відносності, який є узагальненням механічного принципу відносності на будь-які фізичні процеси і явища, у тому числі електромагнітні. Його справедливість підтверджена численними дослідями, що ставилися з метою виявити вплив орбітального руху Землі на закономірності електромагнітних явищ. Усі ці досліді показали, що рух Землі не впливає на



їх перебіг. Таким чином, принцип відносності Ейнштейна встановлює повну рівноправність усіх інерціальних систем відліку.

Другий постулат так само підтверджений експериментально. Однак, враховуючи величезне значення теорії відносності, її постулати і нині підлягають усе точнішим експериментальним перевіркам з використанням найновіших приладів і методів дослідження. Так, наприклад, у 1961 році перший постулат Ейнштейна було експериментально перевірено за допомогою відкритого у 1958 році ефекту Мессбауєра, а в 1963 році була здійснена перевірка в лабораторних умовах другого постулату за допомогою джерел гамма-випромінювання, які швидко рухалися. Всі досліди підтверджують постулати Ейнштейна.

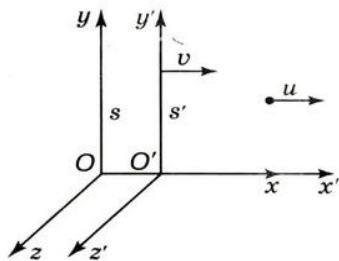
Другий постулат Ейнштейна сам по собі виявився не таким вже й несподіваним. Незалежність швидкості світла від швидкості джерела впливала з електромагнітної теорії Максвелла (це загальна властивість хвильового руху. Швидкість хвиль на поверхні води відносно води чи звукових хвиль відносно повітря також не залежить від швидкості джерела). Але якщо врахувати перший постулат — принцип рівноправності інерціальних систем, то дістанемо несподіваний висновок: *швидкість світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних системах відліку, тобто є абсолютною, а не відносною величиною*. Цей, підтверджений дослідями факт сталості швидкості світла, спричинив потребу докорінного перегляду звичних для нашого мислення уявлень про простір і час, оскільки вони суперечили цьому принципу.

1. Чим принцип відносності Ейнштейна відрізняється від принципу відносності в механіці? 2. Сформулюйте принципи (постулати) теорії відносності.

## § 66 — РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

Легко зрозуміти, що класичний закон додавання швидкостей суперечить другому постулату Ейнштейна про сталість швидкості світла у вакуумі. Якщо літак рухається зі швидкістю  $\bar{v}$  і в літаку в напрямі його руху поширюється світлова хвиля, то її швидкість відносно Землі, згідно з другим постулатом, має бути  $c$ , а не  $c + \bar{v}$ , як випливає з класичного закону додавання швидкостей. Очевидно, цей закон не-

придатний для великих швидкостей. Ейнштейн показав, що з постулатів теорії відносності випливає новий закон додавання швидкостей, так званий р е л я т и в і с т с ь к и й закон. (усі закони чи ефекти, які є наслідком постулатів теорії відносності, часто називають релятивістськими). Запишемо цей закон (без доведення) для окремого випадку, коли тіло рухається вздовж осі  $x'$  системи  $s'$  зі швидкістю  $\bar{u}$ , а ця система, в свою чергу, зі швидкістю  $\bar{v}$  рухається відносно системи  $s$ , причому осі  $x$  і  $x'$  весь час збігаються (мал. 124). Швидкість тіла відносно системи  $s$  дорівнюватиме:



Мал. 124

$$w = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}. \quad (66.1)$$

Проаналізуємо цю формулу на конкретних прикладах. Нехай назустріч один одному летять два космічні кораблі, кожен зі швидкістю 8 км/с (відносно Землі), тобто  $u = v = 8$  км/с. Яка швидкість одного корабля відносно другого? Класичний закон додавання швидкостей дає просту відповідь:  $w = u + v = 16$  км/с. Обчислення значення  $w$  за (66.1) дає  $w \approx 15,9999999885$  км/с, що мізерно мало відрізняється від попереднього результату. Наявні вимірювальні прилади не дають змоги виявити цю різницю. Це означає, що при додаванні двох швидкостей по 8 км/с обидва закони дають результати, які практично збігаються.

Розглянемо тепер додавання більших швидкостей. Нехай у космічному просторі назустріч одна одній рухаються зі швидкістю 300 км/с (відносно Сонця) дві частинки. З погляду класичної механіки, швидкість однієї частинки відносно іншої буде  $w = 600$  км/с. За (66.1) їх відносна швидкість виявляється рівною 599,9994 км/с. Як бачимо, навіть для таких величезних, з погляду повсякденного життя, швидкостей, як 300 км/с, релятивістська формула (66.1) не дає істотно іншого результату. Проте ця різниця стає помітною при значно більших швидкостях. Так, додаючи дві швидкості по 100 000 км/с за (66.1), ми дістанемо  $w = 180\,000$  км/с, що значно відрізняється від класичного результату (200 000 км/с). Чим більші швидкості ми додаємо, тим більшою стає ця різниця. Якщо додавати швидкості  $v = 200\,000$  км/с і  $u = 200\,000$  км/с, дістанемо  $w = 277\,000$  км/с, а не 400 000 км/с, як це мало б бути згідно з класичним законом додавання швидкостей. Додаючи дві швидкості по



299 000 км/с кожна, дістанемо лише  $w = 299\,788$  км/с, а не 598 000 км/с.

Особливо цікавий результат дістанемо, коли один або обидва доданки дорівнюють швидкості світла  $c$ . Нехай  $u = c$ . Тоді

$$w = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c.$$

Цей результат повністю відповідає другому постулату Ейнштейна. Нехай тепер обидві швидкості  $v$  і  $u$  дорівнюють швидкості світла  $c$ . В цьому випадку

$$w = \frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = c.$$

Таким чином, які б дві швидкості ми не додавали, не можна дістати швидкість, яка б перевищила швидкість світла у вакуумі. Швидкість світла у вакуумі є граничною швидкістю передавання сигналів.

Слід підкреслити, що саме швидкість світла у вакуумі є граничною швидкістю, яку не можна перевищити. Швидкість світла в певному середовищі дорівнює  $\frac{c}{n}$ , де  $n$  — показник заломлення цього середовища, не є граничною величиною.

Якщо швидкості  $v$  і  $u$  дуже малі порівняно зі швидкістю світла  $c$  (тобто  $v < c$  і  $u < c$ ), то член  $\frac{vu}{c^2} \ll 1$  і ним можна знехтувати. Тоді замість (66.1) дістанемо галілеївський закон додавання швидкостей  $w = v + u$ .

1. Чим релятивістський закон додавання швидкостей відрізняється від закону додавання швидкостей у класичній механіці?
2. Космічний корабель віддаляється від Землі зі швидкістю, близькою до швидкості світла. У напрямі польоту корабля космонавт дивиться в дзеркало. Чи побачить він своє зображення?

## § 67 — ЗАКОН ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МАСИ І ЕНЕРГІЇ

Припустимо, що треба знайти швидкість електронів, набуту ними в електростатичному полі з напругою  $U = 4,5 \cdot 10^6$  В. Застосовуючи закон динаміки  $F = ma$  і множачи на пройдений електроном шлях  $s = \frac{1}{2}at^2$  обидві частини рівняння, дістанемо:  $Fs = m \frac{a^2 t^2}{2}$  або  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ . З іншого



боку, набута електроном в електростатичному полі енергія дорівнює  $eU$ . Отже,  $eU = \frac{1}{2}mv^2$ , звідки  $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ . Підставляючи числові значення величин, дістанемо:

$$v \approx 40 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 13 c.$$

Таким чином, швидкість електронів значно перевищила б граничну швидкість  $c$ , якби вони підкорялися класичній динаміці. Однак досліди показують, що завжди  $v < c$ . Це означає, що класична формула кінетичної енергії  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  непридатна для обчислень руху частинок з великими швидкостями.

У класичній механіці енергія нерухомого тіла (або системи) з заданою масою  $m$  дорівнювала нулю. Тіло (чи система) набувало енергію, лише коли починало рухатися. Отже, у механіці Ньютона тіло мало тільки кінетичну енергію  $\frac{1}{2}mv^2$ .

Теорія ж відносності доводить, що будь-яке тіло, яке вільно рухається, має енергію

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (67.1)$$

Звідси видно, що будь-яке тіло, яке перебуває в спокої ( $v = 0$ ), має енергію спокою  $E_0 = m_0 c^2$  (або власну енергію).

Який зміст формули  $E_0 = m_0 c^2$ ? За цією формулою визначають максимальну енергію, яка може бути одержана від тіла з масою спокою  $m_0$ , якщо воно перетвориться в матеріальний об'єкт, позбавлений маси спокою, тобто в електромагнітне випромінювання тіла.

Можна сказати, що зміна енергії спокою тіла пропорційна зміні маси тіла. Якщо тіло (система) з масою спокою  $m_0$  виділило енергію  $\Delta E$ , маса спокою цього тіла має зменшитися на  $\Delta m$ , причому, як і раніше, енергія спокою повинна бути зв'язана з масою спокою співвідношенням:

$$E_0 - \Delta E = (m_0 - \Delta m) c^2 = m_0 c^2 - \Delta m \cdot c^2. \quad (67.2)$$

Звідси випливає, що  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ .

Величина  $\Delta m$  називається **дефектом маси**. Вона показує, на скільки зменшиться маса спокою тіла, якщо воно віддало енергію  $\Delta E$ , або, навпаки, на скільки зросте маса спокою тіла (системи), якщо воно поглинуло енергію  $\Delta E$ . Наприклад, нагріваючись електричним струмом, праска набуває певної кількості енергії  $\Delta E$ . Її маса спокою зростає на

величину  $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ . Або, стискаючи пружину, ми надаємо їй додаткову енергію  $\Delta E = \frac{kx^2}{2}$  (де  $x$  — стискання), внаслідок чого маса спокою пружини збільшується на  $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ . Якщо наблизити одне до одного різнойменно заряджені тіла, їх сумарна маса спокою зросте на величину  $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$  (де  $\Delta E$  — збільшення потенціальної енергії системи, що дорівнює роботі, затраченій на подолання сил відштовхування). Можна навести й інші приклади. Однак слід наголосити, що в усіх наведених прикладах і подібних до них зміна маси спокою настільки мала порівняно з масою тіла, що вона не може бути виявлена експериментально. Лише під час перетворень атомних ядер і елементарних частинок зміни енергії виявляються настільки значними, що й пов'язані з ними зміни маси спокою виявляються помітними.

А. Ейнштейн показав, що співвідношення  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$  є справедливим для будь-якого виду енергії. Воно дістало назву **закону Ейнштейна про взаємозв'язок маси й енергії**. Цей закон є одним з найважливіших законів сучасної фізики. Ядерна техніка, фізика прискорювачів і елементарних частинок були б неможливими без існування закону про взаємозв'язок маси й енергії. Наука й техніка нагромадили величезну кількість експериментальних фактів, які з високим ступенем точності підтверджують закон Ейнштейна.

## ВИСНОВКИ

Теорія відносності описує рух тіл з великими швидкостями, які наближаються до швидкості світла. В її основі лежать два принципи (постулати): 1) в усіх інерціальних системах відліку всі фізичні явища відбуваються однаково; 2) швидкість світла однакова в усіх інерціальних системах відліку, тобто вона не залежить ні від швидкості руху джерела, ні від швидкості руху приймача світла. Швидкість світла у вакуумі є граничною швидкістю передавання будь-яких сигналів.

Закон додавання швидкостей у теорії відносності має вигляд:

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}.$$

Між масою тіла і його енергією існує взаємозв'язок:

$$E = mc^2.$$

## РОЗДІЛ VII

### СВІТЛОВІ КВАНТИ. ДІЇ СВІТЛА

Розглянуті вище явища інтерференції, дифракції, дисперсії і поляризації світла свідчать, що світло має хвильові властивості. Однак у процесі вивчення взаємодії світла з речовиною в кінці XIX і на початку XX ст. було відкрито деякі оптичні явища, які не вдавалося пояснити з точки зору електромагнітної теорії світла. У зв'язку з цим виникло нове уявлення про світло як потік своєрідних частинок — фотонів, або квантів світла.

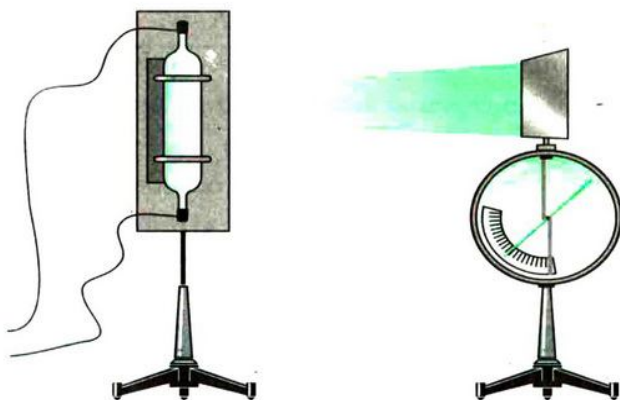
У цьому розділі розглянемо явища взаємодії світла з речовиною, розуміння яких на основі уявлення про світло як електромагнітні хвилі викликає значні труднощі або ж неможливе. Одним з таких явищ є фотоелектричний ефект.

#### § 68 — ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ І ЙОГО ЗАКОНИ

Світло, падаючи на поверхню металу і поглинаючись нею, вириває електрони з металу. Це явище виривання електронів з речовини під дією випромінювання дістало назву *фотоелектричного ефекту*. Фотоэффект можна спостерігати на такому простому досліді: очищеній до блиску і закріпленій на електроскопі цинковій пластинці надають негативно-го заряду (надмір електронів полегшує їх випромінювання) і діють на неї випромінюванням електричної дуги чи ртутно-кварцевої лампи (мал. 125). При цьому пластинка швидко розряджається, що спостерігається за допомогою електроскопа. Якщо пластинку зарядити позитивним зарядом, ніякої зміни заряду пластинки помітити не вдається. Дослід з дуже чутливим електроскопом показує, що під час освітлення незарядженої цинкової пластинки остання заряджається позитивно (втрачаючи негативний заряд).

Пояснюється це тим, що світло вириває електрони з по-





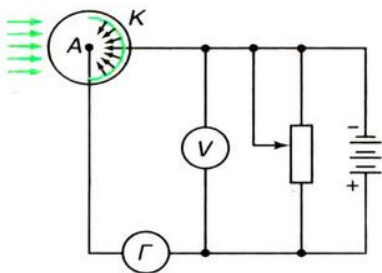
Мал. 125

верхні пластинки і, якщо вона заряджена негативно, електрони відштовхуються від неї і електроскоп розряджається. Якщо заряд пластинки позитивний, вирвані світлом електрони притягуються до пластинки і знову осідають на ній. Тому заряд електроскопа не змінюється. У разі освітлення незарядженої пластинки остання втрачає електрони і заряджається позитивно.

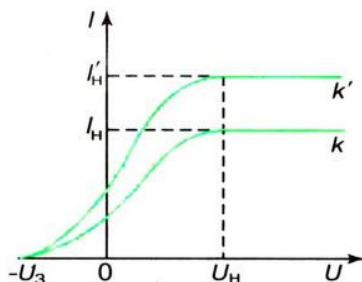
Досліджуючи закономірності фотоефекту, дуже важливо з'ясувати, від чого залежить кількість вирваних з поверхні речовини електронів і їх швидкість. Принципова схема сучасної установки для дослідження фотоефекту показана на малюнку 126. Пучок однорідного світла крізь кварцове віконце спрямовується на досліджувану пластинку  $K$ , вміщену в посудину, з якої викачано повітря. Між пластинкою, яка є катодом  $K$ , і анодом  $A$  створюється електричне поле. Напругу між катодом і анодом можна регулювати за допомогою потенціометра. Електрони, які випускаються катодом під час його опромінення світлом, рухаються під дією електричного поля до анода  $A$  і в колі приладу тече фотострум, силу якого можна виміряти гальванометром  $G$ .

Якщо при незмінному світловому потоці, який падає на катод  $K$ , поступово підвищувати напругу між  $K$  і  $A$ , сила фотоструму спочатку зростає, а потім стає сталою, тобто перестає залежати від напруги (мал. 127). Найбільша сила фотоструму, яка виникає при незмінному світловому потоці, називається *фотострумом насичення*.

Очевидно, фотострум насичення виникає за таких напруг, коли всі електрони, вибиті світлом з катода  $K$ , досягають анода  $A$ . Отже, фотострум насичення може бути кількісною мірою фотоефекту. Поступово збільшуватимемо



Мал. 126



Мал. 127

світловий потік, який падає на катод  $K$ , і вимірюватимемо силу фотоструму насичення. Ми переконаємося, що **сила фотоструму насичення прямо пропорційна падаючому на фотокатод світловому потоку** (*перший закон фотоелектру*).

Цей закон легко зрозуміти: чим більша енергія падаючого світлового пучка, тим більшу кількість електронів цей пучок вибиває. Можна також переконатися, що фотоелектр практично безінерційний. Інтервал часу між початком освітлення і появою фотоструму не перевищує  $10^{-9}$  секунди. Це легко помітити, перекриваючи пучок світла непрозорим екраном, а потім приймаючи екран.

Тепер за незмінного світлового потоку зменшуватимемо напругу між  $K$  і  $A$ . За досить малих напруг сила фотоструму починає зменшуватися, однак навіть при напрузі, рівній нулю, струм у колі не зникає. Це свідчить про те, що світло, вибиваючи електрони, надає їм кінетичної енергії і вони досягають поверхні анода  $A$ . Значення цієї кінетичної енергії (або швидкості електронів) можна визначити так. Поміняємо місцями полюси батареї, щоб створити між катодом і анодом електричне поле, яке гальмує рух електронів. У цьому випадку електрони, які рухаються від пластинки  $K$  до пластинки  $A$ , за рахунок своєї кінетичної енергії виконують роботу проти сил поля. Якщо збільшити напруженість гальмівного поля, сила фотоструму зменшується і при певній напрузі  $U_з$  фотострум взагалі припиняється. Це означає, що навіть електрони, які вилетіли з максимальною швидкістю з металу, вже не можуть подолати гальмівну дію електричного поля і долетіти до пластинки  $A$ . Позначивши найменшу затримуючу напругу, за якої припиняється фотострум, через  $U_з$ , максимальну швидкість вибитих електронів через  $v_m$ , а їх заряд і масу відповідно  $e$  і  $m$ , можна записати:

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_з. \quad (68.1)$$

Отже, вимірявши затримуючу напругу  $U_3$ , за якої припиняється фотострум, можна визначити максимальну кінетичну енергію (або швидкість) вибитих випромінюванням електронів. Ці вимірювання дали можливість встановити досить несподіваний факт: максимальна швидкість (або кінетична енергія) вибитих випромінюванням електронів зовсім не залежить від освітленості поверхні, а визначається лише частотою (або довжиною хвилі) цього випромінювання (*другий закон фотоэффекту*).

Якщо на фотокатод спрямовувати по черговому випромінювання з різною довжиною хвилі (частотою), можна помітити, що зі збільшенням довжини хвилі (або зменшенням частоти) кінетична енергія (або швидкість) вибитих електронів зменшується, і за певної довжини хвилі кінетична енергія (або швидкість) виявляється рівною нулю, тобто фотоэффект зникає. Найбільша довжина хвилі, за якої ще можна спостерігати фотоэффект, називається *червоною межею фотоэффекту*. Термін «червона межа» підкреслює, що фотоэффект обмежений з боку довгохвильової частини спектра.

Отже, не кожне випромінювання здатне викликати фотоэффект. Промені, які мають довжину хвилі, більшу за червону межу фотоэффекту  $\lambda_c$ , не викликають фотоелектричного струму, яку б освітленість не створювали ці промені на поверхні тіла. Наявність червоної межі є однією з чудових особливостей фотоэффекту, яку не може пояснити електромагнітна теорія світла.

Досліди з освітленням фотокатодів з різних матеріалів показали, що червона межа фотоэффекту різна для різних речовин і є величиною, характерною для даної речовини. **Червона межа фотоэффекту визначається лише матеріалом освітлюваного електрода і не залежить від його освітленості** (*третій закон фотоэффекту*).

Якщо перший закон фотоэффекту можна пояснити на основі електромагнітної теорії світла, то другий і третій закони на основі цієї теорії пояснити не можна. Справді, за хвильовою теорією фотоэффект має спостерігатися за будь-якої частоти (довжини хвилі) світла, оскільки енергія, яку одержує електрон при розгойдуванні його електромагнітною хвилею, залежить від енергії хвилі, а остання визначається амплітудою коливання, а не довжиною хвилі. Отже, за будь-якої довжини хвилі, якщо світло має достатню інтенсивність, можна чекати випромінювання електрона з металу. Крім того, з хвильової точки зору, кінетична енергія вибитих електронів мала б залежати від освітленості поверхні, оскільки зі збільшенням освітленості електронів передавалася б більша енергія.



Проте ні наявність червоної межі фотоефекту, ні незалежність швидкості вибитих електронів від світлового потоку не можна пояснити з точки зору електромагнітної теорії світла. Труднощі в тлумаченні явища фотоефекту викликали сумніви в універсальності застосування електромагнітної теорії світла і привели А. Ейнштейна до створення квантової теорії світла.

1. У чому полягає явище фотоефекту? Як його можна спостерігати? 2. Сформулюйте закони фотоефекту. 3. Що називають червоною межею фотоефекту? Чи залежить вона від міри освітленості матеріалу? 4. Як розуміти твердження: «червона межа фотоефекту для нікелю  $\lambda_c = 2,475 \cdot 10^{-7}$  м»? Чи спостерігатиметься фотоефект під час освітлення нікелю світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м?  $\lambda = 2 \cdot 10^{-7}$  м? 5. Чи можна пояснити другий і третій закони фотоефекту з точки зору електромагнітної теорії світла?

## § 69 — РІВНЯННЯ ЕЙНШТЕЙНА. КВАНТИ СВІТЛА

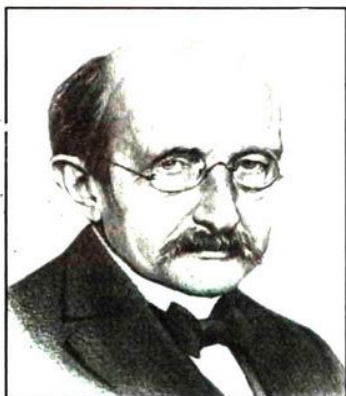
У 1905 р. А. Ейнштейн показав, що закони фотоефекту легко пояснюються, якщо припустити, що будь-яке електромагнітне випромінювання, в тому числі і світло, поширюється в просторі у вигляді окремих порцій енергії — **к в а н т і** в електромагнітного поля. Ці кванти інакше називаються **ф о т о н а м и**. Енергія кожного кванта світла (фотона) дорівнює:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (69.1)$$

де  $\nu$  — частота коливань в електромагнітній світловій хвилі,  $h$  — коефіцієнт, який дістав назву сталої Планка (на честь відомого німецького фізика М.Планка). Її числове значення  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Таким чином, за квантовою теорією, світло є потоком фотонів, які рухаються зі швидкістю світла  $c$ . В однорідному світлі з частотою  $\nu$  всі фотони мають однакову енергію  $h\nu$ . Поглинання світла полягає в тому, що фотони передають **в с ю с в о ю е н е р г і ю** атомам і молекулам речовини, тобто поглинання світла, як і його поширення, відбувається переривчасто (дискретно), окремими порціями.

Ці уявлення про поширення і поглинання світла дали можливість пояснити явище фотоефекту. Фотоефект відбувається в результаті поглинання фотонів вільними електро-



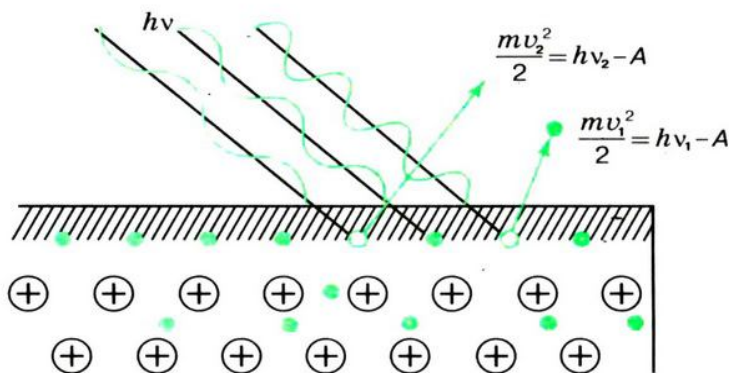
## Макс ПЛАНК (1858—1947)

Видатний німецький фізик-теоретик, засновник квантової теорії — сучасної теорії руху, взаємодії і взаємних перетворень мікроскопічних частинок. В 1900 р. вперше ввів уявлення про те, що енергія осцилятора (системи, яка здійснює гармонічні коливання) набуває дискретних значень, пропорційних частоті коливань. Випромінюється електромагнітна енергія осцилятором окремими порціями. Багато зробив для розвитку термодинаміки.

нами металів. Кожен фотон взаємодіє лише з одним електроном (мал. 128). Внаслідок поглинання фотона електроном його енергія  $h\nu$  буде повністю передана електрону. Якщо ця енергія менша за роботу виходу  $A$  електрона з металу:  $h\nu < A$ , фотоефект не відбувається (посилається тепловий рух електрона). Якщо енергія фотона  $h\nu$  дорівнює або більша за роботу виходу:  $h\nu \geq A$ , фотоефект відбувається. При цьому, якщо енергія фотона перевищує роботу виходу, різниця між ними перетворюється в кінетичну енергію  $\frac{1}{2}mv^2$  фотоелектрона. Тоді, згідно з законом збереження і перетворення енергії, можна записати:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A. \quad (69.2)$$

Ця формула, запропонована у 1905 р. Ейнштейном і підтверджена потім численними експериментами, називається *рівнянням Ейнштейна для фотоефекту*.



Мал. 128



Рівняння Ейнштейна дає можливість правильно пояснити всі закони фотоелектру. Збільшуючи світловий потік без зміни частоти випромінювання, ми збільшуємо кількість фотонів, які падають на фотокатод. Це веде до збільшення кількості вирваних електронів, а їх максимальна кінетична енергія не змінюється, оскільки кожен електрон дістає енергію одного фотона. Так пояснюється перший закон фотоелектру.

З (69.2) випливає, що  $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - A$ , тобто кінетична енергія і швидкість фотоелектронів залежать лише від частоти випромінювання і з її підвищенням збільшуються. Так пояснюється другий закон фотоелектру.

У разі зменшення частоти випромінювання зменшуються кінетична енергія і швидкість електронів і для частоти світла  $\nu_c$ , за якої енергія і швидкість електронів дорівнюватимуть нулю, фотоелектр припиняється. Частота  $\nu_c$  або відповідна їй довжина хвилі  $\lambda_c = \frac{c}{\nu_c}$  є червоною межею фотоелектру для даної речовини. Для її обчислення слід в (69.2) прийняти  $\frac{1}{2}mv^2 = 0$ . Тоді

$$\nu_c = \frac{A}{h}, \text{ або } \lambda_c = \frac{hc}{A}. \quad (69.3)$$

Таким чином, червона межа фотоелектру залежить лише від роботи виходу, тобто від хімічної природи металу і стану його поверхні. За менших частот  $\nu < \nu_c$  (або  $\lambda > \lambda_c$ ) енергії одного фотона недостатньо для виконання роботи виходу, і фотоелектр не відбувається. Так пояснюється третій закон фотоелектру.

З рівняння Ейнштейна можна визначити сталу Планка. Для цього слід знати частоту світла  $\nu$ , роботу виходу  $A$  і виміряти кінетичну енергію вирваних електронів. Такі вимірювання і розрахунки дають значення  $h$ , яке збігається із значеннями, одержаними під час вивчення інших фізичних явищ. Тим самим підтверджується правильність рівняння Ейнштейна для фотоелектру та ідей про квантовий характер взаємодії світла з електронами під час фотоелектру.

1. У чому суть квантових уявлень про поширення і поглинання світла? 2. Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна для фотоелектру. 3. Поясніть закони фотоелектру з точки зору квантової теорії світла. 4. Чому при частотах, менших за червону межу, фотоелектр не спостерігається?



1. Робота виходу електронів із ртуті  $A = 4,53$  еВ. Чи виникатиме фотоелектр. ефект під час освітлення ртуті видимим світлом?

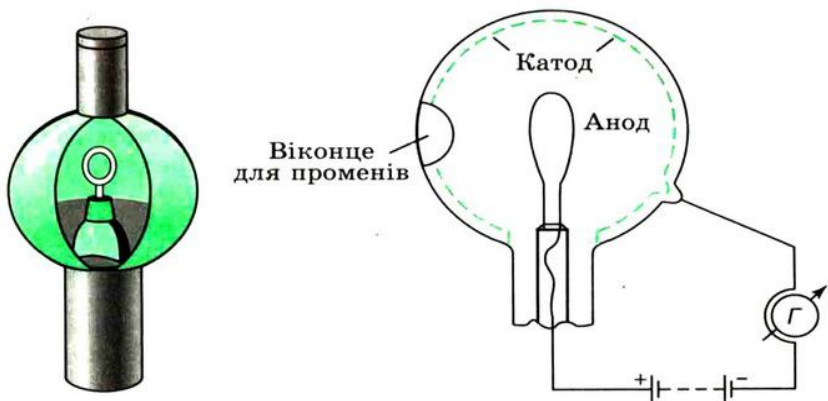
2. Під час опромінення деякого металу світлом з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 0,6 \cdot 10^{-6}$  м, а потім  $\lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-6}$  м виявили, що відповідні максимальні швидкості фотоелектронів відрізняються одна від одної в 2 рази. Визначте червону межу  $\lambda_c$  фотоелектр. ефекту для цього металу.

3. Під час опромінення срібла ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 10^{-7}$  м для повного припинення вильоту фотоелектронів потрібна напруга  $U = 7,7$  В. Чому дорівнює робота виходу для срібла?

4. Фотони з енергією  $E = 5$  еВ вибивають фотоелектрони з металу з роботою виходу  $A = 4,5$  еВ. Визначте максимальний імпульс, який передається поверхні металу, під час вилітання кожного електрона.

## § 70 — ФОТОЕЛЕМЕНТИ І ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Явище фотоелектричного ефекту знайшло широке застосування в науці й техніці для безпосереднього перетворення енергії світла в енергію електричного струму, для перетворення світлових сигналів в електричні. Прилади, дія яких ґрунтується на явищі фотоелектр. ефекту, називаються **фотоелементами**. Найпростіший сучасний вакуумний фотоелемент є скляним балоном (мал. 129), майже вся внутрішня поверхня якого вкрита світлочутливим шаром металу, який відіграє роль фотокатода. Відкритим залишається невеличке віконце для доступу світла. Анодом є металеве кільце, закріплене в балоні. Фотоелемент умикається в коло батареї.



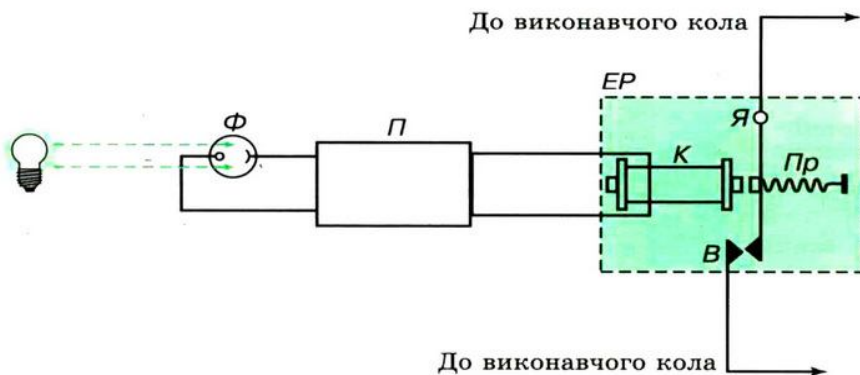
Мал. 129

У разі освітлення катода з нього внаслідок фотоелектру виби-  
ваються електрони і в колі виникає електричний струм. ЕРС  
батареї вибирається такою, щоб фотострум дорівнював стру-  
мові насичення. Залежно від спектрального складу світла,  
яке треба реєструвати, використовуються фотоелементи, ка-  
тоди яких виготовлені з різних матеріалів. Наприклад, для  
реєстрації видимого світла і інфрачервоного випромінювання  
застосовують елементи з киснево-цезієвим катодом (мала  
робота виходу); для реєстрації короткохвильової частини  
видимого світла і ультрафіолетового випромінювання засто-  
совують фотоелементи з стибієво-цезієвим катодом.

Світлові потоки, з якими доводиться мати справу на  
практиці, невеликі, тому фотоструми у вакуумних елементах  
дуже малі і не перевищують  $10^{-6}$  А. Для збільшення сили  
струму фотоелемент заповнюють аргонем під тиском при-  
близно 1 Па. Фотострум у такому фотоелементі підсилюється  
внаслідок йонізації аргону, викликаній зіткненнями елек-  
тронів з його атомами.

Фотоелементи широко застосовуються для автоматизації  
виробничих процесів. У поєднанні з електронними підсилю-  
вачами фотоелементи входять до складу фотореле —  
приладів автоматичного управління різними установками,  
які використовують безінерційність фотоелектру, тобто здат-  
ність фотоелемента практично миттєво реагувати на світло-  
вий вплив чи на його зміну. Складається фотореле (мал. 130)  
з фотоелемента  $\Phi$ , підсилювача фотоструму  $\Pi$  і електро-  
магнітного реле  $EP$ . Якщо на фотоелемент падає світло, в  
котушці  $K$  реле виникає струм. Котушка намагнічується і,  
розтягуючи пружину  $Пр$ , притягує якір  $Я$ , який замикає  
контакт  $B$  виконавчого кола зі струмом великої потужності.

У разі потреби фотореле можна увімкнути і так, щоб у  
разі освітлення фотоелемента виконавче коло розмикалося.



Мал. 130

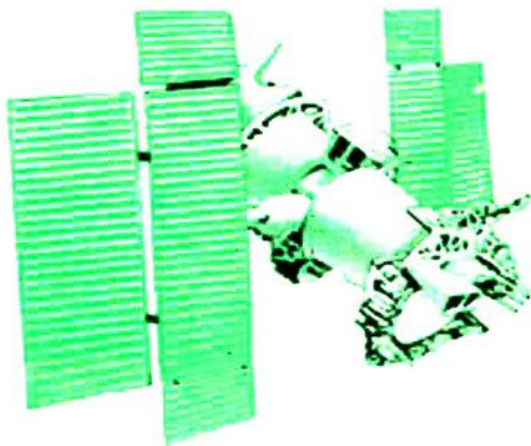
Застосування фотореле надзвичайно різноманітні. Воно вмикає і вимикає в потрібний час освітлення вулиць і майданів у містах, світло маяків і бакенів, сортує різні деталі за кольором і формою, запускає і зупиняє електродвигуни та верстати і т. д.

Фотореле є важливою частиною пристроїв техніки безпеки. Фотоелемент пильно слідкує за роботою машин і майже вмить зупиняє потужний прес, верстат тощо, якщо рука людини раптом опиниться в небезпечній зоні.

За допомогою фотоелементів здійснюється передавання на великі відстані зображень рухомих предметів, відтворення звуку в звуковому кіно, передавання нерухомих зображень по фототелеграфу.

Досі ми розглядали *зовнішній* фотоефект (який звичайно називають просто фотоефектом), під час якого електрони вивираються з поверхні речовини. Але не менш широко використовується в техніці так званий *внутрішній* фотоефект, який спостерігається в напівпровідниках і діелектриках. Він полягає в тому, що під час опромінення напівпровідника чи діелектрика в них збільшується концентрація вільних носіїв зарядів і, отже, підвищується провідність. Це явище внутрішнього фотоефекту використовується в фоторезисторах (фотоопорах), опір яких залежить від освітленості. Фоторезистори також застосовуються для автоматичного управління електричними колами за допомогою світлових сигналів. На відміну від фотоелементів фоторезистори можна використовувати в колах змінного струму, оскільки їх опір не залежить від напрямку струму.

Явище внутрішнього фотоефекту використовується та-



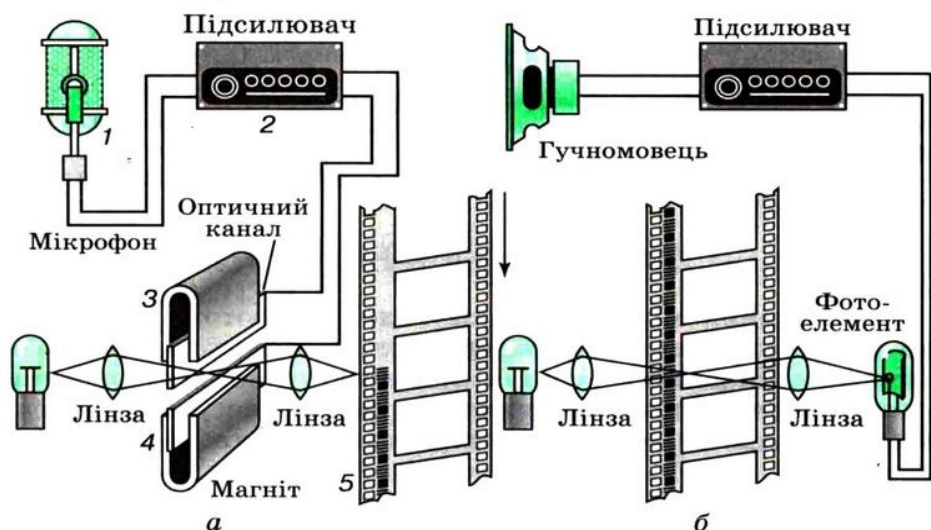
Мал. 131



кож в будові напівпровідникових (або вентильних) фотоелементів, які безпосередньо перетворюють енергію світла в електричну. На відміну від раніше розглянутих, напівпровідникові фотоелементи самі можуть бути генераторами струму. Коефіцієнт корисної дії сучасних силіцієвих фотоелементів досягає 12—15 %. Батареї силіцієвих фотоелементів, які дістали назву сонячних батарей (мал. 131), успішно застосовуються на штучних супутниках Землі й космічних кораблях для живлення бортової радіоапаратури.

Одним з найважливіших застосувань фотоелементів є використання їх у звуковому кіно для відтворення звуку, записаного на кінострічці у вигляді «звукової доріжки». Одночасно з фотографуванням кінокадрів на стрічці здійснюють запис звуку. Розглянемо принцип оптичного запису звуку.

Звукові коливання за допомогою мікрофона 1 (мал. 132, а) перетворюються в коливання сили електричного струму і подаються на підсилювач 2. Підсилений електричний струм пропускається через так званий «оптичний канал» з двох металевих пластин, розміщених дуже близько (біля 0,025 мм) одна від одної між полюсами сильних магнітів 3 і 4. У магнітному полі на пластини, якими йде змінний струм, діє сила Ампера, змушуючи їх по чергову втягуватися в простір між полюсами магнітів і тим самим змінювати ширину щілини між пластинами. Ці зміни ширини щілини викликають відповідні зміни кількості світла, яке проходить від спеціального джерела крізь щілину. Світло фокусується на



Мал. 132

краю світлочутливої плівки 5, викликаючи більше чи менше її почорніння. Плівка потім проявляється, і з її позитиву робиться негативна копія, на якій можна побачити звукову доріжку з темних і світлих смуг, прозорість яких відповідає звуковим хвилям, які діяли на мікрофон.

Під час відтворення звуку (мал. 132, б) через звукову доріжку пропускається вузький пучок світла, який потім спрямовується на фотоелемент. Під час освітлення фотоелемента виникає електричний струм, сила якого залежить від кількості світла, пропущеного світловою доріжкою. Під час руху кінострічки світловий потік, пропущений світловою доріжкою, безперервно змінюється відповідно до ступеня прозорості доріжки, тому змінюється і сила струму в колі фотоелемента. Ці коливання сили струму підсилюються в мільйони разів і спрямовуються в гучномовець, де перетворюються в звукові коливання, які точно відтворюють ті звукові хвилі, які діють на мембрану мікрофона. Оскільки швидкість світла грандіозна порівняно зі швидкістю звуку, то звукова доріжка на кілька кадрів випереджає відповідне їй зображення.

## § 71 — ФОТОН

Згідно з гіпотезою світлових квантів, світло випромінюється, поглинається і поширюється дискретними порціями (квантами), які називаються *фотонами*. Фотон має енергію  $\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ . Масу фотона  $m_{\text{ф}}$  визначимо, виходячи із закону взаємозв'язку маси й енергії (див. § 67):

$$m_{\text{ф}} = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (71.1)$$

За відомою масою і швидкістю фотона можна визначити його імпульс:

$$p_{\text{ф}} = m_{\text{ф}}c = \frac{h\nu}{c^2}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (71.2)$$

З наведених міркувань зрозуміло, що фотон, як і будь-яка інша частинка, характеризується енергією, масою і імпульсом. Вирази (71.1) і (71.2) пов'язують характеристики фотона як частинки (корпускулярні) — енергію, масу і імпульс — з хвильовою характеристикою світла — його частотою  $\nu$ .

З (71.1) і (71.2) випливає, що зі збільшенням частоти випромінювання  $\nu$  маса та імпульс фотона зростають. Обчислимо масу фотона, яка відповідає довжинам хвиль



$\lambda_1 = 6 \cdot 10^{-7}$  м (видиме світло),  $\lambda_2 = 10^{-9}$  м (рентгенівське випромінювання) і  $\lambda_3 = 10^{-14}$  м (гамма-випромінювання). Маса фотона  $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$ . Підставимо значення  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  і  $\lambda_3$  у цю формулу і дістанемо:  $m_1 \approx 4,4 \cdot 10^{-36}$  кг;  $m_2 \approx 2,2 \cdot 10^{-33}$  кг і  $m_3 \approx 2,2 \cdot 10^{-28}$  кг. Порівняємо маси фотонів з масою електрона  $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг:

$$\frac{m_1}{m_e} \approx 4,8 \cdot 10^{-6}; \quad \frac{m_2}{m_e} \approx 2,4 \cdot 10^{-3}; \quad \frac{m_3}{m_e} \approx 240.$$

Таким чином, маса фотона видимого світла в мільйони разів, а рентгенівського проміння в кілька тисяч разів менші за масу електрона; маса ж гамма-фотона приблизно в 240 раз більша за масу електрона.

- ?
- Від чого залежить енергія фотона?
  - Чи може фотон перебувати в спокої в будь-якій інерціальній системі відліку?

## Вправа 17

1. Чутливість сітківки ока до жовтого світла ( $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м) становить  $P = 3,3 \cdot 10^{-18}$  Вт. Скільки фотонів має щосекунди поглинатися сітківкою, щоб створювалося відчуття світла?

2. Скільки фотонів за секунду випромінює волосок електричної лампи з корисною потужністю  $P = 1$  Вт, якщо середня довжина хвилі випромінювання  $\lambda = 10^{-6}$  м?

3. Світло якої довжини хвилі випромінює лазер, якщо його середня потужність  $P = 1,43$  кВт при тривалості імпульсу  $t = 4 \cdot 10^{-3}$  с? В імпульсі випромінюється  $n = 2 \cdot 10^{19}$  квантів.

4. Скільки фотонів падає в 1 с на 1 см<sup>2</sup> поверхні, якщо вона опромінюється з потужністю  $P = 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> гамма-променями з довжиною хвилі  $\lambda = 10^{-14}$  м?

## § 72 — КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ

Усі розглянуті в цьому розділі явища переконливо доводять справедливність квантових властивостей світла. Однак у попередньому розділі ми розглянули явища інтерференції, дифракції і поляризації світла, які свідчать про наявність хвильових властивостей випромінювання. Виникає запитання: що ж таке світло? Це випромінені джерелом електромагнітні хвилі чи джерело світла випускає потік фотонів, які рухаються у просторі зі швидкістю світла у вакуумі? По-



первах здається, що ці два погляди на природу світла — хвильовий і квантовий — взаємно виключають один одного. Очевидно, що ряд ознак хвиль і частинок справді протилежні. Наприклад, фотони, рухаючись, перебувають у певних точках простору, а у випадку поширення хвилі не можна говорити про її перебування в якійсь певній точці. Хвилю можна розділити на частини і такий поділ нічим не обмежений, а фотон поділити не можна.

Розвиток фізики показав, що хвильові й квантові властивості світла не можна протиставляти. Властивості неперервності, характерні для електромагнітного поля світлової хвилі, не виключають властивостей перервності (дискретності), характерних для квантів світла — фотонів. Світло одночасно має властивості і неперервних електромагнітних хвиль, і перервних фотонів. Тому запитання, що є світло — хвиля чи частинка, позбавлене сенсу. Світло — не хвиля і не частинка в звичайному розумінні. Світло має електромагнітну природу і йому притаманні двоїсті квантово-хвильові властивості.

У прояві двоїстих властивостей випромінювання спостерігається важлива закономірність. Якщо частоти малі, більшою мірою проявляються хвильові властивості випромінювання (наприклад, радіопроміння), а для великих частот — квантові властивості (наприклад, рентгенівське проміння). У видимому світлі хвильові й квантові властивості виявляються однаковою мірою.

Пізніше з'ясувалося, що за певних умов частинки речовини (електрон, протон, атом тощо) також виявляють хвильові властивості, тобто речовина, як і випромінювання, має квантово-хвильові властивості.

- ?
1. Як ви розумієте двоїсту (корпускулярно-хвильову) природу світла?
  2. В яких явищах виявляються хвильові властивості світла, а в яких процесах — корпускулярні? Які явища можна пояснити як хвильовою, так і квантовою теоріями?

## § 73 — ТИСК СВІТЛА

На основі електромагнітної теорії світла Д. Максвелл передбачив, що світло повинно чинити тиск на перепони. Існування світлового тиску впливає також з квантової теорії світла. Якщо фотон має масу  $m$ , то під час зіткнення його з поверхнею твердого тіла може відбутися або поглинання фотона, або його відбивання. В першому випадку зміна

імпульсу фотона дорівнює:  $\Delta p = mv$ , а в другому — вона в два рази більша:  $\Delta p = 2mv$ . Тому за однакової густини потоку світлового випромінювання тиск світла на дзеркальну поверхню повинен бути вдвічі більшим за тиск на чорну поверхню, яка поглинає світло.

Багато вчених намагалися виміряти тиск світла, однак їм це не вдавалося, оскільки світловий тиск дуже малий.

В яскравий сонячний день на  $1 \text{ м}^2$  діє сила всього лише  $4 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$ . Вперше тиск світла виміряв російський фізик П. М. Лебедев лише в 1900 р.

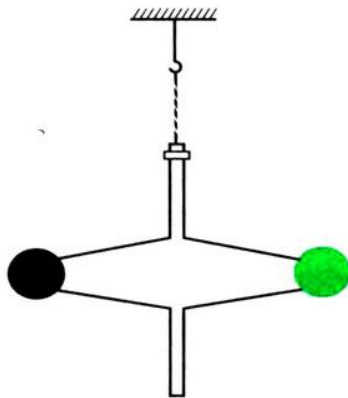
У дослідах Лебедева однакові світлові потоки направлялися на два легенькі металеві диски, підвішені на тонкій нитці (мал. 133). Один диск був дзеркальним і відбивав падаюче на нього світло, другий — чорним, який його поглинав. У разі одночасного освітлення двох дисків відбувалось їх повертання навколо вертикальної осі.

За кутом закручування пружної нитки підвісу можна було виміряти момент сил, які викликали цей поворот. Закручування нитки підвісу відбувалося в напрямі, що відповідав більшій силі тиску світла на дзеркальний диск, який відбивав світло.

Одержане вченим значення тиску світла збігалось з тим, яке передбачив Максвелл. Пізніше, після трьох років наполегливої праці, Лебедеву вдалося здійснити ще тонший експеримент: виміряти тиск світла на газі.

Досліди Лебедева можна розглядати як експериментальне доведення того, що фотони мають імпульс. Закон збереження імпульсу — загальний. Він справедливий як для звичайної речовини, так і для фотонів — квантів електромагнітного поля.

Сила світлового тиску в природних умовах не завжди мізерно мала порівняно з іншими силами. В надрах зірок за температури в кілька десятків мільйонів кельвін тиск електромагнітного випромінювання повинен досягати величезних значень і саме цей тиск перешкоджає необмеженому стисканню зірок.

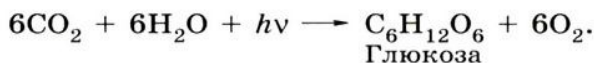


Мал. 133



Окремі молекули поглинають світлову енергію порціями — квантами  $h\nu$ . У випадку видимого світла і ультрафіолетового випромінювання цієї енергії виявляється досить для розщеплення багатьох молекул. Тақ проявляється **хімічна дія світла**. Адже будь-яке перетворення молекул є хімічним процесом.

Найбільш важливі в живій природі хімічні реакції відбуваються в зелених рослинах під дією сонячного світла. Завдяки їм ми маємо їжу, дихаємо киснем. Цей фотохімічний процес — фотосинтез — можна подати таким сумарним рівнянням:



У рослинах з глюкози утворюються сахароза, крохмаль і целюлоза.

Механізм фотосинтезу повністю ще не з'ясований. Коли це станеться, для людства, можливо, настане нова ера. Білки та інші складні органічні речовини можна буде виготовляти на фабриках під блакитним небом.

У житті людини велику роль відіграє здатність ока сприймати світло. Поглинання фотона світла в світлочутливій клітині сітківки ока спричиняє розкладання молекули білка — родопсину. Під час розкладання молекули родопсину виникає сигнал, який нервовими волокнами передається в мозок. У темноті родопсин відновлюється, і клітини знову стають здатними до сприймання світла.

Хімічна дія світла лежить в основі фотографії. Фотоматеріали на основі срібла містять кристали броміду аргентуму  $\text{AgBr}$  (або  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgI}$ ), розподілені в тонкому шарі желатинової емульсії, нанесеної на скляну пластинку, плівку або папір. Під дією світла в кристалі броміду аргентуму утворюються нейтральні атоми Аргентуму і Броду, атоми Аргентуму концентруються поблизу дефектів кристалічної решітки і утворюють там маленькі кристали металевого срібла.

Квантовий характер взаємодії світла з речовиною проявляється у фотохімічних процесах таким чином, що один акт хімічного перетворення відбувається у разі поглинання одного фотона світла. Тому кількість атомів Аргентуму, вивільнених у кристалі броміду аргентуму під дією світла, пропорційна кількості фотонів, поглинутих цим кристалом.

Під час відкривання затвора фотоапарата об'єктив на короткий час проектує на фотоплівку зображення предметів. У різних місцях фотоплівки вивільнюється різна кількість



вільних атомів Аргентуму, в кожному місці кількість вивільнених атомів Аргентуму пропорційна кількості падаючих фотонів світла. Таким чином, на фотоплівці утворюється зображення з дуже малих частинок металевого срібла. Зображення з кристалів срібла, яке утворюється на фотоплівці під дією світла, називається *прихованим зображенням*.

Для одержання видимого зображення використовується процес *проявлення*. Для цього плівку в темноті занурюють у розчин проявника — речовини, здатної відновлювати бромід аргентуму у вільне металеве срібло. > Таке відновлення найбільш ефективно відбувається навколо центрів прихованого зображення.

Для того щоб після проявлення кристали броміду аргентуму, що залишилися на плівці, не могли відновитися, здійснюється процес *фіксування* в розчині тіосульфату натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Він полягає в розчиненні кристалів броміду аргентуму, які не розклалися.

Зображення на фотоплівці є негативним (мал. 134, а), тобто світлим місцям об'єкта відповідають темні місця фотографічного зображення. Для одержання нормального, позитивного, зображення (мал. 134, б) здійснюється повторний процес фотографування з негативу на фотопапір, після чого проводять операції проявлення і фіксування.

Фотографія дуже точно і на тривалий час здатна зафіксувати події, які з часом відходять у минуле. Велике значення має фотографія для науки. Такі швидкі процеси, як удар блискавки, зіткнення елементарних частинок, можна зафіксувати на фотографії і потім детально вивчити.

Об'єкти, які посилають настільки слабе світло, що їх не можна розрізнити оком, можна зафіксувати на фотопластинці за досить великої витримки, тобто великому періоді освітлення пластинки. Саме тому такі дуже віддалені від нас об'єкти, як галактики, вивчаються за фотографіями.



а



б

Мал. 134

Сучасна техніка дає змогу фотографувати не лише у видимому світлі, а й у темноті при інфрачервоному освітленні.

## ВИСНОВКИ

Під час поглинання світла речовиною спостерігається фотоелектричний ефект. Закони фотоефекту: 1) сила фотоструму насичення прямо пропорційна світловому потоку, який падає на фотокатод; 2) максимальна швидкість (кінетична енергія) вибитих електронів не залежить від освітленості поверхні, а визначається лише частотою (довжиною хвилі) цього випромінювання; 3) червона межа фотоефекту визначається матеріалом освітлюваного електрода і не залежить від його освітленості.

Енергія фотона частково витрачається на виконання роботи виходу  $A$  електрона з металу, а частково перетворюється в кінетичну енергію вибитого електрона:  $h\nu = A + \frac{1}{2}mv^2$ .

Фотон має масу  $m = \frac{h\nu}{c^2}$  і імпульс  $p = \frac{h\nu}{c}$ . Фотон не має маси спокою, він існує лише в русі зі швидкістю світла у вакуумі.

Електромагнітне випромінювання виявляє єдність неперервних (хвиль) і дискретних (фотони) властивостей. Хвильові властивості світла виявляються в закономірностях його поширення, інтерференції, дифракції, поляризації, а корпускулярні — в процесах взаємодії з речовиною.

Фотоефект широко використовується в техніці. В спеціальних приладах — фотоелементах — енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється в неї. Фотоелементи застосовуються в різних автоматах, які «бачать». На явищі фотоефекту ґрунтується будова сонячних батарей.

З електромагнітної теорії світла Максвелла випливає, що світло чинить тиск на перепони.

Поглинання світла речовиною супроводжується хімічною дією світла. В зелених рослинах і багатьох мікроорганізмах найважливіші хімічні реакції відбуваються під дією світла. З вуглекислого газу і води, що їх поглинають з атмосфери зелені рослини, утворюється кисень і глюкоза, з якої у рослинах виробляються сахароза, крохмаль і целюлоза. В цьому полягає суть фотосинтезу. Хімічна дія світла лежить в основі фотографії.



## АТОМ І АТОМНЕ ЯДРО

## § 75 — ДОКАЗИ СКЛАДНОЇ БУДОВИ АТОМА

Під час вивчення попередніх розділів курсу фізики, а також хімії ви не раз чули про складну будову атома, спостерігали досліди, які підтверджують це, пояснювали електричні, магнітні й електромагнітні явища, виходячи з того, що атоми складаються з позитивно зарядженого ядра і електронів, які рухаються навколо нього.

Перші експериментальні результати, з яких можна було зробити висновок про складну будову атома, про наявність всередині нього електричних зарядів, були одержані М. Фарадеєм у 1833 р. під час вивчення законів електролізу. В 1897 р. англійський фізик Дж. Дж. Томсон у результаті дослідів з вивчення електричного розряду в розріджених газах, фотоэффекту, термоелектронної емісії встановив, що при співударах атомів у плазмі електричного розряду, під час нагрівання речовини або освітлення її ультрафіолетовим світлом з атома будь-якого хімічного елемента вириваються однакові, негативно заряджені частинки. Ці частинки було названо електронами. У 1909 році американський фізик Р. Міллікен виміряв електричний заряд  $e$  окремих електронів. Він справді виявився однаковим у всіх електронів.

Маса електрона приблизно в 2000 раз менша за масу найлегшого з атомів — атома Гідрогену. Відкриття електрона і виявлення електронів у складі атомів будь-якого хімічного елемента було першим доказом складної будови атомів.

Важливу роль у розумінні будови атома відіграв відкритий у 1869 р. російським хіміком Д. І. Менделєєвим періодичний закон: властивості хімічних елементів перебувають у періодичній залежності від заряду їх атомних ядер. Відкриття цього закону поставило перед фізикою питання про причини повторюваності хімічних властивостей елементів, розміщених у порядку зростання атомної маси. Природно було припустити, що збільшення маси атомів хімічних елементів пов'язане зі збільшенням кількості частинок, які входять до їхнього складу. Періодичну повторюваність





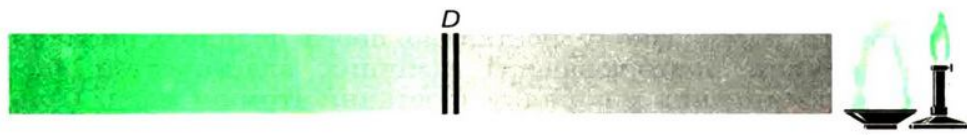
Мал. 135

хімічних властивостей елементів у таблиці Менделєєва можна розглядати як свідчення періодичної повторюваності основних особливостей внутрішньої структури атомів в міру збільшення кількості частинок, які входять до їхнього складу.

Важливим фактором, який свідчить про складну внутрішню будову атомів, було відкриття лінійчастих спектрів. Дослідження показали, що під час нагрівання до високої температури пара будь-якого хімічного елемента випускає світло, вузький пучок якого розкладається призмою на кілька вузьких пучків світла різного кольору (мал. 135). Сукупність спостережуваних при цьому різнокольорових ліній називається **лінійчастим спектром випромінювання**. Він є індивідуальним для кожного хімічного елемента і не збігається зі спектром випромінювання жодного іншого хімічного елемента. Кожна окрема лінія в лінійчастому спектрі випромінювання утворюється світлом з однією довжиною хвилі. Отже, джерело світла з лінійчастим спектром випромінювання випускає електромагнітні хвилі не з якими завгодно частотами, а тільки з кількома цілком певними  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ .

У разі пропускання білого світла з суцільним спектром крізь пару речовини спостерігається виникнення темних ліній на фоні суцільного спектра випромінювання (мал. 136). Темні лінії розміщені точно в тих самих місцях, в яких спостерігалися світлі лінії спектра випромінювання даного хімічного елемента. Такий спектр називається **лінійчастим спектром поглинання**.

Лінійчасті спектри поглинання свідчать про те, що речовина в газоподібному стані здатна поглинати електро-



Мал. 136

магнітне випромінювання лише з такими частотами  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ , які є в лінійчастому спектрі випромінювання даної речовини. Світло з лінійчастим спектром випромінювання випускається речовиною в газоподібному атомарному стані за невисоких тисків, тобто за умови слабкої взаємодії атомів між собою. За таких умов випускання квантів електромагнітного випромінювання є результатом процесів, які відбуваються всередині окремих атомів.

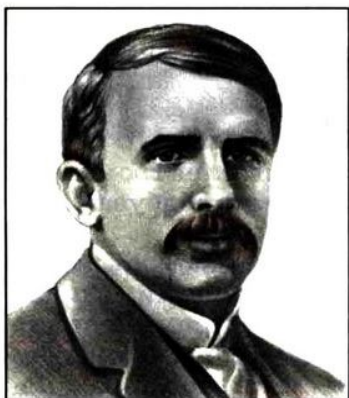
Після відкриття електрона став очевидним зв'язок явищ випромінювання і поглинання світла з електронами. Справді, світло — це електромагнітні хвилі. Випромінювання електромагнітних хвиль відбувається під час прискореного руху електричних зарядів. Можна припустити, що при співударах атомів електрони, які містяться всередині атомів, можуть набувати надмір енергії і потім випромінювати електромагнітні хвилі, здійснюючи гармонічні коливання всередині атомів. Різним довжинам  $\lambda$  хвиль випромінюваного світла відповідають різні частоти коливань електронів всередині атомів. Отже, згідно з теорією будови атома можна розрахувати довжини хвиль у спектрі будь-якого хімічного елемента.

Ще одним доказом складної будови атомів стало відкриття явища радіоактивності — випускання атомами Урану невидимих проникаючих випромінювань. У результаті радіоактивності відбувається перетворення атомів одного хімічного елемента в атоми іншого хімічного елемента. Відкриття явища радіоактивності доводить складність внутрішньої будови атомів, воно спростовувало уявлення про незмінність, неподільність атомів.

## **§ 76 — ДОСЛІДИ Е. РЕЗЕРФОРДА. ЯДЕРНА МОДЕЛЬ АТОМА**

Особливо важливими для з'ясування будови атома були дослідження Е. Резерфорда і його співробітників по вивченню проходження альфа-частинок крізь тонкі плівки золота та інших металів. З курсу хімії відомо, що альфа-частинки виникають під час радіоактивного розпаду атомів (детальніше радіоактивний розпад вивчатиметься пізніше). Ці частинки мають позитивний електричний заряд, за абсолютним значенням удвічі більший від заряду електрона. Маса альфа-частинки приблизно в 7350 раз більша за масу електрона. Падаючи на флюоресціюючий екран, кожна альфа-частинка спричиняє спалах, що дає змогу рахувати альфа-частинки і вивчати їх розподіл. У досліджах Резерфорда альфа-частинки з





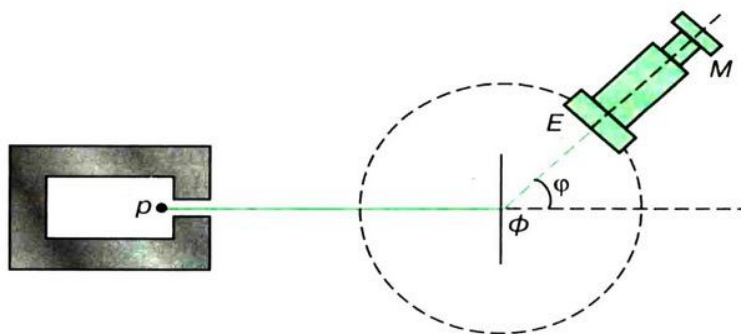
**Ернест  
РЕЗЕРФОРД  
(1871—1937)**

Видатний англійський фізик. Своїми експериментальними відкриттями заклав основи сучасного вчення про будову атома і радіоактивність. Він першим дослідив склад випромінювання радіоактивних речовин, відкрив існування атомного ядра і вперше здійснив штучне перетворення атомних ядер. Його учнями було багато талановитих фізиків різних країн.

однаковою швидкістю спрямовувалися приблизно паралельним пучком на флюоресціюючий екран крізь тоненьку металеву фольгу і підраховувалася кількість частинок, розсіяних під різними кутами.

Схематично дослід Резерфорда показано на малюнку 137. Всередині виїмки в шматку свинцю поміщалась радіоактивна речовина  $p$ , яка служила джерелом альфа-частинок. Внаслідок сильного гальмування у свинці, альфа-частинки могли виходити назовні лише через вузький отвір. На шляху утвореного в такий спосіб вузького, майже паралельного пучка альфа-частинок розміщалися тонка металева (золота, платинова, мідна, срібна) фольга  $\Phi$ , товщина якої становила приблизно  $0,0004$  см — десятки тисяч атомних шарів. Проходячи крізь фольгу, альфа-частинки відхилялися від початкового напрямку руху на різні кути  $\phi$  — розсіювалися. Розсіяні альфа-частинки вдарилися в маленький екран  $E$ , покритий флюоресціюючою речовиною (сульфідом цинку).

Екран закріплювався нерухомо на об'єктиві довгофокус-



Мал. 137



ного мікроскопа  $M$  з малим збільшенням, за допомогою якого велися спостереження спалахів світла під час ударів альфа-частинок в екран. Мікроскоп обертався навколо осі, яка проходила через центр розсіюючої фольги, щоб можна було визначити кількість частинок, розсіяних під різними кутами до напрямку первинного пучка. Весь прилад вміщався в кожух, з якого відкачувалося повітря, і тим самим усувалося гальмування альфа-частинок від зіткнення їх з молекулами повітря.

Досліди показали, що, проходячи крізь плівку завтовшки в кілька тисяч міжатомних відстаней, дуже мало частинок різко змінювали напрям руху, переважна більшість їх майже не відхилялася від початкового напрямку польоту. Наприклад, під час проходження пучка альфа-частинок зі швидкістю  $1,8 \cdot 10^7$  м/с крізь шар золота завтовшки  $6 \cdot 10^{-7}$  м в середньому одна частинка з 20 000 відхилялась (розсіювалась) на кут приблизно  $90^\circ$ . А деякі частинки, їх було надзвичайно мало, відхилялися майже на  $180^\circ$ , тобто іноді альфа-частинки навіть відбивалися від тонкої металевої фольги.

З'ясуємо, з яких причин альфа-частинка може змінити напрям польоту. Альфа-частинка має масу й заряд, тому на неї можуть діяти як сили тяжіння, так і кулонівські. А з електростатики відомо, що кулонівські сили взаємодії заряджених частинок значно переважають гравітаційні. Наприклад, кулонівська сила взаємодії альфа-частинки з протоном чи електроном у  $10^{33}$  раз перевищує силу тяжіння між альфа-частинкою і масивним атомом Плюмбуму. Це означає, що у взаємодії альфа-частинок з атомами фольги гравітаційні сили відіграють мізерну роль і ними можна нехтувати. Отже, відхилення альфа-частинки від початкового напрямку польоту обумовлюється дією електрично заряджених частинок, які містяться всередині атомів.

Які ж це частинки? Як вони розміщені в атомах? На ці запитання і мали відповісти досліди Резерфорда. Очевидно, що заряджена частинка, яка відхиляє альфа-частинку на великий кут, не може бути електроном. Адже маса електрона  $m_e$  приблизно в 7350 раз менша за масу альфа-частинки. Згідно з законами збереження імпульсу і енергії, частинка, яка рухалася зі швидкістю  $v$ , не може під час співударяння надати нерухомій частинці швидкість, більшу за  $2v$ . Отже, під час співударяння з електроном імпульс альфа-частинки

змінюється на значення, яке не перевищує  $2m_e v \approx \frac{1}{3675} m_a v$ .

Ця зміна мізерно мала, тому можна вважати, що внаслідок зіткнення альфа-частинки з електроном її рух практично не зміниться.

Оскільки зіткнення з електронами не змінюють напрям руху альфа-частинок, їхнє відхилення на великі кути обумовлене взаємодією не з електронами, а з позитивно зарядженими частинками.

З дослідів Резерфорда випливало, що хоч атоми в твердому тілі дуже щільно прилягають один до одного, переважна більшість альфа-частинок пронизує, майже не відхиляючись, кілька тисяч атомів. Звідси можна зробити висновок, що атоми майже порожні й лише в центрі їх є позитивно заряджене ядро розміром приблизно  $10^{-15}$  м. З дослідів випливало також, що в ядрі зосереджена майже вся маса атома. Справді, із законів співударяння пружних куль відомо, що куля під час співударяння відлітає назад тільки тоді, коли її маса мала порівняно з масою іншої кулі. Отже, маса позитивно зарядженого ядра, з яким співударяється альфа-частинка, яка відхиляється на кут, близький до  $180^\circ$ , значно перевищує масу самої альфа-частинки.

Досліди Резерфорда, разом з встановленням ядерної структури атома, свідчили ще й про високу міцність атомних ядер, які не руйнувалися навіть під час лобового зіткнення з альфа-частинками, що налітали на ядра з великою швидкістю.

На основі цих досліджень Резерфорд запропонував ядерну «планетарну» модель будови атома. Згідно з цією моделлю, атом складається з позитивно зарядженого масивного ядра, розміри якого порядку  $10^{-15}$  м. Навколо ядра рухаються електрони, утворюючи так звану електронну оболонку атома. Заряд ядра дорівнює за значенням сумарному заряду всіх електронів. У ядрі зосереджена майже вся маса атома (99,95 %).

Планетарна модель атома добре пояснювала результати дослідів з розсіювання альфа-частинок речовиною. Вона давала можливість експериментально визначити заряд ядра, причому було доведено, що він дорівнює порядковому номеру елемента. Однак при всій переконливості планетарної моделі, виникала ціла низка нездоланих труднощів під час пояснення будови атома.

Згідно з теорією Максвелла, будь-яка електрично заряджена частинка, рухаючись з прискоренням, має безперервно випромінювати електромагнітні хвилі. Отже, повинні випромінювати хвилі й електрони, рухаючись в атомах. Між тим, у нормальному стані атоми не випромінюють хвиль. До того ж внаслідок випромінювання електромагнітних хвиль енергія електронів мала б безперервно зменшуватися, в результаті чого електрони мусили б наближатися до ядра. З наближенням до ядра період обертання електронів, а отже, і



частота випромінюваного світла мають безперервно змінюватися. Таким чином, спектр випромінювання резерфордієвого атома мав би бути суцільним, а ми знаємо, що будь-який реальний атом характеризується лінійчастим спектром.

Далі, внаслідок безперервних втрат енергії, електрони мали б упасти на ядро, і атом як планетарна система міг би припинити своє існування. Обчислення показують, що цей процес тривав би близько  $10^{-8}$  с. Проте відомо, що атоми елементів існують тривалий час, який може вимірюватися багатьма мільярдами років.

- ?
1. Які явища свідчать про складну будову атома?
  2. У чому полягає зміст дослідів Е. Резерфорда з розсіювання альфа-частинок і який висновок можна зробити з них?
  3. Яку модель будови атома запропонував Е. Резерфорд?
  4. Які труднощі виникали під час пояснення будови атомів за допомогою моделі атома Резерфорда?

## § 77 — КВАНТОВІ ПОСТУЛАТИ БОРА

Квантові уявлення про процеси в природі набули подальшого розвитку у дослідженнях видатного датського фізика Нільса Бора. Основні дослідні факти, на які спирався Бор, вам уже відомі: атом має планетарну структуру і разом з тим дуже стійкий (атоми можуть існувати необмежено довго, не випромінюючи електромагнітних хвиль); атоми випромінюють і поглинають світло квантами (фотонами), енергія яких дорівнює  $E = h\nu$ ; ізольовані атоми в збудженому стані випромінюють певний набір частот — дають лінійчастий спектр.

Однак послідовної теорії будови атома Бор не запропонував. Він сформулював основні положення нової теорії у вигляді постулатів-тверджень, прийнятих за вихідні положення. Причому і закони класичної фізики ним повністю не відкидалися.

Нові постулати швидше накладали лише певні обмеження на рухи, які допускає класична механіка.

І все ж успіх теорії Бора був вражаючим. Усім вченим стало зрозуміло, що Бор знайшов правильний шлях розвитку теорії, який привів згодом до створення стрункої теорії руху мікрочастинок — квантової механіки.

Перший постулат Бора такий: атом може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових, станах, кожному з яких відповідає певна енергія  $E_n$ . В стаціонарно-





**НІЛЬС  
БОР  
(1885—1962)**

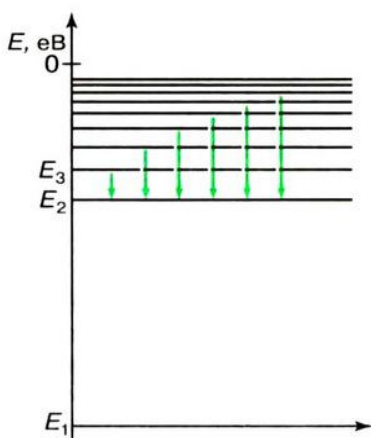
Видатний данський фізик. Створив першу квантову теорію атома і брав активну участь в опрацюванні основ квантової механіки. Поряд з цим, вчений багато зробив для розвитку теорії атомного ядра і ядерних реакцій. Зокрема, розвинув теорію поділу атомних ядер. В Копенгагені створив школу фізиків, чим сприяв розвитку співробітництва між фізиками всього світу.

**му стані атом не випромінює електромагнітних хвиль.** Цей постулат явно суперечить класичній механіці: енергія рухомих електронів може бути якою завгодно. Суперечить він і електродинаміці Максвелла, оскільки допускає можливість прискореного руху електронів без випромінювання електромагнітних хвиль.

Другий постулат Бора: **при переході атома з одного стаціонарного стану в інший випромінюється або поглинається квант електромагнітної енергії** суперечить електродинаміці Максвелла, згідно з якою частота випромінюваного світла дорівнює частоті обертання електрона по орбіті. За теорією Бора, частота пов'язана лише зі зміною енергії атома.

З першого постулату Бора випливає, що існують дискретні стаціонарні стани атома, в яких він має певні значення енергії  $E_1, E_2, E_3, \dots$  і енергії не випромінює. Для наочності прийнято зображати значення енергій атомів у вигляді горизонтальних прямих (енергетичних рівнів), розташованих одна над одною на відстані, пропорційній різниці енергій (мал. 138), де  $E_1$  — енергія атома в незбудженому (основному) стані (вона має найменше для даного атома значення),  $E_2, E_3$  — енергія збуджених станів атома.

Перехід атома зі стану з меншою енергією в стан з більшою енергією можливий лише під час поглинання атомом енергії. Випромінювання відбувається у разі



Мал. 138

переходу атома зі стану з більшою енергією в стан з меншою енергією.

Енергія фотона дорівнює різниці енергій атома в двох його стаціонарних станах:

$$h\nu_{\text{кп}} = E_{\text{к}} - E_{\text{п}},$$

де  $k$  і  $p$  — номери його стаціонарних станів. При  $E_{\text{к}} > E_{\text{п}}$  відбувається випромінювання фотона, а при  $E_{\text{к}} < E_{\text{п}}$  — його поглинання.

Частота коливань, яка відповідає випущеному (чи поглинутому) кванту випромінювання, визначається формулою

$$\nu_{\text{кп}} = \frac{E_{\text{к}} - E_{\text{п}}}{h}. \quad (77.1)$$

?

1. У чому зміст постулатів Бора? 2. Від чого залежить частота випромінюваного атомом світла? 3. В якому стані енергія електрона менша — в основному (стійкому) чи збудженому?

## Вправа 18

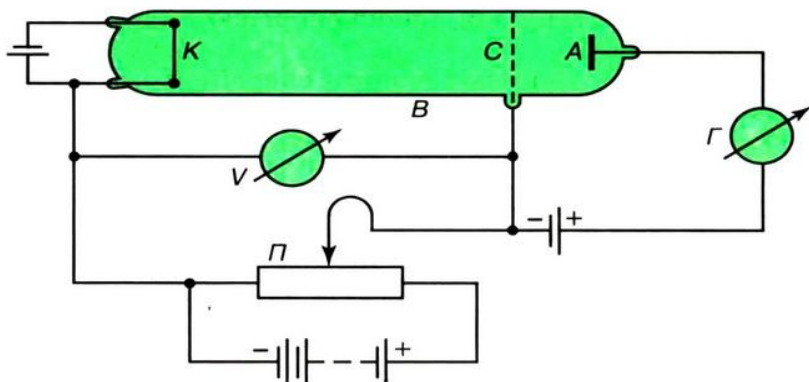
1. Під час переходу електрона в атомі Гідрогену з одного стаціонарного енергетичного рівня на інший енергія атома зменшується на  $\Delta E = 1,89$  еВ. При цьому атом випромінює фотон. Визначте довжину хвилі  $\lambda$  цього випромінювання.

2. Енергія стійкого (основного) стану Гідрогену дорівнює  $E_1 = -13,6$  еВ, а першого збудженого —  $E_2 = -3,5$  еВ. Яку найменшу енергію треба надати атому Гідрогену, щоб перевести його в збуджений стан? Чи може атом Гідрогену поглинути енергію 8 еВ? Чому дорівнює енергія йонізації атома Гідрогену?

## § 78 — ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ПОСТУЛАТІВ БОРА. УСПІХИ І ТРУДНОЩІ У СТАНОВЛЕННІ ТЕОРІЇ БОРА

. Ідеї Бора про стаціонарні стани атома, про дискретні значення його енергії в 1913 р. дістали експериментальне підтвердження у досліді Д. Франка і Г. Герца. Ідея цього дослідження полягає у вимірюванні кількості енергії, яка передається атомом під час його співударянь з електронами.]

Якщо стаціонарні стани атомів справді існують, то електрони, співударяючись з атомами, втрачатимуть енергію дискретно, певними порціями. Якщо ж стаціонарних станів не існує, втрати енергії під час співударянь можуть бути якими завгодно. ]



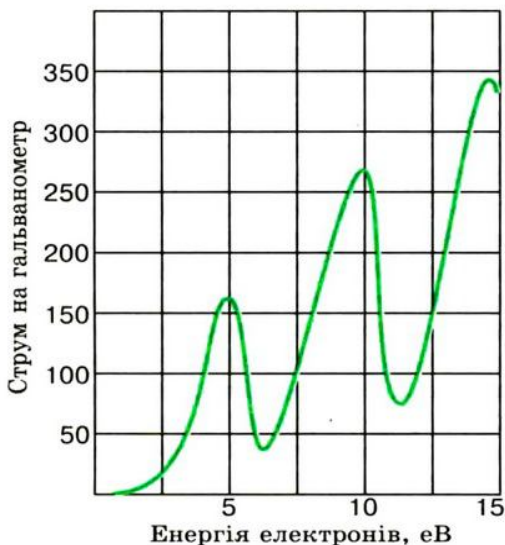
Мал. 139

Схему досліду Франка і Герца показано на малюнку 139. Електрони, випромінювані розжареним катодом  $K$ , прискорюються електричним полем між катодом  $K$  і сітчастим електродом  $C$ . Між сіткою  $C$  і анодом  $A$  створюють електричне поле, яке гальмує електрони. Якщо на шляху від  $K$  до  $A$  електрони внаслідок непружних співударень з атомами газу, що заповнює посудину, втратять свою енергію, вони не зможуть подолати гальмівне поле між  $C$  і  $A$  і потраплять на сітку  $C$ . Тому за показаннями гальванометра  $\Gamma$  можна реєструвати електрони, які втратили енергію внаслідок непружного удару. Коли електрони втрачають енергію, вони затримуються гальмівним полем, і сила струму через гальванометр зменшується. Результати дослідження Франка і Герца для випадку заповнення балона  $B$  парю ртуті зображені на малюнку 140 у вигляді кривої залежності сили струму від кінетичної енергії електронів. Крива має досить характерний вигляд: ряд різких максимумів, розташованих один від одного на відстані приблизно 4,9 еВ. Проаналізуємо, що ж означає вигляд цієї кривої?

Спочатку, в міру збільшення кінетичної енергії електронів, сила струму через гальванометр  $\Gamma$  зростає, оскільки все більша й більша кількість електронів проходить через чарунки сітки  $C$ . Однак таке зростання сили струму відбувається лише до енергії 4,9 еВ. Якщо й далі збільшувати кінетичну енергію електронів, то сила струму не зростає, а різко зменшується. Потім, в міру збільшення енергії електронів, сила струму знову починає зростати і знову різко зменшується у разі досягнення енергії 9,8 еВ. Наступне зменшення сили струму настає тоді, коли енергія електронів досягає значення 14,7 еВ.

Зростання сили струму до максимуму при 4,9 еВ означає,





Мал. 140

що поки енергія електронів не досягає 4,9 еВ, вони зазнають у просторі  $K-C$  лише пружних зіткнень, внаслідок яких електрони не втрачають енергії. Отже, всі електрони, які проходять через чарунки сітки  $C$ , доходять до анода  $A$  і проходять через гальванометр. Як тільки кінетична енергія електронів досягає 4,9 еВ, відбуваються непружні зіткнення, і електрони повністю віддають енергію атомам Гідраргіруму. Зрозуміло, що електрон, втративши кінетичну енергію, не зможе подолати гальмівне поле у просторі  $C-A$  і не досягне анода.

Подальше збільшення кінетичної енергії електронів спричиняє зростання сили струму доти, поки енергія не досягне значення 9,8 еВ. Це зростання відбувається тому, що електрон, втративши частину енергії внаслідок непружного зіткнення, має її ще достатньо для подолання гальмівного поля у просторі  $C-A$ . Різке зменшення сили струму при досягненні енергії 9,8 еВ відповідає випадкам, коли електрони внаслідок зіткнень з кількома атомами Гідраргіруму зазнають двох непружних співударянь, у кожному з яких втрачають по 4,9 еВ. З цього дослідів випливає, що під час зіткнення з атомом Гідраргіруму електрони втрачають енергію порціями в 4,9 еВ, а атоми поглинають енергію такими самими порціями.

Аналогічні дослідів були проведені й з іншими газоподібними речовинами. Було встановлено, що в парі калію електрони втрачають енергію порціями в 1,63 еВ; в парі натрію — порціями в 2,12 еВ; в гелії — порціями в 21 еВ.

Отже, досліди Франка і Герца підтвердили постулат Бора про стаціонарні стани і дискретність енергетичних рівнів атомів. Вони також експериментально підтвердили другий постулат Бора про дискретний характер випромінювання атомів.

Теорія Бора блискуче розв'язала проблему будови атома Гідрогену і спектра його випромінювання. Їй удалося пояснити наявність серій спектральних ліній в спектрі Гідрогену і дістати чудову узгодженість між значеннями частот цих ліній, розрахованих теоретично і вимірянних на досліді.

Теорія Бора дає можливість якісно (і до того ж дуже наочно) пояснити загальні риси будови більш складних (багатоелектронних) атомів і їх спектрів, зокрема, дає можливість обґрунтувати закономірності розміщення хімічних елементів у періодичній системі. Тому теорія Бора відіграла величезну роль у розвитку вчення про будову атомів.

Разом з успіхами в поясненні закономірностей спектра Гідрогену теорія Бора з самого початку її виникнення містила деякі істотні недоліки. За цією теорією можна пояснити не всі властивості атома Гідрогену, а, по суті, лише лінійчасті спектри елементів першої групи періодичної системи, та й то тільки якісно, і не можна пояснити будову багатоелектронних атомів.

Найбільшим недоліком теорії Бора є внутрішня логічна суперечність, непослідовність. У ній використовуються одночасно класичні і квантові уявлення, які суперечать одні одним. Ці недоліки було усунуто за допомогою квантової механіки, яка не тільки пояснювала всі тонкощі в будові атома Гідрогену, а й успішно описувала багатоелектронні атоми, молекули тощо.

?

1. У чому полягала ідея досліду Франка і Герца? Який висновок можна було зробити на основі результатів цього досліду?
2. У чому полягають істотні недоліки теорії Бора?

## § 79 — СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Кожен хімічний елемент має свій характерний лінійчастий спектр випромінювання. Лінійчастий спектр складної речовини складається з лінійчастих спектрів хімічних елементів, які містяться в ній. Тому за лінійчастим спектром речовини можна визначити, які хімічні елементи входять до її складу. Такий метод визначення хімічного складу речовини називається *спектральним аналізом*.



Спектральний аналіз широко використовується в різних галузях науки й техніки. Він надзвичайно чутливий, дає змогу виявити наявність мільйонної частки міліграма хімічного елемента в речовині, причому кількість досліджуваної речовини, необхідної для проведення спектрального аналізу, також дуже незначна (часто досить  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  г). У цьому одна з його переваг перед хімічними методами аналізу. Друга перевага спектрального аналізу та, що за його допомогою можна визначити хімічний склад тіл, які знаходяться на будь-якій великій відстані, достатньо лише, щоб промені від них потрапляли в спектральний апарат. Тому цей метод широко використовуюється в астрономії для визначення хімічного складу Сонця, зір, їх температури, руху в просторі тощо.

Спектральний аналіз газів і пари можна проводити і за спектрами поглинання. Спектри поглинання широко використовуються для дослідження будови речовин і для технічного контролю складу речовин на виробництві.

Нині визначено спектри всіх хімічних елементів і складено спеціальні таблиці або атласи спектральних ліній, в яких наведено точне розміщення ліній спектра кожного хімічного елемента, або відповідні їм довжини хвиль. Цими таблицями чи атласами і користуються для проведення спектрального аналізу. У деяких випадках спектральний аналіз проводиться порівнянням спектрів досліджуваного матеріалу і еталонного спектра зразка з відомим вмістом хімічних елементів.

За останні десятиліття дістав розвиток кількісний спектральний аналіз, який ґрунтується на тому, що від вмісту елемента в досліджуваній речовині залежить інтенсивність його спектральних ліній. Порівнюючи її з інтенсивністю спектральних ліній спеціальної еталонної таблиці, можна визначити масову частку даного елемента в досліджуваному зразку.

- ? 1. Який спектр випромінює розжарений шматок заліза? розплавлене залізо? пара заліза? 2. Як можна дістати лінійчастий спектр речовини? 3. У чому перевага спектрального аналізу перед хімічними методами аналізу?

## § 80 — ПОНЯТТЯ ПРО КВАНТОВІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Наявність дискретних енергетичних рівнів електронів в атомах і можливість переходу електронів з рівня на рівень з випромінюванням електромагнітних хвиль дали можливість створити принципово нові джерела випромінювання —



к в а н т о в і г е н е р а т о р и, а б о л а з е р и. Розглянемо коротко фізичні основи їх дії.

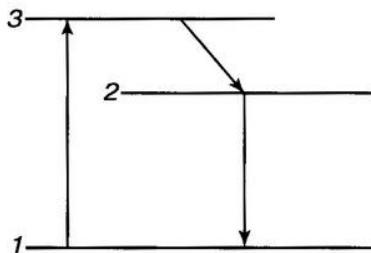
Припустимо, що є деяка система атомів (молекул чи йонів), здатна мати лише два енергетичні рівні (стани): нижній рівень  $E_1$ , який відповідає стаціонарному, незбудженому стану, і верхній рівень  $E_2$ , який відповідає збудженому стану. Відомо, що електрон може здійснювати переходи між цими рівнями. Однією з причин, яка викликає такі переходи, може бути дія на електрон світла. Результат цієї дії залежить від того, на якому рівні в початковий момент перебуває електрон. Якщо електрон міститься на нижньому рівні, то під дією світла цілком певної довжини хвилі він перейде на верхній, поглинувши квант енергії. Цей процес є звичайним поглинанням світла, наприклад у кольоровому склі, яке пропускає світло лише того кольору, в який воно саме забарвлене, і поглинає решту кольорів.

Якщо ж електрон атома чи молекули в момент дії на нього світла перебуває на верхньому рівні, то світло змусить електрон «перестрибнути» на нижній рівень і випромінити таку саму світлову хвилю, яка впала на атом. Виникаюча під час такого випромінювання світлова хвиля не відрізняється від падаючої на атом хвилі ні частотою, ні фазою, ні поляризацією. Якщо на верхньому рівні перебуває одночасно велика кількість електронів, то під дією світла всі вони строго синхронно переходять на нижній рівень, випромінюючи однакові електромагнітні хвилі, які не можна відрізнити від тих, що падають на систему. Такий процес, названий *вимушеним випромінюванням*, є найбільш важливим для створення квантових генераторів світла.

Отже, під дією світла електрони, які перебували на нижніх рівнях, переходять на верхні, поглинаючи енергію світла, а електрони, які перебували на верхніх рівнях, переходять на нижні, випромінюючи світло і збільшуючи цим самим енергію падаючого світла. Таким чином, процеси поглинання і випромінювання світла конкурують між собою. А оскільки електронів на нижніх рівнях більше, ніж на верхніх, то переважатиме поглинання світла. Щоб дістати підсилення світла, необхідно знайти спосіб відсортувати збуджені атоми, тобто створити активне середовище, в якому переважали б збуджені атоми. Якщо пропускати крізь таке середовище проміння з відповідною переходові частотою, воно підсилюватиме це випромінювання.

Такий метод підсилення випромінювання знайшов застосування в молекулярних генераторах, де здійснюється сортування молекул аміаку, попередньо підігрітого в спеціальній печі. Молекули аміаку, переведені в різні енергетичні стани,

пропускають через неоднорідне електричне поле, для створення якого використовують конденсатори особливої конструкції. Під час проходження через такий конденсатор пучка молекул аміаку збуджені молекули розмістяться переважно вздовж його осі, а незбуджені відхилятимуться до країв конденсатора. Якщо вздовж такого пучка збуджених молекул пропустити проміння з відповідною довжиною хвилі ( $\lambda = 1,27 \cdot 10^{-2}$  м), то відбудуватиметься його підсилення.



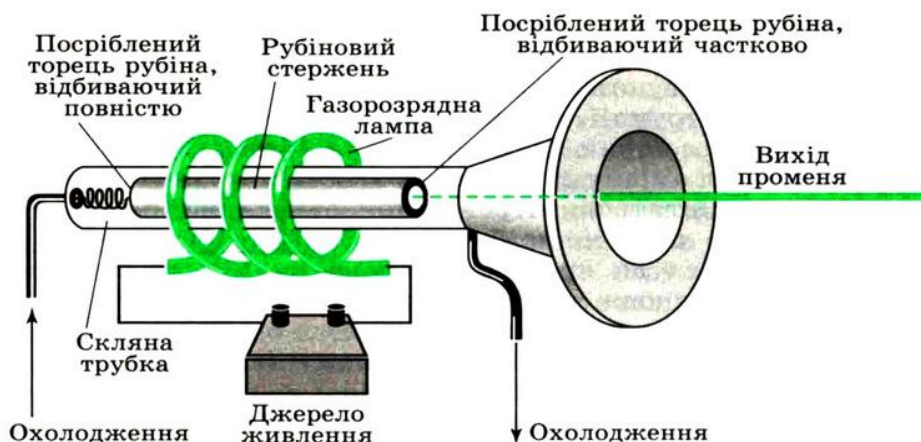
Мал. 141

Однак такий метод одержання активного середовища, в якому використовуються двоєрівневі системи (загальна кількість рівнів завжди велика, але йдеться про рівні, які «працюють»), має істотні недоліки, до того ж він не може бути застосований у випадку лазера на твердих тілах і рідинах. Більш вдалим методом збудження квантових систем для одержання активного середовища виявився запропонований лауреатами Нобелівської премії М. Г. Б а с о в и м і О. М. П р о х о р о в и м метод трьох рівнів.

Припустимо, що є система з трьома енергетичними рівнями (мал. 141). Якщо цю систему освітити світлом від зовнішнього джерела з частотою  $\nu = \frac{E_3 - E_1}{h}$ , яка відповідає переходові між рівнями 1 і 3, то частина електронів перейде на рівень 3. За відсутності зовнішніх впливів час перебування системи на різних рівнях неоднаковий. На рівні 3 квантова система (атом чи молекула) «живе» дуже мало, порядку  $10^{-8}$  с, після чого самодовільно без випромінювання переходить у стан 2. Час життя в стані 2 в  $10^5$  раз більший, тобто становить близько  $10^3$  с. Перехід же із стану 2 в стан 1 під впливом електромагнітної хвилі супроводжується випромінюванням, що й використовується в лазерах. Підсилення випромінювання відбувається внаслідок вивільнення надміру енергії, набутої системою під час початкового збудження її електромагнітним випромінюванням від зовнішнього джерела.

Розглянемо коротко роботу одного з найбільш поширених типів оптичних квантових генераторів на твердих кристалічних речовинах — рубінового лазера.

Рубіновий лазер (мал. 142) складається із стержня з плоскопаралельними торцями і системи збудження (накачування), в ролі якої звичайно використовується ксенонова лампа-спалах з джерелом живлення. Один торець стержня роблять дзеркальним, інший — напівпрозорим.

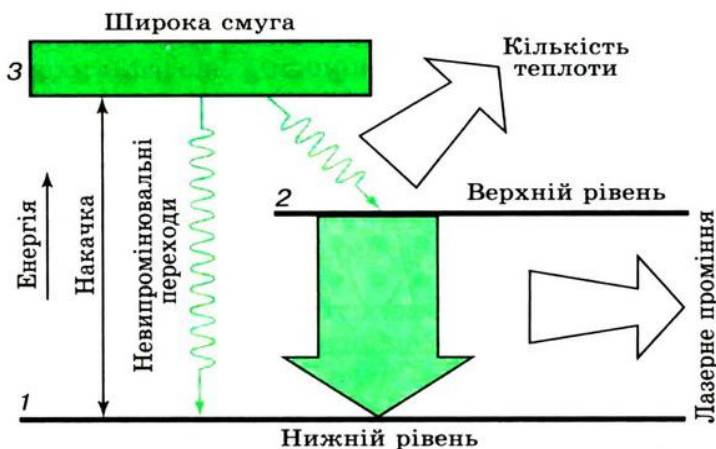


Мал. 142

Рубін є кристалом оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з домішками атомів Хрому. Від вмісту Хрому в кристалі залежить його забарвлення. Звичайно використовується блідорожевий рубін, який містить близько 0,05 % Хрому. Активною (робочою) речовиною служать йони Хрому, оскільки саме вони утворюють трьохрівневу систему з необхідними властивостями. Рубіновий стержень вміщують у спіральну імпульсну ксенонову лампу, витки якої охоплюють його з усіх боків. Як джерело живлення лампи використовують конденсатор великої ємності. Короткочасний імпульс струму від батареї конденсаторів викликає яскравий синьо-зелений спалах лампи, який триває тисячні частки секунди. За цей час лампа споживає енергію в кілька тисяч джоулів, більша частина якої затрачається на нагрівання приладу. Друга, менша частина, у вигляді блакитного і зеленого випромінювання, поглинається рубіном. Ця енергія і забезпечує збудження йонів Хрому.

На малюнку 143 показана схема енергетичних рівнів Хрому. В нормальному, не збудженому стані йони Хрому перебувають на нижньому рівні 1. Під час опромінення рубін світлом ксенонової лампи, яке містить зелену частину спектра, атоми Хрому збуджуються і переходять на верхній рівень 3, який відповідає поглинанню світла з довжиною хвилі  $5,6 \cdot 10^{-6}$  м. З рівня 3 збуджені атоми Хрому за час порядку  $10^{-8}$  с переходять на рівень 2. Це так званий безвипромінювальний перехід, у разі якого йони Хрому віддають частину своєї енергії кристалічній решітці, підвищуючи її внутрішню енергію. Таким чином, рівень 2 виявляється більш «заселеним» збудженими атомами, ніж рівень 1, і





Мал. 143

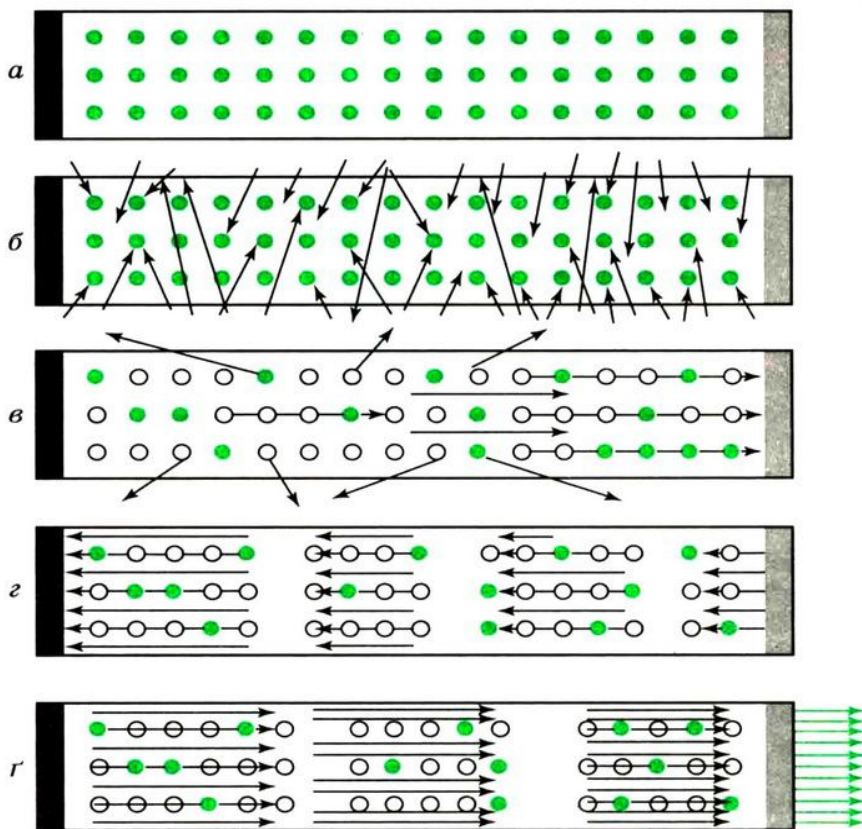
створюються необхідні умови для інтенсивних індукованих переходів.

Ми знаємо, що така система вкрай нестійка. Ймовірність самочинних переходів  $2 \rightarrow 1$  в будь-який момент часу дуже велика. Перший же фотон, який з'являється під час самочинного переходу, виб'є із сусіднього атома другий фотон і переведе атом в основний стан. Далі ці два фотони виб'ють ще два, після чого їх буде чотири, і т. д. Процес наростає практично миттєво.

Фотони, напрям польоту яких на початку їх виникнення не збігається з віссю стержня, покинуть його через бічні стінки і не відіграють у подальших процесах ніякої ролі. Фотони, які рухаються паралельно осі стержня, викликають індуковане випромінювання. Перша хвиля випромінювання, досягнувши відбиваючої поверхні, повертається назад і викликає подальше збільшення числа індукованих переходів і потужності випромінювання. Відбивання від відбиваючих поверхонь стержня повторюється багато разів, і потужність випромінювання зростає доти, поки більшість збуджених йонів Хрому не віддадуть енергію, набуту в момент збудження. Через посріблений напівпрозорий торець стержня вивереться промінь дуже високої інтенсивності. Напрямок променя буде строго паралельним осі стержня (мал. 144).

Промінь лазера має такі важливі *властивості*:

1. Випромінювання лазера поширюється вузьким пучком. Розрахунки показують, що можна дістати лазерний промінь з кутом розходження близько  $10^{-4}$  рад. Діаметр пучка з такою спрямованістю дорівнюватиме приблизно 40 км



Мал. 144

на відстані порядку 400 000 км від лазера (тобто приблизно на відстані Місяця від Землі). За допомогою лінз паралельний пучок випромінювання лазера можна сфокусувати в такий гострий пучок променів, який на відстані 400 000 км створить пляму діаметром близько 2 км. Висока спрямованість лазерного променя має велике значення для створення систем зв'язку й локації, які працюють на великих відстанях.

2. Випромінювання лазера має високу монохроматичність, зумовлену тим, що в лазерах атоми чи молекули випромінюють світло узгоджено, тоді як у звичайних джерелах світла атоми випромінюють світло незалежно один від одного.

3. Випромінювання лазера має високу когерентність. Це випромінювання є просторово когерентним, тому що всі

фронти хвиль плоскі і перпендикулярні до напрямку поширення хвиль. Це випромінювання когерентне і в часі, тому що існує строга фазова відповідність між частотами хвиль, випущених в один момент часу, і хвилею, випроміненою через певний інтервал часу.

4. Висока когерентність і монохроматичність лазерного випромінювання дають можливість сфокусувати пучок світла лазера системою звичайних дзеркал і лінз і дістати дуже маленьке зображення предмета, яскравість якого більша за яскравість джерела світла.

5. Лазери є найбільш потужними штучними джерелами випромінювання. Нині створені лазери з імпульсами світла тривалістю  $10^{-8}$  с і енергією в декілька десятків джоулів. Це означає, що миттєва потужність в імпульсі досягає мільярда ват. Оскільки випромінювання лазера може бути сфокусоване на площах з діаметром  $10^{-5}$  м, то можна дістати густини потоку до  $10^{19}$  Вт/м<sup>2</sup>, а амплітуду напруженості електричного поля світлової хвилі — до  $10^{11}$  В/м. Це поле більшої напруженості, ніж те, яке зв'язує в атомах і молекулах зовнішні електрони. Тому воно чинить жахливі руйнування в будь-яких (прозорих і непрозорих) речовинах. Світловий тиск, який з такими труднощами вимірюється в звичайному потоці випромінювання, в сфокусованому досягає мільйона атмосфер. За допомогою таких імпульсних лазерів легко зробити отвори в надтвердих металах і алмазах.

Незвичайні властивості лазерного проміння зумовили надзвичайно різноманітні застосування лазерів у різних галузях народного господарства. Великі потужності лазерного променя використовуються для обробки надтвердих матеріалів: алмазу, корунду, спеціальних сплавів. Лазерний промінь знайшов застосування в радіоелектронній промисловості для з'єднання блоків напівпровідникових схем.

У медицині за їх допомогою здійснюється своєрідне точкове зварювання тканин: приварюється сітківка ока у разі її відшарування. Лазерне проміння має застосування у лікуванні ракових пухлин, в стоматології тощо.

Перспективним є застосування лазерного проміння в засобах зв'язку. Лазерний зв'язок на малих відстанях використовується в міських системах телефонного зв'язку. В багатьох країнах світу ведуться роботи по створенню телевізійних систем, оптичних обчислювальних машин тощо на основі використання лазерів.

Застосовуючи лазери, дістають кольорові об'ємні зображення предметів у фотографії, кіно- і телебаченні, використовуючи когерентність лазерного променя (так звана голографія).



Ми розглянули принцип роботи лише одного типу рубінових лазерів. Існують й інші конструкції рубінових лазерів, все ширше застосовуються лазери з використанням у них інших кристалічних речовин. Створено лазери, в яких активною речовиною є скло з домішками тривалентних рідкоземельних елементів (Неодиму, Ітербію, Гадолінію тощо).

Поряд з лазерами, які працюють в імпульсному режимі, створюються лазери безперервного випромінювання. — газові і напівпровідникові.

## § 81 — РАДІОАКТИВНІСТЬ

Одним з найбільш переконливих доказів складної будови атомів стало відкрите у 1896 р. французьким фізиком А. Б е к к е р е л е м явище природної радіоактивності. З цим явищем ви вже частково ознайомилися в курсі хімії 9-го класу. Розглянемо його детальніше.

А. Беккерель вивчав світіння різних речовин, попередньо опромінюючи їх сонячним світлом. У ході цих досліджень він виявив, що солі Урану без попереднього їх освітлення випускають промені, здатні йонізувати повітря, діяти на фотопластинку, викликати світіння деяких речовин. Перші ж дослідження показали, що це випромінювання має велику проникаючу здатність — проникає крізь тонкі металеві пластинки.

Беккерель досліджував Уран і багато його солей як у твердому стані, так і в розчинах. У кожному випадку з'ясувалось, що інтенсивність випромінювання пропорційна концентрації Урану. Електронні оболонки Урану в різних його хімічних сполуках неоднакові, проте це не впливало на характер випромінювання. З цього факту можна було зробити важливий висновок, що властивість Урану самочинно випускати промені зумовлена лише структурою його ядра.

Чудовою властивістю виявленого випромінювання була його спонтанність і сталість, повна незалежність від зовнішніх умов: освітленості, температури, тиску, напруженості електричного й індукції магнітного полів тощо. Ця властивість самочинно випускати випромінювання була названа *радіоактивністю*, а речовини, які випускають таке випромінювання, були названі *радіоактивними*.

Пошуками радіоактивних речовин і дослідженням їх випромінювань відразу ж зайнялися багато вчених в усьому світі. Особливо плідною виявилася праця французьких вчених П'єр а К ю р і та його дружини М а р і ї С к л о д о в с ь к о ї - К ю р і. В 1898 р. вони відкрили два нові радіоактивні елементи — Полоній ( $^{210}_{84}\text{Po}$ ) і Радій ( $^{206}_{88}\text{Ra}$ ), радіоактивність яких виявилася значно сильнішою, ніж в

**Марія  
СКЛОДОВСЬКА-КЮРІ  
(1867—1934)**

Видатний фізик і хімік. Зробила значний внесок у створення вчення про радіоактивність. Вона — перша жінка-професор Паризького університету. Разом з чоловіком П. Кюрі відкрила нові радіоеlementи Полоній і Радій і досліджила їхні властивості. Опрацювала класичний метод обробки і аналізу уранових руд, протягом ряду років досліджувала властивості радіоактивних випромінювань, їх дію на живі клітини тощо.

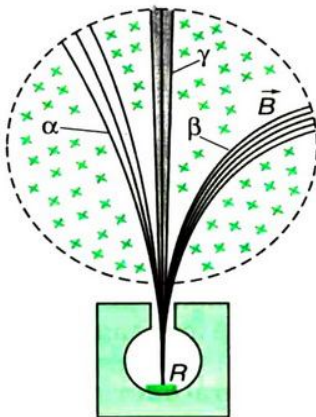


Урану. Згодом з'ясувалося, що радіоактивність мають ще багато елементів: Торій, Актиній тощо — всього близько сорока елементів.

Явище радіоактивності почало широко вивчатися, причому особлива увага приділялася встановленню природи випромінювань радіоактивних елементів. Дослідження методом відхилення в магнітному полі, поставлені М. Склодовською-Кюрі, а згодом Е. Резерфордом, показали, що радіоактивні елементи випускають три види променів, які були названі умовно першими трьома літерами грецького алфавіту: альфа ( $\alpha$ )-, бета ( $\beta$ )-, гамма ( $\gamma$ )-промені.

Дослід з відхилення радіоактивних променів у магнітному полі проводився так. Радіоактивний препарат  $R$  поміщався на дно вузького каналу (мал. 145), просвердленого в шматку свинцю. Через товстий шар свинцю радіоактивне проміння не проходить, а виходить лише вузьким пучком із каналу. Навпроти каналу поміщалася фотопластинка, а в просторі між свинцем і пластинкою (тобто на шляху випромінювання) створювалося потужне магнітне поле, перпендикулярне до пучка (на мал. 145 індукція поля спрямована перпендикулярно до площини малюнка від нас). Вся установка поміщалася в камеру, з якої відкачувалося повітря.

За відсутності магнітного поля радіоактивне проміння викликало почорніння пластинки в точці, розміщеній навпроти каналу. Якщо ж створювалося магнітне поле, то пучок



Мал. 145

розпадався на три частини. Дві частини первинного потоку відхилялися в протилежні боки. Це незаперечно вказувало на те, що ці частини є потоками електрично заряджених частинок протилежного знаку. За напрямом відхилення в магнітному полі можна легко визначити знак заряджених частинок. Виявилось, що потік негативно заряджених частинок відхилявся в магнітному полі значно сильніше, ніж потік позитивно заряджених. Третя частина потоку не відхилялася магнітним полем, що свідчило про відсутність у неї електричного заряду. Позитивно заряджена частина потоку дістала назву альфа-променів, негативно заряджена — бета-променів і нейтральна — гамма-променів.

Подальші дослідження дали змогу з'ясувати фізичну природу альфа-, бета- і гамма-проміння.

**Альфа-частинки.** Для з'ясування природи альфа-частинок було експериментально визначено заряд частинки і відношення цього заряду до її маси. Вимірювання показали, що заряд частинки позитивний і в два рази перевищує за значенням заряд електрона, тобто  $q = 2e = 3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл.

У результаті дослідів з відхилення альфа-частинок у магнітному полі було визначено відношення заряду частинки до її маси  $\frac{q}{m}$ . За цими даними була визначена маса частинки  $m$ . Вона виявилася рівною масі двохзарядного йона  $\text{He}^{++}$ , тобто ядра атома Гелію.

Характерною ознакою альфа-частинок є їх енергія. Вона дуже велика — порядку кількох мільйонів електрон-вольт (швидкість порядку  $10^7$  м/с). Різні радіоактивні речовини випромінюють альфа-частинки різної енергії, але всі альфа-частинки, випущені даною радіоактивною речовиною, мають цілком певну енергію. Найчастіше радіоактивна речовина випромінює не одну, а кілька груп альфа-частинок, які мають кожна цілком певну початкову енергію.

Пролітаючи крізь речовину, альфа-частинка поступово втрачає енергію, затрачаючи її на йонізацію молекул речовини, і, зрештою, зупиняється. На утворення однієї пари йонів у повітрі затрачається в середньому 35 еВ. Таким чином, альфа-частинка утворює на своєму шляху приблизно  $10^5$  пар йонів. Зрозуміло, що чим більша густина речовини, тим менший шлях частинок до зупинки. Так, у повітрі за нормального тиску шлях частинки становить кілька сантиметрів, у твердій речовині — всього кілька десятків мікрон (альфа-частинки затримуються звичайним аркушем паперу).

**Бета-частинки.** Вимірювання питомого заряду  $\frac{q}{m}$  для бета-частинок з відхилення їх у магнітному полі показали, що це відношення таке саме, як і для електронів. Бета-про-



мені і є потоком електронів, подібним до катодних променів. Відрізняються бета-промені від катодних лише значно більшою енергією. Енергія бета-електронів може досягати кількох мільйонів електрон-вольт (швидкість наближається до швидкості світла і становить 0,999 с).

На відміну від альфа-частинок, випромінювані даною радіоактивною речовиною бета-електрони мають не одне значення енергії, а можуть мати енергію від 0 до деякого найбільшого значення  $E_m$ . Максимальна енергія  $E_m$  є характерною сталою для даного хімічного елемента.

Внаслідок відносно малої маси бета-частинок під час проходження крізь речовину можливе відхилення їх на значний кут — розсіювання в різні боки. Траєкторії бета-частинок у речовині дуже покручені, для них не існує певної довжини вільного пробігу. Проте сумарна товщина шару, на яку бета-частинка проникає в речовину, в десятки разів перевищує пробіг альфа-частинок.

**Гамма-промені.** Відсутність відхилень в електричному і магнітному полях і величезна проникаюча здатність гамма-променів вказували на те, що за своєю природою вони аналогічні до рентгенівських. І справді, за допомогою кристалічних решіток удалося спостерігати дифракцію гамма-променів і визначити їх довжину. Вона виявилася порядку  $10^{-10}$  м, тобто в десятки разів меншою, ніж у жорстких рентгенівських променів. Це означало, що їх квантові властивості виявляються ще більшою мірою, ніж у рентгенівських променів.

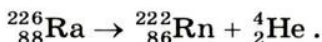
Природа радіоактивного проміння вказує на те, що його причиною є самочинний розпад атомних ядер радіоактивних елементів. При цьому деякі з ядер випускають тільки альфа-частинки, інші — бета-частинки. Є радіоактивні ядра, які випускають і ті й ті частинки. Більшість ядер одночасно випускає і гамма-промені. У радіоактивних ядер, які утворюються штучно, спостерігаються й інші радіоактивні процеси, наприклад виліт протонів або позитронів. Про штучні радіоактивні елементи йтиметься пізніше.

?

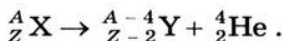
1. Що розуміють під радіоактивністю?
2. Яким методом можна розділити радіоактивне випромінювання на складові частини?
3. Яка фізична природа альфа-, бета- і гамма-променів?
4. Що є причиною радіоактивного випромінювання?

Ми вже знаємо, що альфа-, бета- і гамма-промені випускаються атомними ядрами радіоактивних елементів. Це цілком очевидно у випадку альфа-частинок, оскільки в електронній оболонці їх просто немає. Ядерне походження бета-частинок доведено хімічними дослідями. Але виникає запитання: що ж відбувається з ядром хімічного елемента під час радіоактивного випромінювання?

Щоб відповісти на це запитання, скористаємося законами збереження електричного заряду і маси. Оскільки альфа-частинка є ядром атома Гелію, її заряд дорівнює 2 елементарним електричним зарядам і масове число дорівнює 4 одиницям. Отже, в результаті вилітання альфа-частинки ядро даного радіоактивного елемента перетворюється в ядро нового хімічного елемента з меншим на дві одиниці зарядом і меншим на чотири одиниці масовим числом. Таким чином, утворюється новий елемент, який міститься в Періодичній системі на дві клітинки раніше за даний радіоактивний елемент. Наприклад, для альфа-розпаду Радію маємо:

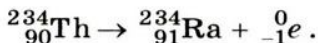


Тут зліва, внизу, вказані порядкові номери елементів у Періодичній системі, тобто заряди їхніх ядер, а вгорі — масові числа. Rn — благородний газ радон. У загальному вигляді схему радіоактивного альфа-розпаду ядер можна записати:



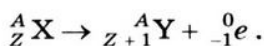
Літерою X позначено хімічний символ ядра, яке розпадається (часто його називають материнським), літерою Y — хімічний символ ядра, яке утворюється (дочірнього).

У випадку бета-розпаду ядро радіоактивного елемента самостійно випускає електрони  ${}_{-1}^0e$  і перетворюється при цьому в нове атомне ядро з більшим на одиницю атомним номером (зрозуміло, що віднімання від'ємної одиниці означає додавання одиниці), але з тим самим масовим числом A, оскільки маса електрона в 1840 раз менша за масу протона. Таким чином, елемент, що виникає в результаті бета-розпаду, розміщується в Періодичній системі в наступній клітинці за даним радіоактивним елементом. Наприклад:



Схематично рівняння бета-розпаду ядер записується так:





У вас може виникнути запитання: яким чином позитивне ядро може випускати негативно заряджені частинки-електрони? Адже в ядрах електронів немає. Це надзвичайно цікаве запитання розглянемо пізніше.

Правила, за допомогою яких можна встановити масове число і заряд нового елемента, що виникає внаслідок альфа-або бета-перетворення, дістали назву *правил зміщення*.

Явище гамма-випромінювання полягає в тому, що ядро випускає гамма-квант без зміни заряду (порядкового номера елемента  $Z$ ) і масового числа  $A$ .

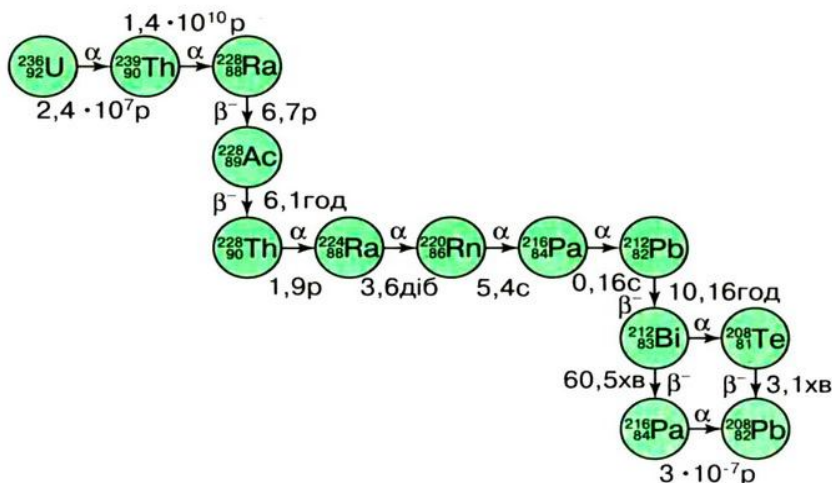
Зрозуміло, що коли за одним альфа-перетворенням відбувається підряд два бета-перетворення, то кінцевий продукт їх має повернутися в те саме місце в Періодичній системі, де містився вихідний елемент, маючи масове число на 4 одиниці менше.

Хімічні елементи, які відрізняються масовими числами, але мають один і той же заряд атомних ядер і тому займають одне й те саме місце в Періодичній системі, називаються *ізотопами*. З курсу хімії 9-го класу ви знаєте, що ядерні властивості ізоотопів одного й того самого елемента різні, а хімічні їх властивості майже однакові. Тепер встановлено, що більшість елементів, які поширені в природі, є сумішшю ізоотопів. Пізніше ви ознайомитесь з їх властивостями, з методами створення штучних радіоактивних ізоотопів.

Часто з'ясовується, що елемент, який виникає в результаті радіоактивного перетворення, теж радіоактивний. Наприклад, ізоотп Урану  ${}^{236}_{92}\text{U}$  в результаті альфа-розпаду перетворюється в ізоотп Торію  ${}^{228}_{90}\text{Th}$ , який, в свою чергу, внаслідок альфа-розпаду перетворюється в ізоотп  ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ . Радій є бета-радіоактивним і, випустивши бета-частинку, перетворюється в ізоотп Актинію  ${}^{228}_{89}\text{Ac}$ . Актиній також бета-радіоактивний і внаслідок бета-розпаду перетворюється в ізоотп Торію  ${}^{228}_{90}\text{Th}$  і т. д. Завершується цей ланцюжок радіоактивних перетворень ядер утворенням ядра стабільного (нерадіоактивного) ізоотпу.

На малюнку 146 наведено схему послідовних перетворень ізоотпу Урану  ${}^{236}_{92}\text{U}$ . Закінчується цей радіоактивний ряд стабільним ізоотпом Плюмбуму  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . У цій схемі в кружках вказано символ радіоактивного ізоотпу, його масове число і атомний номер. Літери  $\alpha$  і  $\beta$  біля стрілок чи над ними вказують на характер радіоактивного перетворення.





Мал. 146

Сукупність усіх ізотопів, які виникають внаслідок ряду послдовних радіоактивних перетворень з однієї материнської речовини (на малюнку 146 такою речовиною є ізотоп Урану  $^{236}_{92}\text{U}$ ), прийнято називати *радіоактивним рядом*, або *сім'єю*. Дослідження показали, що всі природні радіоактивні елементи є членами чотирьох радіоактивних рядів:

- 1) ряд  $^{236}_{92}\text{U} - ^{208}_{82}\text{Pb}$ ;
- 2) ряд  $^{237}_{93}\text{Np} - ^{208}_{81}\text{Tl}$ ;
- 3) ряд  $^{238}_{92}\text{U} - ^{206}_{82}\text{Pb}$ ;
- 4) ряд  $^{235}_{92}\text{U} - ^{207}_{82}\text{Pb}$ .

Радіоактивний альфа- чи бета-розпад веде до безперервного зменшення числа атомів вихідного радіоактивного елемента. Для одних елементів це зменшення відбувається дуже швидко — протягом хвилин і навіть секунд, для інших — на це йдуть сотні років. Мірою швидкості радіоактивного перетворення може служити інтервал часу, за який розпадається половина атомів будь-якої кількості елемента. Цей інтервал називають *періодом піврозпаду*  $T$ . Наприклад, період піврозпаду Полонію  $^{216}_{84}\text{Po}$  дорівнює  $T = 140$  діб. Значить, від 1 г полонію через 140 діб залишиться 1/2 г. Якою буде швидкість дальшого розпаду? Досліди показали, що вона залишиться незмінною, тобто від 1/2 г полонію залишиться половина, тобто 1/4 г, рівно через 140 діб. Це означає, що

1/16 г полонію, яка залишиться через 560 діб від вихідного грама, не відрізняється абсолютно нічим від 1/16 вихідного грама полонію. Це надзвичайно важливий факт. Він свідчить про те, що розпад не є результатом зміни властивостей ядра (своєрідного «старіння»). Властивості радіоактивних ядер з часом не змінюються, ядра не «старіють» у процесі свого існування. Так, наприклад, ядра атомів Актинію, які виникають під час розпаду Протактинію, мають однакові шанси зазнати радіоактивного розпаду як відразу ж після утворення, так і через добу чи через кілька років після цього. Розпад будь-якого атомного ядра — це, так би мовити, не «смерть від старості», а «нещасний випадок» у його житті.

Розпад того чи іншого ядра в певний момент часу є випадковою подією. Ми не можемо сказати, що станеться саме з даним ядром. Воно може однаковою мірою зазнати розпаду або залишитися цілим незалежно від того, скільки часу воно взагалі існує. Можна лише твердити, що є певна ймовірність розпаду кожного ядра радіоактивного елемента за певний інтервал часу.

Сформулюємо основний закон радіоактивного розпаду. За одиницю часу з наявної кількості радіоактивних ядер завжди розпадається певна їх частина, яку позначають через  $\lambda$  і називають сталою розпаду даного радіоактивного елемента. Якщо є  $N$  атомних ядер, то очевидно, що за 1 с розпадається  $\lambda N$  з них, а за час  $dt$ :

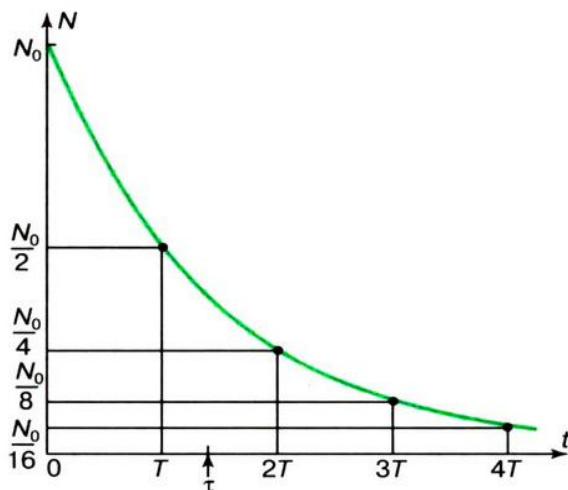
$$dN = -\lambda N dt. \quad (82.1)$$

Знак мінус взято тому, що загальна кількість радіоактивних ядер зменшується в процесі розпаду.

З (82.1) випливає, що  $\lambda = -\frac{dN}{N dt}$ , тобто стала розпаду є відношенням кількості ядер, що розпадаються за одну секунду  $\frac{dN}{dt}$ , до кількості ядер атомів радіоактивної речовини  $N$ , які містяться в ній у даний момент часу, або, іншими словами, ймовірністю розпаду ядер атома радіоактивного елемента за секунду.

З основного закону радіоактивного розпаду можна вивести формулу для обчислення зменшення кількості радіоактивних ядер з часом. Нехай кількість радіоактивних атомів у початковий момент часу ( $t = 0$ ) дорівнює  $N_0$ . Через один період піврозпаду їх залишиться  $\frac{1}{2} N_0$ . Ще через один такий самий інтервал часу  $t = nT$ , тобто через  $n$  періодів піврозпаду  $T$ , радіоактивних атомів залишиться  $N = N_0 \frac{1}{2} n$ . Оскільки  $n = \frac{t}{T}$ ,

$$\text{то} \quad N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (82.2)$$



Мал. 147

За цією формулою знаходять кількість атомів  $N$ , що не розпалися, у будь-який момент часу, якщо відомий період піврозпаду. Ця ж закономірність дала можливість визначити і період піврозпаду всіх відомих радіоактивних елементів.

Залежність, виражена формулою 82.2, зображена на графіку малюнка 147, де по осі абсцис відкладено час у періодах піврозпаду, по осі ординат — кількість атомів, що не розпалися.

Звернемо увагу ще раз, що радіоактивний розпад є статистичним процесом. Закон радіоактивного розпаду дає можливість визначити середню кількість атомів, які розпадаються за певний інтервал часу. Ми не можемо передбачити, коли саме розпадеться те чи інше ядро радіоактивного елемента, але знаємо, що в середньому за одиницю часу в будь-якій радіоактивній речовині розпадеться цілком певна, характерна для даної радіоактивної речовини частка атомних ядер.

?

1. Що станеться з ядром під час випромінювання альфа-частинки, бета-частинки і гамма-кванта? 2. Запишіть схему радіоактивного альфа- і бета-розпаду. 3. Що таке ізоtop? 4. Що таке радіоактивний ряд (сім'я)? Наведіть приклад радіоактивного ряду. 5. Що розуміють під періодом піврозпаду? Чому не визначають час повного розпаду всіх ядер? 6. Чи правильно, що чим довше існує атом, тим більша ймовірність його розпаду?



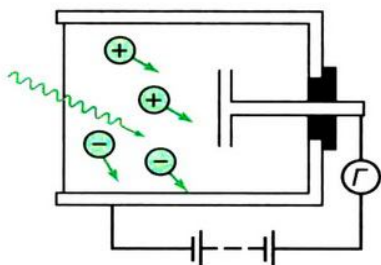
## **§ 83 — МЕТОДИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ І РЕЄСТРАЦІЇ ЙОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ**

Розвиток ядерної фізики вимагає вимірювання кількості випромінюваних частинок, їх енергії, швидкості, вивчення траєкторій тощо. Хоча розміри окремих частинок (електронів, протонів, альфа-частинок) такі, що безпосередньо спостерігати їх не можна навіть за допомогою електронного мікроскопа, фізики все ж сконструювали прилади, які дають можливість рахувати частинки, спостерігати їх траєкторії тощо.

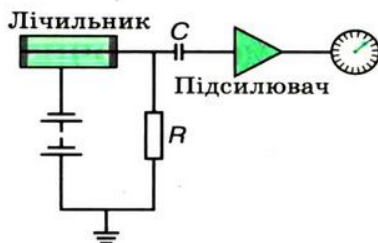
Розглянемо коротко основні методи і прилади, які дають можливість спостерігати частинки. У зв'язку з широким проникненням методів ядерної фізики в сучасну техніку прилади для спостереження і реєстрації йонізуючих випромінювань застосовуються на багатьох виробництвах, і знання основних вимірювальних приладів і розуміння принципів їх дії є необхідним для сучасного робітника.

**Йонізаційна камера.** Одним з найпростіших приладів для дослідження інтенсивних потоків частинок великої енергії є йонізаційна камера. Це посудина (мал. 148), заповнена газом, з двома електродами, на які подається стала напруга. В багатьох конструкціях одним з електродів служить корпус камери, другий електрод введено всередину камери і добре ізольовано від першого. Якщо в камеру влітає частинка, вона утворює певну кількість йонів, і крізь газ проходить струм. За відповідної напруги між електродами сила струму досягає насичення, тобто сила струму не залежить від напруги і пропорційна кількості утворюваних під дією випромінювання йонів, що дає можливість за виміряною силою струму насичення в камері визначати інтенсивність ядерних випромінювань.

**Лічильник Гейгера — Мюллера.** Значного підсилення слабких йонізаційних струмів, зумовлених йонізацією газу навіть однією швидкою частинкою або гамма-квантом, можна досягти, скориставшись явищем ударної йонізації. Це використовується в будові лічильників Гейгера — Мюллера, швидко клацання яких добре знайоме всім за багатьма популярними кінофільмами. Цей лічильник є металевою тонкостінною трубкою (мал. 149), яка служить катодом. Анодом є тонка металева нитка, протягнута вздовж осі трубки. Між ниткою і стінками трубки прикладена значна різниця потенціалів порядку 800—1000 В. Трубка звичайно заповнюється інертним газом під зниженим тиском — для збільшення довжини вільного пробігу і полегшення ударної йонізації газу.



Мал. 148

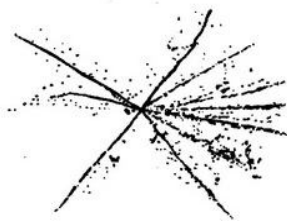


Мал. 149

Проникаючи всередину трубки, випромінювання йонізує атоми газу на своєму шляху. Виникаючі вільні електрони і йони, прискорюючись електричним полем між ниткою і стінками, здійснюють дальшу йонізацію, яка веде до пробивання газу, — відбувається електричний розряд, і струм через лічильник різко зростає. Імпульс напруги з резистора  $R$  подається в реєструючий пристрій (звичайно це підсилювач і механічний лічильник). Поки триває розряд, лічильник не може реєструвати влітання в нього інших частинок. Щоб лічильник міг реєструвати нову частинку, необхідно погасити лавинний розряд. Для цього в коло лічильника вмикають резистор з великим опором (порядку  $10^7 - 10^8$  Ом). Під час проходження струму на цьому резисторі виникає великий спад напруги, внаслідок чого різко зменшується напруга між трубкою й ниткою (катодом і анодом), що призводить до припинення розряду. Для зменшення тривалості розряду лічильник заповнюється аргоном з добавкою до нього метану або пари метилового спирту. Позитивні йони на шляху до катода при зіткненні з масивними молекулами метану чи спирту нейтралізуються і вже не можуть вибити з катода електрони, необхідні для підтримання розряду.

Лічильники Гейгера — Мюллера дешеві, винятково прості в експлуатації (великий імпульс), безвідмовні. Тому вони широко використовуються в ядерній фізиці й техніці.

**Фотоемульсійний метод.** Найбільш дешевим методом реєстрації йонізуючих випромінювань є фотоемульсійний (або метод товстошарових емульсій). Він ґрунтується на тому, що заряджена частинка, рухаючись у фотоемульсії, руйнує молекули броміду аргентуму лише в тих зернах, крізь які вона пройшла. Після проявлення такої пластинки в ній виникають «доріжки» з осілого срібла, добре видимі в мікроскоп. Кожна така доріжка є слідом рухомої частинки. За характером видимого сліду — його довжиною, товщиною тощо можна судити як про властивості частинки, яка залишила слід (її енергію, швидкість, масу, напрям руху), так і про ха-



Мал. 150

рактер процесу (розсіювання, ядерна реакція, розпад частинок), якщо він стався в емульсії. На малюнку 150 показані сліди, залишені у фотоемульсії.

Цей метод має такі переваги: ним можна реєструвати траєкторії всіх частинок, які пролетіли крізь фотопластинку за час спостереження;

фотопластинка завжди готова до застосування (емульсія не потребує процедур, які б приводили її в робочий стан);

емульсія має велику гальмівну здатність (зумовлену великою густиною);

метод дає незникаючий слід частинки, який потім можна старанно вивчати.

Недоліком методу є довготривалість і складність хімічної обробки фотопластинок і головне — багато часу, який треба витратити на тривалий розгляд кожної пластинки у сильно-му мікроскопі.

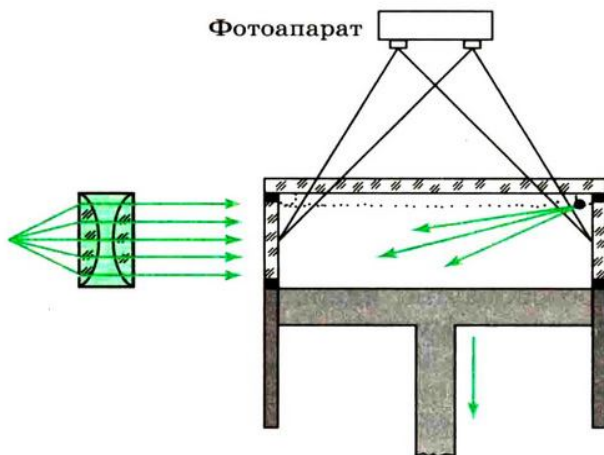
**Камера Вільсона.** Безпосередньо спостерігати і фотографувати сліди окремих частинок можна в камері В і л ь с о н а — приладі, винайденому в 1911 році англійським вченим Ч. Вільсоном.

Камера Вільсона є герметично закритим циліндром (мал. 151), заповненим газом і парами якихось рідин; близькими до насичення. У разі швидкого збільшення об'єму пара охолоджується і з насиченої перетворюється в перенасичену. Якщо в цей час у циліндр влітає заряджена частинка, вона на своєму шляху йонізує молекули газу, і на цих йонах конденсуються краплі рідини, роблячи видимою траєкторію частинки. При належній підготовці камери туманний слід частинки утворюється настільки густим, що добре видимий не лише оком, а й може бути сфотографованим.

Видимі відрізки шляхів заряджених частинок у камері Вільсона звичайно називають *треками*. На малюнку 152 відтворені деякі з фотографій таких треків.

За довжиною треку можна визначити енергію частинки, а за кількістю краплин туману на одиницю довжини треку можна оцінити її швидкість. За характером треку можна визначити вид (природу) частинки. Так, масивна альфа-час-



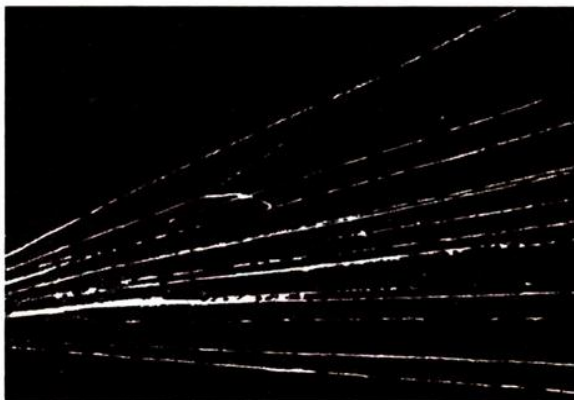


Мал. 151

тинка залишає суцільний жирний слід, швидка бета-частинка (електрон) — тонкий, а у разі малої швидкості — звивистий слід.

Можливості камери Вільсона як приладу для кількісних вимірювань значно розширюються, якщо вмістити камеру в сильне магнітне поле. Завдяки цьому є можливість за кривизною сліду частинки визначати її масу, імпульс і знак заряду, а в деяких випадках також енергію, швидкість і кількість пар йонів, створюваних частинкою на одиниці довжини свого шляху.

Серйозним недоліком камери Вільсона є її малий об'єм. Звичайно камера має розмір порядку 20 см — відстань для пробігів частинок у газі дуже незначна. Тому в останні роки



Мал. 152

**Жорж  
ШАРПАК**  
(народився в 1924 р. в м. Сарни)



Відомий фізик-експериментатор, перший вчений родом з України, який став у 1992 р. Нобелівським лауреатом за винахід та вдосконалення детекторів елементарних частинок — багатодротової пропорційної камери. Цей винахід дав змогу об'єднати детектор з комп'ютером і збільшити швидкість збирання корисної інформації у мільйони разів.

для дослідження швидких частинок застосовують так звані бульбашкові камери.

Існує й багато інших методів спостереження і реєстрації йонізуючих випромінювань. Значний вклад у їх розвиток і вдосконалення вніс відомий фізик-експериментатор Жорж Шарпак.

?

1. Як влаштована йонізаційна камера? 2. Яке явище використовується у будові лічильників Гейгера — Мюллера? Як побудовано цей лічильник? 3. За допомогою якого приладу можна вивчати сліди заряджених частинок? 4. Який принцип дії камери Вільсона? Як за допомогою цієї камери можна визначити природу частинки, що пролетіла в камері, її енергію, швидкість?

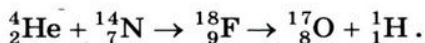
## **§ 84 — ШТУЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ АТОМНИХ ЯДЕР. ВІДКРИТТЯ НЕЙТРОНА**

Вивчення природної радіоактивності показало, що перетворення одного хімічного елемента в інший зумовлено внутрішньоядерними процесами, тобто змінами, які відбуваються всередині атомних ядер. У зв'язку з цим були зроблені спроби штучного перетворення одних хімічних елементів в інші шляхом впливу на атомні ядра. Виняткова стабільність ядер нерадіоактивних елементів свідчить про те, що їх зміна може статися лише за винятково енергійного зовнішнього впливу. Ефективним засобом такого впливу виявилось бомбардування атомних ядер частинками високої енергії. Спочатку для бомбардування брали альфа-частинки радіоактивного проміння. Пізніше почали застосовувати й інші

заряджені частинки, попередньо надавши їм великої швидкості (кінетичної енергії) в спеціальних прискорювачах.

Процес перетворення атомних ядер, зумовлений впливом на них швидких заряджених частинок (або ядер атомів), називається *ядерною реакцією*.

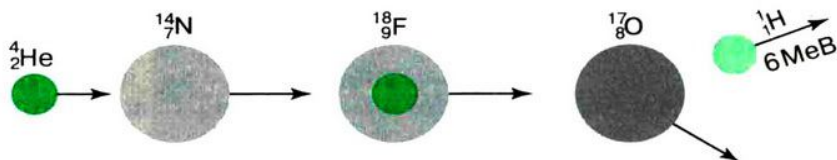
Перша штучна ядерна реакція була здійснена в 1919 р. Е. Резерфордом, який перетворив ядра Нітрогену в ядра ізотопу Оксигену. Для бомбардування використовувалися альфа-частинки радіоактивного проміння. Реакція проводилася в камері Вільсона, заповненій азотом. Після опромінення азоту потоком альфа-частинок у робочому об'ємі камери утворилися атоми ізотопу Оксигену і атомні ядра Гідрогену, тобто протони. Поява протонів та ізотопу Оксигену в цьому експерименті пояснюється так. Під час співударяння швидкої альфа-частинки з ядром Нітрогену  $^{14}_7\text{N}$  альфа-частинка ( $^4_2\text{He}$ ) проникає в ядро і поглинається ним. При цьому утворюється дуже нестійке проміжне ядро ізотопу Флуору  $^{18}_9\text{F}$ , яке вмиг викидає з себе один протон, перетворюючись в ядро ізотопу Оксигену  $^{17}_8\text{O}$  (мал. 153). Цю ядерну реакцію можна записати так:



Таким чином, дослід Резерфорда підтвердив можливість здійснення штучних ядерних реакцій і разом з тим безпосередньо показав, що протони входять до складу атомних ядер і можуть бути виділені (вибиті) з цих ядер. Пізніше іншими дослідниками були виявлені перетворення під впливом альфа-частинок ядер інших хімічних елементів (Алюмінію, Натрію, Флуору тощо).

Відкриття Резерфорда привело до створення нової галузі наукових досліджень — галузі штучного перетворення хімічних елементів, яка має важливе наукове і практичне значення.

У ході вивчення штучного перетворення ядер хімічних елементів під час бомбардування їх альфа-частинками німецькі фізики В. Б о т е і Г. Б е к к е р у 1930 р.



Мал. 153



**Фредерік  
ЖОЛІО-КЮРІ  
(1900—1958)**



Видатний французький вчений. Разом з дружиною Ірен відкрив у 1934 р. штучну радіоактивність. Праці подружжя Кюрі з дослідження випромінювання Берилію під дією  $\alpha$ -частинок мали велике значення для відкриття нейтронів. Разом із співробітниками у 1939 р. вчений визначив кількість нейтронів, які вилітають під час поділу ядра Урану, і показав принципову можливість ланцюгової ядерної реакції.

виявили, що в результаті опромінення деякі легкі елементи, наприклад Берилій, самі стають джерелом випромінювання дуже високої проникаючої здатності. Потік цього випромінювання не відхилявся електричним полем і його не можна було вважати потоком заряджених частинок. Воно було дуже схожим на гамма-промені, і тому спочатку це випромінювання було назване «берилієвими променями».

У 1932 р. французькі фізики Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі виявили, що це проміння, падаючи на речовини, які містять Гідроген (парафін, воду, целофан), викликає випромінювання ними протонів великої енергії. Вони правильно припустили, що випромінювання Берилію вибиває з парафіну (чи іншої речовини, яка містить Гідроген) протони, які є у великих кількостях в таких речовинах. За допомогою камери Вільсона (схема досліду показана на мал. 154) подружжя Кюрі визначили енергію цих протонів. Виявилось, що протони мають таку велику енергію, що для їх вибивання гамма-кванти повинні були б мати неправдоподібно велику енергію понад 50 MeV.

Подальші досліді, виконані учнем Резерфорда англійським фізиком Д ж. Ч е д в і к о м, привели до ще цікавіших результатів. Він спостерігав у камері Вільсона треки ядер

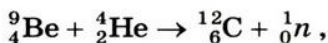


Мал. 154

Нітрогену, які зазнали зіткнення з берилієвим випромінюванням. У деяких випадках удалося виявити треки ядер віддачі завдовжки 3 мм. Таких прискорень масивним ядрам Нітрогену могли б надати гамма-кванти з енергією 90 MeV.

Чедвік перший припустив, що нове випромінювання є не гамма-квантами (фотонами), а потоком масивних незаряджених частинок, названих ним *нейтронами*. За значенням слідів віддачі ядер різних мас у камері Вільсона можна було зробити висновок, що маса нейтронів дуже близька до маси протонів. До кінця 30-х років було одержано велику кількість фотографій, які ілюстрували процес зіткнень нейтрона з ядрами різних елементів. За величиною віддачі атомів, які зазнали зіткнень з нейтроном, а також за рівняннями ядерних реакцій було обчислено масу нейтрона. Вона виявилася рівною  $1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг (маса протона дорівнює  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг). З молекулярної фізики і хімії ви знаєте, що масу атомів ядер і елементарних частинок звичайно виражають в атомних одиницях маси (а.о.м.):  $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг. Тоді маса нейтрона  $m_n = 1,0087 \text{ а.о.м.}$ , а протона  $m_p = 1,0073 \text{ а.о.м.}$

(Ядерну реакцію, в результаті якої було вперше виявлено нейтрон, можна записати так:



тобто ядро Берилію  ${}^9_4\text{Be}$  захоплює альфа-частинку і, випустивши нейтрон  ${}^1_0\text{n}$ , перетворюється в ядро Карбону  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Відсутність у нейтронів електричного заряду приводить до того, що вони практично не взаємодіють з електронною оболонкою атомів. З цієї ж причини відсутня і електрична взаємодія з атомними ядрами. Тому пучки нейтронів у речовині мають велику проникаючу здатність, і їх виявлення можливе лише шляхом спостереження результатів безпосередньої взаємодії нейтронів з ядрами. З деякими властивостями нейтронів ознайомимося трохи пізніше.

- ?
1. Що таке ядерна реакція?
  2. На основі яких міркувань вчені дійшли висновку, що протони з парафіну вибиваються не гамма-квантами, а нейтронами?
  3. Як було визначено масу нейтрона?
  4. Чим пояснюється велика проникаюча здатність нейтронів?



## § 85 — СКЛАД ЯДРА АТОМА

Відомо, що з ядер можуть вилітати і поглинатися ними альфа-частинки. За допомогою альфа-частинок з деяких ядер можна вибити протони, з інших — нейтрони. Які ж частинки входять до складу атомних ядер?

До 1932 р. (до відкриття нейтрона) були відомі дві (якщо не враховувати фотонів) елементарні частинки: електрон і протон. Було висловлено припущення, що ядра атомів складаються з протонів і електронів. Наявність в ядрах електронів, здавалося б, підтверджував факт бета-розпаду, при якому з ядер атомів вилітають електрони. Однак швидко з'ясувалося, що таке уявлення про склад ядра суперечить дослідним даним.

Відразу ж після відкриття нейтрона німецький фізик В. Гейзенберг висловив гіпотезу, що до складу атомних ядер входять лише протони і нейтрони. Уявлення про протонно-нейтронний склад атомних ядер підтверджене великою кількістю експериментів і нині є загальноновизнаним. Ядерні частинки — протони і нейтрони — часто називають *нуклонами*.

Атом електрично нейтральний. Тому число протонів у ядрі атома має дорівнювати числу електронів в оболонці атома, тобто атомному номерові цього елемента. Наприклад, атомний номер алюмінію 13, це означає, що ядро атома Алюмінію містить 13 протонів.

Майже вся маса атома зосереджена в його ядрі. Але маса ядра складається з мас усіх частинок, які входять до складу ядра. Загальне число частинок в ядрі позначається через  $A$  і називається *масовим числом*, іншими словами, масовим числом  $A$  називають суму числа протонів  $Z$  і числа нейтронів  $N$  в ядрі:  $A = Z + N$ .

Оскільки маси протона і нейтрона дуже близькі, то масове число  $A$  дорівнює заокругленій до цілого числу атомній масі елемента (вираженій в а.о.м.). Маси атомних ядер можуть бути визначені з великою точністю за допомогою спеціальних приладів — мас-спектрографів.

Отже, за масовим числом  $A$  і атомним номером хімічного елемента  $Z$  можна безпосередньо визначити число протонів і нейтронів в атомному ядрі цього елемента. Нагадаємо, що атомні ядра хімічних елементів прийнято позначати символом  ${}^A_ZX$ , де  $X$  — символ елемента,  $A$  — масове число,  $Z$  — атомний номер (протонне число). Наприклад,  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  означає атомне ядро Плюмбуму, яке містить 82 протони і  $206 - 82 = 124$  нейтрони;  ${}^{14}_7\text{N}$  — атомне ядро Нітрогену, яке містить 7 протонів і 7 нейтронів і т. д.



З курсу хімії ви знаєте, що більшість хімічних елементів має по кілька різновидів — ізотопів, які відрізняються значеннями масового числа  $A$ . Так, наприклад, Гідроген має чотири ізотопи:

${}^1_1\text{H}$  — звичайний Гідроген, або протій ( $Z = 1$ ;  $n = 0$ );

${}^2_1\text{H}$  — важкий Гідроген, або дейтерій ( $Z = 1$ ;  $n = 1$ );  
часто дейтерій позначають символом  $D$ ;

${}^3_1\text{H}$  — надважкий Гідроген, або тритій ( $Z = 1$ ;  $n = 2$ );  
часто тритій позначають символом  $T$ ;

${}^4_1\text{H}$  — відкритий у 1963 р. ізотоп Гідрогену ( $Z = 1$ ;  $n = 3$ ).

У природних умовах майже всі елементи мають від одного до кількох стабільних ізотопів. У Оксигену три стабільні ізотопи, в Стануму — десять і т. д.

Ядра ізотопів даного хімічного елемента містять однако-ве число протонів і мають однакову кількість електронних оболонок. Тому в ізотопів даного хімічного елемента однакові як хімічні властивості, так і ті фізичні властивості, які обумовлені головним чином структурою електронної оболонки. Що стосується фізичних властивостей, обумовлених структурою ядра (масове число, радіоактивність, густина), то вони помітно відмінні між собою.

Ядра більшості хімічних елементів стійкі. Це свідчить про те, що протони і нейтрони всередині ядра утримуються якимись дуже великими силами. Що ж це за сили?

З упевненістю можна сказати, що це не гравітаційні сили, оскільки вони надзвичайно малі. Кулонівські сили, що діють між протонами, є силами відштовхування. Отже, в ядрах між нуклонами існує особливий вид взаємодії, існують особливі сили. Цю взаємодію називають *сильною*, а сили, що їй відповідають, *ядерними*. Які основні особливості ядерних сил?

Ядерні сили винятково великі: вони приблизно в 100 раз перевищують значні кулонівські сили між протонами, розташованими дуже близько один біля одного. Ядерні сили виявляються тільки на дуже малих відстанях — порядку  $10^{-15}$  м. На відміну від гравітаційних і кулонівських сил, які зменшуються обернено пропорційно квадратові відстані між точковими масами чи зарядами, — ядерні сили зменшуються значно швидше. Вони дуже великі на відстанях, близьких до відстаней між нуклонами в ядрі ( $\sim 10^{-15}$  м), однак вже при незначному збільшенні відстані між нуклонами в ядрі (принаймні до  $2 \cdot 10^{-15}$  м) вони зменшуються практично до нуля.

В ядрі існують частинки двох типів — протони й нейтрони. Між якими ж частинками діють ядерні сили? Чи лише

між протонами й нейтронами, чи між двома протонами (або двома нейтронами)?

Дослідження показали, що ядерні сили не залежать від того, мають частинки електричний заряд чи не мають. За допомогою ядерних сил нейтрон з нейтроном, нейтрон з протоном і два протони взаємодіють однаково. Остаточна теорія ядерних сил ще не створена.

?

1. Яка будова атомного ядра? Які частинки називаються нуклонами? 2. Як за атомним номером і масовим числом хімічного елемента визначити число протонів і нейтронів у ядрі цього елемента? 3. Який склад ядра атома Радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$ ? 4. Чим ядерні сили відрізняються від електричних і гравітаційних? Чому протони ядра не розлітаються, хоча мають однойменні заряди і між ними діють кулонівські сили відштовхування?

## § 86 — ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ АТОМНИХ ЯДЕР

Протони і нейтрони в ядрах атомів міцно зв'язані ядерними силами. Щоб розірвати цей зв'язок, тобто повністю роз'єднати частинки ядра, необхідно затратити певну кількість енергії (виконати певну роботу). Енергія, необхідна для роз'єднання частинок ядра, називається *енергією зв'язку*. Під час утворення ядра з окремих нуклонів ця енергія виділяється. Енергія зв'язку атомних ядер надзвичайно велика. Її можна визначити на основі закону збереження енергії і закону взаємозв'язку маси й енергії.

Згідно з законом збереження енергії зв'язаних в ядрі нуклонів має бути меншою за енергію роз'єднаних нуклонів на величину енергії зв'язку ядра  $E$ . З іншого боку, згідно з законом взаємозв'язку маси й енергії, зміна енергії системи на  $\Delta E$  супроводжується пропорційною зміною маси системи на  $\Delta m$ :

$$\Delta E = \Delta mc^2, \quad (86.1)$$

де  $c$  — швидкість світла у вакуумі. Оскільки в розглядуваному випадку  $\Delta E$  і є енергією зв'язку ядра  $E$ , то маса атомного ядра має бути меншою за суму мас нуклонів, з яких складається ядро, на значення  $\Delta m$ , яке називається *дефектом маси ядра*. За (86.1) можна обчислити енергію зв'язку  $E$ , якщо відомий дефект маси цього ядра  $\Delta m$ .

Нині маси атомних ядер визначені з високим ступенем точності (за допомогою мас-спектрографів), маси нуклонів так само відомі. Це дає можливість визначати дефект маси будь-якого ядра і обчислювати за (86.1) енергію зв'язку ядра.

Для прикладу обчислимо енергію зв'язку ядра атома Гелію, яке, як відомо, складається з двох протонів і двох нейтронів. Маса протона  $m_p = 1,0073$  а.о.м., маса нейтрона  $m_n = 1,0087$  а.о.м. Отже, маса нуклонів, які утворюють ядро, дорівнює  $2m_p + 2m_n = 4,0320$  а.о.м. Маса ж ядра атома Гелію  $m_{He} = 4,0016$  а.о.м. Отже, дефект маси атомного ядра Гелію дорівнює:  $\Delta m = 4,0320$  а.о.м.  $- 4,0016$  а.о.м.  $= 0,03$  а.о.м., або  $\Delta m = 0,03 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 5 \cdot 10^{-29}$  кг.

Тоді енергія зв'язку ядра Гелію дорівнює:

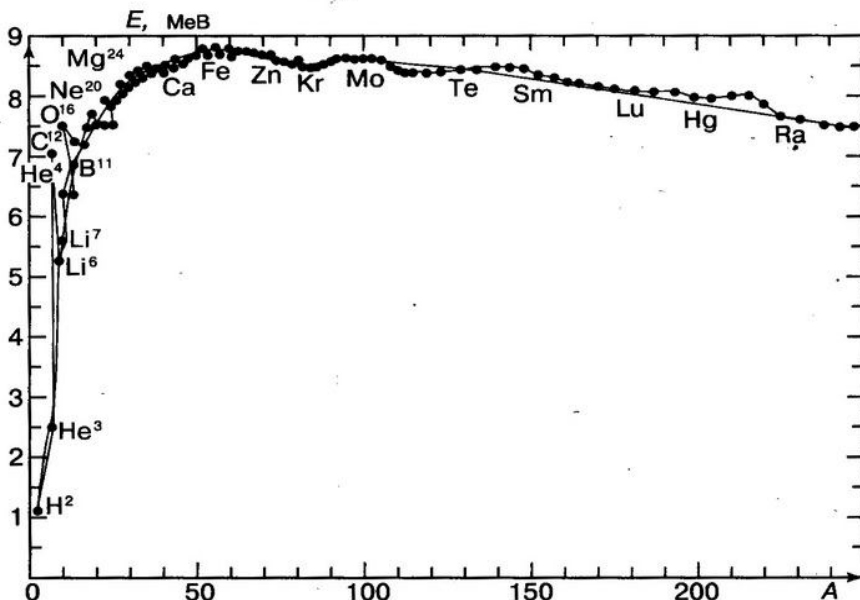
$$E = \Delta m \cdot c^2 = 5 \cdot 10^{-29} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = \\ = \frac{4,5 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ еВ} \approx 28 \text{ МеВ}.$$

Така енергія виділяється під час утворення одного ядра атома Гелію.

Загальна формула для обчислення енергії зв'язку будь-якого ядра за його дефектом маси матиме вигляд:

$$E = (Zm_p + Nm_n - m_a) c^2. \quad (86.2)$$

Енергія зв'язку — одна з найважливіших характеристик ядра. Дуже часто для характеристики стійкості (міцності) атомних ядер розраховують *питому енергію зв'язку*, яка припадає на один нуклон. Чим більша питома енергія зв'язку, тим стійкіше ядро. Її можна обчислити, поділивши



Мал. 155



енергію зв'язку ядра на число нуклонів у ньому (на масове число  $A$ ). Результати таких розрахунків зображені графічно на малюнку 155, де по осі ординат відкладені питомі енергії зв'язку в  $\text{MeV}$ , по осі абсцис — масові числа  $A$ . З малюнка видно, що питома енергія зв'язку максимальна ( $8,65 \text{ MeV}$ ) в ядер з масовими числами порядку 100; у масивних і легких ядер вона дещо менша (наприклад,  $7,5 \text{ MeV}$  в Урану,  $7 \text{ MeV}$  у Гелію). В ядра Гідрогену  ${}^1_1\text{H}$  питома енергія зв'язку дорівнює нулю, що цілком зрозуміло, оскільки в цьому ядрі немає чого роз'єднувати: воно складається лише з одного нуклона (протона).

У середній частині графіка крива майже паралельна осі абсцис (осі масових чисел). Ця наближена сталість питомої енергії зв'язку дає підстави для двох важливих висновків про характер ядерних сил. П о - п е р ш е, це свідчить про те, що кожна частинка взаємодіє лише з сусідніми, а не всіма частинками; тому енергія зв'язку ядра пропорційна числу нуклонів, а питома енергія зв'язку залишається сталою. П о - д р у г е, наближена сталість питомої енергії зв'язку свідчить, що ядерні сили не залежать від того, заряджений чи незаряджений нуклон. Справді, коли б такий зв'язок існував, то, внаслідок більш швидкого зростання числа нейтронів порівняно з протонами в ядрі кожного наступного елемента, питома енергія зв'язку якось би змінювалася.

Крива питомої енергії зв'язку має слабо виражений максимум  $8,65 \text{ MeV}$  для ядер з масовим числом  $A \sim 50-100$ , тобто у Феруму і близьких до нього за порядковим номером елементів. Це вказує на те, що елементи, які містяться в середній частині Періодичної системи, мають найбільшу енергію зв'язку і є найбільш стійкими.

Малим радіусом дії ядерних сил пояснюється і менша питома енергія зв'язку для легких елементів. Ядра легких елементів містять невелику кількість нуклонів, і відносно велика кількість цих нуклонів міститься біля поверхні ядра (зовнішні нуклони). Ці зовнішні нуклони взаємодіють тільки з внутрішніми, сусідів зверху вони не мають. Отже, вони вносять менший вклад в енергію зв'язку, ніж внутрішні нуклони. Зі збільшенням кількості нуклонів у ядрі відносне число розташованих на поверхні нуклонів зменшується. Тому питома енергія зв'язку для ядер наступних хімічних елементів має бути більшою за питому енергію для попередніх, що й спостерігається на графіку.

Можна заперечити, що в такому випадку повинна збільшуватися питома енергія зв'язку і для ядер середньої частини графіка, адже відносна кількість зовнішніх нуклонів продовжує зменшуватися, а між тим, вона приблизно

стала. Уявна суперечність пояснюється тим, що зі збільшенням числа нуклонів у ядрі зростає і сила кулонівського відштовхування протонів, яка компенсує збільшення енергії зв'язку. Для масивних хімічних елементів зростання кулонівського відштовхування протонів призводить до зниження питомої енергії зв'язку (кінцева ділянка графіка), а отже, і до зменшення стійкості ядер. Саме зниженням питомої енергії зв'язку ядер елементів, які відповідають кінцевій частині кривої, пояснюється радіоактивний розпад ядер елементів. Починаючи з Полонію, ядра елементів нестійкі і можуть самовільно розпадатися. Однак ця нестійкість відносна, тому що ядра таких елементів такі ж стійкі відносно зовнішніх впливів, як і стабільні ядра. Проте то одне з них, то інше несподівано розпадаються.

?

1. Що розуміють під енергією зв'язку атомних ядер і як її можна визначити? 2. Чи може маса атомного ядра бути меншою за суму мас нуклонів, які входять до складу цього ядра? 3. Що розуміють під дефектом маси атомних ядер? 4. Що таке питома енергія зв'язку атомних ядер? Що вона характеризує? 5. Середня частина графіка кривої питомої енергії зв'язку йде майже паралельно осі масових чисел. Про що це свідчить? 6. Чим пояснюється зменшення питомої енергії зв'язку для ядер легких елементів?

## Вправа 19

1. Визначте енергію зв'язку ядра ізотопу Літію  ${}^7_3\text{Li}$ . Маса ядра  $m_{\text{я}} = 7,01823$  а.о.м.
2. Знайдіть енергію зв'язку ізотопів  ${}^3_1\text{H}$  і  ${}^3_2\text{He}$ . Яке з цих ядер більш стійке? Маси ядер ізотопів відповідно дорівнюють  $m_{\text{ГіД.}} = 3,01700$  а.о.м. і  $m_{\text{Ге}} = 3,01699$  а.о.м.
3. Визначте питому енергію зв'язку в ядрі атома Оксигену  ${}^{16}_8\text{O}$ .

## § 87 — ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ

Вище вже розглядалися ядерні реакції — штучні перетворення атомних ядер, викликані їх взаємодією з частинками або одне з одним. Розглянемо більш детально закономірності ядерних реакцій.

Під час ядерних реакцій обов'язково виконуються різні закони збереження, більшість яких вам відома:

1) закон збереження електричного заряду: сумарний електричний заряд ядер і частинок до реакції дорівнює сумарному електричному зарядові всіх продуктів ядерної реакції;

2) закон збереження кількості нуклонів (у реакціях без античастинок, про які йтиметься далі): під час ядерних реакцій нуклони не знищуються й не виникають з нічого, відбувається лише їх перерозподіл (захоплення ядром, виліт з ядра, перехід до іншого ядра тощо). Тому сумарна кількість усіх нуклонів під час ядерної реакції не змінюється;

3) закон збереження й перетворення енергії: повна енергія всіх частинок, які вступають у реакцію, дорівнює повній енергії всіх частинок, що виникають після реакції;

4) закон збереження імпульсу: сума імпульсів ядер і частинок до вступу в ядерну реакцію дорівнює сумі імпульсів усіх частинок, що виникли після реакції;

5) закон збереження маси: маса частинок, які вступили в реакцію, має дорівнювати масі одержаних частинок речовини і фотонів випромінювання. У вас може виникнути сумнів у справедливості цього закону для ядерних реакцій, оскільки в ядерних реакціях має місце дефект мас. Як же в цьому випадку можна говорити про непохитну рівність мас? Річ у тім, що в законі збереження мас йдеться не про маси спокою (маси нерухомих частинок, а саме вони наводяться в довідниках для ядер і ядерних частинок), а про маси рухомих частинок. Рухомі частинки, маючи певну кінетичну енергію, мають, згідно з теорією відносності, і додаткову масу. Тому закон збереження мас повинен записуватися так:

$$m_1 + \frac{E_{K1}}{c^2} = m_2 + \frac{E_{K2}}{c^2},$$

а якщо реакція супроводжується ще й випромінюванням фотонів, то

$$m_1 + \frac{E_{K1}}{c^2} = m_2 + \frac{E_{K2}}{c^2} + \frac{h\nu}{c^2}.$$

Користуючись цими законами, можна легко визначити характер ядерних реакцій, які відбуваються.

Залежно від виду частинок, якими бомбардується ядро хімічного елемента, від енергії цих частинок, а також від виду бомбардованих ядер можуть відбуватися різні ядерні реакції. Розрізняють такі типи ядерних реакцій:

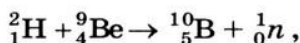
1. Збуджене в результаті бомбардування ядро повертається в нормальний стан і при цьому випускає один або кілька гамма-квантів. У цій ядерній реакції ядро даного хімічного елемента не перетворюється в ядро іншого.

2. Реакція захоплення. Ядро поглинає бомбардуючу частинку і перетворюється в нове, масивніше ядро. Прикладом може бути реакція  ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$ , під час якої протон погли-



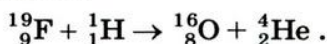
нається ядром Бору і виникає ядро Карбону. Звичайно у реакціях такого типу нове ядро буде в збудженому стані і, випромінивши один чи кілька гамма-квантів, переходить у нормальний (незбуджений) стан.

3. Поглинання ядром бомбардуючої частинки і випускання ядром однієї або кількох частинок (протонів, дейтронів, альфа-частинок, нейтронів). Прикладом такої реакції може бути

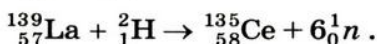


коли дейтрон поглинається ядром Берилію, а ядро, що утворилося, випромінює нейтрон, і виникає ядро атома Бору (мал. 156).

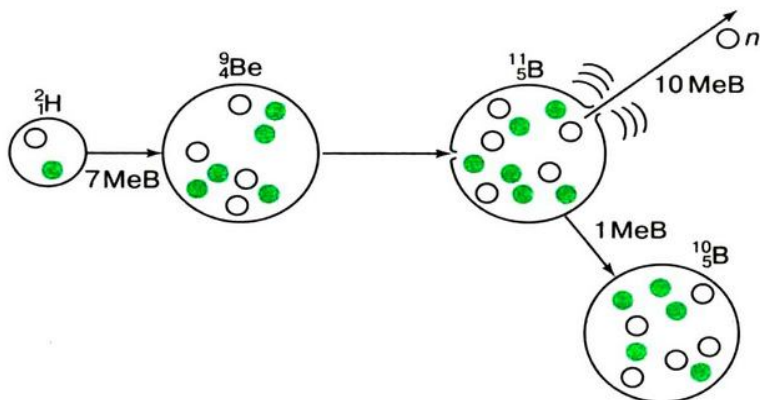
Прикладом реакції, у якій поглинається протон, а випромінюється альфа-частинка, може бути реакція перетворення Флуору в Оксиген:



Якщо енергія бомбардування частинки велика, то ядро, що утворилося, може випустити кілька частинок. Наприклад, під час бомбардування дейтронами з енергією 60 MeV Лантану утворюється ядро, яке може випустити 6 нейтронів і перетворитися в ядро Церію:

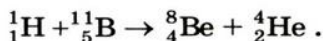


4. Розщеплення ядра на кілька частин. У разі бомбардування ядер частинками великих енергій може спостерігатися розщеплення ядра на кілька частин. Так, наприклад, під час бомбардування протонами досить великої енергії ядра атома Бору останнє може розпастися на три альфа-частинки.



Мал. 156

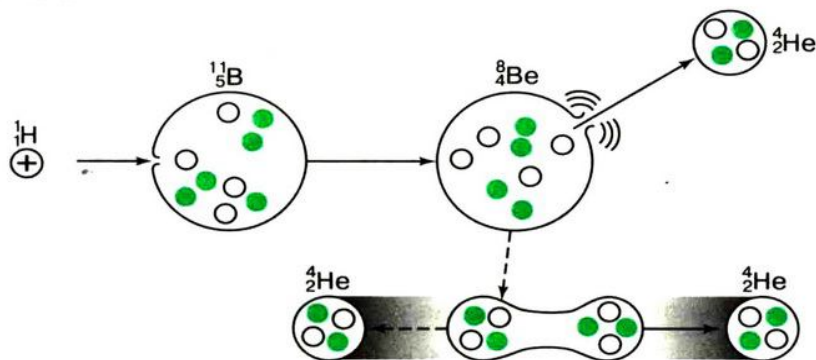
Ця реакція відбувається в два етапи. Протон захоплюється ядром Бору, і виникає сильно збуджене, нестабільне ядро. Випускаючи одну альфа-частинку, це ядро перетворюється в ядро Берилію:



Ядро, що утворюється, також сильно збуджене і розпадається на дві альфа-частинки:

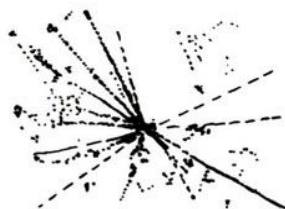


Ці два етапи реакції схематично показані на малюнку 157.



Мал. 157

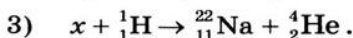
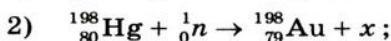
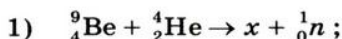
У разі влучання частинки високої енергії в ядра масивних атомів останні можуть розпастися на велику кількість частинок. На малюнку 158 наведено знімок сліду, залишеного в фотоемульсії продуктами реакції розщеплення ядра атома Аргентуму під дією фотона з енергією 28 ГеВ.



Мал. 158

1. Які закони збереження виконуються під час ядерних реакцій? Як формулюється закон збереження числа нуклонів?
2. Які типи ядерних реакцій ви знаєте?
3. Запишіть ядерну реакцію для випадку, коли ядро атома Алюмінію під час бомбардування захоплює нейтрон і випускає альфа-частинку.
4. Запишіть ядерну реакцію зіткнення альфа-частинки з ядром ізотопу Літію  ${}_3^6\text{Li}$ , якщо в результаті вилітає нейтрон.
5. Запишіть рівняння реакції: ізоотп Карбону з масовим числом 12 захоплює протон і перетворюється в ізоотп Нітрогену з масовим числом 13.

1. Напишіть позначення, яких не вистачає в таких ядерних реакціях:

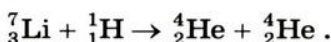


2. Під час бомбардування ізотопу Нітрогену  ${}^{14}_7\text{N}$  нейтронами одержують ізотоп Карбону  ${}^{14}_6\text{C}$ , який виявляється бета-радіоактивним. Запишіть рівняння обох реакцій.

3. Під час захоплення нейтрона ядром Магнію  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$  утворюється радіоактивний ізотоп  ${}^{24}_{11}\text{Na}$ . Які частинки випускаються під час цієї ядерної реакції?

## § 88 — ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ВИХІД ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ

У процесі ядерних реакцій, як і хімічних, може виділятися і поглинатися енергія. Енергетичний вихід ядерних реакцій можна розрахувати на основі закону збереження й перетворення енергії. Для прикладу розглянемо реакцію:



Записуючи закон збереження й перетворення енергії, необхідно враховувати як кінетичні енергії всіх частинок, так і енергії, зв'язані з масою ядер і ядерних частинок:

$$m_{\text{Li}}c^2 + m_{\text{п}}c^2 + E_{\text{кп}} = 2m_{\text{He}}c^2 + 2E_{\text{кHe}}.$$

У цьому рівнянні  $E_{\text{кп}}$  і  $E_{\text{кHe}}$  означають кінетичні енергії протона і ядра атома Гелію (альфа-частинки) відповідно. Оскільки внаслідок цієї реакції утворюються дві частинки однакової маси, їх кінетичні енергії мають бути однаковими.

У результаті реакції виділяється енергія:

$$\Delta E = 2E_{\text{кHe}} - E_{\text{кп}} = (m_{\text{Li}} + m_{\text{п}} - 2m_{\text{He}})c^2.$$

Оскільки  $m_{\text{Li}} = 7,018239$  а.о.м.,  $m_{\text{п}} = 1,0081451$  а.о.м.,  $m_{\text{He}} = 4,0038671$  а.о.м., то  $m_{\text{Li}} + m_{\text{п}} - 2m_{\text{He}} = 0,01857$  а.о.м., а  $(m_{\text{Li}} + m_{\text{п}} - 2m_{\text{He}})c^2 \approx 17,35$  МеВ. Отже, під час цієї реакції виділяється велика кількість енергії — 17,35 МеВ.

Реакції можуть відбуватися і з поглинанням енергії. Наприклад, реакція  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$  йде з поглинанням 1,16 МеВ енергії.



Визначити, які реакції йдуть з виділенням енергії, а які з її поглинанням, можна на основі графіка залежності питомої енергії зв'язку  $E$  від масового числа  $A$  ядра (див. мал. 155). Питома енергія зв'язку ядер атомів, які посідають у Періодичній системі останні місця ( $A \approx 200$ ), приблизно на 1 МеВ менша від питомої енергії зв'язку в ядрах елементів, які містяться в середині Періодичної системи ( $A \approx 100$ ). Тому при поділі масивного ядра на двоє ядер з масовими числами порядку 100 (і більше) відбувається виділення енергії.

Для прикладу розглянемо поділ ядра Урану  $^{238}\text{U}$  ( $A_1 = 238$ ) на два атомних ядра з масовими числами  $A_2 = 119$ . Питома енергія зв'язку ядра Урану  $\varepsilon_1 = 7,5$  МеВ, питома енергія зв'язку кожного з нових ядер  $\varepsilon_2 = 8,6$  МеВ. Для роз'єднання всіх нуклонів, які складають атомне ядро Урану, необхідно затратити енергію, що дорівнює енергії зв'язку ядра:

$$E_1 = \varepsilon_1 A_1 = 7,5 \text{ МеВ} \cdot 238 = 1785 \text{ МеВ}.$$

При об'єднанні цих нуклонів у два нових ядра з масовими числами  $A_2 = 119$  виділиться енергія, що дорівнює сумі енергій зв'язку нових ядер:

$$E_2 = 2\varepsilon_2 A_2 = 2 \cdot 8,6 \text{ МеВ} \cdot 119 = 2046,8 \text{ МеВ}.$$

Отже, в результаті реакції поділу ядра Урану виділиться енергія  $\Delta E$ , яка дорівнює різниці між енергією зв'язку нових ядер і енергією зв'язку ядра Урану:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2046,8 \text{ МеВ} - 1785 \text{ МеВ} = 261,8 \text{ МеВ}.$$

Безпосередні вимірювання підтверджують, що під час поділу ядра Урану  $^{238}\text{U}$  виділяється енергія понад 200 МеВ, причому більша частина її припадає на кінетичну енергію нових ядер («осколків»).

З аналізу графіка залежності питомої енергії зв'язку від масового числа випливає, що виділення енергії повинно мати місце і під час об'єднання (синтезу) кількох легких ядер в одне масивне. Припустимо, що відбувається синтез двох ядер Натрію  $^{23}_{11}\text{Na}$  ( $A_1 = 23$ ) в ядро з масовим числом  $A_2 = 46$ . Питома енергія зв'язку ядра Натрію  $\varepsilon_1 = 7,9$  МеВ, питома енергія нового ядра  $\varepsilon_2 = 8,4$  МеВ. Для роз'єднання всіх нуклонів, які утворюють два ядра Натрію, необхідно затратити енергію, що дорівнює подвоєній енергії ядра Натрію:

$$E_1 = 2\varepsilon_1 A_1 = 2 \cdot 7,9 \text{ МеВ} \cdot 23 = 363,4 \text{ МеВ}.$$

У разі об'єднання цих нуклонів у нове ядро з масовим

числом  $A_2 = 46$  виділиться енергія, що дорівнює енергії зв'язку нового ядра:

$$E_2 = 2\varepsilon_2 A_2 = 8,4 \text{ Мев} \cdot 46 = 386,4 \text{ Мев}.$$

Отже, під час реакції синтезу ядер Натрію відбувається виділення енергії  $\Delta E$ , яка дорівнює різниці енергій зв'язку новоутвореного ядра і енергії зв'язку ядер Натрію:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 386,4 \text{ Мев} - 363,4 \text{ Мев} = 23 \text{ Мев}.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що виділення ядерної енергії відбувається як під час реакцій поділу важких ядер, так і під час реакцій синтезу легких ядер. Значення ядерної енергії, виділеної кожним ядром, яке бере участь у реакції, дорівнює різниці між енергією зв'язку  $E_2$  продукту реакції і енергією зв'язку  $E_1$  вихідного ядра:  $E = E_2 - E_1$ .

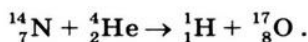
Найбільш вигідною з точки зору одержання ядерної енергії є реакція синтезу ядер Гідрогену  $^1_1\text{H}$  або дейтерію  $^2_1\text{H}$ , оскільки, як видно з графіка, в цьому випадку різниця енергій зв'язку ядра, яке синтезується, і вихідних ядер буде найбільшою. Легко підрахувати, що під час утворення ядра Гелію з двох дейтронів виділяється 24 Мев енергії. Якби у такій реакції взяли участь всі ядра 1 кг дейтерію, то виділилася б грандіозна кількість енергії — порядку  $3,6 \cdot 10^{27} \text{ Мев} = 1,62 \cdot 10^8 \text{ кВт-год}$ .

- ?
1. Чому під час реакцій поділу важких ядер відбувається виділення енергії? Як можна обчислити цю енергію?
  2. Як пояснити виділення енергії під час синтезу легких ядер?
  3. Яка реакція є найбільш вигідною з точки зору одержання енергії?

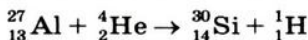
## Вправа 21

1. Визначте енергію зв'язку Урану  $^{235}_{92}\text{U}$  і Гелію  $^4_2\text{He}$  та повну енергію, яка виділяється під час перетворення всіх ядер атомів, що містяться в 1 г речовини.

2. Визначте енергію, яка поглинається під час реакції:



3. Яка енергія виділиться, якщо під час реакції



піддати перетворенню всі ядра атомів 1 г алюмінію?

## § 89 — ОДЕРЖАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ІЗОТОПІВ

Після відкриття в 1932 р. англійським фізиком Дж. Чедвіком нейтрона французькі фізики Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі зайнялися дослідженням ядерних реакцій, які виникають під час опромінення різних речовин альфа-частинками. Вони виявили, що опромінені речовини можуть випускати нейтрони, протони, електрони, гамма-фотони та інші частинки і після припинення опромінення. Це означало, що внаслідок впливу альфа-частинок на ядра останні ставали радіоактивними. Досліди показали, що зміна активності цього власного радіоактивного випромінювання задовольняє основний закон радіоактивного розпаду  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , тобто експоненціально залежить від часу, як і у випадку природної радіоактивності.

Так було відкрито явище *штучної* (наведеної) *радіоактивності*.

Подальші дослідження показали, що штучно радіоактивні ядра можна одержати бомбардуванням речовин не лише альфа-частинками, а й нейтронами, протонами чи іншими частинками, розігнаними в спеціальних прискорювачах до великих енергій, наприклад ядрами дейтерію, тритію тощо.

Розглянемо кілька прикладів реакцій, які ведуть до одержання радіоактивних ядер. Ядро Іоду  $^{127}_{53}\text{I}$  захоплює нейтрон, і утворюється ядро бета-радіоактивного ізотопу Іоду  $^{128}_{53}\text{I}$  з періодом піврозпаду  $T = 24,98$  хвилин:



У результаті радіоактивного розпаду Іоду утворюється стабільний ізотоп Ксенону з масовим числом  $A = 128$ .

Стабільний ізотоп Натрію  $^{23}_{11}\text{Na}$  під дією нейтронів перетворюється в радіоактивний ізотоп  $^{24}_{11}\text{Na}$ . Цей ізотоп є бета-радіоактивним і перетворюється в стабільний ізотоп Магнію  $^{24}_{12}\text{Mg}$ , випускаючи при цьому гамма-квант:



Як і для природних радіоактивних речовин, для штучно радіоактивних ізотопів властиві альфа-, бета- і гамма-розпади. Принципової різниці між природною і штучною радіоактивністю не існує, оскільки властивості ізотопу не залежать від способу його утворення. Радіоактивний ізотоп, одержаний штучно, нічим не відрізняється від того самого природного ізотопу.



З часу відкриття штучної радіоактивності одержано по кілька радіоактивних ізотопів для кожного хімічного елемента, які мають різноманітні періоди піврозпадів: від часток секунди до тисяч років. Усього одержано і досліджено понад 1500 радіоактивних ізотопів. Багато з них знайшли важливе застосування в різноманітних галузях діяльності людини.

За допомогою штучної радіоактивності в останні роки проведено велику роботу з синтезу трансуранових елементів, тобто елементів з порядковим номером, більшим за порядковий номер Урану ( $Z = 92$ ). На сьогодні одержано 15 трансуранових елементів, кожен з яких має кілька ізотопів. Нижче в таблиці наведено перелік трансуранових елементів, вказано ізотоп з найбільшим часом життя і період його піврозпаду.

**Відомі на сьогодні трансуранові елементи.**

Назва і позначення	Виявлені ізотопи з масовими числами $A$	Найбільший період піврозпаду
Нептуній, ${}_{93}\text{Np}$	231—241	$2,2 \cdot 10^6$ р.
Плутоній, ${}_{94}\text{Pu}$	232—246	24340 р.
Америцій, ${}_{95}\text{Am}$	237—246	8000 р.
Кюрій, ${}_{96}\text{Cm}$	238—250	$1,7 \cdot 10^7$ р.
Берклій, ${}_{97}\text{Bk}$	243—250	$10^4$ р.
Каліфорній, ${}_{98}\text{Cf}$	244—254	800 р.
Ейнштейній, ${}_{99}\text{Es}$	245—256	140 дн.
Фермій, ${}_{100}\text{Fm}$	248—258, 260	79 дн.
Менделевій, ${}_{101}\text{Md}$	255, 256	1,5 р.
Нобелій, ${}_{102}\text{No}$	254—256, 258, 260—264, 266	секунди
Лоуренсій, ${}_{103}\text{Lr}$	257, 266	секунди
Резерфордій, ${}_{104}\text{Rf}$	260, 264, 266—270,	
Дубній, ${}_{105}\text{Db}$	272, 274	0,1 с
Сиборгій, ${}_{106}\text{Sg}$	260, 261	2 с
Борій, ${}_{107}\text{Bh}$	259	0,01 с
Гасій, ${}_{108}\text{Hs}$	262	$4,2 \cdot 10^{-6}$ с
Майтнерій, ${}_{109}\text{Mt}$		

Елементи із  $Z = 110$ ,  $Z = 111$  і  $Z = 112$  добуті, але ще не названі.

?

**1. Як було відкрито штучну радіоактивність? Як можна одержати штучні радіоактивні ізотопи? 2. Як змінюється з часом радіоактивність штучних радіоактивних ізотопів? 3. Чи існує різниця між природною і штучною радіоактивністю? 4. Які елементи називають трансурановими? Чому таких елементів немає на Землі?**

## § 90 — ВИКОРИСТАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ІЗОТОПІВ У НАУЦІ Й ТЕХНІЦІ

Радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів, одержаних штучно, широко застосовуються в різноманітних галузях народного господарства. Про використання радіоактивних ізотопів лише в одній якійсь галузі, наприклад харчовій промисловості чи медицині, написані великі книги. Спробуємо з'ясувати фізичні принципи найважливіших методів застосування радіоактивних ізотопів.

Основою практичного використання радіоактивних ізотопів є такі їх властивості:

а) будь-який радіоактивний ізотоп є міченим атомом відповідного хімічного елемента, тобто атомом, який за своїми фізичними і хімічними властивостями поводить себе так само, як і звичайний атом, але за поведінкою якого можна спостерігати за його радіоактивним промінням;

б) будь-яке радіоактивне проміння має певну проникаючу здатність, тобто властивість поширюватися і поглинатися в даному середовищі певним чином;

в) радіоактивне проміння, проходячи крізь речовини, іонізує їх;

г) під дією нейтронів та інших випромінювань великої енергії в речовині утворюється наведена радіоактивність.

Відповідно до цих властивостей основні методи використання радіоактивного проміння можна розділити на такі чотири групи: а) мічені атоми (або радіоактивні індикатори); б) використання проникаючої здатності випромінювань; в) використання йонізуючої здатності випромінювань; г) використання різних форм наведеної радіоактивності.

Наведемо приклади застосування цих методів.

**Метод мічених атомів** полягає в тому, що до досліджуваного хімічного елемента домішується певна кількість його радіоактивного ізотопу. Цю радіоактивну домішку не можна хімічно відрізнити від основної маси елемента, однак її можна виявити за допомогою лічильника Гейгера — Мюллера чи іншого реєстратора радіоактивного проміння. Спостерігаючи за поведінкою радіоактивного ізотопу, можна судити і про поведінку хімічного елемента, який нас цікавить. Радіоактивність є своєрідною міткою, яка дає можливість стежити за поведінкою атомів того чи іншого хімічного елемента.

Використання мічених атомів дало можливість дістати дуже цінні відомості з біології, хімії, металургії, медицини, фізіології тощо. Наприклад, за допомогою мічених атомів можна дістати інформацію про швидкість обміну речовин в



тканинах живого організму, про швидкість руху крові в судинах людини і нафтопродуктів трубопроводами тощо.

У медицині за допомогою мічених атомів вивчають вміст тих чи інших речовин у різних тканинах і органах людини, процеси обміну в організмі з метою діагностики деяких захворювань. Так, наприклад, за допомогою радіоактивного йоду розпізнають захворювання щитовидної залози, а також пухлин головного мозку. Невелику кількість радіоактивного ізотопу Йоду  $^{132}_{53}\text{I}$  домішують до нерадіоактивного Йоду  $^{127}_{53}\text{I}$  і суміш вводять в організм. Радіоактивний Йод випускає електрони, які можуть бути виявлені лічильником Гейгера — Мюллера. За показаннями лічильника можна дізнатись про швидкість нагромадження і кінцеву концентрацію Йоду в щитовидній залозі або в тканині пухлини головного мозку і зробити певні висновки про захворювання людини.

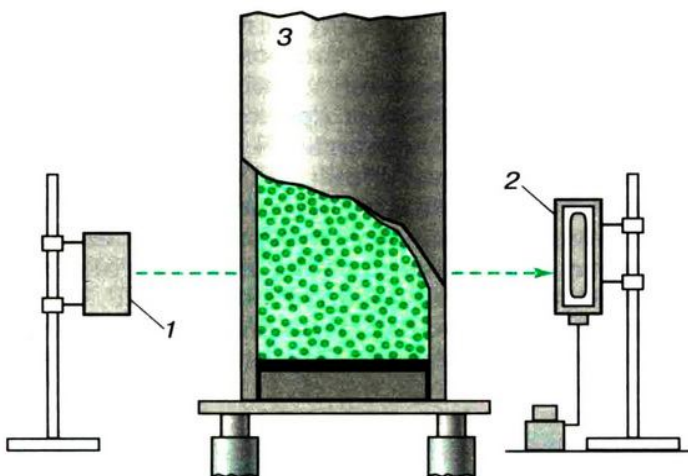
Аналогічно досліджуються переміщення в організмі людини різних лікарських речовин, їх засвоєння різними органами тощо.

У машинобудуванні мічені атоми широко використовуються для вивчення характеру зношування деталей машини залежно від режиму їх роботи і властивостей змащувальних речовин, для визначення швидкості зношення підшипників у різних умовах. Для цього в одну з третьових поверхонь вносять радіоактивний ізотоп (наприклад, бета-радіоактивний ізотоп Феруму  $^{59}_{26}\text{Fe}$  в сталь), після чого вимірюють радіоактивність або іншої третьової поверхні, або (що, звичайно, зручніше) змащувальної речовини. Такий метод дає можливість різко скоротити час випробування на зношення при підвищенні точності й детальності інформації про цей процес.

Не менш широке застосування приладів, в яких використовується проникаюча здатність гамма- (рідше бета-) променів. В основу дії майже всіх цих приладів покладено один і той самий простий принцип: лічба в приймачі радіоактивних випромінювань детектора змінюється, якщо змінюється товщина або вид матеріалу між приймачем і джерелом випромінювання. На основі цього принципу діють різні прилади для вимірювання товщини виробу, густини речовини, рівня рідин чи сипких тіл у закритих посудинах, лічильники предметів, гамма-дефектоскопи та багато інших приладів. На цьому ж принципі діють також численні гамма-релейні пристрої, які автоматично контролюють хід виробничих процесів.

Однією з найбільш розвинутих галузей застосування радіоізотопних приладів цього типу є автоматичний контроль рівня рідких і сипких речовин у закритих непрозорих





Мал. 159

посудинах, розплавленого чавуну в вагранках тощо. Принцип дії найбільш поширених приладів для контролю рівня є таким. З протилежних боків посудини один проти одного розміщують джерело (1) і приймач (2) випромінювання (мал. 159). Оскільки густина повітря значно менша за густину речовини, яка заповнює посудину 3, то поки рівень речовини знаходиться нижче від прямої, яка з'єднує джерело і приймач, потік випромінювання, пройшовши крізь стінки посудини, потрапляє на приймач. Якщо при заповненні посудини речовиною рівень останньої підніметься вище за пряму джерело — приймач, потік випромінювання не потрапляє на приймач, і спеціальний релейний пристрій вмикає світло-ву чи звукову сигналізацію або механізм автоматичного регулювання рівня.

Важливим у народному господарстві є використання **йонізуючої здатності** радіоактивних випромінювань. Особливо в медицині для руйнування злоякісних пухлин. Під дією гамма-випромінювання Кобальту  $^{60}_{27}\text{Co}$  руйнуються ракові пухлини, виліковується рак крові людини (лейкемія).

Радіоактивні випромінювання вбивають мікроорганізми, а тому застосовуються для стерилізації харчових продуктів і фармацевтичних препаратів.

На закінчення розглянемо використання явища **наведеної радіоактивності**. Особливо широко це явище використовується в так званому активаційному аналізі. Якщо досліджувану речовину опромінити нейтронами, деякі з атомів стабільних ізотопів даної речовини, захопивши нейтрони,

перетворюються в радіоактивні. Встановивши за характером випромінювання (за видом випромінюваних частинок, їх енергією і періодом піврозпаду), які саме радіоактивні ізотопи утворилися, можна судити про наявність у даній речовині домішок тих чи інших елементів. Чудовою особливістю активаційного аналізу є можливість виявлення дуже малих концентрацій досліджуваних елементів — до  $10^{-10} \%$ .

Дуже цікавим прикладом використання явища наведеної радіоактивності є визначення віку археологічних об'єктів за вмістом у них радіоактивного ізотопу  $^{14}_6\text{C}$ .

Ми, звичайно, розглянули далеко не всі можливі випадки застосування радіоактивних ізотопів у народному господарстві.

?

1. Які властивості радіоактивних ізотопів є основою для їх практичного використання? 2. Які основні методи використання радіоактивних ізотопів існують? 3. Наведіть приклади застосування методу мічених атомів. 4. Наведіть приклади використання проникаючої здатності гамма-проміння. 5. Розкажіть про використання в медицині йонізуючої здатності радіоактивного проміння. 6. У чому полягає принцип активаційного аналізу?

## **§ 91 — ПОГЛИНУТА ДОЗА ВИПРОМІНЮВАННЯ І ЇЇ БІОЛОГІЧНА ДІЯ. ЗАХИСТ ВІД ВИПРОМІНЮВАНЬ**

Під час роботи на ядерних установках і з радіоактивними препаратами, які використовуються в різних галузях науки і техніки (дефектоскопія в машинобудуванні, радіоактивні прилади для контролю товщини виробу, рівня рідин, променеві датчики, пристрої для автоматизації виробничих процесів, медичні застосування випромінювань, добування і переробка уранових руд тощо), людина зазнає зовнішнього опромінення гамма-квантами, нейтронами, електронами та іншими частинками.

Йонізація, яка виникає під час взаємодії випромінювання з живою тканиною, шкідливо впливає на людський організм. Опромінення всього організму або значної його частини може викликати променеву хворобу, розвиток ракових пухлин, лейкемію (білокрів'я) тощо.

Незалежно від природи йонізуючого випромінювання його вплив на речовину оцінюють енергією, яка поглинається одиницею маси речовини. Цю характеристику називають *поглинутою дозою опромінення* (або дозою випромінювання):



$$D_{\Pi} = \frac{E}{m}, \quad (91.1)$$

де  $E$  — енергія йонізуючого випромінювання, передана речовині,  $m$  — маса опроміненої речовини. За одиницю поглинутої дози прийнято 1 Дж/кг. Цю одиницю назвали **г р е й** (Гр) на честь англійського вченого Л. Г р е я (1905—1965). 1 грей дорівнює поглинутій дозі випромінювання, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія йонізуючого випромінювання 1 Дж.

Значення поглинутої дози залежить від виду випромінювання, енергії його частинок, густини їх потоку і від складу опромінюваної речовини. Це пояснюється різними процесами взаємодії частинок і фотонів з електронами і атомами речовини. За інших однакових умов поглинута доза тим більша, чим більший час опромінення, тобто поглинута доза нагромаджується з часом.

Здавалося б, для обчислення поглинутої дози достатньо виміряти енергію йонізуючого випромінювання, яке падає на тіло, енергію, яка пройшла крізь тіло, і їх різницю поділити на масу тіла. Однак практично це зробити важко, оскільки тіло неоднорідне, енергія розсіюється тілом у всі боки тощо. Отже, цілком конкретне і зрозуміле поняття «поглинута доза» виявляється мало придатним на практиці. Тому дозу рентгенівського і гамма-випромінювання вимірюють за йонізацією ними повітря. Одиницею вимірювання в цьому випадку є кулон/кілограм (Кл/кг). Доза в 1 Кл/кг означає, що сумарний заряд усіх йонів одного знака, утворених в 1 кг повітря, дорівнює кулонові. На практиці часто користуються також застарілою одиницею дози рентгенівського і гамма-випромінювання — рентгеном (Р).  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

Біологічна дія йонізуючих випромінювань будь-якого виду на живі тканини пов'язана із збудженням і йонізацією атомів та молекул, утворенням вільних хімічних радикалів. Збуджені атоми і йони, вільні радикали мають високу хімічну активність, тому в клітинах організму утворюються нові хімічні сполуки, чужі здоровому організму. Йонізуючі випромінювання пошкоджують або руйнують клітини, порушують їх здатність до поділу, викликають необоротні генетичні зміни (мутації) хромосом, що призводить до тяжких спадкових хвороб і потворства нащадків, до променевої хвороби і утворення злоякісних пухлин.

Враховуючи небезпеку для людини радіоактивних випромінювань, встановлено гранично допустимі дози опромінення. Для великих груп населення будь-якого віку, включаючи й тих, що проживають поблизу підприємств, на яких використовуються випромінювання з промисловою чи



дослідницькою метою, гранично допустима доза рентгенівського або гамма-випромінювання встановлена в 0,05 Гр за рік. Доза загального опромінення людини в 2 Гр веде до променевої хвороби, дози в 6—8 Гр і більше майже завжди смертельні.

Слід підкреслити, що радіаційна небезпека під час роботи з радіоактивними джерелами справді існує і вона надзвичайно підступна, оскільки тяжкі, часто непоправні патологічні зміни в організмі настають під дією випромінювання без щонайменших суб'єктивних ознак, які сигналізують про небезпеку. Ці зміни нагромаджуються, наростають в організмі, і в ряді випадків проявляються лише через дуже великий строк (десятиліття) після фактичного опромінення, коли лікувальне втручання виявляється запізнілیم. Тому легко-важне ставлення до радіації абсолютно неприпустиме.

Однак це не означає, що з радіоактивними речовинами не можна працювати. Великі успіхи, досягнуті в галузі вивчення властивостей різних видів випромінювання і їх фізіологічного впливу, опрацювання обґрунтованої системи допустимих доз, розвиток методів вимірювання поглинутих доз, організація надійного захисту від випромінювання, постійний медичний контроль осіб, які мають справу з радіоактивними речовинами, гарантують можливість роботи з радіоактивними речовинами без ризику для здоров'я.

У приміщеннях для роботи, пов'язаної з випромінюваннями речовин, встановлюють до з и м е т р и — прилади для вимірювання доз випромінювання в даному місці приміщення. Їх часто забезпечують пристроєм, який автоматично подає звуковий або світловий сигнал, якщо доза випромінювання перевищить допустиме значення. Кожна людина під час роботи з радіоактивними речовинами повинна мати при собі контрольні прилади, які показують дозу, одержану протягом робочого дня. Для цієї мети в спеціальні касети вкладають шматочки фотоплівки і заряджену касету кладуть у кишеню. В кінці робочого дня (або тижня) плівки проявляються і за їх почорнінням визначають дозу, одержану робітником. Як кишенькові дозиметри використовують також інтегруючі йонізаційні камери, виготовлені у вигляді авторучок.

Щоб знизити дозу опромінення до прийнятної, навколо джерела радіоактивних випромінювань встановлюють біологічний захист з речовин, які сильно поглинають випромінювання. Найпростішим за своєю ідеєю методом захисту є віддалення джерела випромінювання на достатню відстань. У тих випадках, коли це неможливо, для захисту від випромінювання використовуються перешкоди з погли-

наючих матеріалів. Найпростішим є захист від альфа-випромінювань, оскільки альфа-частинки мають мізерно малі пробіги. Бета-активні джерела навіть малої активності слід екранувати. Для екранування від електронів з енергіями до 4 МеВ достатньо шару пластмаси в 0,25 см. Більш масивний захист необхідний під час роботи з джерелами гамма-випромінювань. Джерела гамма-випромінювання звичайно вміщують у свинцеві контейнери, а в лабораторних умовах для захисту від гамма-активних препаратів використовують «будиночки» із свинцевих плиток. При необхідності візуального спостереження використовують віконця із спеціального скла, яке містить свинець.

Для захисту від особливо потужних джерел випромінювання (працюючих реакторів, прискорювачів тощо) будують захисні стіни з бетону (як дешевого матеріалу). Товщина захисних бетонних стін в окремих випадках досягає кількох метрів.

## § 92 — ПОДІЛ ЯДЕР УРАНУ

Вище розглядалися типи ядерних реакцій, у тому числі й реакції розщеплення ядра на кілька частин. Серед цих ядерних реакцій особливе місце посідають реакції поділу важких ядер на осколки приблизно однакової маси. Історія відкриття цього важливого явища відноситься до 1934 року, коли італійський фізик Е. Фермі, вивчаючи штучну радіоактивність, виявив, що опромінений нейтронами Уран дає радіоактивні продукти, які мають кілька періодів піврозпаду. Спочатку було висловлено припущення, що відбувається лише утворення трансуранових елементів. Ядро атома Урану  $^{238}_{92}\text{U}$ , захопивши один нейтрон, перетворюється в радіоактивний ізотоп  $^{239}_{92}\text{U}$ . Внаслідок бета-розпаду  $^{239}_{92}\text{U}$  перетворюється в перший трансурановий елемент — Нептуній  $^{239}_{93}\text{Np}$ . У свою чергу, ядро атома Нептунію внаслідок бета-розпаду перетворюється в наступний трансурановий елемент — Плутоній  $^{239}_{94}\text{Pu}$ . Плутоній — альфа-радіоактивний з періодом піврозпаду 24 години і перетворюється в ізотоп  $^{235}_{92}\text{U}$ .

Для перевірки цього припущення в 1936—1937 рр. були проведені дослідження ядерних реакцій, які відбуваються під час опромінення Урану нейтронами різних енергій. На великий подив учених дослідження хімічних властивостей продуктів цих реакцій показало, що поряд з трансурановими елементами утворювалися хімічні елементи, розташовані в середній частині Періодичної системи: Барій, Стронцій,

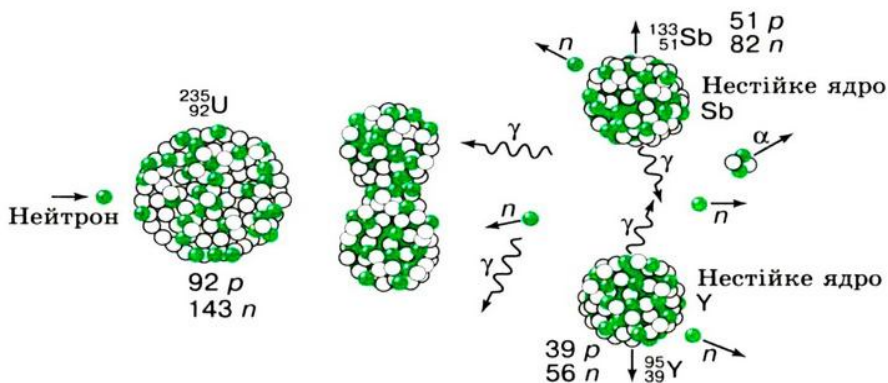


**Енріко  
ФЕРМІ  
(1901—1954)**

Великий італійський фізик. Зробив значний внесок у розвиток сучасної теоретичної і експериментальної фізики. Одночасно з Діраком створив квантову статистичну теорію електронів та інших частинок (статистика Фермі—Дірака). Він здійснив ряд фундаментальних відкриттів у нейтронній фізиці: виявив штучну радіоактивність під час опромінення речовини нейтронами, процес сповільнення нейтронів тощо. Під його керівництвом у 1942 р. вперше була здійснена керована ядерна реакція.

Ітрій, Криптон, Ксенон тощо. Для пояснення цих результатів німецький фізик **Л і з е М е й т н е р** у 1939 р. припустила, що під дією нейтронів відбувається поділ ядер Урану на дві приблизно рівні частини. Ця гіпотеза була експериментально підтверджена дослідями **Жоліо-Кюрі, Л. Мейтнер** та інших.

У разі влучання нейтрона в ядро атома Урану в ньому відбувається перегрупування нуклонів. Ядро дуже деформується (мал. 160) і розпадається на два приблизно однакових ядра. При цьому нуклони (протони і нейтрони) вихідного ядра розподіляються між ядрами, які утворюються, з виконанням законів збереження зарядів і масових чисел:  $Z_{\text{в}} = Z_1 + Z_2$  і  $A_{\text{в}} = A_1 + A_2$ , де індекси 1 і 2 стосуються осколків поділу,  $Z_{\text{в}}$  і  $A_{\text{в}}$  — заряд і масове число вихідного ядра Урану.



Мал. 160



Оскільки питома енергія зв'язку ядер Урану (7,5 MeV) менша за питому енергію зв'язку ядер, які утворюються (8,6 MeV), поділ ядер Урану супроводжується виділенням величезної енергії. Вище ми підраховували, що під час поділу ядра Урану виділяється енергія порядку 200 MeV. При поділі ядер, які містяться в 1 г урану, виділяється енергія  $8 \cdot 10^{10}$  Дж, або 22 000 кВт-год. Для порівняння: така кількість енергії виділяється під час згоряння 2000 кг бензину, або 2500 кг кам'яного вугілля, або, нарешті, під час вибуху 25 000 кг тринітротолуолу (тротилу). Основна частина цієї енергії є кінетичною енергією осколків поділу.

Поділ ядра Урану на осколки з однаковими масовими числами відбувається дуже рідко. Найбільш часто утворюються осколки з масовими числами близько 95 і 139. Осколки ядра є радіоактивними: вони випромінюють фотони, бета-частинки і нейтрони. Ці нейтрони на відміну від миттєвих називаються *запізнилими нейтронами* (викидаються протягом кількох хвилин після поділу вихідного ядра). Кількість запізнилых нейтронів складає близько 1 % всіх нейтронів, які виникають під час поділу. В результаті серії послідовних бета-розпадів осколків поділу врешті-решт утворюються стабільні ізотопи.

?

1. Що відбувається під час бомбардування ядер Урану нейтронами? 2. Завдяки чому виявилось можливим практичне використання внутрішньоядерної енергії? 3. Які нейтрони називають миттєвими і які — запізнилими?

## § 93 — ЛАНЦЮГОВА ЯДЕРНА РЕАКЦІЯ

Ви вже знаєте, що під час кожного поділу ядра Урану вивільнюються нейтрони. Скільки нейтронів вивільнюється у разі одного акту поділу? Це запитання важливе тому, що коли кількість нейтронів у середньому велика, то їх можна використати для поділу наступних ядер, тобто виникає можливість здійснення *ланцюгової реакції*. Над розв'язанням цього питання в 1939—1940 рр. працювали практично в усіх великих ядерних лабораторіях світу. Експериментально було встановлено, що в середньому на один акт поділу випускається 2,5 (від 2 до 3) миттєвих нейтронів. Будь-який з нейтронів, який вилітає у процесі поділу ядра, може в свою чергу викликати поділ наступних 2—3 ядер, які також випускають нейтрони, здатні викликати поділ ядер.

Нехай після кожного поділу випускаються три нейтрони. Тоді один нейтрон може викликати поділ іншого ядра і

породити три нейтрони. Назвемо їх нейтронами першого покоління. Вони в свою чергу створять  $3^2 = 9$  нейтронів другого покоління. В третьому поколінні виникне  $3^3 = 27$  нейтронів і т. д. Така схема розмноження нейтронів. Початковий нейтрон має значення сірника, який запалює пальне.

Реакції з розмноженням нейтронів відбуваються аналогічно до ланцюгових хімічних реакцій, тому вони також названі ланцюговими. Для початку хімічної ланцюгової реакції потрібен запал (іскра, факел). Запалом для ланцюгової ядерної реакції служить невелика кількість нейтронів. Коли б розмноження нейтронів відбувалося так, як описано вище, то один нейтрон у п'ятдесятому поколінні розмножився б до  $3^{50} \approx 10^{25}$  нейтронів. Насправді не всі нейтрони викликають поділ. Частина нейтронів може бути захоплена ядрами домішок до Урану, які не поділяються (або погано поділяються), частина нейтронів може вилетіти через поверхню об'єму палива, не встигаючи зіткнутися з його ядрами. Існують й інші причини, що зменшують кількість нейтронів, які беруть активну участь у ланцюговій ядерній реакції.

Очевидно, що обов'язковою умовою виникнення ланцюгової ядерної реакції є наявність розмноження нейтронів. Розмноження нейтронів характеризують коефіцієнтом розмноження  $k$ , який дорівнює відношенню числа нейтронів  $N_i$ , які викликають поділ ядер речовини на одному з етапів реакції, до  $N_{i-1}$  — нейтронів, які викликали поділ на попередньому етапі реакції:

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}. \quad (93.1)$$

Необхідною умовою для розвитку ланцюгової ядерної реакції є вимога  $k \geq 1$ . Якщо  $k > 1$ , ланцюгова ядерна реакція розвивається у формі вибуху; якщо  $k = 1$ , вона буде стаціонарною, тобто сама себе підтримуватиме (кількість нейтронів, які виникають за одиницю часу, залишається сталою); і якщо  $k < 1$ , реакція швидко затухає. Коефіцієнт розмноження залежить від ряду факторів, зокрема від природи і кількості речовини, яка поділяється, від об'єму, який вона займає. Одна й та сама кількість даної речовини має найбільше значення коефіцієнта  $k$  при сферичній формі об'єму, оскільки в цьому випадку втрата миттєвих нейтронів через поверхню об'єму буде найменшою (куля має мінімальну поверхню при даному об'ємі).

Практичне здійснення ядерної ланцюгової реакції вимагає подолання значних труднощів. Природний уран є сумішшю двох ізотопів:  ${}^{235}_{92}\text{U}$  становить 0,7 % і  ${}^{238}_{92}\text{U}$  — 99,3 %. Ці ізотопи під дією нейтронів ведуть себе по-різному. Ядра

Урану  $^{235}_{92}\text{U}$  поділяються нейтронами будь-яких енергій, але особливо добре повільними (тепловими) нейтронами. Ядра ж  $^{238}_{92}\text{U}$  поділяються лише дуже швидкими нейтронами з енергією понад 1 МеВ. Нейтрони меншої енергії поглинаються ядрами  $^{238}_{92}\text{U}$  без наступного їх поділу. В результаті утворюється нестабільне ядро  $^{239}_{92}\text{U}$  (період піврозпаду дорівнює 25 хв). Випускаючи електрон, антинейтрино і фотон, це ядро перетворюється в ядро першого трансуранового елемента — Нептунію  $^{239}_{93}\text{Np}$ . Нептуній також зазнає бета-розпаду ( $T = 2,3$  доби), перетворюючись в Плутоній  $^{239}_{94}\text{Pu}$ . Плутоній альфа-радіоактивний, однак його період піврозпаду такий великий (24 400 років), що його можна вважати практично стабільним.

Ця істотна відмінність у поведінці ізотопів Урану під дією нейтронів робить неможливим здійснення ланцюгової ядерної реакції в природному урані, тобто в природній суміші ізотопів Урану. Справді, припустимо, що під дією якогось випадкового («блукаючого») нейтрона відбувся поділ ядра Урану-235 чи Урану-238. При цьому поділі виникає 2—3 миттєвих нейтрони з енергією близько 1 МеВ. Нейтрони такої енергії не викликають поділу ядер Урану-238, тому поділятимуться лише ядра Урану-235, яких в природній суміші є дуже мало (0,7 %). В результаті зіткнень вільних нейтронів з ядрами нейтрони сповільнюватимуться і поглинатимуться Ураном-235 і Ураном-238; при цьому Уран-235 поділятиметься, а Уран-238 буде лише зменшувати загальну кількість нейтронів за рахунок їх поглинання. Оскільки ядер Урану-238 приблизно в 140 раз більше, ніж Урану-235, то в природній суміші ізотопів Урану ймовірність поглинання нейтронів ядрами Урану-238 без поділу в багато разів перевищує ймовірність поглинання нейтронів ядрами Урану-235 з поділом, і ланцюгова реакція не може розвиватися ні на повільних, ні на швидких нейтронах у природному урані.

Цю трудність можна подолати двома способами.

1. Можна виділити ізотоп Урану-235. Однак хімічні властивості обох ізотопів майже однакові, а тому їх розділення становить дуже складне завдання. Доводиться використовувати незначну різницю в швидкостях перебігу хімічних реакцій, дифузії тощо, зумовлену різницею в масах ізотопів. З дифузійним методом розділення ізотопів ви ознайомилися в 10-му класі, вивчаючи явище дифузії. Практично ланцюгову реакцію завжди здійснюють у природному урані, попередньо збагаченому Ураном-235 до 5 %.

2. Можна сповільнювати нейтрони, щоб істотно зменшити поглинання їх ядрами Урану-238. У цьому випадку ре-



акція може здійснюватися на природному чи трохи збагаченому ізотопом  $^{235}_{92}\text{U}$  Урані. Однак виникає проблема, як сповільнити нейтрони високих енергій, що виникають під час поділу ядер, до незначних (теплових) енергій. Звичайно, і в природній суміші двох ізотопів Урану нейтрони, стикаючись з ядрами, поступово сповільнюються. Однак у разі природного сповільнення занадто багато нейтронів поглинається Ураном-238 до того, як вони сповільняться до енергій, ефективних для поділу  $^{235}_{92}\text{U}$ . Звідси виникає необхідність швидкого сповільнення нейтронів іншою речовиною, яка поглинає їх слабо. Для цього використовують сповільнювач — речовину з великою сповільнюючою, але з малою поглинаючою нейтрони здатністю. Його часто розміщують шарами окремо (гетерогенно) від Урану. Однак можна також рівномірно переміщувати (гомогенно) речовину, яка поділяється і яка сповільнює нейтрони.

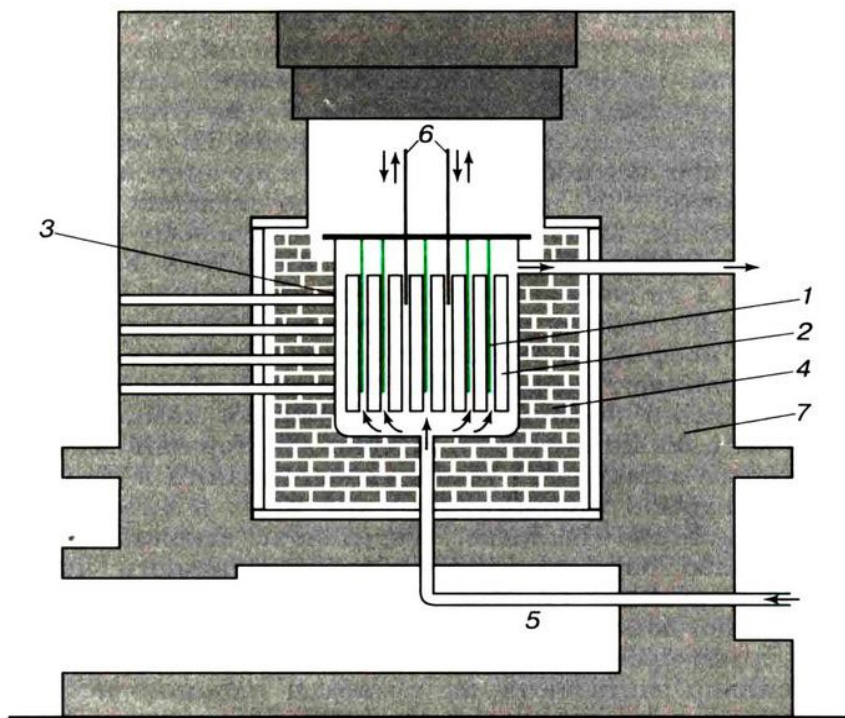
Отже, щоб дістати енергію в результаті ланцюгової реакції поділу ядер, треба створити установку з врахуванням усіх особливостей реакції поділу. Така установка називається **я д е р н и м (або атомним) р е а к т о р о м**.

?

1. Скільки нейтронів випускається ядром Урану під час одного акту поділу? 2. За яких умов можлива ланцюгова ядерна реакція? 3. Що таке коефіцієнт розмноження нейтронів і від чого він залежить? 4. У чому труднощі практичного здійснення ланцюгової ядерної реакції? Які шляхи їх подолання існують?

## **§ 94 — ЯДЕРНИЙ РЕАКТОР**

**Р е а к т о р о м** називається установка, в якій здійснюється керована ланцюгова реакція поділу ядер. Існує багато різновидів реакторів, які відрізняються за робочими енергіями нейтронів, за матеріалом сповільнювача, за призначенням. Але незалежно від призначення і конструкції основними елементами кожного ядерного реактора є: ядерне пальне; пристрій для регулювання ходу ланцюгової реакції; запобіжні пристосування — пристрої, які забезпечують захист персоналу від випромінювань; теплоносій, який відводить надмір кількості теплоти; пристосування для заміни палива. Крім того, переважна більшість реакторів має так званий відбивач, який зменшує втрати нейтронів через поверхню активної зони. В реакторах на повільних нейтронах важливим елементом є сповільнювач.



Мал. 161

Розглянемо коротко будову і принцип дії ядерного реактора на повільних нейтронах (мал. 161).

Головною частиною реактора є активна зона, в якій відбувається ланцюгова реакція і виділяється енергія. В активній зоні розміщені уранові стержні 1 і сповільнювач нейтронів 2. Як сповільнювач використовують графіт, важку воду, а у випадку збагаченого урану — звичайну воду. Ядерне паливо і сповільнювач вміщують у металевий бак 3 і оточують добрим відбивачем нейтронів 4, який повертає нейтрони, що вилітають з активної зони, назад. Для відбивача застосовують ті ж самі матеріали, що й для сповільнювача.

Відведення енергії з активної зони реактора здійснюється теплоносієм, який рухається трубками 5. В енергетичних реакторах теплоносій повинен не лише інтенсивно відводити енергію з активної зони, а й з мінімальними втратами передавати її в установку, яка виробляє електроенергію. В міру проходження через реактор теплоносій нагрівається, передає набуту кількість теплоти через теплообмінний пристрій робочому тілу і знову надходить в реактор. Як теп-

лоносії в реакторах на теплових нейтронах використовують воду, водяну пару, повітря, азот, вуглекислий газ тощо.

Керування перебігом ланцюгової реакції здійснюється звичайно регулюючими стержнями  $\delta$ , виготовленими з матеріалів, які сильно поглинають нейтрони. Ці стержні можна повністю або частково вводити в активну зону, параметри якої розраховані так, щоб при повністю введених стержнях реакція явно не відбувалася. При поступовому виведенні стержня коефіцієнт розмноження нейтронів  $k$  в активній зоні зростає і за певного положення стержнів доходить до одиниці. В цей момент реактор починає працювати. В процесі роботи коефіцієнт  $k$  змінюється переважно в бік зменшення за рахунок забруднення активної зони осколками поділу. Ці зміни коефіцієнта розмноження компенсуються виведенням і, якщо потрібно, введенням стержнів. На випадок раптового збільшення інтенсивності реакції в реакторі є додаткові аварійні стержні, введення яких в активну зону негайно припиняє реакцію. Регулюючі стержні роблять із кадмію або бору, які ефективно поглинають повільні нейтрони. Керування стержнями звичайно автоматизоване.

З активної зони реактора виходить потужний потік нейтронів і гамма-променів. Оскільки гамма-промені і нейтрони досить сильно впливають на організм людини, необхідне влаштування потужного захисту 7 від цих випромінювань. До його складу входять добрі поглиначі гамма-променів (залізо і свинець), сповільнювачі й поглиначі нейтронів (вода, бор, бетон тощо).

Ланцюгова реакція, яка б сама себе підтримувала, можлива в реакторі з певними розмірами активної зони і завантаженою в неї масою ядерного палива. Частина нейтронів під час поділу ядер вилітає з активної зони. При малих розмірах активної зони реактора більша частина нейтронів покидає активну зону, не викликавши поділу ядер, і в такій системі не можна здійснити ланцюгової реакції. Поділ ядер відбувається у всьому об'ємі урану, а втрата нейтронів йде лише з поверхневого шару, тому зі збільшенням розмірів активної зони кількість народжуваних нейтронів зростає швидше, ніж вилітаючих з поверхні. За певних розмірів активної зони кількість втрачених внаслідок вилітання і захоплення нейтронів зрівноважується кількістю нейтронів, які виникають у процесі ділення. Інакше кажучи, якщо коефіцієнт розмноження нейтронів  $k = 1$ , ланцюгова реакція в такій системі можлива.

Мінімальні розміри активної зони, для яких можлива ланцюгова реакція, називаються *критичними розмірами*, а мінімальна маса розщеплюваних речовин, які перебувають у



системі критичних розмірів, називається *критичною масою*. Зрозуміло, що критичні розміри і критична маса залежать не тільки від властивостей розщеплюваної речовини, а також, і дуже сильно, від форми, яку має розщеплювана речовина, або, відповідно, від форми активної зони реактора. Критичні розміри і маса найменші для сферичної активної зони. Для шматка чистого урану-235 сферичної форми критична маса становить від 30 до 50 кг. Значення критичної маси можна дещо зменшити, оточивши активну зону добрим відбивачем нейтронів.

Дуже цікавим є питання про принципову можливість керування ходом ядерної реакції. Неважко здогадатися, що коли б у процесі поділу ядер випускалися лише миттєві нейтрони, то регулювання реакції було б неможливим і вона здійснювалася б лише у формі вибуху. Справді, від моменту виникнення нейтрона під час поділу ядра до зменшення його швидкості й участі в новому акті поділу проходить близько  $10^{-3}$  с (час життя покоління нейтронів). За цей час опустити на потрібну глибину регулюючий стержень практично неможливо. Між тим, як би мало не перевищував коефіцієнт розмноження  $k$  одиницю, швидкість зростання потужності реактора була б дуже великою. Так, для  $k = 1,005$  і часу життя покоління нейтронів  $10^{-3}$  с потужність реактора за секунду зростає у  $(1,005)^{1000} \approx 150$  раз, і його регулювання виявилось б практично неможливим.

Проте, крім миттєвих нейтронів, осколками ядра випускаються з запізненням на 0,2—57,6 с після поділу ядра додаткові нейтрони. Враховуючи наявність нейтронів, які спізнюються, підбирають умови роботи реактора так, щоб коефіцієнт розмноження нейтронів, будучи трохи меншим за одиницю за рахунок миттєвих нейтронів, дещо перевищував одиницю (1,005) за рахунок нейтронів, які спізнюються. В цьому випадку час життя одного покоління нейтронів стає рівним 0,1 с, що цілком достатньо для автоматичного регулювання положення стержнів.

Останнім часом великий інтерес викликає створення реакторів на швидких нейтронах без сповільнювача. Як ядерне паливо в них використовується природний уран, значно збагачений ізотопом  $^{235}_{92}\text{U}$  або Плутонієм. У результаті поділу ядер Урану-235 (або Плутонію-239, який не поступається за своєю здатністю до поділу Урану-235) утворюються швидкі нейтрони з енергією 1—2 МеВ. Частина нейтронів, як у будь-якому реакторі, втрачається, вилітаючи за межі реактора, решта поглинається ядрами Урану-235 чи Урану-238. Ядра Урану-235 діляться, а ядра ізотопу  $^{238}_{92}\text{U}$ , захопивши нейтрон,

перетворюються за відомою вам схемою шляхом бета-розпаду в ізоотоп Плутонію  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ . Таким чином, витрата («вигорання») ізоотопу  ${}^{235}_{92}\text{U}$  супроводжується утворенням не менш цінного ядерного пального  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ . На кожний акт поділу  ${}^{235}_{92}\text{U}$  в середньому може утворитися до 1,5 ядра  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ , оскільки кількість нейтронів, які випускаються під час поділу  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , дорівнює 2,5; з них один йде на підтримання ланцюгової реакції в  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Отже, реактори на швидких нейтронах, виробляючи енергію, можуть продукувати більше ядерного пального, ніж споживають. Тому їх називають реакторами-розмножувачами (або бридерними реакторами).

Аналогічно в реакторах на швидких нейтронах може «спалюватися» ізоотоп Урану  ${}^{233}_{92}\text{U}$  з одночасним утворенням з ізоотопу Торію  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  нового  ${}^{233}_{92}\text{U}$ . Поглинання Торієм нейтрона веде до утворення бета-радіоактивного ізоотопу  ${}^{233}_{90}\text{Th}$ , який внаслідок двох бета-розпадів перетворюється в  ${}^{233}_{92}\text{U}$ .

Важливою перевагою реакторів-розмножувачів є те, що в них одночасно з одержанням енергії можна в безперервно зростаючій кількості виробляти з відносно дешевих  ${}^{238}_{92}\text{U}$  і  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  дорогі розщеплювані матеріали  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  і  ${}^{233}_{92}\text{U}$ .

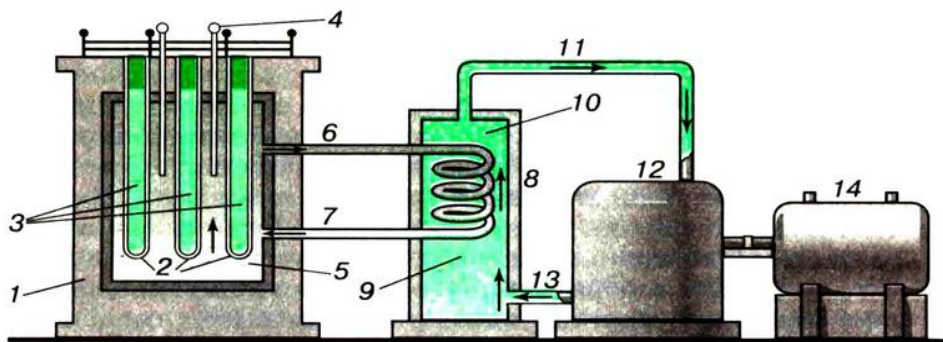
За своїм призначенням реактори поділяють на енергетичні, експериментальні, дослідницькі, а також реактори для вироблення нових розщеплюваних елементів і радіоактивних ізоотопів.

?

1. Як побудований і як працює ядерний реактор? 2. Як здійснюється керування ядерною реакцією в реакторі? 3. Що таке критичні розміри і критична маса ядерного пального? Від чого вони залежать? 4. Завдяки чому можливе керування ходом ланцюгової ядерної реакції? 5. У чому характерна особливість роботи реактора на швидких нейтронах?

## § 95 — АТОМНІ (ЯДЕРНІ) ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

За останні роки в галузі практичного використання ядерної енергії сформувалися два основних напрями: застосування радіоактивних ізоотопів і розвиток ядерної енергетики. З одним із цих напрямів ви вже ознайомилися. Ядерною енергетикою називають здійснюване в промислових масштабах перетворення ядерної енергії в інші види енергії (механічну, електричну тощо), які використовуються потім для виробничих і побутових потреб. Перетворення ядерної



Мал. 162

енергії в електричну відбувається на атомних електростанціях, основною частиною яких є ядерний реактор.

Схему і принцип роботи атомної електростанції на теплових нейтронах з використанням як сповільнювача і теплоносія звичайної води ілюструє малюнок 162. Тут 1 означає бетонний захист ядерного реактора, цифрами 2 позначено циліндри (стержні) з ураном 3 всередині їх. Уранові стержні-блоки 2—3 знаходяться у воді 5, яка одночасно служить і сповільнювачем, і теплоносієм. Вода перебуває під великим тиском і тому може бути нагріта до дуже високої температури порядку  $300^{\circ}\text{C}$ . Така гаряча вода з верхньої частини активної зони реактора надходить через трубопровід 6 в парогенератор 8 (де випаровується вода 9), охолоджується і повертається через трубопровід 7 в реактор. Насичена пара 10 через трубопровід 11 надходить в парову турбіну 12 і після відпрацювання повертається в парогенератор через трубопровід 13. Турбіна обертає електричний генератор 14, струм від якого надходить у розподільний пристрій і потім у зовнішнє електричне коло. Хід ланцюгової реакції регулюється стержнем 4.

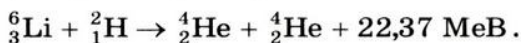
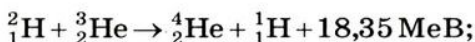
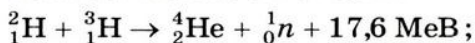
Завдяки застосованій тут двохконтурній схемі відведення теплоти виключається можливість проникнення радіоактивної пари в турбіну та інші частини електростанції. В результаті для обслуговування турбогенератора не потрібно застосовувати якийсь біологічний захист.

Управління атомною електростанцією здійснюється з центрального пункту, де розташовані прилади контролю за роботою обладнання, яке показує положення регулюючих стержнів, тиск, витрату і температуру води в первинному контурі, параметри пари, потужність реактора тощо.



У Ядерна енергія може вивільнятися не тільки під час поділу важких ядер на легші осколки, а також і у разі з'єднання (синтезу) легких ядер у більш масивні. Для прикладу ми розглядали утворення ядер Гелію з ядер Гідрогену та нейтронів і переконалися, що в результаті утворення ядра Гелію виділяється близько 25 МеВ енергії.

Розглянувши ще раз криву залежності питомої енергії зв'язку нуклона в ядрі від масового числа  $A$  (див. мал. 155), неважко переконатися, що оскільки питома енергія зв'язку ядра  ${}^4_2\text{He}$  більша, ніж у сусідніх ядер, то під час його утворення має виділятися енергія. Наведемо приклади кількох реакцій синтезу легких ядер в ядра Гелію, які супроводять-ся виділенням великої кількості енергії:



У Отже, ядерна енергія злиття легких ядер також може бути джерелом енергії. Цікаво порівняти виділення енергії під час ядерних реакцій поділу і синтезу ядер. Ми вже знаємо, що під час реакції поділу одного ядра Урану, Торію чи Плутонію виділяється значно більше енергії — порядку 200 МеВ. І все ж, для промислового використання реакції синтезу становлять значно більший інтерес, ніж реакції поділу. Для оцінки цих двох типів ядерних реакцій правильніше оцінювати не кількості енергії, яка виділяється під час реакцій злиття чи розпаду одного ядра, а вихід енергії на грам речовини, що прореагувала. Оскільки кількість ядер у грамі урану-235 в  $\frac{235}{4}$  раз менша, ніж у грамі дейтерію, то кількість реакцій при «спалюванні» граму урану в  $\frac{235}{4}$  раз менша, ніж при «спалюванні» ядер дейтерію (для реакції синтезу потрібно два ядра). За один акт поділу виділяється середня енергія порядку 200 МеВ, а за один акт синтезу — в середньому 3,6 МеВ, тому відношення енергій, які виділяються в результаті цих двох процесів, дорівнює  $\frac{E_{\text{діл}}}{E_{\text{син}}} = \frac{200 \cdot 4}{3,6 \cdot 235} \approx 1$ , тобто при поділі ядер одного грама урану-235 і синтезі одного грама гелію виділяється приблизно однакова кількість енергії.

А якщо в реакції синтезу візьмуть участь всі ядра, які містяться в 1 г суміші дейтерію з тритієм, то виділиться у

8 раз більше енергії, ніж її виділяється під час реакції поділу ядер 1 г урану-235. До цього порівняння слід додати, що тепер вартість одного грама дейтерію приблизно в 100 раз менша за вартість грама урану-235, а його природні запаси фактично невичерпні, чого не можна сказати про запаси розщеплюваних речовин. Цим пояснюється та велика увага, яка приділяється у всьому світі відшукуванню шляхів здійснення керованих реакцій ядерного синтезу легких ядер.

Однак здійснити практично такі реакції дуже складно. Очевидно, що для об'єднання двох ядер в одне вони мають, долаючи кулонівську силу взаємного відштовхування, наблизитися на відстань порядку  $10^{-13}$  см; тоді подальше їх зближення і об'єднання виконують вже ядерні сили. Об'єднувані ядра повинні мати досить велику кінетичну енергію для виконання роботи проти кулонівських сил відштовхування. Це є необхідною умовою здійснення реакції синтезу.

Розрахунки показують, що для здійснення реакції синтезу Гелію з дейтерію і тритію їх ядра повинні мати кінетичну енергію порядку 0,01 МеВ. Отже, в принципі синтез ядер Гелію можна здійснити, бомбардуючи дейтронами, розігнаними до енергії 0,01 МеВ, ядра тритію. Таке бомбардування хоча й дає можливість створити одиничні випадки з'єднання ядер, але не може бути використане для одержання енергії. На прискорення дейтронів доводиться затрачувати набагато більше енергії, ніж її виділяється в результаті малочислених випадків синтезу ядер, викликаних цими прискореними дейтронами. Реакція синтезу стане економічно вигідною лише тоді, коли в суміші дейтерію з тритієм всі ядра (або хоча б значна їх частина) матимуть енергію порядку 0,01 МеВ. Цього можна досягти, нагріваючи суміш до такої температури, коли середня кінетична енергія теплового руху частинок суміші наближається до 0,01 МеВ. Неважко показати, що така температура має становити десятки мільйонів градусів. Справді, ви знаєте, що середня кінетична енергія  $E$  теплового руху частинок дорівнює  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ , звідки  $T = \frac{2\bar{E}}{3k}$  або  $T \approx 77\,000\,000$  К.

Отже, реакція синтезу може бути здійснена лише за температури в десятки мільйонів градусів, у зв'язку з чим вона дістала назву *термоядерної реакції*. За таких температур речовина перетворюється в гарячу плазму. Для здійснення реакції синтезу ядер дейтерію температура плазми має бути ще вища — порядку 1 млрд градусів.

На шляху здійснення керованої термоядерної реакції стоять грандіозні труднощі: необхідно нагріти плазму до



дуже високих температур порядку  $10^8$  і більше градусів і, що не менш складно, утримати розігріту плазму протягом тривалого часу в заданому об'ємі.

Одним з основних методів нагрівання плазми є пропускання крізь неї електричного струму, нагрівання струмами високої частоти, ударними хвилями, методом адіабатичного стискування тощо. Останнім часом особлива увага приділяється використанню електронних або лазерних пучків для миттєвого нагрівання термоядерного палива до необхідних температур. Плазму вдалося нагріти до 40 млн градусів.

Дуже складним є питання про те, які стінки можуть утримати плазму з температурою в десятки мільйонів градусів. Будь-яка речовина за цих температур не лише випаровується, а й повністю йонізується. Вчені намагаються розв'язати проблему термоізоляції плазми за допомогою неоднорідних магнітних полів. Ви знаєте, що заряджена частинка не може рухатися поступально поперек ліній магнітної індукції. В однорідному магнітному полі частинка закручуватиметься навколо ліній магнітної індукції. Якщо створити магнітне поле з замкнутими лініями магнітної індукції, то в принципі можна утримати плазму в певному об'ємі.

Нині в багатьох країнах світу ведеться велика теоретична й експериментальна робота з одержання керованих термоядерних реакцій. Поки що трудно сказати, коли буде одержана керована термоядерна реакція, можна лише сподіватись, що її успішне розв'язання обіцяє практично безмежне розширення енергетичних ресурсів на Землі.

Цікаво, що термоядерний синтез ядер Гідрогену з ядер Гелію є джерелом енергії випромінювання Сонця і зір, температура речовини в надрах яких досягає  $10^7$ — $10^8$  градусів.

## **§ 97 — ПОНЯТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ ЧАСТИНКИ**

Вся історія розвитку фізики пронизана однією основною ідеєю: пояснити властивості різних об'єктів, виходячи з їх структури, або, іншими словами, відшукати ті неподільні первинні часточки (цеглинки світобудови), з яких побудовано матеріальний світ. Розв'язання цієї ідеї привело до створення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини, на основі якої дістали зрозуміле і єдине пояснення механічні й теплові властивості ті. Вивчення електричних і магнітних властивостей привело до відкриття електрона і протона і до створення електронної теорії будови речовини. Дослідження процесів випромінювання і поглинання електромагнітних



хвиль тілами показало, що електромагнітне поле має свою структуру, елементарною структурною одиницею якого є фотон. Уявлення про квантовий характер випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль з успіхом було використане і в атомній фізиці. Ядерна фізика зайнялася вивченням структури атомного ядра і встановила, що воно складається з протонів і нейтронів.

Таким чином, на початку 30-х років XX ст. було встановлено, що основними структурними елементами речовини є електрони, фотони, нейтрони і протони. Ці частинки були названі елементарними. Такою назвою фізики хотіли підкреслити той факт, що на даному етапі розвитку наших знань про будову речовини вони є останніми структурними елементами. Термін «елементарна частинка» на різних етапах розвитку науки присвоювався різним частинкам. Так, «елементарним» був атом, коли вважався неподільним. «Елементарним» було атомне ядро і залишається поки що електрон. Елементарними були протон і нейтрон, з яких складається ядро.

Тепер строго доведено, що багато з так званих елементарних частинок мають складну структуру. Нині елементарними прийнято вважати частинки, які не складаються з інших відомих частинок і під час взаємодії з іншими частинками чи полями поведуться як єдине ціле.

Вивчення явищ природної і штучної радіоактивності, особливо взаємодії елементарних частинок між собою, сприяло відкриттю все нових і нових елементарних частинок з різноманітними властивостями. Уже відомо понад двісті різних елементарних частинок.

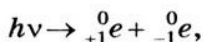
Однією з найбільш важливих властивостей елементарних частинок є їх взаємоперетворюваність. Наприклад, нейтрон може перетворитися в протон з випусканням електрона, а протон, в свою чергу, за певних умов може перетворитися в нейтрон. Однак це не означає, що нейтрон складається з протона й електрона — останні виникають в момент розпаду нейтрона, подібно до того, як виникає фотон світла під час переходу атома із збудженого стану в нормальний. Деякі із взаємоперетворень ми розглянемо нижче.

Взаємоперетворення частинок позбавляють змісту питання про те, з чого складається та чи інша частинка: елементарна частинка не складається з інших елементарних частинок. Вони з'являються в процесі перетворення інших частинок. Під час всіх взаємоперетворень елементарних частинок строго виконуються основні закони збереження: маси, енергії, імпульсу, електричного заряду, закон взаємозв'язку маси й енергії.

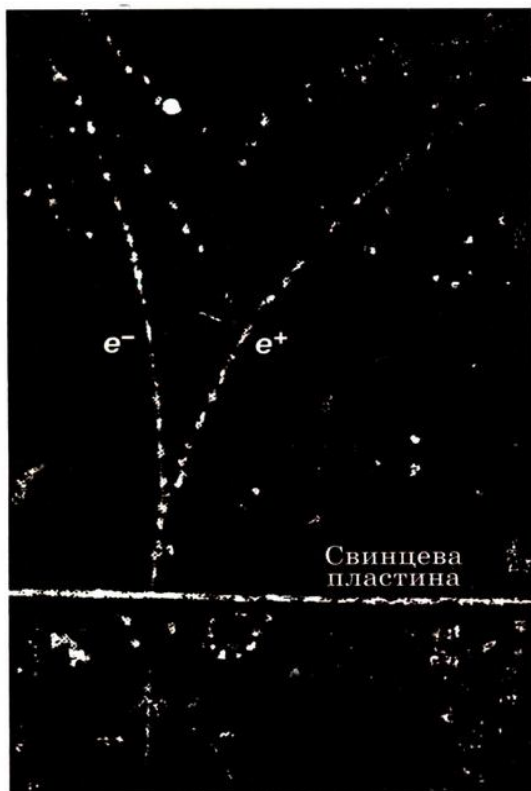
## § 98 — АНТИЧАСТИНКИ І АНТИРЕЧОВИНА

У попередніх розділах ми ознайомилися з чотирма елементарними частинками: електроном, протоном, нейтроном і фотоном. Одним з найбільших досягнень фізики ХХ ст. стало відкриття античастинок — своєрідних двійників згаданих вище частинок. Першим було відкрито двійник електрона — позитивний електрон, або позитрон, тобто частинка з позитивним зарядом, рівним за абсолютним значенням заряду електрона, і масою, рівною масі електрона. Цікаво, що існування позитрона ще до його відкриття теоретично передбачив англійський фізик-теоретик П. Д і р а к у 1930 р. Він передбачив також і умови виникнення позитрона: така частинка утворюється в парі із звичайним електроном у процесі взаємодії кванта електромагнітного випромінювання із сильним електричним полем, яке існує в будь-якому атомі в безпосередній близькості до ядра. З теорії Дірака випливало, що у разі зустрічі позитрона з електроном відбувається їх перетворення у фотони великої енергії. Через два роки позитрон було експериментально виявлено в космічних променях американським фізиком К. А н д е р с о н о м за допомогою камери Вільсона, вміщеної в магнітне поле.

У 1933 році реальність існування позитронів була підтверджена дослідями, не пов'язаними з дослідженням космічних променів. Було виявлено, що позитрони вилітають із свинцевої пластини під час опромінення її гамма-фотонами великої енергії. В цьому можна переконатися на такому досліді. В камері Вільсона, вміщеній в магнітне поле, встановлюють джерело гамма-фотонів великої енергії (наприклад, радіоактивний препарат  $\text{ThC}'$ ). Над препаратом, на шляху гамма-променів, ставлять свинцеву пластину. На одержаних фотографіях (мал. 163) можна спостерігати два викривлені у протилежні боки магнітним полем сліди частинок — «вилку». За густиною слідів, їх довжиною і кривизною можна визначити, що вони належать позитронові й електрону. В місці, де починаються сліди, відбулося перетворення гамма-фотона, який зіткнувся з ядром, у позитрон і електрон. Реакцію утворення позитрона і електрона можна записати так:



де  ${}^0_{+1}e$  — позитрон.



Мал. 163

Незабаром Фредерік та Ірен Жоліо-Кюрі в дослідях з вивчення штучної радіоактивності спостерігали випускання позитронів радіоактивними ізотопами Фосфору, Нітрогену та інших елементів.

Так була відкрита перша античастинка.

Той факт, що позитрон на відміну від електрона спостерігається лише у виняткових випадках, пояснюється дуже малою тривалістю його існування, порядку  $10^{-6}$  с (в атмосферному повітрі). Протягом цього часу позитрон стикається з якимось електроном речовини, що веде до перетворення позитрона і цього електрона у два фотони.

Відкриття перетворення фотонів у пару електрон — позитрон і зворотного перетворення цієї пари у фотони викликало справжню сенсацію в науковому світі. До цього вважалося, що електрони можуть переходити від атома до атома, але, здавалося, ніколи не зникають і не виникають знову. Між тим, з'ясувалося, що дійсний світ значно багатший за



ці, тепер вже застарілі, уявлення. Виявилось, що будь-яка частинка може виникати в парі з античастинкою і зникати в результаті взаємодії з античастинкою, перетворюючись в інші частинки. Підтвердженням цього стало відкриття двійників-античастинок у всіх частинок. Так, у 1995 році групою американських фізиків було відкрито антипротон. Він має масу, що дорівнює масі протона, але заряджений негативно. Його заряд дорівнює зарядові протона. Протон і антипротон також виникають одночасно в парі, а з'єднуючись, зникають, перетворюючись в інші частинки.

У 1957 році було виявлено існування антинейтронів. Антинейтрони мають масу, рівну або близьку до маси нейтрона. Антинейтрон, так само як і нейтрон, не має електричного заряду. Об'єднуючись разом, нейтрон і антинейтрон зникають, перетворюючись в інші частинки.

Нині вважається доведеним, що античастинки є в усіх без винятку мікрочастинок, лише в деяких нейтральних частинок, як, наприклад, у фотона, античастинка тотожна частинці.

Встановлення факту існування античастинок — позитронів, антинейтронів, антипротонів — привело до нової проблеми — проблеми антиречовини. Відкриття антипротона дало можливість висловити припущення, що антипротон може захоплювати на зовнішню орбіту позитрон і утворювати «антиатом», аналогічний до атома Гідрогену, з тією лише різницею, що позитивні й негативні заряди міняються місцями. З антипротонів і антинейтронів можуть утворюватися «антиядра» й інших елементів, які, захопивши на зовнішню орбіту відповідну кількість позитронів, утворюють антиатоми цих елементів. Сукупність таких антиатомів утворює антиречовину.

Ці припущення дістали експериментальне підтвердження. На сьогодні одержано важкий антиводень (антидейтерій), антигелій і антитритій.

Властивості антиречовини нічим не відрізняються від властивостей звичайної речовини, але разом речовина й антиречовина існувати не можуть — взаємодіючи, атоми речовини й антиречовини зникають, перетворюючись у фотони та інші частинки. При такому перетворенні дефект маси досягає максимуму і виділяється максимально можлива, згідно з законом взаємозв'язку маси й енергії, кількість повної енергії  $2mc^2$ , де  $m$  — маса однієї частинки. Таким чином, антиречовина є найбільш досконалим, найбільш «калорійним» паливом. Але це паливо необхідно не лише навчитися добувати, а й зберігати, оскільки воно має бути старанно ізольоване від звичайної речовини. Чи зможе людство успішно розв'язати цю проблему, покаже майбутнє.

Вчені припускають можливість існування окремих зір, а можливо, й цілих зоряних систем (галактик), які складаються з антиречовини, — антисвітів. Зустріч у світовому просторі зірок з двома типами речовини закінчилася б гігантським вибухом, зумовленим спільним зникненням атомів і антиатомів — перетворенням їх у фотони та інші частинки.

1. Чим пояснюються дуже рідкі випадки спостереження позитрона? 2. Які античастинки ви знаєте? 3. Що розуміють під антиречовиною? Що ви знаєте про властивості антиречовини?

## § 99 — РОЗПАД НЕЙТРОНА. ВІДКРИТТЯ НЕЙТРИНО

Після відкриття нейтрона було запропоновано протонно-нейтронну модель ядра, яка стала загальноновизнаною після того, як на її основі удалось пояснити бета-розпад ядер. Як відомо, під час бета-розпаду з ядра вилітає електрон. Однак електронів у ядрі немає, звідки ж він береться?

Розглянемо детальніше бета-розпад деякого ядра, наприклад, Карбону:  ${}^{14}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N} + {}^0_{-1}e$ .

До розпаду ядро  ${}^{14}_{6}\text{C}$  містило 8 нейтронів і 6 протонів, а ядро  ${}^{14}_{7}\text{N}$ , що утворилося після розпаду, містить 7 нейтронів і 7 протонів. Отже, під час бета-розпаду в ядрі відбулося перетворення нейтрона в протон і електрон. Протон залишається в ядрі, а електрон викидається з нього. Правильність цього висновку підтверджується спостереженням над вільними (не зв'язаними в ядрі) нейтронами. Виявилось, що вільні нейтрони бета-радіоактивні з періодом піврозпаду близько 11,4 хв. Перетворення вільного нейтрона в протон можливе тому, що маса спокою нейтрона  $m_n = 1,008982$  а.о.м. перевищує масу спокою протона  $m_p = 1,007593$  а.о.м. на 2,53 маси спокою електрона ( $m_e = 5,48763 \cdot 10^{-4}$  а.о.м.). Здавалося б, що під час розпаду вільного нейтрона електрон має набутися кінетичної енергії:

$$[(m_n - (m_p + m_e)) c^2 = 0,782 \text{ MeV.}]$$

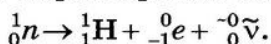
Однак дослідження бета-розпаду ядер показали, що таку енергію мають лише найбільш швидкі електрони. Це було дуже дивним: зовсім однакові ядра випускали електрони різної енергії і перетворювалися також в цілком однакові ядра, незалежно від того, яку енергію мав випущений електрон. Виходило, що бета-розпад ядер відбувається з по-

рушенням закону збереження енергії — одного з найбільш фундаментальних фізичних законів. До речі, саме таке припущення було спочатку висловлене Н. Б о р о м. Однак це припущення рішуче спростоване подальшим розвитком фізики.

Щоб подолати це несподіване порушення закону збереження енергії, швейцарський фізик В. П á у л і висловив припущення, що одночасно з випромінюванням електрона ядро випускає ще одну частинку, яка й забирає частину енергії. Коли б ця частинка мала електричний заряд або досить велику масу спокою (порядку маси електрона), то під час експериментальних досліджень бета-розпаду вона не залишалася б непоміченою. Звідси випливав висновок, що ця частинка, яка згодом дістала назву *нейтрино*, не несе електричного заряду і має дуже малу або рівну нулю масу спокою. Через відсутність електричного заряду і мізерну масу нейтрино дуже слабо взаємодіє з речовиною, тобто має величезну проникаючу здатність. Земна куля для нейтрино більш прозора, ніж найкраще скло для видимого світла. Тому довелося затратити багато зусиль, щоб довести експериментально існування нейтрино.

Лише в 1958 році були одержані дані, які засвідчили, що нейтрино здатне взаємодіяти з атомними ядрами, викликаючи в них перетворення протона в нейтрон. Цей факт сприяв перетворенню гіпотези про виникнення нейтрино під час бета-розпаду ядер в достовірне твердження.

Позначивши нейтрино  ${}^0_0\nu$  (масове число і заряд дорівнюють нулю), реакцію перетворення нейтрона можна записати:



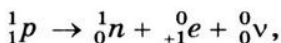
Тепер прийнято називати частинку, яка утворюється під час розпаду нейтрона, антинейтрино, що відмічено значком  $\bar{\nu}$  над індексом частинки. Антинейтрино відрізняється від нейтрино рядом властивостей, які виявляються в різному характері взаємодії з іншими частинками.

Під час бета-розпаду ядер енергія, що виділяється, розподіляється в різних пропорціях між народжуваними в момент перетворення електроном і антинейтрино.

Під час розгляду ядерної реакції перетворення нейтрона в протон, електрон і антинейтрино може виникнути запитання, чи не означає ця реакція простого поділу нейтрона на три складові частини. Чи, може, нейтрон є такою ж мікро-частинкою, як і протон, а електрон і антинейтрино є новими частинками, які не існували «всередині» нейтрона і народилися за рахунок зміни маси у процесі перетворення нейтрона в протон?



Дослідження показали, що розпад нейтрона є перетворенням мікрочастинки, а не роз'єднанням складної системи на частини. Це твердження можна підкріпити рядом фактів. По-перше, було відкрито аналогічне перетворення протона в нейтрон за схемою



де  ${}_{+1}^0e$  — позитрон.

На відміну від розпаду нейтрона позитрон тут супроводить нейтрино, а не антинейтрино. Оскільки маса спокою протона менша за масу спокою нейтрона (і, тим більше, за суму мас нейтрона, позитрона і нейтрино), такий процес можливий лише тоді, коли вихідний протон має достатній надмір енергії, зумовленої взаємодією з іншими частинками, наприклад в атомних ядрах. Нейтрон під час народження залишається всередині ядра, а народжені позитрон і нейтрино викидаються назовні. Такий процес, відкритий Жоліо-Кюрі в 1935 р., носить назву позитронного, або бета-плюс-розпаду.

Відоме перетворення  ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + {}_0^0\nu$ . Під час цього перетворення ядро захоплює один з електронів своєї оболонки і викидає нейтрино. Один з протонів ядра перетворюється в нейтрон, заряд ядра зменшується на одиницю. Цей процес носить назву  $e$ -захоплення. Вилітання нейтрино виявляється за віддачею ядра.

Кожен з цих процесів не можна пояснити поділом системи на складові частини, не вступаючи в суперечність з фактом існування інших перетворень (якщо нейтрон розпадається на протон, електрон і антинейтрино, то як пояснити розпад протона на нейтрон, позитрон і нейтрино). Ці процеси є перетворенням мікрочастинок в прямому розумінні цього слова. Електрон, позитрон, нейтрино і антинейтрино не містяться в протоні чи нейтроні, а народжуються під час взаємного перетворення останніх.

## **§ 100 — ВЗАЄМНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСТИНОК І КВАНТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

У процесі вивчення всього курсу фізики ми постійно підкреслювали, що існує два види матерії — речовина й поле (гравітаційне й електромагнітне) — і показували відмінності між цими двома видами матерії. Ці відмінності можна звести до таких:

1) частинки речовини мають масу спокою, а електромагнітне і гравітаційне поля — не мають;

2) швидкість поширення електромагнітних і гравітаційних полів дорівнює швидкості світла у вакуумі, а швидкість руху частинок речовини завжди менша за цю швидкість;

3) речовина мало проникна, тоді як електромагнітне і гравітаційне поля дуже проникні;

4) речовина й поле відрізняються концентрацією маси й енергії: вона дуже велика в частинок речовини і дуже мала в електромагнітного і гравітаційного полів.

Однак ці відмінності між частинками речовини й поля зникають у мікросвіті. Ми вже знаємо, що взаємодії між нуклонами в ядрах здійснюються за допомогою ядерних полів. Сучасна квантова теорія поля виходить з того, що елементарні частинки є квантами різних полів: фотони — кванти електромагнітного поля, електрони й позитрони — кванти електронно-позитронного поля, мезони — кванти кількох типів мезонних полів, нуклони — кванти нуклонного поля тощо. Інакше кажучи, на рівні елементарних частинок фактично відсутні істотні відмінності між речовиною і полем як видами матерії. І електрон, і позитрон, і протон, і фотон є як елементарними частинками речовини так і квантами відповідних полів.

Про відносність поділу матерії на рівні елементарних частинок на частинки речовини і частинки поля переконливо свідчить взаємоперетворюваність частинок речовини й поля. Наприклад, у 1934 році було встановлено, що при зіткненні електрона з позитроном відбувається їх перетворення в два фотони, тобто відбувається перетворення частинок речовини в частинки електромагнітного поля. Можна також говорити про перетворення квантів електронно-позитронного поля в кванти електромагнітного поля. Можливий також і зворотний процес перетворення фотона великої енергії під час зіткнення з ядром в пару електрон — позитрон. У цьому випадку частинка поля — фотон — перетворюється в частинку речовини (електрон — позитрон). Природно, під час цих перетворень виконуються всі закони збереження. Так, маса фотона виявляється точно рівною сумі мас частинок, які утворилися. Тому не може бути й мови ні про яке «знищення» або «народження» маси, а тим більше матерії в цих процесах.

Дослідження показали, що перетворення в фотони і народження за рахунок фотонів спостерігається для всіх заряджених частинок і античастинок: протона й антипротона,  $\mu^-$ -мезона й  $\mu^+$ -мезона,  $\pi^+$ -мезона і  $\pi^-$ -мезона,  $K^-$ -мезона і  $K^+$ -мезона, а також для нейтрона і антинейтрона. Як і у випадку перетворення пари електрон — позитрон, під час всіх цих процесів перетворення частинок речовини в частинки електромагнітного поля (фотони) і зворотно зберігаються маса, енергія, імпульс і деякі інші характеристики частинок.

# § 101 — ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Елементарні частинки характеризуються масою (спокую), електричним зарядом, середнім часом життя та деякими іншими величинами, яких ми не розглядатимемо. В наведеній нижче таблиці вказані всі відомі елементарні частинки (за винятком так званих резонансів) і дано деякі їх характеристики. Частинки в таблиці розміщені в порядку зростання їх мас. Частинки з масами, які не перевищують 207 електронних мас (крім однієї з них), складають групу легких частинок — *лептонів*, частинки з масами понад 207 електронних мас, але меншими за масу протона, входять до групи *мезонів* (середніх частинок), протон і більш масивні частинки складають групу *баріонів*. Особливе місце посідає в таблиці фотон.

	Назва частинки	Символ		Електричний заряд	Маса спокою	Час життя в секундах (наближено)
		частинка	анти-частинка			
Лептони	Фотон	$\nu$		0	0	Стабільний
	Нейтрино електронне	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабільне
	Нейтрино мюонне	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабільне
	Нейтрино таонне	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Стабільне
	Електрон	$e^-$	$e^+$	1	1	Стабільний
	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	1	206,8	$\approx 10^{-6}$
	Таон	$\tau^-$	$\tau^+$	1	3487	$\approx 10^{-12}$
Мезони	Піони	$\begin{cases} \pi^0 \\ \pi^+ \end{cases}$	$\begin{cases} \pi^0 \\ \pi^- \end{cases}$	$\begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 264,1 \\ 273,1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \approx 10^{-6} \\ \approx 10^{-8} \end{matrix}$
	Каони	$\begin{cases} K^0 \\ K^+ \end{cases}$	$\begin{cases} K^0 \\ K^- \end{cases}$	$\begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 974,0 \\ 966,2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \approx 10^{-10} - 10^{-8} \\ \approx 10^{-8} \end{matrix}$
	Ета-мезон	$\eta^0$	$\bar{\eta}^0$	0	1074	$\approx 10^{-19}$
Баріони	Протон	$p$	$\bar{p}$	1	1836,2	Стабільний
	Нейтрон	$n$	$\bar{n}$	0	1838,7	$\approx 10^3$
	Гіперони: лямбда	$\lambda^0$	$\bar{\lambda}^0$	0	2183	$\approx 10^{-10}$
	сигма	$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	$\approx 10^{-20}$
		$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	$\approx 10^{-10}$
		$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	$\approx 10^{-10}$
	кси	$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	$\approx 10^{-10}$
		$\Xi^-$	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	$\approx 10^{-10}$
	омега	$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	$\approx 10^{-10}$



При розгляді таблиці звертають на себе увагу такі факти. По-перше, лише три з елементарних частинок — електрон, протон і нейтрон є основними: з них побудовані атоми і відповідно весь навколишній речовинний світ. Заряд елементарної частинки (виражений в елементарних зарядах) дорівнює або +1, або -1, або ж 0; дво- і багатозарядних частинок немає. Більшість елементарних частинок є нестійкими і мають дуже малий період життя. Кожній частинці (крім фотона і пі-нуль-мезона) відповідає античастинка.

У 1964 році австрійським фізиком Д. ж. Цвейгом і незалежно від нього американським фізиком М. Гелломаном запропонована гіпотеза про існування в природі невеликої кількості більш фундаментальних, «справді елементарних частинок», названих *кварками*. Згідно з цією гіпотезою, всі мезони й баріони побудовані з кварків і антикварків, з'єднаних між собою в різних комбінаціях. Найбільш дивна (майже неймовірна) властивість кварків пов'язана з їх електричним зарядом — припускається, що кварки мають дробове значення елементарного електричного заряду. Нині в багатьох фізичних лабораторіях світу ведуться експериментальні пошуки кварків.

## ВИСНОВКИ

Електричні явища і особливості оптичних спектрів хімічних елементів свідчать про складну внутрішню структуру атомів. В результаті проведених Е. Резерфордом дослідів встановлено, що атом складається з позитивно зарядженого масивного ядра і електронів, які рухаються навколо цього ядра.

Для пояснення лінійчастих спектрів атома Гідрогену Н. Бор запропонував постулати:

1) Атоми можуть тривалий час перебувати лише в певних (стаціонарних або квантових) станах, в яких, незважаючи на рух електронів з прискоренням, вони не випромінюють електромагнітних хвиль.

2) Атоми випромінюють електромагнітні хвилі під час переходу з одного стаціонарного стану в інший. При цьому випромінюється фотон з енергією, що дорівнює різниці енергій стаціонарних станів:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Постулати Бора експериментально підтверджені Франком і Герцом. Теорія Бора відіграла величезну роль у розвитку вчення про будову атомів, але була логічно суперечливою,

оскільки користувалася одночасно і класичними, і квантовими уявленнями, і пізніше замінена квантовою механікою, яка включає в себе теорію Бора як окремий випадок.

У 1896 році А. Беккерель відкрив явище природної радіоактивності — властивість деяких речовин самочинно випромінювати альфа-, бета- і гамма-промені. Альфа-промені є потоком ядер Гелію, бета-промені — потоком електронів і гамма-промені є променями з дуже короткою довжиною хвилі порядку  $10^{-10}$  м. В результаті альфа-розпаду ядра утворюється ядро нового хімічного елемента з порядковим номером (протонним числом) на дві одиниці меншим, а в результаті бета-розпаду нове ядро має порядковий номер на одиницю більший за номер вихідного ядра. Гамма-випромінювання полягає у випусканні ядром фотона великої енергії без зміни заряду цього ядра.

Радіоактивний розпад ядра в певний момент часу є випадковою подією і не залежить від того, скільки часу ядро взагалі існує. Мірою швидкості радіоактивного перетворення служить період піврозпаду — час, за який розпадається половина атомів будь-якої кількості елемента. Кількість радіоактивних ядер даного сорту, що збереглися до моменту часу  $t$ , зменшується з часом за законом  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ . Стала розпаду  $\lambda$  зв'язана з періодом піврозпаду  $T$  залежністю  $\lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0,693}{T}$ .

Властивості заряджених частинок йонізувати молекули, впливати на фотопластинку, викликати свічення ряду речовин тощо використовуються для спостереження і реєстрації цих частинок. Для дослідження інтенсивних потоків частинок великої енергії використовуються йонізаційні камери. В лічильниках Гейгера — Мюллера використовується явище ударної йонізації молекул. Фотоемульсійний метод реєстрації заряджених частинок ґрунтується на тому, що заряджена частинка, рухаючись у фотоемульсії, руйнує молекули броміду аргентуму на своєму шляху. В камері Вільсона використовується явище конденсації пари на йонах, які виникають внаслідок йонізації молекул газу пролітаючою зарядженою частинкою.

Процес перетворення атомних ядер, зумовлений впливом на них швидких частинок, називається ядерною реакцією. Перша штучна ядерна реакція була здійснена в 1919 році Е. Резерфордом.

Атомні ядра складаються з протонів і нейтронів, які часто називають нуклонами. Число протонів у ядрі дорівнює атомному номеру цього елемента; сума чисел протонів і нейтронів у ядрі називається його масовим числом. Між нуклонами в ядрі діють гігантські ядерні сили, які приблизно в

100 раз перевищують сили кулонівського відштовхування протонів. Ядерні сили діють на дуже малих відстанях.

Під час утворення ядра з окремих нуклонів виділяється енергія, що дорівнює енергії зв'язку ядра. Стійкість (міцність) атомних ядер часто характеризують питомою енергією зв'язку.

Під час ядерних реакцій обов'язково виконуються різні закони збереження: електричного заряду, числа нуклонів, енергії, імпульсу, маси тощо. Розрізняють такі типи реакцій: 1) випускання збудженим ядром гамма-квантів з поверненням ядра в нормальний стан; 2) захоплення ядром бомбардуючої частинки з перетворенням цього ядра в більш масивне; 3) поглинання ядром бомбардуючої частинки з випусканням ним однієї чи кількох частинок; 4) розщеплення ядра на кілька частин.

У процесі ядерних реакцій може виділятися й поглинатися енергія. Енергетичний ефект реакції можна розрахувати на основі закону збереження й перетворення енергії. Виділення ядерної енергії має місце як під час реакцій поділу важких ядер, так і під час реакцій синтезу легких ядер.

Ступінь опромінення середовища радіоактивними випромінюваннями кількісно характеризують поглинутою дозою — енергією випромінювання, поглинутою 1 кг речовини.

На початку 30-х років XX століття встановлено, що основними структурними елементами речовини є електрони, протони, нейтрони і фотони. Пізніше було відкрито ряд елементарних частинок, які не є структурними елементами речовини, однак відіграють важливу роль у взаємодіях між елементарними частинками (позитрон, нейтрино, мезони, піони тощо).

У 1932 році відкрито двійник електрона, його античастинку — позитрон, існування якого теоретично передбачив у 1930 р. П. Дірак. Фотон великої енергії може перетворитися в пару електрон—позитрон і, навпаки, під час зіткнення позитрона з електроном вони перетворюються у два фотони.

Вільний нейтрон радіоактивний і внаслідок радіоактивного розпаду перетворюється в протон, випромінюючи при цьому електрон і антинейтрино. Розпад нейтрона є перетворенням в інші частинки, а не простим поділом на складові частини.

У мікросвіті зникає різниця між частинками речовини й поля. Про відносність поділу матерії на рівні елементарних частинок на частинки речовини і частинки поля переконливо свідчить їх взаємоперетворюваність.



## ФІЗИКА. ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ. ТЕХНОЛОГІЯ

**§ 102 — СУЧАСНА ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ**

Ви закінчили вивчення курсу фізики. Вивчений вами матеріал є результатом гігантської дослідницької роботи, виконаної протягом багатьох століть ученими всього світу з дослідження різних форм руху матерії, будови і властивостей матеріальних тіл.

У ході вивчення фізики та інших наук ви переконалися, що при всій своїй різноманітності навколишній матеріальний світ єдиний. Його єдність виявляється насамперед в тому, що всі явища, якими б складними вони не здавалися, є різними станами і властивостями рухомої матерії, мають **матеріальне походження**. Єдність світу виявляється також у **взаємозв'язку всіх явищ**, можливості взаємоперетворень форм матерії і її руху. Разом з тим єдність світу виявляється в існуванні ряду **загальних законів руху матерії** (закони збереження енергії, імпульсу, електричного заряду, взаємозв'язку маси та енергії тощо). Завдання фізики та інших природничих наук полягає в тому, щоб виявити ці загальні закони природи і пояснити на їх основі конкретні явища й процеси.

Відображенням єдності світу в пізнанні є синтез наукових знань, здобутих у процесі дослідження природи різними науками. На кожному етапі розвитку науки виникає необхідність об'єднання наукових знань в єдину систему знань про явища природи — в природничо-наукову картину світу. Під природничо-науковою картиною світу розуміють усю сукупність знань про предмети і явища природи, об'єднаних єдиними основоположними ідеями, які дістали підтвердження на дослідах і зберегли свою об'єктивну цінність у розвитку людської думки.

Фізична картина світу становить частину всієї системи знань про природу, оскільки вона стосується лише фізичних властивостей матеріальних тіл і фізичних форм руху матерії. Фізична картина світу дає найбільш загальне синтезоване уявлення про суть фізичних явищ на даному етапі розвитку фізичної науки. Природно, що з розвитком фізики зростає кількість відкритих законів. Одночасно встановлюється зв'я-

зок між цими законами, деякі з них дістають теоретичне обґрунтування і подальше узагальнення, на основі чого часто виявляється можливим вивести відомі раніше закони з більш загальних фізичних теорій, принципів. Так, з основного рівняння кінетичної теорії можна вивести всі закони ідеального газу або з електронної теорії будови речовини вивести закони Ома, Джоуля—Ленца тощо.

У розвитку людського пізнання і практичного освоєння світу завжди проявлялося прагнення сформулювати найбільш загальні закони і принципи, знання яких давало б ключ для пояснення всіх процесів. Розкриття таких законів завжди вважалося найважливішою умовою побудови єдиної наукової картини світу.

У стародавньому світі всі знання про природу об'єднувала в собі фізика і уже на той час були сформульовані основні елементи матеріалістичного розуміння світу. Мислителі Давньої Греції — Левкіп, Демокріт, Епікур, а також Стародавнього Риму — Лукрецій Карр твердили, що навколишній світ за своєю природою матеріальний, нестворюваний і незнищуваний, існує вічно в часі і безмежний у просторі. Всі тіла складаються з первинних, далі неподільних частинок — атомів, які під час всіх змін не виникають з нічого і не знищуються, а лише з'єднуються і роз'єднуються.

Висунення в 1543 році Миколаєм Коперником геліоцентричної системи світу і наступний прогрес фізичних знань підготували ґрунт для формування механічної картини світу на основі законів механіки Ньютона. Згідно з вченням Ньютона, весь світ складається з твердих, непроникних частинок — атомів, які мають масу та інерцію. Відрізняються вони один від одного головним чином кількісно, своїми масами. Ці частинки утворюють різні тіла, які об'єднуються в космічні системи. Все багатство, вся якісна різноманітність світу є результатом різниці в русі цих частинок.

Фізика Ньютона давала досить загальну і відносно наочну картину світу. Вона стала теоретичною основою різних галузей техніки того часу. До другої половини XIX ст. механічна картина світу досягла певної завершеності і здавалася непохитною. Її зміцнення було зумовлено насамперед успіхами небесної механіки, яка змогла точно заздалегідь обчислювати майбутні положення планет на небі на основі знання їхніх параметрів у минулому. Фізики вважали, що подібний однозначний взаємозв'язок між явищами виявляється повсюди в світі, який є гігантською складною машиною.

Однак ця наочна механічна картина світу виявилася неспроможною. Під час вивчення електромагнітних явищ (праці Ерстеда, Ампера, Араго тощо) з'ясувалося, що вони не

підкоряються механіці Ньютона. Ці труднощі ще поглибилися з розвитком М. Фарадеєм теорії електромагнітного поля. Фарадеєм був встановлений взаємозв'язок між електричними і магнітними явищами, а Максвеллом сформульовані рівняння електромагнітного поля, які математично описували цей зв'язок. Фізики наполегливо намагалися звести ці рівняння до рівнянь механіки Ньютона, але всі спроби виявилися марними.

Крім того, з розвитком термодинаміки і статистичної фізики були відкриті якісно нові статистичні закони теплових процесів, які не можна звести до законів динаміки Ньютона. По суті, це була криза механічної картини світу: уявлень про абсолютність законів механіки, про незмінність атомів, про можливість зведення всіх форм руху матерії до механічної.

З розвитком електродинаміки у фізиці поступово утверджується уявлення про світ як про всезагальну систему, побудовану з електрично заряджених частинок, які взаємодіють між собою за допомогою електромагнітного поля. Інакше кажучи, починається побудова єдиної електромагнітної картини світу, всі події в якій керуються законами електромагнітних взаємодій.

Вершини свого розквіту електромагнітна картина світу досягла після створення спеціальної теорії відносності, коли було усвідомлено фундаментальне значення скінченності швидкості поширення електромагнітних взаємодій, створено нове вчення про просторово-часові властивості матерії, встановлені релятивістські рівняння руху тіл, які замінили рівняння Ньютона за великих швидкостей.

Однак дальший розвиток фізики показав обмеженість електромагнітної картини світу. В ній матерія розглядалась як сукупність позитивно і негативно заряджених частинок, які взаємодіють через електромагнітне і гравітаційне поля. Частинки рухаються за механічними законами, а зміни в електромагнітному полі описуються рівняннями Максвелла. Але незабаром з'ясувалася обмеженість цієї картини світу. Вона не могла пояснити стійкості атомів і їх спектральні характеристики, не охоплювала тяжіння (закон всесвітнього тяжіння не можна вивести з теорії електромагнітного поля), не пояснювала хімічного зв'язку атомів у молекулах, явища радіоактивності тощо.

Ряд фундаментальних відкриттів на початку XX ст. — квантованості енергії і енергетичних рівнів електронів в атомах, єдності корпускулярних і хвильових властивостей у мікрочастинок, різноманітності типів елементарних частинок і їх властивостей, взаємодій і перетворень — все це при-



вело до заміни електромагнітної картини якісно новою **квантово-польовою** картиною світу. Вона ґрунтується на досягненнях квантової механіки, яка в основному пояснила структуру атомів і молекул, природу хімічного зв'язку, фізико-хімічні властивості макроскопічних тіл, описала багато властивостей і законів перетворення елементарних частинок і теорії відносності, розкрила зміни просторово-часових характеристик тіл зі швидкістю їх руху, зв'язок маси й енергії тощо.

Сучасна квантово-польова картина світу, як і будь-яка інша наукова картина, ґрунтується на визнанні матеріальності і єдності світу, загального зв'язку і зумовленості структурних рівнів, на визнанні невичерпності властивостей матерії і необмеженості її пізнання.

Єдність світу полягає в його матеріальності (всі предмети і явища є різними станами і властивостями рухомої матерії), у взаємозв'язку явищ, наявності в матерії універсальних властивостей (атрибутів), в існуванні загальних законів руху матерії.

З погляду сучасної фізики, існують дві основні форми матерії — речовина і поле. Речовина має переривчасту (дискретну) будову, а поле — безперервну. Однак розвиток фізики показав, що поділ матерії на речовину й поле втратив абсолютний смисл. Ми знаємо, що кожному полю відповідають кванти цього поля: електромагнітному полю — фотони, ядерному —  $\pi$ -мезони тощо. В свою чергу всі частинки речовини мають хвильові властивості. За відповідних умов частинки речовини можуть перетворюватися в кванти відповідних полів і, навпаки, кванти полів можуть перетворюватися в частинки речовини (прикладом може бути відоме утворення електронно-позитронних пар за рахунок фотонів і перетворення пари електрон—позитрон у фотони).

Відображенням матеріальної єдності світу є також і те, що вся різноманітність різних форм руху мікрочастинок і макроскопічних тіл виявляється через чотири основні типи взаємодій: 1) *сильну*, або *ядерну*, яка здійснює зв'язок нуклонів у ядрах атомів; 2) *електромагнітну*, яка зумовлює зв'язок між електрично зарядженими частинками; 3) *слабку*, або «*розпадна*», яка зумовлює бета-розпад ядер і перетворення нейтрона в протон; 4) *гравітаційну*, яка зумовлює тяжіння між всіма матеріальними об'єктами. Ці взаємодії відрізняються радіусом дії і відносною інтенсивністю, тобто енергією, яка передається під час цих процесів.

Сфера прояву різних взаємодій і викликаних ними фізичних явищ визначається радіусом їх дії і пов'язана з тим чи іншим структурним рівнем поділу матерії. На макрофізичному рівні не виявляються короткодійчі сильні і слабкі

взаємодії, тобто для макротіл вирішальне значення мають гравітаційна і електромагнітна взаємодія. Гравітаційна взаємодія визначає рух космічних об'єктів і частково їх будову. Істотною є сила тяжіння і для руху всіх макрофізичних тіл на Землі.

Під час контактів макроскопічних тіл електричні заряди одного тіла наближаються до зарядів іншого, що викликає істотні електромагнітні сили, відомі як сили пружності, тертя, опору середовища. Таким чином, рух макроскопічних тіл на Землі визначається гравітаційними і електромагнітними взаємодіями. Останніми зумовлені і більшість випромінювань — видиме, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське тощо.

У мікросвіті, в областях розмірами від  $10^{-8}$  м до  $10^{-15}$  м вирішальну роль відіграють електромагнітні взаємодії, оскільки гравітаційні порівняно з ними мізерно малі. Електромагнітна взаємодія об'єднує ядра й електрони в атоми, атоми — в молекули, молекули — в кристали. Електромагнітними взаємодіями зумовлені всі хімічні реакції, а значить, і біологічні процеси.

Електромагнітні взаємодії виявляються в мікросвіті на відстанях, менших за  $10^{-15}$  м, але тут вони перекриваються більш інтенсивними сильними взаємодіями. Сильні взаємодії ведуть до взаємних перетворень елементарних частинок і атомних ядер. На відміну від гравітаційної і електромагнітної форм руху ці процеси відбуваються в масштабах порядку розмірів атомних ядер. Сильні взаємодії забезпечують стійкість атомних ядер. Поряд з сильними в мікросвіті, починаючи з відстаней  $10^{-13}$  м, проявляються слабкі взаємодії. Слабкі взаємодії — це процеси, зв'язані з випромінюванням і взаємодією нейтрино (під час розпаду радіоактивних ядер, нейтронів, мезонів тощо).

Отже, сильні і слабкі взаємодії разом з електромагнітними зумовлюють будову і властивості атомних ядер і елементарних частинок.

Матеріальна єдність світу виявляється також в абсолютності і відносності існування матерії, в її нестворюваності і незнищуваності, підтверджених всім розвитком природознавства. Про це свідчать конкретні закони збереження і перетворення фізичних величин, які характеризують різні властивості матерії і її руху (закони збереження маси, енергії, заряду, імпульсу тощо). Ці окремі закони є конкретним виразом об'єктивної загальної властивості нестворюваності і незнищуваності матерії і руху.

Сучасна фізична картина світу є результатом узагальнення найважливіших досягнень усіх фізичних наук. Однак хоч

ця картина світу і відзначається великою загальністю і успішно пояснює багато явищ, все ж у природі існує невичерпна кількість явищ, які сучасна фізична картина світу пояснити не може. З таких труднощів слід насамперед вказати ті, що пов'язані із створенням єдиної теорії елементарних частинок. Тому не можна вважати сучасну фізичну картину світу скільки-небудь завершеною. Складність світу переважає і завжди переважатиме складність людських уявлень про нього.

## **§ 103 — ФІЗИКА І НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС**

Сучасний науково-технічний прогрес характеризується істотно новими взаєминами науки з виробництвом. На базі найновіших відкриттів виникають більш прогресивні технологічні процеси (електрофізичні, електронні, електрохімічні, ультразвукові тощо) і нові галузі промисловості. На основі досягнень ядерної фізики виникли ядерна енергетика і виробництво радіоактивних ізотопів, на основі досягнень фізики твердого тіла — виробництво напівпровідникових приладів, синтетичних матеріалів із заздалегідь заданими властивостями тощо. У наш час різко скорочуються строки впровадження наукових відкриттів у виробництво. Сучасна наука настільки тісно зв'язана з виробництвом, що сама стає безпосередньою виробничою силою.

Які ж напрями технічного прогресу найбільш важливі? З усієї їх різноманітності виділимо лише ті, в яких, з одного боку, виявляються революційні процеси, що вносять істотні зміни в характер розвитку цих областей, а з другого — ці напрями самі впливають на все народне господарство і тим самим виступають у ролі прискорювача науково-технічного прогресу. Природно, що розглядатимемо лише ті напрями, які ґрунтуються на досягненнях фізики.

**Енергетика.** Істотне значення для розвитку науково-технічного прогресу має енергетична база техніки. Основним видом енергії нашого часу є електрична. Легкість одержання, передавання й використання — все це зробило електричну енергію найбільш універсальним видом енергії. Лише електрична енергія дає можливість реально перейти до широкої автоматизації трудових процесів.

Науково-технічний прогрес привів до широкого застосування в технологічних процесах різних властивостей електрики (термічних, світлових, електромагнітних тощо), а також до всебічного застосування електричної енергії для управління, для потреб транспорту, зв'язку і в усіх сферах по-



буту. Цей ріст споживання електроенергії спостерігається нині у всьому світі. Кожні 8—9 років виробництво електроенергії на Землі подвоюється.

Основними напрямками розвитку електроенергетики є теплоенергетика й атомна енергетика. Це означає, що для переважної більшості електростанцій, які будуватимуться, джерелами енергії будуть відповідно хімічна енергія палива і ядерна енергія. У наш час понад 80 % електроенергії виробляється на теплових електростанціях. Їх значення в енергетиці ще тривалий час залишатиметься визначальним.

Важливими тенденціями розвитку теплоенергетики є: використання водяної пари високого тиску й температури, подальше підвищення потужності енергетичних блоків, розвиток автоматизації процесів на теплових електростанціях. Одним з найбільш ефективних напрямів розвитку теплоенергетики є теплофікація, тобто комбіноване вироблення електроенергії і одержання великих кількостей теплоти, що дає можливість значно економніше використовувати паливо.

З часу введення в дію першої атомної електростанції (АЕС) минуло близько 50 років. За цей час в техніці АЕС сталися великі зміни: різко зросли потужності ядерних реакторів, підвищилися техніко-економічні показники АЕС. Для районів, віддалених від ресурсів хімічного палива, собівартість кіловат-години для АЕС менша, ніж для теплових електростанцій. Тому, незважаючи на дещо вищу вартість обладнання для АЕС, їх загальні економічні показники в цих умовах кращі, ніж для теплових електростанцій. Майже для всіх країн світу, особливо для тих, які не мають достатніх ресурсів хімічного палива, програма створення АЕС стала нині однією з найбільш важливих у розвитку енергетики й економіки в цілому.

Розвиток атомної енергетики відбувається на основі створення ядерних реакторів на теплових нейтронах. До важливих завдань удосконалення цих реакторів і розвитку АЕС належать подальше збільшення потужностей реакторів (до 1,5—2 млн кВт і, можливо, більше) і турбогенераторів для них, створення високотемпературного реактора (~ 800 — 1000 °C і вище), які мають велике значення для поліпшення використання ядерного палива і застосування ядерної енергії у високотемпературних технологічних процесах тощо.

У розвитку енергетики велике значення зберігає гідроенергетика. Перевагу гідроелектростанцій (ГЕС) становить невичерпність гідроенергоресурсів, низька собівартість виробленої енергії, відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище. Недоліком ГЕС є відносно висока вартість їх спорудження.

Процес електрифікації вимагав високих темпів розвитку й опрацювання наукових основ енергетики. Розв'язання фізико-технічних проблем енергетики дає нові методи перетворення енергії палива в електричну, удосконалення методів передавання її на далекі відстані. Це дає можливість будувати як теплові, так і гідравлічні енергоблоки з величезною одиничною потужністю, яка досягає кількох мільйонів кіловат. Тепер впроваджуються високовольтні лінії передач напругою 1 млн вольт. Досягнення напівпровідникової техніки забезпечують електроенергетику потужними перетворювачами енергії, електронними керуючими пристроями.

Перші успіхи досягнуто в пошуках нових методів і способів одержання електроенергії. Зокрема, досягнуто великого прогресу в перетворенні сонячної енергії в електричну, починають застосовуватися магнітогідродинамічні способи генерування електричного струму. Проведені успішні дослідження з освоєння термоядерного перетворення внутрішньої енергії в електричну. Велика робота в усьому світі ведеться над проблемою термоядерного синтезу.

**Радіoeлектроніка.** Важливим напрямом сучасного науково-технічного прогресу є радіoeлектроніка, її технічні засоби та їх застосування в багатьох галузях діяльності людей. Сучасна радіoeлектроніка є розвинутою технічною наукою і галуззю техніки, зв'язаною з широким комплексом наукових методів і технічних засобів для запам'ятовування, переробки і передачі інформації на основі використання електромагнітних явищ. Важко назвати іншу галузь техніки, яка б за своїм впливом на життя і діяльність людини посідала б таке важливе місце. Сучасну радіoeлектроніку по праву вважають визначальним напрямом науково-технічного прогресу.

Радіoeлектроніка є основою автоматизації виробничих процесів. Ускладнення сучасного промислового виробництва, зростаючі взаємозв'язки окремих підприємств між собою вимагають автоматизації багатьох керуючих функцій. Це можна зробити лише за допомогою електронних автоматизованих систем управління (АСУ), матеріальну основу яких становлять електронні обчислювальні машини (ЕОМ). Технічною основою обчислювальних машин є засоби радіoeлектроніки.

За порівняно коротку історію використання ЕОМ, ці пристрої зазнали значних змін, змінили три «покоління». Перше покоління ЕОМ, створене на межі 40-х і 50-х років, являло собою громіздкі малонадійні лампові пристрої, здатні розв'язувати вузьке коло обчислювальних задач. І все ж саме ці ЕОМ зіграли надзвичайну роль в техніці інженерних розрахунків і в практиці фізичних досліджень. Однак вони виявилися малоефективними для розв'язання економічних і управлінських задач.

На зміну цим ЕОМ в 50-х роках прийшли машини другого покоління, побудовані на напівпровідниках. Вони мали значно менші розміри, відзначалися більшою надійністю в роботі і мали цілком нові можливості, зумовлені їх великою пам'яттю і швидкодією.

Нові можливості ЕОМ другого покоління різко розширили коло розв'язуваних задач, дали можливість широко застосовувати їх в економіці. Машини другого покоління дали можливість провести істотні зміни в характері технологічних процесів, створити автоматизовані системи управління виробництвом (АСУП), автоматизувати розв'язання багатьох задач економіки.

Наприкінці 60-х років почали створюватися машини третього покоління на інтегральних схемах, які замінюють цілі блоки машин одним мікроскопічним елементом. Вони відзначаються ще більшою надійністю, мають величезну пам'ять і дуже високу швидкодію. Тепер у лабораторіях і дослідному виробництві народжується четверте покоління машин з елементною базою на основі ще більшої інтеграції, а також із застосуванням лазерної техніки і оптоелектроніки.

У наш час ЕОМ знаходять широке застосування в усіх сферах науки, техніки й виробництва. Машини третього і частково вже другого покоління відкрили великі можливості в галузі управління виробничими процесами для побудови автоматизованих систем управління (АСУ) в технологічній сфері і в галузі адміністративній. За їх допомогою виконується управління в масштабі цехів, заводів і цілих галузей.

Застосовується ЕОМ у верстатах з програмним керуванням. Використовуються спеціальні ЕОМ для керування окремими транспортними засобами, наприклад, електропотягами, літаками, кораблями, для організації контролю за рухом в аеропортах, на аеродромах.

Розвиток ЕОМ і заснованих на них АСУ поступово веде до такого положення, що вони набувають значення основного засобу праці, який визначає прогрес у провідних галузях промисловості. Сфера застосування ЕОМ весь час зростає. Дуже велике значення вони мають і в розвитку науки. Без застосування ЕОМ тепер не обходиться жодне значне дослідження. Великі можливості відкрилися завдяки ЕОМ перед медициною. Опрацьовані методи використання ЕОМ як діагностів у клінічній практиці. Без ЕОМ неможливі запуски космічних кораблів і супутників. Для виведення на орбіту космічного корабля необхідно за секунди переробити такий великий обсяг інформації, що це під силу лише ЕОМ. Усі дані про політ корабля, про стан бортових систем і само-



почуття космонавтів вводяться в бортові обчислювальні пристрої, передаються на Землю і надходять у вигляді команд на виконання в потрібні прилади корабля і наземних комплексів. Усі ці процеси виконуються тут з величезною швидкістю і високою точністю.

Завдання автоматизації виробництва вимагають створення гнучких, точних і надійних систем контролю і управління різними процесами, які б характеризувалися максимальною швидкістю. Крім ЕОМ, в яких елементи електронної техніки займають головне місце, для автоматизації виробництва використовується багато інших радіоелектронних пристроїв, оскільки лише вони найбільш повно відповідають усім цим вимогам. Це пояснюється самою фізичною суттю і характером використовуваних у цій галузі явищ, зв'язаних насамперед з безінерційністю електронів і високою швидкістю поширення електромагнітних сигналів. Радіоелектронні прилади дають можливість реєструвати найтонші зміни параметрів будь-яких процесів, легко вимірювати величини самого різноманітного характеру.

Галузі використання радіоелектроніки надзвичайно широкі. Це й нагрівання речовин у високочастотних електромагнітних полях для термічної обробки: загартування, плавлення, паяння, зварювання тощо. Це й застосування ультразвуку для інтенсифікації різних технологічних процесів: очищення деталей, ударне ультразвукове притирання; різання великогабаритних виробів, паяння, зварювання тощо. Це й широке застосування радіоелектронної апаратури і електронної техніки для обробки різних матеріалів. В останні десятиліття в різних технологічних процесах, зв'язаних з термічним впливом на метал (плавлення металу, свердління і фрезерування, зварювання), використовується енергія електронного променя (потoku електронів). Це, нарешті, використання потужних лазерних пучків світла для обробки надтогнуплавких, надтвердих і крихких матеріалів та для іншої мети. Засоби радіоелектроніки дуже широко застосовуються і в транспортній техніці, де без радіонавігації і радіолокації неможливе водіння кораблів і літаків.

Радіоелектроніка, її технічні засоби і методи досліджень надзвичайно широко використовуються в інших науках і насамперед у фізиці, хімії, астрономії, біології, медицині. Вона дає можливість розширити межі дослідження, вимірювати параметри і величини, які значно виходять за можливості людини. Так, наприклад, лише засобами радіоелектроніки можна фіксувати й вимірювати надзвичайно короткі інтервали часу тривалістю порядку  $10^{-12}$  секунд, що має вкрай важливе значення для ядерної фізики.

**Космонавтика.** Дуже важливим напрямом науково-технічного прогресу є космічні дослідження, розвиток космонавтики. З одного боку, освоєння космосу є яскравим проявом грандіозних досягнень усіх галузей науки й техніки, а з другого боку, — сам процес вивчення і освоєння космічного простору сприяє розквіту науки, техніки й виробництва.

Найбільш значний внесок у розвиток космонавтики зробила ракетна техніка, створення потужних ракетоносців, здатних виводити в космос супутники і кораблі із складною апаратурою і людьми на борту. Не менш істотно вплинули на прогрес космонавтики успіхи електронної обчислювальної техніки і радіоелектроніки, а також автоматики. Без приладів радіоелектроніки не можна здійснити багато функцій ракет і космічних апаратів: виведення їх на орбіту, корекція траєкторій, збирання, обробка і передача на Землю інформації.

Важко переоцінити роль і значення штучних супутників Землі в розв'язанні багатьох практичних завдань. Через штучні супутники зв'язку і систему наземних станцій здійснюється телефонно-телеграфний зв'язок і обмін телевізійними програмами.

Прогноз погоди сьогодні немислимий без метеорологічної інформації, яку дістають за допомогою супутникових систем. Супутники-маяки знайшли застосування в системах навігації.

**Автоматизація виробництва.** Найбільший ступінь автоматизації спостерігається в енергетичній, металургійній, хімічній і нафтопереробній промисловості.

На одному з перших місць за кількістю використовуваних ЕОМ стоїть енергетика, де досягнута повна автоматизація керування роботою електростанцій. В металургії важко знайти завод, де б не застосовувалися автоматичні пристрої. Засобами автоматизованого контролю і регулювання теплового режиму обладнано практично всі мартенівські печі. Застосування автоматичних пристроїв підвищує продуктивність праці, надійність роботи агрегатів, якість продукції, поліпшує умови праці обслуговуючого персоналу, дає можливість економити паливо, сировину і електроенергію.

Майже в усіх галузях машинобудування спостерігається перехід на автоматизовані технологічні процеси. Завдяки успіхам електроніки і обчислювальної техніки створено верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ). За певними програмами, записаними на перфокартах, перфострічках чи магнітних стрічках, вони обробляють деталі практично будь-якої складності профілю. Випускаються сотні моделей верстатів з числовим програмним управлінням. Однак верстати з програмним управлінням лише етап: в майбутньому

машинобудування перейде до автоматичних ліній і цехів з числовим програмним управлінням.

На транспорті досить звичним явищем стали автоматичні залізничні сортувальні станції. Поїзди без машиніста сьогодні вже реальність. В авіації багато років використовуються автопілоти. В основному автоматизовані радіолокаційні і авіанavigаційні пристрої.

**Нові матеріали.** Важливий напрям науково-технічного прогресу становлять досягнення в галузі одержання матеріалів із заздалегідь заданими властивостями, використання рідкісних елементів. Сучасний прогрес космонавтики, радіоелектроніки, атомної енергетики, авіації, машинобудування тощо багато в чому завдячує досягненням у галузі виробництва штучних матеріалів: надтвердих, жароміцних, антикорозійних тощо; використанню рідкісних металів та їх сплавів. Знання залежності хімічних і фізичних властивостей речовини від її фізичної структури дає можливість вченим передбачати майбутні властивості того чи іншого матеріалу і цілеспрямовано синтезувати матеріали з заздалегідь заданими механічними, магнітними, оптичними та іншими властивостями.

Завдяки фізиці і хімії успішно розв'язана проблема синтезу штучних алмазів, що дало змогу зовсім по-новому здійснити багато процесів обробки матеріалів, запровадити в масове виробництво алмазні інструменти.

Важко переоцінити значення досягнень у виробництві напівпровідникових та інших матеріалів для сучасної радіоелектроніки.

Швидкими темпами зростає виробництво і використання рідкісних металів. Якщо півстоліття назад їх добували в мізерних кількостях лише в окремих лабораторіях, то тепер ці метали перетворилися на обов'язковий конструкційний матеріал в атомній енергетиці, авіаційній і ракетній техніці, радіоелектроніці, машинобудуванні, приладобудуванні, хімічній промисловості тощо.

\* \* \*

Ми з вами розглянули дуже коротко найбільш важливі напрями сучасного науково-технічного прогресу, зв'язані з використанням досягнень фізичної науки. Природно, що розповіли ми тут далеко не про все. Досягнення сучасної фізичної науки широко використовуються не лише в техніці, а й у сільському господарстві, побуті, медицині, біології, хімії тощо. Але й наведені відомості переконливо показують, яку величезну роль відіграє фізика в житті сучасної людини.



### 1. Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою маятника

*Прилади і матеріали:* штатив з муфтою і кільцем, кулька з отвором, нитка, годинник з секундною стрілкою або секундомір, вимірювальна стрічка з міліметровими поділками.

*Вказівки до роботи.*

1. Встановити на краю стола штатив. Біля його верхнього кінця за допомогою муфти закріпити кільце і підвісити до нього кульку на нитці. Кулька має висіти на відстані 1—2 см від підлоги.

2. Змусити маятник коливатися, відхиливши кульку в бік на 5—8 см і відпустивши її.

3. Зафіксувати час 20 — 30 повних коливань маятника.

4. Виміряти стрічкою довжину  $l$  маятника.

5. Обчислити прискорення вільного падіння за формулою

$$g = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}.$$

6. Дослід повторити ще два рази для трохи менших дозвін маятника та більшого числа коливань.

7. Оцінити похибку, з якою визначене прискорення.

### 2. Вивчення явища електромагнітної індукції

*Прилади і матеріали:* дві котушки з осердями, два підковоподібні магніти, міліамперметр лабораторний, джерело постійного струму на 5—6 В, реостат на 30 Ом, вимикач, реостат на 10 Ом, котушка з великою кількістю витків і замкнутим осердям, з'єднувальні провідники.

*Вказівки до роботи.*

1. Підключити котушку з великою кількістю витків до міліамперметра. Швидко вставити магніт у котушку, спостерігаючи за показаннями міліамперметра. Залишити магніт у котушці і спостерігати за стрілкою приладу. Швидко вийняти магніт з котушки, спостерігаючи за показаннями міліамперметра. Повторити досліди, рухаючи котушку відносно нерухомого магніту.

2. Повільно вставити в котушку або вийняти з неї один, а потім два магніти, складені однойменними полюсами. По-

вторити дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясувати, в яких випадках сила індукційного струму більша.

3. До міліамперметра послідовно під'єднати ще й реостат і приблизно з однаковою швидкістю вставляти в котушку (або виймати з неї) два магніти: спочатку, коли реостат виведено з кола ( $R = 0$ ), а потім, коли введено повністю ( $R = 30 \text{ Ом}$ ). Зафіксувати показання міліамперметра і зробити висновки.

4. Швидко вставити магніт у котушку, під'єднану до раніше складеного кола. За відхиленням стрілки визначити напрям індукційного струму і вектора індукції магнітного поля індукційного струму. Визначити напрям магнітного поля індукційного струму під час віддалення магнітів. Переконалися, що в обох випадках правило Ленца виконується.

5. Видалити з раніше використаного електричного кола реостат, тобто котушку з великою кількістю витків увімкнути лише до міліамперметра. Другу котушку ввімкнути послідовно з реостатом, вимикачем і джерелом струму. Одну котушку ввести в другу і вставити в першу котушку осердя або ж надіти обидві котушки на спільне осердя. Реостат повністю вивести. Вимикачем замкнути коло, спостерігаючи при цьому за показаннями міліамперметра. Потім швидко збільшити опір кола, зменшити і розімкнути коло. Весь час спостерігати за показаннями міліамперметра. З'ясувати, в яких випадках індукується струм.

6. Використовуючи те ж саме коло, повністю вивести реостат, замкнути коло, за допомогою реостата швидко збільшити і зменшити опір кола. Відмітити максимальне відхилення стрілки міліамперметра під час замикання кола, під час швидкого і повільного зменшення опору кола. Зробити висновок про значення ЕРС індукції в цих дослідах.

7. Використовуючи те ж саме коло, замкнути й розімкнути його, зафіксувати напрям відхилення стрілки міліамперметра. За напрямом відхилення стрілки визначити напрям індукційного струму, напрям індукції магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрям струму в первинній котушці і напрям індукції магнітного поля цього струму. Пояснити, який напрям має індукційний струм порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, під час збільшення і зменшення його. Перевірити виконання в цих дослідах правила Ленца.

### 3. Визначення показника заломлення скла

*Прилади і матеріали:* скляна пластинка з паралельними гранями, аркуш паперу, 4 кнопки, транспорир, три шпильки, олівець, трикутник, дощечка.

### *Вказівки до роботи.*

1. Поклавши скляну пластинку на прищиплений до дощечки аркуш паперу, прокреслити олівцем лінії вздовж заломлюючих граней.

2. Встромити в дощечку дві шпильки так, щоб одна з них дотикалася до пластинки, а проведений через них відрізок прямої утворював би з гранню довільний кут  $\alpha$ .

3. Піднявши дощечку на рівень очей, встромити третю шпильку так, щоб вона (якщо дивитися через пластинку) закрила перші дві шпильки.

4. Знявши пластинку і витягнувши шпильки, сполучити місця проколів відрізками прямої лінії.

5. Виміряти транспортиром кути падіння  $\alpha$  і заломлення  $\beta$ .

6. Обчислити показник заломлення за формулою

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

7. Повторити дослід для інших кутів падіння і порівняти результати.

### **4. Спостереження явища інтерференції світла**

*Прилади і матеріали:* дві скляні пластинки, дротяна рамка на підставці, мильна вода, збирна лінза, екран.

### *Вказівки до роботи.*

1. Старанно протерши скляні пластинки, скласти їх разом і стиснути пальцями.

2. Розглянути пластинки у відбитому світлі на темному фоні. При цьому пластинки слід розміщувати так, щоб на поверхні скла не виникали яскраві полиски від вікон чи білих стін.

3. Звернути увагу, що в окремих місцях дотику пластинок виникає інтерференційна картина у вигляді яскравих кільцеподібних або неправильної форми смуг.

4. Змінивши стискання пластин, розглянути зміну форми й розміщення інтерференційних смуг.

5. Опустивши дротяну рамку в мильну воду, а потім витягнувши її, домогтися утворення мильної плівки.

6. Спрямувавши на плівку за допомогою лінзи світло, спостерігати виникнення на екрані інтерференційної картини у відбитому світлі у вигляді кольорових горизонтальних смуг.

### **5. Спостереження явища дифракції світла**

*Прилади і матеріали:* електрична лампа з прямим волоском розжарення (одна на весь клас); екрани з щілиною, які можна вигото-



вити з добре засвічених, проявлених і висушених фотопластинок. Можна виготовити екрани з щілиною із алюмінієвої фольги, зробивши лезом безпечної бритви проріз.

### *Вказівки до роботи.*

1. На демонстраційному столі встановити лампу так, щоб її волосок розміщувався вертикально.

2. Екран з щілиною приставити щільно до ока так, щоб щілина розмістилася вертикально. Крізь щілину подивитися на розжарений волосок лампи і спостерігати по обидва боки волоска райдужні смуги (дифракційні спектри).

3. Розглянути одержану дифракційну картину і встановити, в якому порядку розміщуються кольорові смуги і як змінюється їх яскравість з віддаленням від центральної смуги.

4. Закрити волосок лампи двома світлофільтрами: верхню половину — червоним, нижню — синім або зеленим. Який вигляд має в цьому випадку дифракційна картина?

5. Двома складеними разом лезами від безпечної бритви продряпати в шарі желатини дві паралельні щілини. Подивитися через ці щілини на волосок лампи. Який вигляд у цьому випадку має дифракційна картина?

### **6. Вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки**

*Прилади і матеріали:* електрична лампа з прямим волоском розжарення (одна на весь клас), прилад для визначення довжини світлової хвилі.

### *Вказівки до роботи.*

1. Вставити в рамку приладу дифракційну решітку.

2. Відсунути шкалу з вузькою прицільною щілиною на максимально можливу відстань від дифракційної решітки.

3. Спрямувати вісь приладу на лампу так, щоб через вузьку прицілну щілину щитка було видно волосок лампи.

4. Спостерігати по обидва боки від щілини на чорному фоні над шкалою дифракційні спектри.

5. Якщо спектри трохи нахилені відносно шкали, то це означає, що щілини дифракційної решітки не вертикальні. Треба усунути перекося, повернувши рамку з решіткою на певний кут.

6. Не рухаючи приладу, за шкалою визначити положення середин кольорових смуг у спектрах першого порядку. Результати записати в таблицю:

Колір смуг	$h$ зліва	$h$ справа	$h$ серед.	$l$	$d$	$\lambda$
Фіолетовий						
Синій						
Блакитний						
Зелений						
Жовтий						
Оранжевий						
Червоний						

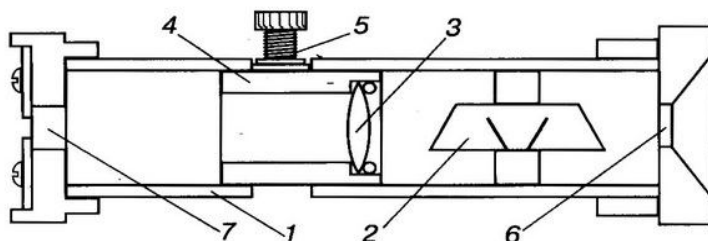
7. За даними вимірювань обчислити довжини хвиль за формулою  $\lambda = d \sin \alpha$ . Оскільки кут  $\alpha$  малий, то  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ . Але  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l}$ , тому розрахункову формулу можна записати так:  $\lambda = d \frac{h}{l}$ .

### 7. Спостереження суцільного і лінійчастого спектрів

*Прилади і матеріали:* спектроскоп прямого зору, лампочка на столі, люмінесцентна лампа, набір спектральних трубок з воднем, неоном чи гелієм, високовольтний індуктор, джерело живлення (випрямляч або акумуляторна батарея на 5 В), спиртівка, колба з парою йоду, з'єднувальні провідники, штатив, реостат на 6—10 Ом, пробірки з водними розчинами солей металів (NaCl, BaCl<sub>2</sub>) і ватними ґнотами на дротинах.

#### Вказівки до роботи.

1. Ознайомитися із спектроскопом прямого зору (мал. 164), який складається з металевої трубки 1, в яку вміщено складну призму 2, збирну лінзу 3, закріплену в рухомому тримачі 4 із гвинтом 5, коліматорної щілини 6 і кришки 7 з окулярним отвором. Під час спостереження спектрів спектроскоп спрямовувати коліматорною щілиною



Мал. 164

на джерело світла і дивитися в окулярний отвір. Різкість зображення спектра регулювати переміщенням лінзи за голову гвинта вздовж невеликого прорізу в трубці.

2. Закріпити спектроскоп у лапці штатива, розмістивши його коліматорну щілину вертикально. Перед щілиною на відстані кількох сантиметрів встановити електричну лампу так, щоб її волосок був на висоті щілини. Підключити лампу до джерела живлення.

3. Засвітити лампу і при повному розжаренні спостерігати суцільний спектр випромінювання її волоска. Зменшуючи розжарення волоска за допомогою реостата, спостерігати ослаблення яскравості спектра і поступове зникнення окремих його спектральних кольорів, починаючи з фіолетового.

4. Спрямувати спектроскоп на світну люмінесцентну лампу і розглянути суцільний спектр, який дає люмінофор, а на його фоні лінійчастий спектр пари ртуті (жовту, зелену і фіолетову лінії). Переміщаючи окуляр, досягти чіткого зображення спектральних ліній.

5. Вставити трубку з гелієм у тримач приладу для зазвичування спектральних трубок і під'єднати прилад до джерела живлення. Засвітити спектральну трубку і розглянути лінійчастий спектр випромінювання гелію.

6. Повторити спостереження з трубкою, наповненою воднем або неоном. Порівняти лінійчасті спектри випромінювання із спектрами випромінювання відповідних газів, які зображено в підручнику.

7. Розмістити перед щілиною коліматора спектроскопа полум'я спиртівки і по черзі внести в нього жмутки вати, змоченої водними розчинами хлориду натрію і хлориду барію. Спостерігати на фоні слабого суцільного спектра яскраві спектральні лінії Натрію і Барію. Після цього внести у полум'я вату, просочену сумішшю розчинів солей хлориду натрію і хлориду барію, і спостерігати всі спектральні лінії згаданих металів.

8. Розмістити спиртівку між спектроскопом і лампою, яка нормально світиться, а над нею — колбу з кількома кристалами йоду, закриту пробкою. Запалити спиртівку і спостерігати кризь колбу за зміною суцільного спектра випромінювання волоска лампи. Як тільки колба наповниться паром йоду, звернути увагу на три смуги поглинання, що з'являються в зелено-синій частині суцільного спектра.

## **8. Вивчення треків заряджених частинок за готовими фотографіями**

*Прилади і матеріали:* фотографії треків, прозорий папір, трикутник, циркуль, олівець.



### Теоретичні відомості.

Щоб уміти «прочитати» фотографію треків частинок, необхідно знати, що:

1. За інших однакових умов, трек товщий у тієї частинки, яка має більший заряд. Наприклад, за однакових швидкостей трек альфа-частинки товщий, ніж трек протона і електрона.

2. Якщо частинки мають однакові заряди, то трек товщий у тієї, яка має меншу швидкість, рухається повільніше. Звідси очевидно, що під кінець руху трек частинки товщий, ніж на початку, оскільки швидкість частинки зменшується внаслідок втрати енергії на йонізацію атомів середовища.

3. Пробіг частинки залежить від її енергії і від густини середовища.

Якщо камера Вільсона вміщена в магнітне поле, на заряджені частинки в ній діє сила Лоренца, яка дорівнює (для випадку, коли швидкість частинки перпендикулярна до індукції поля):

$$F = Ze v B,$$

де  $Ze$  — заряд частинки,  $v$  — швидкість і  $B$  — індукція магнітного поля. Правило лівої руки дає можливість показати, що сила Лоренца спрямована завжди перпендикулярно до швидкості частинки і, отже, є доцентровою силою:  $Ze v B = \frac{mv^2}{r}$ , де  $m$  — маса частинки,  $r$  — радіус кривизни її треку. Звідси

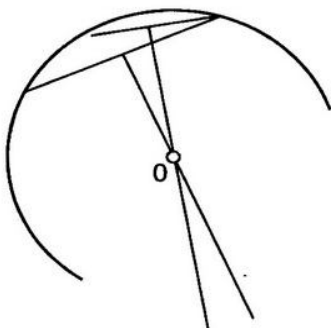
$$\frac{Ze}{m} = \frac{v}{Br}.$$

Вимірявши радіус кривизни треку  $r$  та індукцію магнітного поля  $B$ , можна для частинки обчислити відношення її заряду до маси:  $\frac{Ze}{m}$ . Це відношення дає можливість визначити, що це за частинка, або, як кажуть, ідентифікувати частинку, тобто встановити її ідентичність (тотожність, подібність) відомій частинці.

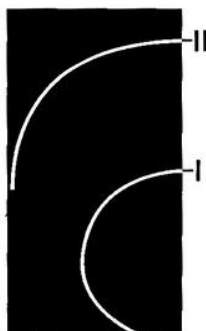
Радіус кривизни треку частинки визначають так. На фотографію накладають аркуш прозорого паперу і переводять на нього трек (обережно, щоб не пошкодити фотографію). Як показано на малюнку 165, креслять дві хорди і в середині ставлять перпендикуляри. На перетині перпендикулярів лежить центр кола; його радіус вимірюють лінійкою.

### Вказівки до роботи.

1. Ознайомитися з фотографією треків двох заряджених частинок (мал. 166) — ядер легких елементів. Ядра рухалися в магнітному полі з індукцією  $B = 2,17$  Тл, спрямованою пер-



Мал. 165



Мал. 166

пендикулярно до фотографії. Початкові швидкості всіх ядер однакові і перпендикулярні до ліній індукції поля.

2. Визначити напрям вектора індукції магнітного поля. Пояснити, чому траєкторії частинок є дугами кіл. Яка причина різниці в кривизні траєкторій різних ядер? Чому кривизна кожної траєкторії змінюється від початку до кінця пробігу частинки?

3. Пояснити причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товщий в кінці пробігу, ніж на його початку?

4. Накласти на фотографію аркуш прозорого паперу (кальку) і обережно перенести на нього трек I і правий край фотографії. Виміряти радіуси кривизни треку частинки I приблизно на початку і в кінці пробігу і визначити, на скільки змінилась енергія частинки за час пробігу, якщо відомо, що частинка I ідентифікована як протон.

5. Виміряти радіус кривизни треку частинки II на початку її пробігу. Знаючи, що початкова швидкість цієї частинки дорівнює початковій швидкості протона, обчислити для частинки II відношення заряду до маси  $\frac{q}{m}$ . За одержаним числом визначити, ядром якого елемента є ця частинка.

### ЗАДАЧІ ДЛЯ ПОВТОРЕННЯ

1. В котушці, яка має  $n = 200$  витків, за  $\Delta t = 0,1$  с магнітний потік зменшився від  $\Phi_1 = 6 \cdot 10^{-5}$  Вб до  $\Phi_2 = 2 \cdot 10^{-5}$  Вб. Визначити ЕРС індукції в котушці.

2. Визначити ЕРС індукції в контурі у разі рівномірного зменшення магнітного потоку на  $\Delta \Phi = 4 \cdot 10^{-4}$  Вб за  $\Delta t = 0,2$  с.

3. Під час зміни магнітного потоку на  $\Delta \Phi = 8 \cdot 10^{-3}$  Вб в контурі провідника, який охоплює цей потік, збуджується ЕРС індукції  $\mathcal{E} = 20$  В. Протягом якого часу відбувається зміна магнітного потоку?

4. Магнітний потік через замкнутий провідник опором  $R = 0,5 \text{ Ом}$  рівномірно збільшився від  $\Phi_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$  до  $\Phi_2 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ . Який заряд пройшов через поперечний переріз провідника?

5. Металеве кільце, радіус якого  $r = 4,8 \text{ см}$ , розміщене в магнітному полі з індукцією  $B = 0,012 \text{ Тл}$  перпендикулярно до ліній індукції. На його видалення з поля затрачається  $\Delta t = 0,025 \text{ с}$ . Яка середня ЕРС при цьому виникає в кільці?

6. Скільки витків повинна мати котушка, щоб у разі рівномірного зростання магнітного потоку через кожен її виток від нуля до  $\Phi = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$  за  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  на її кінцях виникала напруга  $U = 220 \text{ В}$ ?

7. Яку кількість витків має котушка, якщо в ній збуджується ЕРС індукції  $\mathcal{E} = 24 \text{ В}$  під час зміни магнітного потоку з швидкістю  $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 0,2 \text{ Вб/с}$ ?

8. Котушку з  $n = 1000$  витків дроту за  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$  вимикають з однорідного магнітного поля з індукцією  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Яка напруга виникає між кінцями котушки під час її руху, якщо вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини витка котушки, а площа витка  $S = 10 \text{ см}^2$ ?

9. Замкнутий виток опором  $R = 2 \text{ Ом}$  і площею  $S = 20 \text{ см}^2$  вміщений в магнітне поле з індукцією  $B_1 = 0,1 \text{ Тл}$ . Індукцію поля підвищують до  $B_2 = 0,3 \text{ Тл}$ . Який заряд при цьому пройде через переріз витка?

10. Замкнутий виток з дроту опором  $R = 3 \text{ Ом}$  і площею  $S = 30 \text{ см}^2$  вміщений в магнітне поле з індукцією  $B = 0,1 \text{ Тл}$ . Який струм пройде через виток, якщо магнітний потік протягом  $\Delta t = 0,01 \text{ с}$  рівномірно зменшити до нуля?

11. Часто під час гальмування потяга метро машиніст відключає електродвигуни від мережі і підключає їх до спеціальних реостатів. Чому при цьому відбувається гальмування?

12. В однорідному магнітному полі з індукцією  $B = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$  перпендикулярно до ліній індукції з швидкістю  $v = 50 \text{ м/с}$  рухається провідник довжиною  $l = 40 \text{ см}$ . Визначити різницю потенціалів на кінцях провідника.

13. Яка напруга між кінцями крил літака виникає під час його польоту в магнітному полі Землі, якщо відстань між кінцями крил літака  $l = 43 \text{ м}$ , а швидкість польоту  $v = 900 \text{ км/год}$ ? Модуль вертикальної складової вектора магнітної індукції прийняти рівним  $B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

14. Під час рівномірної зміни сили струму в котушці від  $I_1 = 2 \text{ А}$  до  $I_2 = 10 \text{ А}$  протягом  $\Delta t = 0,05 \text{ с}$  магнітний потік через контур котушки змінився від  $\Phi_1 = 0,1 \text{ Вб}$  до



$\Phi_2 = 0,16$  Вб. Визначити ЕРС самоіндукції та індуктивність котушки; енергію магнітного поля котушки за сили струму  $I = 12$  А. Обмотка котушки містить  $n = 100$  витків.

15. Яку індуктивність має контур, якщо за сили струму  $I = 20$  А магнітний потік у контурі дорівнює  $\Phi = 10^{-2}$  Вб?

16. За сили струму  $I = 8$  А в котушці виникає магнітне поле з індукцією  $B = 4 \cdot 10^{-3}$  Тл. Яка індуктивність котушки, якщо середня площа перерізу витка  $S = 40$  см<sup>2</sup>?

17. Електромагніт вмикають в коло постійного струму. Чому максимальна сила струму в колі встановлюється не відразу?

18. Під час рівномірної зміни сили струму від  $I_1 = 1$  А до  $I_2 = 6$  А за  $\Delta t = 0,1$  с в котушці виникає ЕРС самоіндукції  $\mathcal{E} = 50$  В. Яка індуктивність котушки?

19. Яка напруга між кінцями котушки з індуктивністю  $L = 1$  Гн виникає під час рівномірного зменшення сили струму в ній від  $I_1 = 1$  А до  $I_2 = 0$  за  $\Delta t = 10^{-3}$  с?

20. Правилами електробезпеки заборонено здійснювати монтажні перемикання в електричних колах, якщо вони перебувають під напругою понад 30 В. Чому таке перемикання особливо небезпечне, якщо в коло увімкнуті котушки індуктивності (дроселі, трансформатори тощо)?

21. По котушці електромагніту з індуктивністю  $L = 0,4$  Гн тече струм силою  $I = 10$  А. Визначити енергію магнітного поля електромагніту.

22. Обмотка автотрансформатора із стальним осердям має індуктивність  $L = 0,6$  Гн. За якої сили струму енергія магнітного поля автотрансформатора дорівнюватиме  $E = 180$  Дж?

23. В обмотці котушки з індуктивністю  $L = 5,2 \cdot 10^{-3}$  Гн сила струму дорівнює  $I = 20$  А. Визначити енергію магнітного поля котушки і густину енергії (об'єм котушки  $V = 200$  см<sup>3</sup>).

24. У скільки разів треба зменшити довжину математичного маятника для того, щоб період його коливань зменшився в 3 рази?

25. З яким періодом математичний маятник довжиною  $l = 1$  м здійснюватиме коливання на поверхні Місяця? Прискорення сили тяжіння на Місяці  $g_m = 1,62$  м/с<sup>2</sup>.

26. Період коливань маятника в нерухомому ліфті становить  $T = 1$  с. З яким прискоренням рухається ліфт, якщо період коливань маятника став рівним  $T_1 = 1,1$  с?

27. Пружина під дією вантажу  $m = 10$  кг здійснює  $N = 50$  коливань за час  $t = 1$  хв. Визначити коефіцієнт жорсткості пружини.

28. Тіло здійснює гармонічні коливання з періодом  $T = 0,5$  с. Амплітуда коливання  $X_m = 0,9$  м. Рух тіла починається з положення  $x_0 = 0,3$  м. Написати рівняння руху тіла у формі косинусоїди.

29. Тіло здійснює гармонічні коливання з періодом  $T = 0,8$  с. Амплітуда коливання  $X_m = 1,5$  м. Записати рівняння руху тіла, якщо рух почато з положення рівноваги ( $x_0 = 0$ ).

30. Тіло здійснює гармонічні коливання з амплітудою  $X_m = 0,6$  м, почавши рух з положення рівноваги. Записати рівняння руху тіла, якщо через  $t = \frac{1}{3}$  с після початку руху  $x = 0,3$  м. Яка частота коливань тіла?

31. Тіло здійснює гармонічні коливання з частотою  $\nu = 5$  Гц. Амплітуда коливання  $X_m = 0,5$  м. Рух починається з положення  $x_0 = 0,3$  м. Записати рівняння руху тіла.

32. Тіло здійснює коливання за законом  $x = 0,04 \sin 2\pi \times (t + 0,25)$ . Визначити амплітуду, період, частоту, циклічну частоту і початкову фазу коливань.

33. Хвиля від пароплава, який пливе по озеру, дійшла до берега через  $t = 1$  хв, причому відстань між двома сусідніми гребенями дорівнює  $\lambda = 1,5$  м, час між двома послідовними ударами об берег дорівнює  $T = 2$  с. На якій відстані від берега рухався пароплав?

34. Яку різницю фаз матимуть коливання двох точок, які перебувають на відстані  $l_1 = 10$  м і  $l_2 = 16$  м від джерела коливань? Період коливань  $T = 0,04$  с, швидкість їх поширення  $v = 300$  м/с.

35. Звукові коливання з періодом  $T = 0,01$  с поширюються у повітрі. Визначити довжину звукової хвилі і різницю фаз двох точок, які перебувають на одній прямій з джерелом коливань на відстані  $l = 1,7$  м одна від одної. Швидкість звуку в повітрі вважати рівною  $v = 340$  м/с.

36. Коливання з частотою  $\nu = 10$  Гц поширюються в матеріалі, причому різниця фаз двох точок, які перебувають на одному радіусі з джерелом коливань на відстані  $l = 1$  м одна від одної, дорівнює  $\frac{1}{4}\pi$ . Визначити швидкість поширення коливань у цьому матеріалі.

37. На відстані  $s = 1068$  м від спостерігача ударяють молотком по залізничній рейці. Спостерігач, приклавши вухо до рейки, почув звук на  $t = 3$  с раніше, ніж він дійшов до нього повітрям. Чому дорівнює швидкість  $v_1$  звуку в сталі? Швидкість звуку в повітрі вважати рівною  $v = 333$  м/с.

38. У скільки разів зміниться довжина звукової хвилі під час переходу звуку з повітря у воду? Швидкість звуку у воді  $v_1 = 1480$  м/с, у повітрі  $v_2 = 340$  м/с.

39. Чому дорівнює період власних коливань у контурі, якщо індуктивність контуру  $L = 2,5 \cdot 10^{-3}$  Гн і ємність  $C = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Ф?

40. Визначити період і частоту власних коливань у контурі при ємності  $C = 2,2 \cdot 10^{-6}$  Ф та індуктивності  $L = 0,65 \cdot 10^{-3}$  Гн.

41. Що станеться з власними коливаннями в контурі, активним опором якого можна нехтувати, якщо його ємність у три рази збільшити, а індуктивність у три рази зменшити?

42. Як зміняться період і частота вільних коливань у контурі з  $R = 0$ , якщо його індуктивність збільшити в два рази, а ємність — в чотири рази?

43. Коливальний контур має ємність  $C = 2,6 \cdot 10^{-12}$  Ф та індуктивність  $L = 1,2 \cdot 10^{-5}$  Гн. Якої довжини електромагнітні хвилі створює цей контур у вакуумі, коли в ньому виникають коливання з власною частотою?

44. Коливальний контур створює в повітрі електромагнітні хвилі довжиною  $\lambda = 150$  м. Яка ємність увімкнута в контур, якщо індуктивність контуру  $L = 0,25 \cdot 10^{-3}$  Гн? Активним опором контуру можна знехтувати.

45. Яку ємність повинен мати конденсатор, щоб коливальний контур радіоприймача, який складається з цього конденсатора і котушки індуктивністю  $L = 10 \cdot 10^{-3}$  Гн, був настроєний на довжину хвилі  $\lambda = 1000$  м?

46. Радіоприймач працює в діапазоні довжин хвиль від  $\lambda_1 = 188$  м до  $\lambda_2 = 545$  м. В яких межах змінюється ємність конденсатора в приймачі, якщо активним опором контуру можна знехтувати?

47. Контур радіоприймача настроєний на радіостанцію, несуча частота якої  $\nu = 9 \cdot 10^6$  Гц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора коливального контуру приймача, щоб він був настроєний на довжину хвилі  $\lambda = 50$  м?

48. Електромагнітні хвилі поширюються в певному середовищі зі швидкістю  $v = 2 \cdot 10^8$  м/с. Яка довжина хвилі в цьому середовищі, якщо частота коливань  $\nu = 10^6$  Гц?

49. Чому не можна здійснити радіозв'язок з підводним човном, який перебуває під водою, за допомогою електромагнітних хвиль?

50. Чому лампові радіоприймачі більш чутливі, ніж детекторні?

51. Чому радіоприймач в автомобілі погано працює, коли проїздить під естакадою або під мостом?

52. Чому радіолокаційна установка посиляє радіосигнали у вигляді коротких імпульсів, які ідуть один за одним через рівні інтервали часу?



53. Під час радіолокації сигнал, посланий на Венеру, був прийнятий знову на Землі через  $\Delta t = 2,5$  хв. Яка відстань від Землі до Венери?

54. Радіолокатор працює на довжині хвилі  $\lambda = 20$  см і дає  $n = 5000$  імпульсів за секунду. Яка глибина розвідки радіолокатора?

55. Чому вежі телецентрів будують дуже високими?

56. Чому дорівнює швидкість поширення світлового випромінювання, якщо відстань від Землі до Місяця, рівну  $\approx 3,84 \cdot 10^5$  км, воно проходить за  $t = 1,28$  с?

57. За скільки хвилин сонячне світло досягає Землі? Радіус земної орбіти прийняти  $R \approx 150 \cdot 10^6$  км.

58. Під яким кутом до горизонтальної поверхні стола треба розмістити плоске дзеркало, щоб дістати зображення предмета, який лежить на столі, у вертикальній площині?

59. Під яким кутом до поверхні парти треба розмістити плоске дзеркало, щоб дістати зображення предмета, який лежить на парті, у вертикальній площині? Парта нахилена до горизонту під кутом  $20^\circ$ .

60. Плоске дзеркало повертається на кут  $\alpha = 27^\circ$ . На який кут  $\beta$  повернеться відбитий від дзеркала промінь?

61. Промінь світла падає на поверхню поділу двох прозорих середовищ під кутом  $\alpha = 35^\circ$  і заломлюється під кутом  $\beta = 25^\circ$ . Чому дорівнюватиме кут заломлення, якщо промінь падатиме під кутом  $\alpha_1 = 50^\circ$ ?

62. Промінь світла падає з повітря на поверхню рідини під кутом  $\alpha = 40^\circ$  і заломлюється під кутом  $\beta = 24^\circ$ . При якому куті падіння променя кут заломлення дорівнюватиме  $\beta_1 = 20^\circ$ ?

63. Визначити кут падіння променя в повітрі на поверхню води, якщо кут між заломленим і відбитим променями дорівнює  $90^\circ$ .

64. Визначити кут заломлення променя при переході з повітря в етиловий спирт ( $n = 1,36$ ), якщо кут між відбитим і заломленим променями дорівнює  $120^\circ$ .

65. Аквалангіст визначив кут заломлення світлового променя у воді. Він виявився рівним  $\beta = 32^\circ$ . Під яким кутом до поверхні води падають світлові промені?

66. Знаходячись у воді, водолаз встановив, що напрям на Сонце утворює з вертикаллю кут  $28^\circ$ . Коли він вийшов з води, то побачив, що Сонце стоїть нижче над горизонтом. Визначити, на який кут змінився напрям на Сонце для водолаза.

67. Чи може відбутися повне відбивання променя світла під час переходу його з води в скло?

68. Чи можна говорити про оборотність ходу променів у випадку повного відбивання світла?

69. У певну точку простору приходять когерентні промені з геометричною різницею ходу  $\Delta d = 1,2 \cdot 10^{-6}$  м, довжина хвилі яких у вакуумі  $\lambda = 600$  нм. Визначити, що станеться в цій точці внаслідок інтерференції в трьох випадках: 1) світло йде в повітрі; 2) світло йде у воді; 3) світло йде в склі з показником заломлення  $n = 1,5$ .

70. Блакитні промені з довжиною хвилі  $\lambda = 480$  нм від двох когерентних джерел, відстань між якими  $d = 1,2 \cdot 10^{-4}$  м, потрапляють на екран. Відстань від джерел світла до екрана  $L = 3,6$  м. Внаслідок інтерференції на екрані спостерігається чергування темних і світлих смуг. Визначити відстань між центрами двох сусідніх темних смуг на екрані. Чому дорівнюватиме ця ж відстань, якщо блакитні промені замінити оранжевими з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 650$  нм?

71. Під час спостереження в повітрі інтерференції світла від двох когерентних джерел на екрані видно чергування темних і світлих смуг. Що станеться з шириною смуг, якщо спостереження вести у воді, зберігаючи решту умов незмінними?

72. У разі спостереження через дифракційну решітку червоний край спектра видно на відстані  $l = 3,5$  см від середини щілини в екрані. Відстань від дифракційної решітки до екрана  $L = 0,5$  м, період решітки  $d = 10^{-5}$  м. Визначити довжину хвилі червоного світла.

73. Дифракційна решітка з періодом  $d = 2$  нм освітлюється світлом натрієвої лампи, найбільша довжина світлової хвилі якої  $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7}$  м. Скільки світлих (жовтих) смуг можна при цьому побачити?

74. У шкільному кабінеті фізики є дифракційні решітки, які мають  $n_1 = 50$  і  $n_2 = 100$  штрихів на 1 мм. Яка з них дасть на екрані ширший спектр за інших однакових умов?

75. У лабораторній роботі з визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки з періодом  $d = 0,002$  мм дістають перше зображення на екрані, яке перебуває на відстані  $l = 30$  см від середньої (білої) лінії. Визначити довжину хвилі  $\lambda$ , якщо відстань від решітки до екрана  $L = 1,5$  м.

76. Під час переходу світла з повітря в будь-яке тверде тіло або рідину довжина світлової хвилі зменшується, а колір світла залишається таким самим. Чому? Чому колір деяких матеріалів при денному і електричному освітленні різний?

77. Чому надзвукові літаки і ракети в польоті є могутніми інфрачервоними випромінювачами?

78. Чому електрозварники працюють в темних захисних окулярах із скла? Чому не можна зробити такі самі темні окуляри із плексигласу?

79. Як пояснити той факт, що штучні супутники і космічні кораблі, які рухаються у високих шарах атмосфери, стають джерелами рентгенівського випромінювання?

80. Визначити діапазон довжин хвиль рентгенівського випромінювання, граничні частоти яких лежать у межах від  $6 \cdot 10^6$  до  $7,5 \cdot 10^{19}$  Гц.

81. Літак летить над поверхнею Землі зі швидкістю  $v_1$  і запалює сигнальні вогні. З якою швидкістю поширюється сигнал до спостерігача на Землі — нерухомого і такого, що рухається зі швидкістю  $v_2$ ?

82. Дві ракети рухаються назустріч одна одній з швидкостями  $v_1 = v_2 = \frac{3}{4}c$  по відношенню до нерухомого спостерігача. Визначити швидкість зближення ракет за класичною і релятивістською формулами додавання швидкостей.

83. Потужність випромінювання Сонця  $P = 3,8 \cdot 10^{23}$  кВт. Обчислити зменшення маси Сонця за  $t = 1$  с за рахунок цього випромінювання.

84. Пластика нікелю, для якого робота виходу електрона  $A = 5$  еВ, освітлена ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 200$  нм. Визначити максимальну швидкість фотоелектронів.

85. Робота виходу електрона з цезію  $A = 1,9$  еВ. З якою швидкістю електрони вилітають з поверхні металу, якщо він освітлений світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 500$  нм?

86. Найбільша довжина світлової хвилі, за якої може мати місце фотоэффект для вольфраму,  $\lambda_{\max} = 2,75 \cdot 10^{-7}$  м. Визначити роботу виходу, найбільшу швидкість і енергію електронів, які вириваються з вольфраму світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-7}$  м.

87. Визначити постійну Планка  $h$ , якщо фотоелектрони, що їх вириває з поверхні якогось металу світло з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 2,5 \cdot 10^{-7}$  м, затримуються електричним полем з напругою  $U_1 = 3,1$  В, а вирвані світлом з довжиною хвилі  $\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-7}$  м — з напругою  $U_2 = 8,1$  В.

88. Чим різняться зовнішній і внутрішній фотоэффекти?

89. Визначити масу фотонів видимого світла ( $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-7}$  м) і рентгенівського випромінювання ( $\lambda_2 = 4,1 \cdot 10^{-9}$  м).

90. Визначити імпульс фотона червоного світла ( $\lambda_1 = 7 \times 10^{-7}$  м) і рентгенівського випромінювання ( $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-9}$  м).

91. В атомному реакторі спостерігають гамма-випромінювання з енергією фотонів порядку 3 МеВ. Чому дорівнюють маса і імпульс фотонів, а також довжина хвилі гамма-випромінювання?

92. На  $1 \text{ м}^2$  чорної поверхні щосекунди падає  $n = 2,5 \cdot 10^{15}$



фотонів рентгенівського випромінювання з частотою  $\nu = 7 \times 10^{19}$  Гц. Який тиск створює це випромінювання на поверхню?

93. Тиск сонячного світла на поверхню Землі  $p = 4,5 \cdot 10^{-6}$  Па. Визначити енергію випромінювання, яке падає щосекунди на  $1 \text{ м}^2$  поверхні Землі, розміщеної перпендикулярно до променів.

94. Під час переходу електрона в атомі Гідрогену з одного стаціонарного стану в інший атом випускає фотон, енергія якого відповідає довжині хвилі  $\lambda = 652 \text{ нм}$ . На скільки зменшується при цьому енергія атома Гідрогену?

95. Під час бомбардування електронами атоми Гідраргіуму переходять в збуджений стан, якщо енергія електронів дорівнює  $4,9 \text{ еВ}$  або перевищує це значення. Обчислити довжину хвилі світла, яке випускається атомом Гідраргіуму під час переходу зі збудженого стану в нормальний.

96. Чим характеризується швидкість розпаду радіоактивної речовини?

97. Яке ядро утворюється в результаті альфа-розпаду ядра ізоотопу  ${}_{92}^{234}\text{U}$ ?

98. Яке ядро утворюється в результаті електронного бета-розпаду ізоотопу Гідрогену  ${}_{1}^3\text{H}$ ?

99. Яке ядро утворюється в результаті позитронного бета-розпаду ядра ізоотопу Купруму  ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ ?

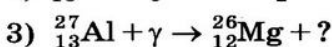
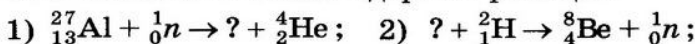
100. На що перетворюється  ${}_{92}^{238}\text{U}$  після  $\alpha$ -розпаду і двох  $\beta$ -розпадів?

101. Ядра ізоотопу  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  зазнають  $\alpha$ -розпаду, двох  $\beta$ -розпадів і ще одного  $\alpha$ -розпаду. Які ядра після цього виникають?

102. Період піврозпаду Радію  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  становить  $1600$  років. Скільки ядер ізоотопу розпадеться за  $3200$  років, якщо початкова кількість радіоактивних ядер  $10^9$ ?

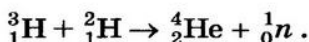
103. Період піврозпаду ядер ізоотопу Іоду  ${}_{53}^{131}\text{I}$   $8$  діб. Скільки радіоактивних ядер цього ізоотопу залишиться в зразку через  $80$  діб, якщо початкова кількість радіоактивних ядер дорівнює  $10^9$ ?

104. Закінчити запис ядерних реакцій:



105. Записати ядерну реакцію, яка відбувається під час бомбардування Алюмінію  ${}_{13}^{27}\text{Al}$   $\alpha$ -частинками, якщо відомо, що ця реакція супроводжується випусканням нейтрона.

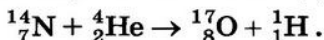
106. Визначити енергію, яка виділяється під час реакції:



Атомні маси ізотопів Гідрогену  ${}^3_1\text{H}$  і  ${}^2_1\text{H}$  відповідно дорівнюють 3,01605 і 2,01410, Гелію 6,01513 і нейтрона 1,00867.

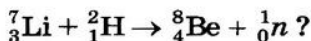
107. Визначити енергію зв'язку ядра Гелію  ${}^4_2\text{He}$ , якщо маса цього ізотопу дорівнює 4,00260 а.о.м., а маси протона і нейтрона відповідно дорівнюють 1,00783 і 1,00867 а.о.м.

108. Обчислити енергетичний вихід реакції:



Маса атома Нітрогену 14,003074 а.о.м., атома Оксигену 16,999133 а.о.м.

109. Виділяється чи поглинається енергія в такій ядерній реакції:



Маса атома Літію 7,01601 а.о.м., атома Берилію становить 8,00531 а.о.м.

110. У проєкті термоядерного реактора передбачається використати реакцію  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$ . Однак тритію в природі не існує. Його можна одержувати в тому самому реакторі за рахунок реакції  ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0n \rightarrow {}^4_2\text{X} + {}^3_1\text{H}$ . Визначити характеристики невідомого ядра.

111. Спостерігаючи за зміною кількості ядер ізотопу  ${}^{14}_6\text{C}$  у виробах з дерева, можна визначити їхній вік. Визначити вік виробу з дерева, якщо відомо, що число ядер ізотопу  ${}^{14}_6\text{C}$  в ньому зменшилось у три рази порівняно зі свіжою деревиною. Період піврозпаду  ${}^{14}_6\text{C}$  становить 5570 років.

112. Після ядерного вибуху в довкіллі залишається багато радіоактивних ізотопів з різноманітними періодами піврозпаду. Які з них становлять найбільшу небезпеку для людей?

113. Допустима доза загального опромінення людини гамма-випромінюванням або бета-частинками 5 рад (0,05 Гр) за рік. Яка допустима потужність дози загального опромінення людини за умови неперервної дії випромінювання на людину цілодобово протягом всього року?

114. Потужність дози гамма-випромінювання радіоактивних ізотопів у зоні зараження 20 рад/год (0,2 Гр/год). Скільки годин може працювати в цій зоні людина, якщо допустимою безпечною дозою в аварійній ситуації прийнята доза 25 рад (0,25 Гр)?

---

Вправа 1. 1. 0,5 В. 2. 0,25 Ом. 3.  $9 \cdot 10^3$  В. 4.  $\approx 0,67$  В.  
5.  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл.

Вправа 2. 1. Всувати в котушку. 2. Заряди пройдуть по ко-

тущі однакові, а кількість теплоти у першому випадку виділиться більша. 3. Змінне магнітне поле магніту, який обертається, збуджує в диску індукційні вихрові струми такого напрямку, що створюване ними магнітне поле гальмує рух магніту. За третім законом Ньютона рівна і протилежно напрямлена сила діє на диск і змушує його обертатися.

**Вправа 3.** 1. 50 А/с. 2. 0,1 Гн. 3. 25. 4. Найбільшу — випадок б, найменшу — випадок а.

**Вправа 4.** 1.  $x = 0,02 \sin(200\pi t)$ . 2. 0,02 м,  $\frac{1}{4}\pi$ ,  $\frac{5}{12}\pi$ ,  $\frac{1}{2}\pi$ ,  $\approx 0,014$  м,  $\approx 0,019$  м, 0,02 м.

**Вправа 5.** 1.  $\frac{1}{2}\pi$ , одночасно, 0. 2.  $\frac{1}{2}\pi$ ,  $-\frac{1}{2}\pi$ , одночасно,  $\pi$ . 3.  $\approx 0,25$  м. 4. У другому і третьому випадках за першою формулою, а в другому й четвертому — за другою.

5.  $\bar{a} = \frac{4\pi^2 l}{T^2} - g$ .

**Вправа 6.** 1. Збільшити удвічі. 2. Зменшилась удвічі. 3. Від  $6,28 \cdot 10^{-7}$  с до  $12,56 \cdot 10^{-7}$  с.

**Вправа 7.** 1.  $\approx 138,5$  В. 2.  $\approx 11,76$  мА. 3. 100 В, 50 В.

**Вправа 8.** 1. 100 Ом. 2. 96 Вт. 3. 8 Ом. 4. 36.

**Вправа 9.** 1. 1000 м/с. 2. 4 с.

**Вправа 10.** 1. 765 м. 2. 3,4 км. 3. 5 км/с.

**Вправа 11.** 1. Під кутом  $15^\circ$  до вертикалі і  $75^\circ$  до горизонталі. 2.  $45^\circ$ . 3. 91 см. 4. Може, якщо  $n_1 = n_2$  або кут падіння дорівнює нулю. 5. Кут заломлення буде  $41^\circ$ . 6. а)  $35,2^\circ$ , б)  $60^\circ$ .

**Вправа 12.** 1. а) Так, вийде; б) ні. 2. 1,3.

**Вправа 13.** 1. а) Ослабне, б) ослабне, в) максимально підсилиться. 2. Ослаблення світла, оскільки різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль:  $\Delta d = \frac{5}{2}\lambda$ .

**Вправа 15.** 1.  $\lambda = \frac{db}{ka} = 500$  нм; 2. 0,2 мм. 3.  $\approx 5,2 \cdot 10^{-7}$  м.

**Вправа 16.** 1. Виникатиме. 2.  $1,8 \cdot 10^{-6}$  м. 3.  $7,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. 4.  $3,8 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с.

**Вправа 17.** 1. Приблизно 10 фотонів щосекунди. 2.  $\approx 5 \cdot 10^{18}$ . 3.  $\approx 3,47 \cdot 10^{-7}$  м. 4.  $\approx 5 \cdot 10^7$ .

**Вправа 18.** 1.  $\approx 6,6 \cdot 10^{-7}$  м. 2.  $\Delta E = 10,1$  еВ; ні, не може; 13,6 еВ.

**Вправа 19.** 1.  $\approx 39,3$  МеВ. 2. Енергія зв'язку ядра ізотопу Гідрогену  $E_1 = 8,5$  МеВ; ядра ізотопу Гелію  $E_2 = 7,7$  МеВ; ядро  ${}^3_1\text{H}$  більш стійке, ніж  ${}^3_2\text{He}$ . 3. 7,97 МеВ.

**Вправа 20.** 1. 1)  ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$ ;

2)  ${}^{198}_{80}\text{Hg} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{198}_{79}\text{Au} + {}^1_1\text{H}$ ; 3)  ${}^{25}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$ .

2.  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$ ;  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$ . 3. Протони.

**Вправа 21.** 1.  $0,313 \cdot 10^{-10}$  Дж;  $0,028 \cdot 10^{-10}$  Дж;  $8,05 \cdot 10^{10}$  Дж;  $33,7 \cdot 10^{10}$  Дж. 2. 1,18 МеВ. 3.  $5,35 \cdot 10^{22}$  МеВ.



1.  $0,08 \text{ В}$ . 2.  $2 \cdot 10^{-3} \text{ В}$ . 3.  $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . 4.  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ .  
5.  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$ . 6. 55 витків. 7. 120 витків. 8. 15 В. 9.  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ .  
10.  $10^{-2} \text{ А}$ . 11. Індукційний струм, що виникає в обмотці якоря, протидіє рухові якоря і викликає гальмування. 12. 0,28 В.  
13. 0,22 В. 14. 120 В; 0,75 Гн; 54 Дж. 15.  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$ .  
16.  $2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ . 17. У котушці електромагніту в момент вмикання струму в колі виникає ЕРС індукції, яка перешкоджає миттєвому встановленню максимальної сили струму. 18. 1 Гн.  
19. 1000 В. 20. У колах з котушками великої індуктивності під час перемикання виникають значні індукційні струми, небезпечні для життя. 21. 20 Дж. 22. 24,5 А. 23. 1,04 Дж;  $5 \text{ кДж/м}^3$ .  
24. 9 раз. 25.  $\approx 4,93 \text{ с}$ . 26.  $\approx 1,7 \text{ м/с}^2$ . 27. 274 Н/м.  
28.  $x = 0,9 \cos \left( 4\pi t + \arccos \frac{1}{3} \right)$ . 29.  $x = 1,5 \sin 2,5\pi t$ .  
30.  $x = 0,6 \sin \frac{\pi}{2} t$ ;  $v = 0,25 \text{ Гц}$ . 31.  $x = 0,5 \sin (10\pi t + \arcsin 0,6)$ .  
32.  $A = 0,04 \text{ м}$ ,  $T = 1 \text{ с}$ ,  $v = 1 \text{ Гц}$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $\varphi_0 = \frac{1}{2}\pi$ . 33. 45 м. 34. п.  
35. 3,4 м; п. 36. 80 м/с. 37. 5100 м/с. 38. 4,35 рази.  
39.  $0,38 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . 40.  $0,24 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ; 4200 Гц. 41. Власні коливання в контурі не зміняться. 42. Період коливань збільшиться в  $\sqrt{8}$  раз, а частота зменшиться в  $\sqrt{8}$  раз. 43. 10,5 м. 44.  $25,4 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ .  
45.  $\approx 2,8 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$ . 46. Від  $31 \cdot 10^{-12}$  до  $260 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ . 47. Збільшити в 2,25 рази. 48. 200 м. 49. Морська вода поглинає електромагнітні хвилі, оскільки є провідником. 50. У ламповому приймачі відбувається підсилення прийнятих сигналів, а в детекторному ні. 51. Міст відбиває електромагнітні хвилі. 52. Щоб можна було зареєструвати відбитий імпульс. 53.  $2,3 \cdot 10^{10} \text{ м}$ .  
54.  $3 \cdot 10^4 \text{ м}$ . 55. Телецентри працюють на ультракоротких хвилях ( $\lambda < 10 \text{ м}$ ). Ці хвилі не дифрагують і тому не обгинають кризову поверхню Землі. 56.  $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . 57.  $\approx 8,3 \text{ хв}$ . 58.  $45^\circ$ .  
59. Можливі два випадки:  $35^\circ$  і  $55^\circ$ . 60.  $\beta = 2\alpha = 54^\circ$ . 61.  $34^\circ$ .  
62.  $33^\circ$ . 63.  $53^\circ$ . 64.  $25^\circ$ . 65.  $45^\circ$ . 66. На  $11^\circ$ . 67. Ні. 68. Можна.  
69. 1) Максимальне підсилення; 2) послаблення; 3) максимальне підсилення. 70. 14,4 мм; 19,5 мм. 71. Ширина смуг зменшиться в 1,33 раза. 72.  $\lambda \approx d \frac{L}{L} \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . 73. 6. 74. З більшою кількістю штрихів. 75.  $\lambda \approx \frac{dL}{kL} \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . 76. Колір світла зв'язаний з частотою, яка в даному випадку не змінюється, тому що зі зміною швидкості поширення хвиль у даному середовищі у стільки ж разів змінюється і довжина світлових хвиль ( $v = \frac{c}{\lambda} = \frac{v}{\lambda_1}$ ). Спектр денного і електричного освітлення різний, тому в деяких матеріалів при цих видах освітлення різні відтінки кольору. 77. Під час польоту сильно нагрівається головна частина літаків або ракет, яка долає в польоті великий опір повітря. Нагріті частини і є випромінювачами. 78. Плексиглас прозорий для ульт-

рафіолетових променів. 79. У високих шарах атмосфери є швидкі електрони і йони, які налітають на супутники і кораблі і гальмуються, внаслідок чого випромінюють рентгенівські промені. 80. Від  $5 \cdot 10^{-9}$  до  $4 \cdot 10^{-12}$  м. 81. Швидкість поширення світлового сигналу не залежить від швидкості джерела і швидкості спостерігача. 82. 1,5 с, 0,96 с. 83.  $\approx 4,2 \cdot 10^6$  т. 84.  $\approx 6,53 \cdot 10^5$  м/с. 85.  $\approx 4,54 \cdot 10^5$  м/с. 86.  $\approx 7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $\approx 9,1 \cdot 10^5$  м/с;  $3,8 \cdot 10^{-19}$  Дж. 87.  $\approx 6,7 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. 88. Під час зовнішнього фотоефекту електрони вибиваються з речовини, а під час внутрішнього — залишаються в речовині. 89.  $4,4 \cdot 10^{-36}$  кг;  $5,4 \cdot 10^{-34}$  кг. 90.  $9,5 \cdot 10^{-28}$  кг·м/с;  $3,3 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с. 91.  $3,6 \cdot 10^{-30}$  кг;  $1,1 \cdot 10^{-21}$  кг·м/с;  $6,2 \cdot 10^{-13}$  м. 92.  $\approx 3,87 \cdot 10^{-7}$  Па. 93. 1350 Дж. 94.  $\approx 3 \cdot 10^{-19}$  Дж. 95.  $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  м. 96. Періодом піврозпаду. 97.  $^{230}_{90}\text{Th}$ . 98.  $^3_2\text{He}$ . 99.  $^{64}_{28}\text{Ni}$ . 100. На ізотоп Урану  $^{234}_{92}\text{U}$ . 101.  $^{224}_{88}\text{Ra}$ . 102.  $7,5 \cdot 10^8$ . 103.  $9,76 \cdot 10^5$ . 104. Невідомими частинками будуть: 1)  $^{24}_{11}\text{Na}$ ; 2)  $^7_3\text{Li}$ ; 3)  $^1_1\text{H}$ . 105.  $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^1_0n + ^{30}_{15}\text{P}$ . 106. 17,7 МеВ. 107. 28 МеВ. 108. 1,2 МеВ. 109. Виділяється 15,9 МеВ. 110.  $^4_2\text{He}$ . 111. 8800 років. 112. Ізотопи з великим періодом піврозпаду. 113.  $0,57 \cdot 10^{-3}$  рад/год ( $0,57 \cdot 10^{-5}$  Гр/год). 114. 1250 год.

## Предметний покажчик

**А**  
 Автоколивання 53  
 Автоколивальна система 53  
 Автотрансформатор 82  
 Активність препарату  
 Альфа-частинка 220  
 Амплітуда 33  
 Антена 113  
 Антиречовина 270  
 Антигелій 272  
 Антидейтерій 272  
 Антинейтрино 274  
 Антинейтрон 272  
 Антипротон 272  
 Антитритій 272  
 Античастинка 270

**Б**  
 Баріони 277  
 Бета-частинки 220

**В**  
 Взаємодія  
 — гравітаційна 284

— електромагнітна 284  
 — сильна 284  
 — слабка 284  
 Вібратор електричний 112  
 Відбивання світла 135  
 — — повне 138  
 Відікон 128  
 Випромінювання  
 — вимушене 212  
 — інфрачервоне 163  
 — ультрафіолетове 164  
 Вебер (одиниця магнітного потоку) 11

**Г**  
 Гамма-промені 221  
 Генератор  
 — електромагнітних коливань 67  
 — змінного струму 73  
 — квантовий 212  
 Генрі (одиниця індуктивності) 22  
 Голографія 217  
 Грей (одиниця поглинутої дози випромінювання) 253

Густина потоку енергії  
(випромінювання) 118  
Гучність 103

## Д

Демодуляція 121  
Демодулятор 124  
Детектування 121  
Дефект маси 179  
Дисперсія світла 162  
Дифракційна  
— картина 152  
— решітка 153  
Дифракція  
— світла 151  
— хвиль 151, 152  
Довжина хвилі 90  
Доза випромінювання  
поглинута 252  
Дозиметр 254  
Досліди  
— Резерфорда 202  
— Франка і Герца 208

## Е

Електричне поле  
— індукційне 6,8  
— — вихрове 9  
Електромагнітна індукція 3  
Енергія  
— зв'язку 237  
— — питома 238  
— магнітного поля 23  
Ефект Месбауера 176

## З

Закон  
— відбивання світла 135  
— заломлення — 136  
— Ейнштейна про взаємозв'язок  
маси й енергії 180  
— електромагнітної індукції 10  
— додавання швидкостей  
Галілея 174  
— — — релятивістський 177  
— радіоактивного розпаду 222  
Закони фотоефекту 183, 184  
Заломлення світла 136

## І

Ізотопи 223  
Індуктивність 21  
Інтерференційна картина 141  
Інтерференція

— хвиль 141  
— світла 143  
Інтерферометр 150  
Інфразвук 99

## К

Камера  
— Вільсона 229  
— йонізаційна 227  
Камертон 98  
Квант 181, 185  
Кварки 278  
Кінескоп 129  
Когерентні хвилі 142  
Когерер 118  
Коливання  
— вимушені 27, 46, 71  
— вільні 26  
— гармонічні 33  
— електромагнітні 58  
Коливальна система 26  
Коливальний контур 58  
— — відкритий 113  
Коефіцієнт  
— самоіндукції 21  
— розмноження нейтронів 258  
— трансформації 80  
Корпускулярно-хвильовий  
дуалізм 193  
Кут  
— відбивання 136  
— заломлення 136  
— падіння 136  
— повного відбивання  
граничний 138

## Л

Лазер 212  
— напівпровідниковий 218  
— рубіновий 213  
Лептони 277  
Лічильник  
Гейгера — Мюллера 227

## М

Маса критична 263  
Масове число 222  
Маятник математичний 29  
Межа фотоефекту червона 184  
Мезони 277  
Метод фотоемульсійний 228  
Мікрофон 18  
Модуляція 121



## Н

Нейтрино 274  
Нейтрон 234  
Нуклон 235

## П

Період  
— дифракційної решітки 155  
— коливань 26  
— піврозпаду 224  
Позитрон 270  
Показник заломлення світла  
— — абсолютний 136  
— — відносний 136  
Поле електромагнітне 108  
Поляризація світла 156  
Полярійд 160  
Поперечність світлових хвиль 159  
Постулати  
— Бора 205, 206  
— теорії відносності 175  
Правило  
— зміщення 223  
— Ленца 13  
— правої руки 12  
Принцип відносності  
Ейнштейна 175  
Промені  
— інфрачервоні 163  
— рентгенівські 165  
— ультрафіолетові 164  
Просвітлення оптики 148

## Р

Радіоактивність 218  
— штучна 247  
Радіолокація 125  
— планет 128  
Реактор ядерний 261  
Реакції  
— термоядерні 266  
— ядерні 232, 240  
— — ланцюгові 257  
Резонанс 48, 77  
— акустичний 105  
Рентгенівська дефектоскопія 166  
Рівняння Ейнштейна для фотоефекту 186

## С

Самоіндукція 20  
Світловод 139

Сила струму діюча 75  
Спектр 161  
— лінійчастий 200  
— поглинання 200, 211  
Спектральний аналіз 210  
Сповільнювач нейтронів 261  
Стала Планка 185  
Струм  
— індукційний 6  
— електричний змінний 73

## Т

Телебачення 128  
Тембр 104  
Теорія відносності 175  
Тиск світла 195  
Тон 104  
Трансформатор 80  
Трек 229

## У

Ультразвук 99

## Ф

Фаза коливань 37  
Формула  
— Гюйгенса 40  
— Томсона 65  
Фотографія 196  
Фотон 181, 185  
Фотореле 189  
Фотосинтез 196  
Фотострум насичення 182  
Фотоелемент 188  
Фотоефект  
— внутрішній 190  
— зовнішній 190

## Х

Хвилі  
— електромагнітні 109  
— механічні 88  
— поздовжні 92  
— поперечні 92  
— світлові 133

## Ч

Частота коливань 26  
— — власна 35  
— — колова 35  
— — резонансна 48, 79  
— — циклічна 35  
Частотомір 52

### Ш

Швидкість

— хвилі 90

— звуку 101

— світла 133

### ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

---

Андерсон К. 270

Басов М. Г. 213

Беккерель А. 218

Беккер Г. 232

Бор Н. 206

Боте В. 232

Вільсон Ч. 229

Галілей Г. 133

Гейзенберг В. 235

Гелл-Манн М. 278

Герц Г. 110

Грей Л. 253

Гюйгенс Х. 40

Декарт Р. 136

Дірак П. 270

Жоліо-Кюрі І. 233

Жоліо-Кюрі Ф. 233

Ейнштейн А. 175

Кюрі П. 218

Лебедєв П. М. 195

Майкельсон А. 135

Максвелл Дж. 109

Марконі Г. 119

Менделєєв Д. І. 199

Мейтнер Л. 256

Міллікен Р. 199

Паулі В. 274

Планк М. 186

Попов О. С. 118

Прохоров О. М. 213

Птолемей К. 136

Пулюй І. 165

Резерфорд Е. 202

Ремер О. 134

Рентген В. 166

Склодовська-Кюрі М. 218

Смакула О. 149

Снеліус В. 136

Томсон В. 65

Томсон Дж. Дж. 199

Фарадей М. 3,5

Фермі Е. 256

Цвейг Дж. 278

Чедвік Дж. 233

Шарпак Ж. 231

# З М І С Т

## ЕЛЕКТРОДИНАМІКА (продовження)

### Розділ I. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

§ 1. Явище електромагнітної індукції . . . . .	4
§ 2. Індукційне електричне поле . . . . .	7
§ 3. Закон електромагнітної індукції . . . . .	10
Вправа 1 . . . . .	13
§ 4. Правило Ленца . . . . .	13
Вправа 2 . . . . .	18
§ 5. Електродинамічний мікрофон . . . . .	18
§ 6. Самоіндукція. Індуктивність . . . . .	19
Вправа 3 . . . . .	23
§ 7. Енергія магнітного поля . . . . .	23
<i>Висновки</i> . . . . .	25

### Розділ II. МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ

§ 8. Вільні та вимушені коливання . . . . .	26
§ 9. Рівняння руху тіла, яке коливається під дією сил пружності і тяжіння . . . . .	30
§ 10. Гармонічні коливання . . . . .	32
§ 11. Графічне зображення коливань . . . . .	35
§ 12. Фаза коливань . . . . .	37
Вправа 4 . . . . .	40
§ 13. Математичний маятник . . . . .	40
Вправа 5 . . . . .	43
§ 14. Перетворення енергії у гармонічних коливаннях . .	43
§ 15. Затухання вільних коливань . . . . .	45
§ 16. Вимушені коливання . . . . .	46
§ 17. Резонанс . . . . .	48
§ 18. Використання резонансу в техніці і подолання його . . . . .	51
§ 19. Поняття про автоколивання . . . . .	53
<i>Висновки</i> . . . . .	56

### Розділ III. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

§ 20. Вільні електромагнітні коливання в контурі . . . .	58
§ 21. Перетворення енергії в коливальному контурі . . .	60
§ 22. Рівняння гармонічних коливань у контурі . . . . .	63
Вправа 6 . . . . .	66



§ 23. Затухаючі електромагнітні коливання.	
Автоколивання	67
§ 24. Генератор незатухаючих коливань	68
§ 25. Вимушені електромагнітні коливання.	
Змінний струм	71
Вправа 7	73
§ 26. Генератор змінного струму	73
§ 27. Діючі значення напруги і сили струму	75
§ 28. Електричний резонанс	77
§ 29. Трансформатор	79
Вправа 8	82
§ 30. Електричні станції. Передача і використання електричної енергії	83
§ 31. Проблеми сучасної електроенергетики і охорона навколишнього середовища	84
<i>Висновки</i>	86

#### Розділ IV. МЕХАНІЧНІ ХВИЛІ. ЗВУКОВІ ХВИЛІ

§ 32. Поширення коливань у пружному середовищі	87
§ 33. Довжина хвилі. Швидкість хвилі	90
Вправа 9	92
§ 34. Поперечні і поздовжні хвилі	92
§ 35. Поширення механічних хвиль в однорідному суцільному середовищі	95
§ 36. Звукові хвилі	98
§ 37. Швидкість звуку	100
Вправа 10	101
§ 38. Музикальні звуки і шуми. Гучність і висота звуку	102
§ 39. Акустичний резонанс	105
<i>Висновки</i>	107

#### Розділ V. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

§ 40. Електромагнітне поле	108
§ 41. Електромагнітні хвилі і швидкість їх поширення	108
§ 42. Утворення електромагнітних хвиль	111
§ 43. Властивості електромагнітних хвиль	114
§ 44. Енергія електромагнітної хвилі. Густина потоку випромінювання	117
§ 45. Винайдення радіо	118
§ 46. Принцип радіотелефонного зв'язку. Амплітудна модуляція і детектування	120
§ 47. Найпростіший радіоприймач	123
§ 48. Радіолокація	125
§ 49. Поняття про телебачення	128
§ 50. Розвиток засобів зв'язку	131

§ 51. Світло як електромагнітні хвилі.	
Швидкість світла . . . . .	133
§ 52. Закони відбивання і заломлення світла . . . . .	135
Вправа 11 . . . . .	137
§ 53. Повне відбивання світла . . . . .	138
Вправа 12 . . . . .	140
§ 54. Інтерференція хвиль . . . . .	140
§ 55. Інтерференція світла . . . . .	143
Вправа 13 . . . . .	145
§ 56. Інтерференція в тонких плівках . . . . .	146
Вправа 14 . . . . .	148
§ 57. Практичне застосування інтерференції світла . . . . .	148
§ 58. Дифракція світла . . . . .	151
§ 59. Дифракційна решітка . . . . .	153
Вправа 15 . . . . .	156
§ 60. Поляризація світла . . . . .	156
§ 61. Дисперсія світла . . . . .	161
§ 62. Інфрачервоне та ультрафіолетове проміння . . . . .	163
§ 63. Рентгенівські промені . . . . .	165
§ 64. Шкала електромагнітних хвиль . . . . .	167
Висновки . . . . .	170

## Розділ VI. ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

§ 65. Принцип відносності Ейнштейна . . . . .	173
§ 66. Релятивістський закон додавання швидкостей . . . . .	176
§ 67. Закон взаємозв'язку маси й енергії . . . . .	178
Висновки . . . . .	180

## КВАНТОВА ФІЗИКА

### Розділ VII. СВІТЛОВІ КВАНТИ. ДІЇ СВІТЛА .

§ 68. Фотоелектричний ефект і його закони . . . . .	181
§ 69. Рівняння Ейнштейна. Кванти світла . . . . .	185
Вправа 16 . . . . .	188
§ 70. Фотоелементи і їх застосування . . . . .	188
§ 71. Фотон . . . . .	192
Вправа 17 . . . . .	193
§ 72. Корпускулярно-хвильовий дуалізм . . . . .	193
§ 73. Тиск світла . . . . .	194
§ 74. Хімічна дія світла . . . . .	196
Висновки . . . . .	198

### Розділ VIII. АТОМ І АТОМНЕ ЯДРО

§ 75. Докази складної будови атома . . . . .	199
§ 76. Досліди Е. Резерфорда. Ядерна модель атома . . . . .	201
§ 77. Квантові постулати Бора . . . . .	205
Вправа 18 . . . . .	207

§ 78. Експериментальне підтвердження постулатів Бора. Успіхи і труднощі у становленні теорії Бора . . . . .	207
§ 79. Спектральний аналіз . . . . .	210
§ 80. Поняття про квантові джерела світла . . . . .	211
§ 81. Радіоактивність . . . . .	218
§ 82. Закон радіоактивного розпаду . . . . .	222
§ 83. Методи спостереження і реєстрації йонізуючих випромінювань . . . . .	227
§ 84. Штучне перетворення атомних ядер. Відкриття нейтрона . . . . .	231
§ 85. Склад ядра атома . . . . .	235
§ 86. Енергія зв'язку атомних ядер . . . . .	237
Вправа 19 . . . . .	240
§ 87. Ядерні реакції . . . . .	240
Вправа 20 . . . . .	244
§ 88. Енергетичний вихід ядерних реакцій . . . . .	244
Вправа 21 . . . . .	246
§ 89. Одержання радіоактивних ізотопів . . . . .	247
§ 90. Використання радіоактивних ізотопів у науці й техніці . . . . .	249
§ 91. Поглинута доза випромінювання і її біологічна дія. Захист від випромінювань . . . . .	252
§ 92. Поділ ядер Урану . . . . .	255
§ 93. Ланцюгова ядерна реакція . . . . .	257
§ 94. Ядерний реактор . . . . .	260
§ 95. Атомні (ядерні) електростанції . . . . .	264
§ 96. Термоядерні реакції . . . . .	266
§ 97. Поняття елементарної частинки . . . . .	268
§ 98. Античастинки і антиматерія . . . . .	270
§ 99. Розпад нейтрона. Відкриття нейтрино . . . . .	273
§ 100. Взаємні перетворення частинок і квантів електромагнітного випромінювання . . . . .	275
§ 101. Характеристики елементарних частинок . . . . .	277
Висновки . . . . .	278

## Розділ IX. ФІЗИКА. ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ. ТЕХНОЛОГІЯ

§ 102. Сучасна фізична картина світу . . . . .	281
§ 103. Фізика і науково-технічний прогрес . . . . .	286
Лабораторні роботи . . . . .	293
Задачі для повторення . . . . .	300
Відповіді до вправ . . . . .	309
Відповіді до задач на повторення . . . . .	311
Предметний покажчик . . . . .	312
Іменний покажчик . . . . .	315



Навчальне видання

**ГОНЧАРЕНКО Семен Устимович**

## **ФІЗИКА**

**Підручник для 11 класу  
середньої загальноосвітньої школи**

*Затверджено Міністерством освіти і науки України*

**Відповідальна за випуск Є. М. Коденко**

**Редактор В. Г. Голуб**

**Художник обкладинки О. Я. Остапов**

**Художній редактор Н. Г. Антоненко**

**Технічний редактор Г. Г. Саливон**

**Коректори Л. С. Командир, І. М. Ситниченко**

Здано до набору 01.01.2002. Підписано до друку 20.08.2002. Формат 60х90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Папір офс. Гарнітура Шкільна. Друк офс. Ум.друк.арк. 20.

Ум. фарбовідб. 41. Обл.-вид. арк. 18,35.

Тираж 300 000 (II з-д 100 001—200 000) пр. Вид. №36768.

Зам. 2—263.

Набір та верстка комп'ютерного центру видавництва «Освіта».

Видавництво «Освіта», 04053, Київ, Ю. Коцюбинського, 5.

Свідоцтво ДК № 27 від 31.01.2000 р.

Виготовлено в ЗАТ «Київська книжкова фабрика»,

01054, Київ, Воровського, 24.

Свідоцтво ДК № 787 від 28.01.2002 р.