

Оріон

Тетяна Засекіна, Дмитро Засекін

Фізика і астрономія

Рівень стандарту

11

УДК 53+52]*кл11(075.3)
3-36

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України від 12.04.2019 № 472)*

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Засєкіна Т. М.

3-36 Фізика і астрономія (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підруч. для 11 кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. — К. : УОВЦ «Оріон», 2019. — 272 с. : іл.

ISBN 978-617-7712-52-6.

УДК 53+52]*кл11(075.3)

ISBN 978-617-7712-52-6

© Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін, 2019
© УОВЦ «Оріон», 2019

Передмова

Шановні старшокласники і старшокласниці! У цьому році ви завершуєте вивчення шкільних курсів фізики й астрономії. Проте ці науки супроводжуватимуть вас усе життя. Адже нині будь-яка галузь господарства (інформаційні технології, промисловість, медицина, сільське господарство) й навіть гуманітарна сфера життя суспільства використовують сучасне технологічне устаткування, автоматизовані пристрої. Сьогодні наукові дослідження здійснюються не лише в академічних установах, а й у компаніях і офісах сучасного виробництва товарів для промисловості, сільського господарства, медицини, сфери послуг, побуту. Сьогодні наша країна потребує молодих людей, які прагнуть успіху, здатні шукати способи вдосконалення того чи того процесу, вносити зміни, порівнювати й аналізувати різні підходи, вирішувати проблеми, працювати в команді. У пригоді вам стануть знання, здобуті в старшій школі на уроках фізики й астрономії: ваше вміння глобально мислити, бачити проблему цілісно, пов'язувати та систематизувати факти й події.

А щоб вивчати ці науки було захопливо й зрозуміло, ми намагалися в тексті підручника наводити не лише наукові факти, теорії та пояснення, а й проблемні запитання, описи природних явищ чи технологічних процесів. Вони спонукатимуть вас шукати відповіді, аналізувати й пояснювати.

Підручник не є єдиним джерелом інформації. Готовччись до уроків, навчальних проектів, ви маєте навчитися працювати з багатьма джерелами інформації, вміти оцінювати її достовірність і надійність джерел, аналізувати, опрацьовувати, інтерпретувати.

У підручнику є рубрика «Електронний додаток», яка містить необхідний додатковий матеріал. З «Електронним додатком» можна ознайомитися за посиланням <https://bitly.su/BZMT0VKM> або за допомогою QR-кодів, які містяться в тексті підручника.

1. Для цього встановіть програму-роздільник на свій телефон і запустіть її.
2. Наведіть об'єктив камери на картинку QR-коду. Код розпізнається автоматично або після натиснення на кнопку (Snapshot) для активації сканера.
3. Інформація, зашифрована в QR-коді, з'явиться на екрані мобільного телефона.

Виконуючи роботи фізичного й астрономічного практикумів, ви матимете нагоду використовувати як сучасне фізичне обладнання, так і звичайні, а інколи й підручні засоби. Головне — навчитися застосовувати набуті природничо-наукові знання й методологію дослідницької діяльності щоб пояснювати світ природи через виявлення проблеми та пошук способів її розв'язання.

І першим серйозним випробуванням міцності ваших знань і вмінь буде зовнішнє незалежне оцінювання, готовччись до якого, ви маєте насамперед навчитися розв'язувати фізичні задачі. Цьому виду діяльності радимо приділити особливу увагу! Підручник містить достатню кількість прикладів розв'язування задач, вправ із запитаннями й задачами різного виду. Особливу увагу варто приділити комбінованим задачам, які потребують знань з усіх розділів фізики.

Сподіваємося, що вивчення фізики й астрономії за цим підручником буде для вас цікавим і нескладним.

ЗМІСТ

Передмова	3
Розділ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	6
§ 1. Електромагнітна взаємодія. Закон Кулона.	7
§ 2. Електричне поле.	10
§ 3. Провідники та діелектрики в електричному полі.	14
§ 4. Робота з переміщення заряду в електричному полі.	18
§ 5. Потенціал електричного поля	22
§ 6. Електроемність. Конденсатори	25
Перевірте себе (§ 1–6)	31
§ 7. Електричний струм. Закон Ома для однорідної ділянки кола	32
§ 8. Електрорушайна сила. Закон Ома для повного кола.	38
§ 9. Робота й потужність електричного струму.	43
§ 10. Електричний струм у металах	47
§ 11. Електричний струм у напівпровідниках	51
§ 12. Електричний струм у рідинах	55
§ 13. Електричний струм у газах	59
Перевірте себе (§ 7–13)	63
§ 14. Магнітна взаємодія. Закон Ампера	64
§ 15. Дія магнітного поля	68
§ 16. Електромагнітна індукція	73
§ 17. Самоіндукція	80
Перевірте себе (§ 14–17)	85
Практикум	86
Розділ 2. КОЛІВАННЯ ТА ХВИЛІ	88
§ 18. Механічні коливання	88
§ 19. Гармонічні коливання	90
§ 20. Перетворення енергії в гармонічних коливаннях	96
§ 21. Маятники	100
§ 22. Вимушенні коливання. Резонанс. Автоколивання	103
§ 23. Механічні хвилі	106
Перевірте себе (§ 18–23)	112
§ 24. Вільні електромагнітні коливання	113
§ 25. Змінний струм	119
§ 26. Активні та реактивні навантаження в електричному колі змінного струму.	123
§ 27. Трансформатор	129
§ 28. Електромагнітні хвилі	134
Перевірте себе (§ 24–28)	141

§ 29. Інтерференція світла	142
§ 30. Дифракція світла	148
§ 31. Дисперсія світла.	153
§ 32. Поляризація світла.	155
§ 33. Відбиття й заломлення світла	159
§ 34. Лінзи. Оптичні прилади та системи.	164
Перевірте себе (§ 29–34)	168
Практикум	169
Розділ 3. КВАНТОВА І ЯДЕРНА ФІЗИКА	170
§ 35. Гіпотеза квантів Планка. Фотон	170
§ 36. Фотоефект	173
§ 37. Квантові властивості атома	178
§ 38. Спектри. Спектральний аналіз	181
§ 39. Атомне ядро	185
§ 40. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	189
§ 41. Ядерні реакції	195
§ 42. Елементарні частинки	199
Перевірте себе (§ 35–42)	203
Практикум	204
Розділ 4. АСТРОНОМІЯ	205
§ 43. Небесна сфера	205
§ 44. Видимі рухи світил на небесній сфері	209
§ 45. Методи та засоби фізичних й астрономічних досліджень	212
§ 46. Сонячна система	216
§ 47. Видимі рухи планет. Закони Кеплера	219
§ 48. Планети та їхні супутники	223
§ 49. Малі тіла Сонячної системи	228
§ 50. Найближча зоря — Сонце	231
§ 51. Зорі. Еволюція зір	238
§ 52. Галактики	246
§ 53. Елементи сучасної космології	252
§ 54. Дослідження космосу	259
Перевірте себе (§ 43–54)	263
Практикум	264
Відповіді	265
Предметний покажчик	268
Додатки	270

Розділ 1

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Електромагнітна взаємодія — це не лише електрика й магнетизм, без чого неможливе життя сучасної цивілізації. Ця взаємодія була так само потрібна пічерній людині, як і нам з вами. Саме електромагнітна взаємодія зв'язує електрони і ядра в атомах і молекулах. Зникне вона — зникне життя.

Як змінилося життя людини з використанням електрики й магнетизму? Як вдалося вченим дослідити й використати електромагнітну взаємодію? Чи є ще не дослідженні електромагнітні явища? Про це — у розділі «Електродинаміка»

§1

Електромагнітна взаємодія. Закон Кулона

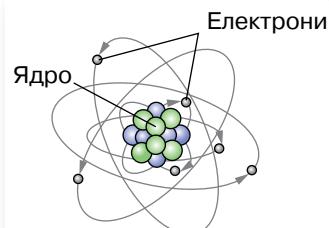
Електричний заряд. У 8 і 9 класах ми вивчали електромагнітні явища. Узагальнимо відомі нам факти. Електромагнітна взаємодія є найбільш дослідженою із чотирьох фундаментальних фізичних взаємодій, адже нею зумовлено більшість явищ у нашому світі. Саме електромагнітна взаємодія зв'язує електрони і ядра в атомах і молекулах. Саме вона відповідає за всі хімічні реакції, зокрема й за реакції, що протікають у живих організмах. Зникне вона — зникне життя.

Електромагнітна взаємодія зумовлена тим, що в природі існують частинки, для яких електричний заряд є їх невіддільною особливістю.

Електричний заряд q — це фізична величина, яка кількісно характеризує електромагнітну взаємодію.

Бувають частинки без електричного заряду, але не існує електричного заряду без частинки. У 1911 р. було створено *планетарну модель атома* (мал. 1). Її автор — англійський фізик Ернест Резерфорд — показав, що в центрі атома розташоване ядро, навколо якого обертаються електрони.

Подальші дослідження довели, що атомне ядро складається з позитивно заряджених протонів і електронейтральних нейtronів.



Мал. 1. Планетарна модель атома

Електричний заряд протона за величиною дорівнює заряду електрона, але протилежний за знаком. У цілому атом електронейтральний, оскільки кількість протонів у ядрі дорівнює кількості електронів в атомі. Кількість протонів у ядрі визначає хімічні властивості атома та його місце в періодичній системі хімічних елементів.

Електричний заряд дискретний: існує *елементарний електричний заряд*, що дорівнює за абсолютною значенням заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Одиниця електричного заряду — кулон, 1 Кл.

Чітке визначення одиниці електричного заряду буде встановлено згодом. Зараз зазначимо, що числове значення електричного заряду 1 Кл дорівнює сумі зарядів $6,25 \cdot 10^{18}$ електронів.

Наявність електричного заряду q в макротіл пояснюється нерівномірним перерозподілом позитивних і негативних дискретних елементарних зарядів. Електричний заряд $q = ne$, де n — кількість елементарних нескомпенсованих електричних зарядів.

Як відомо, однайменно заряджені тіла відштовхуються, різномірно заряджені — притягаються. На електризувати тіло можна тертям або дотиком до електрично зарядженого тіла.

Явище нерівномірного перерозподілу позитивних і негативних електричних зарядів у макротілах називається електризацією (електростатичною індукцією).

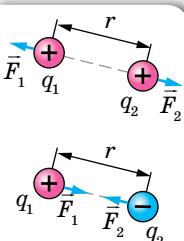
Існують й інші способи електризації тіл. Наприклад, метал можна зробити позитивно зарядженим, якщо його освітити відповідним світловим потоком. У результаті взаємодії світла з металом відбувається виривання електронів з поверхні металу. Втрачаючи електрони, метал стає позитивно зарядженим. Але за будь-якого способу електризації тіл електричні заряди не виникають і не зникають, а лише перерозподіляються між усіма тілами, які беруть участь у тому або тому процесі. Це твердження називають **законом збереження електричного заряду**. Математично він формулюється так.

Алгебраїчна сума електричних зарядів тіл, що утворюють замкнену систему за будь-яких взаємодій, залишається сталою:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.}$$

Закон Кулона. В електростатиці, як і в будь-якому розділі фізики, використовують певні моделі. Однією з моделей електростатики є *точковий електричний заряд*.

Точкові електричні заряди — це заряджені тіла, розміри яких малі порівняно з відстанню між ними.



Мал. 2. Сили взаємодії між точковими електричними зарядами

Інколи для спрощення вживають тільки термін «заряд». Варто пам'ятати, що цим терміном можуть називати як точкове електрично заряджене тіло, так і значення електричного заряду на ньому.

Кількісно взаємодію точкових електричних зарядів описує закон, експериментально встановлений Шарлем Кулоном у 1785 р.

Закон Кулона формулюється так: сила взаємодії F двох точкових зарядів q_1 і q_2 прямо пропорційна добутку абсолютних величин їх зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними, напрямлена вздовж прямої, що сполучає заряди, і відповідає притяганню для різномінних зарядів та відштовхуванню — для однотипних (мал. 2).

Модуль цієї сили: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$, де ϵ_0 — електрична стала (її величина та розмірність залежать від вибраної системи одиниць), ϵ — відносна діелектрична проникність середовища.

Відносна діелектрична проникність середовища ϵ показує, у скільки разів сила взаємодії електричних зарядів у цьому середовищі менша, ніж у вакуумі. Її числове значення для багатьох речовин визначено дослідним шляхом і занесено до таблиць. Отже, для вакууму $\epsilon = 1$.

Підтверджено, що два точкові заряди по 1 Кл на відстані 1 м один від одного у вакуумі взаємодіють із силою $9 \cdot 10^9$ Н. Із закону Кулона можна визначити електричну сталь:

$$\epsilon_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 F} = \frac{1 \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Н}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

У фізиці, як ви знаєте, потрібно враховувати межі виконання законів. Правильність закону Кулона підтверджено численними перевірками. Установлено, що він діє між зарядженими частинками, відстань між якими може становити від 10^{-15} м до десятків кілометрів.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЧУМІЮ

- Як на досліді можна виявити електромагнітну взаємодію?
- Сформулюйте й поясніть закон збереження електричного заряду.
- У скільки разів зміниться сила взаємодії між двома точковими зарядами, якщо відстань між ними збільшити у два рази, а значення електричного заряду одного з них збільшити у три рази?
- Чим подібні й чим відрізняються закон всесвітнього тяжіння та закон Кулона?



Приклади розв'язування задач

Задача. Однотипні точкові заряди, модулі яких $q_1 = q_2 = q_3 = 1 \cdot 10^{-6}$ Кл, розміщені у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 20$ см. Визначте силу, що діє в повітрі на один із цих зарядів з боку двох інших.

Дано:

$$\begin{aligned} q_1 = q_2 = q_3 &= 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \\ a &= 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м} \\ F &=? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Виконаемо схематичний малюнок до задачі (мал. 3).

Визначимо силу, що діє на точковий заряд q_3 , який перебуває в точці C . Заряди q_1 (у точці A) і q_2 (у точці B) діють на заряд q_3 із силами \vec{F}_1 і \vec{F}_2 .

Рівнодійну цих сил $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ визначимо за правилом паралелограма.

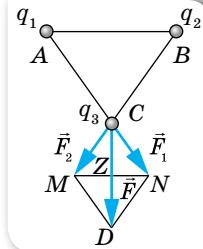
Напрямок результуючої сили \vec{F} , що діє на заряд q_3 , зображене на малюнку 3. Обчислимо її модуль F , використовуючи модулі векторів F_1 , F_2 , які дорівнюють довжинам відрізків, що зображують ці вектори. Легко довести, що $F_1 = F_2$, $\angle DCM = 30^\circ$, оскільки $\angle MCN = \angle ACB = 60^\circ$. Тоді $\frac{F}{2} = F_1 \cos 30^\circ$,

у $\triangle CNZ$ сторона $CZ = \frac{F}{2}$. За законом Кулона, модуль сили $F_1 = k \frac{q_1 q_3}{(AC)^2}$.

$$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}}{(0,2)^2 \text{ м}^2} = 0,225 \text{ Н};$$

$$F = 0,225 \text{ Н} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,39 \text{ Н.}$$

Відповідь: 0,39 Н.



Мал. 3



Вправа 1

- З якою силою взаємодіють два заряди $0,66 \cdot 10^{-7}$ і $1,1 \cdot 10^{-5}$ Кл у воді на відстані 3,3 см? На якій відстані їх слід розмістити у вакуумі, щоб сила взаємодії залишилась такою самою?
- Два заряди, один з яких у три рази більший за інший, перебуваючи у вакуумі на відстані 0,3 м, взаємодіють із силою 30 Н. Визначте ці заряди. На якій відстані у воді заряди будуть взаємодіяти із силою, у три рази більшою?
- Однакові кульки масою по 0,2 г підвісили на нитці так, як зображенено на малюнку 4. Відстань між кульками $|BC| = 3$ см. Визначте силу натягу нитки на ділянках AB і BC , якщо кулькам надали однакових зарядів по 10 нКл. Розгляньте такі випадки: а) заряди одніменні; б) заряди різноіменні.
- Тонка шовкова нитка витримує силу натягу $9,8 \cdot 10^{-3}$ Н. Підвішена на цій нитці кулька масою 0,67 г має заряд $q_1 = 1,1 \cdot 10^{-9}$ Кл. Знизу в напрямку лінії підвісу на відстані 1,8 см до неї підносять іншу кульку із зарядом q_2 протилежного знаку. За якого заряду q_2 нитка може розірватись?
- Дві однакові металеві кульки зарядили так, що заряд однієї з них у 5 раз більший від заряду іншої. Кульки доторкнули одну до одної та розсунули на ту саму відстань. Як змінилася (за модулем) сила взаємодії, якщо кульки мали одніменні заряди; різноіменні заряди?
- Заряди 10 і 16 нКл розташовані на відстані 7 мм один від одного. Яка сила діятиме на заряд 2 нКл, розміщений у точці, що віддалена на 3 мм від меншого заряду й на 4 мм — від більшого?



Мал. 4

§ 2

Електричне поле

Електричне поле. Електромагнітна взаємодія між електрично зарядженими тілами відбувається через *електромагнітне поле*. Вирішальними у становленні теорії електромагнітного поля були дослідження Майкла Фарадея (1791–1867) та Джеймса Максвелла (1831–1879). Якщо в певній системі відліку електрично заряджені тіла нерухомі, то поле, що існує навколо них, називають *електричним (електростатичним)*.

Електричне поле має певні властивості, які можна дослідити. Для дослідження електричного поля використовують ще одну модель — так званий *пробний електричний заряд*.

Пробний електричний заряд — позитивно заряджене тіло, поле якого не змінює поле, у яке він внесений.

Напруженість електричного поля. Головна властивість електричного поля — здатність діяти на внесені в нього електричні заряди з деякою силою. Нехай електричне поле створюється точковим зарядом¹ q . Тут і надалі, якщо немає спеціальних застережень, вважатимемо електричне поле однорідним. Будемо по черзі поміщати в одну й ту само точку поля пробні заряди різної величини: q_1, q_2, \dots — і щоразу вимірювати силу, що діє на пробний заряд: F_1, F_2, \dots . Виявляється, що відношення сили до заряду в даній точці поля завжди є сталою величиною: $\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \dots = \text{const.}$

В іншій точці поля (або в електричному полі іншого зарядженого тіла) це відношення також виконується, але його значення може бути іншим.

Отже, відношення $\frac{F}{q}$ залежить тільки від вибраної точки поля і є характеристикою силової дії поля. Силова характеристика електричного поля називається *напруженістю* поля й позначається буквою E .

Напруженість електричного поля E — це фізична величина, яка є силовою характеристикою поля й визначається відношенням сили \vec{F} , що діє в даній точці поля на пробний заряд q , до величини цього заряду:

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

Якщо пробний заряд дорівнює одиниці, то можна дати й таке визначення напруженості електричного поля в деякій точці: напруженість електричного поля в даній точці дорівнює *силі*, що діє на одиничний *пробний заряд*, розміщений у цій точці.

¹ Тут і надалі, описуючи поведінку заряду в електричному полі, матимемо на увазі саме позитивний заряд q .

Одиниця напруженості електричного поля — ньютон на кулон, $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.

Як далі буде з'ясовано, одиницею напруженості є також вольт на метр, $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Увівши таку характеристику, ми можемо говорити не про силу, з якою один точковий заряд діє на іншій, а про силу, з якою на точковий заряд діє поле в тій точці, де він розміщений. За допомогою сучасних приладів можна вимірювати напруженості поля. І, відповідно, можна розрахувати дію поля в даній точці на будь-яке заряджене тіло за формулою $\vec{F} = \vec{E}q$.

Якщо електричне поле створене одним точковим зарядом q , то, за законом Кулона, на пробний заряд q_0 у точці на відстані r з боку поля, створюваного зарядом q , діє сила, модуль якої $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{\epsilon r^2}$.

Тоді напруженість поля точкового заряду q на відстані r від нього:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}.$$

З формулі видно, що напруженість електричного поля точкового заряду зменшується пропорційно квадрату відстані від заряду.

Принцип суперпозиції. Принцип суперпозиції застосовується, коли електричне поле створено не одним зарядженим тілом, а кількома. Оскільки напруженість, як і сила, — векторна величина, то вектор напруженості результуючого поля дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створених кожним із цих зарядів окремо. У цьому полягає **принцип суперпозиції (накладання) електричних полів**.

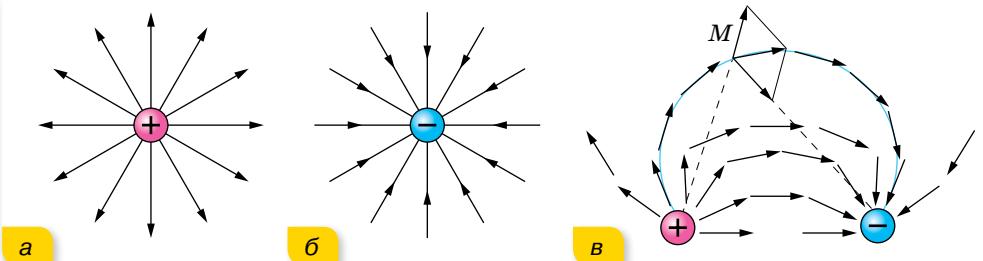
Напруженість поля, створеного системою нерухомих зарядів, дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створених кожним із цих зарядів окремо:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

Цим пояснюється те, що напруженість електричного поля навколо тіла, до складу якого входять і позитивно, і негативно заряджені частинки, може дорівнювати нулю, і тіло в цілому буде електронейтральним.

Графічне зображення електричних полів. Щоб задати електричне поле, треба вказати напрямок і значення сили, що діє на пробний заряд, коли його розмістити в тій або іншій точці поля. Це можна зробити графічним способом, запропонованим Фарадеєм, за допомогою *силових ліній (ліній напруженості електричного поля)*.

Напрямок силових ліній збігається з напрямком вектора напруженості. У випадку точкових зарядів силові лінії напрямлені від позитивного заряду й закінчуються в нескінченності (мал. 5, а; с. 12) або починаються в нескінченності та йдуть до негативного заряду (мал. 5, б; с. 12).

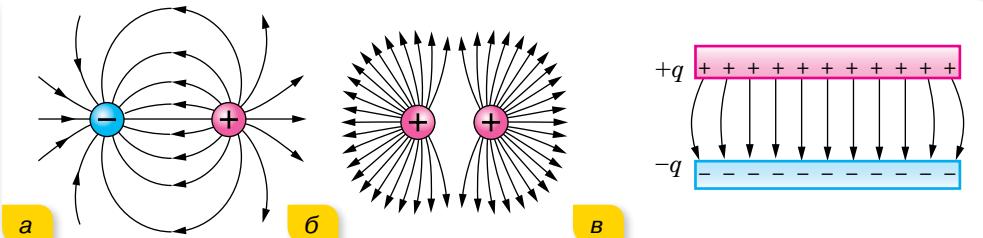


Мал. 5. Лінії напруженості точкових зарядів (а, б), диполя (в)

Складніше провести лінії напруженості, коли поле створено кількома зарядами, наприклад двома. Така система з двох зарядів називається *диполем*. Провести лінію так, щоб вектори напруженості в кожній точці збігалися з нею, здебільшого не можна. Тому лінії напруженості проводять так, щоб вектори напруженості були напрямлені по дотичній (мал. 5, в).

Лінії напруженості (силові лінії) електричного поля — неперервні лінії, дотичні до яких у кожній точці, через яку вони проходять, збігаються з вектором напруженості поля.

На малюнку 6 зображене ще кілька прикладів електричних полів.



Мал. 6. Графічне зображення електричних полів: а — одинакових за значенням різномінних зарядів; б — одинакових за значенням одніменних зарядів; в — двох пластин, заряджених різномінними зарядами однакової величини

Зображенуши електричне поле графічно, потрібно пам'ятати, що лінії напруженості ніде не перетинаються одна з одною, не перериваються між зарядами, починаються на позитивному заряді (або в нескінченості) і закінчуються на негативному заряді (або в нескінченості).

Поле, напруженість якого в усіх точках однакова за модулем і напрямком, називають *однорідним електростатичним полем*. Прикладом такого поля є поле всередині простору між зарядженими пластинами (мал. 6, в) (біля країв пластин поле неоднорідне).

Електричне поле заряджених поверхонь. Напруженість електричного поля, створюваного тілами, що мають різні геометричні форми, визначається відповідними формулами.

Напруженість електричного поля *точкового заряду* q_0 у будь-якій точці поля визначається: $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_0|}{\epsilon r^2}$, де ϵ_0 — електрична стала, ϵ — діелектрична проникність середовища, r — відстань від заряду q_0 , що створює поле, до даної точки поля.

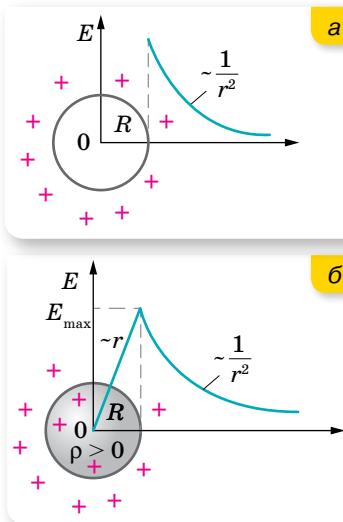
Такий самий вигляд має формула для напруженості *зарядженої сфери* радіусом R , за умови, що відстань від її центра $r \gg R$. Усередині сфери електричного поля немає. За межами сфери напруженість електричного поля зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані від центра сфери (мал. 7, а).

Якщо маемо *суцільну заряджену кулю* радіусом R , то електричний заряд розподіляється в її об'ємі: $\rho = \frac{q}{V}$, де ρ — об'ємна густота заряду. Усередині кулі електричне поле існує й лінійно зростає зі збільшенням відстані від центра кулі (мал. 7, б). За межами кулі $r \gg R$ напруженість визначається тими само формулами, що й для точкового тіла (сфери).

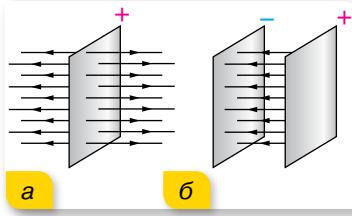
Напруженість електричного поля *рівномірно зарядженої нескінченної площини* (мал. 8, а) визначається: $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$, де σ — поверхнева густота електричного заряду — величина, що дорівнює електричному заряду, який припадає на одиницю площини: $\sigma = \frac{q}{S}$.

Напруженість електричного поля *двох рівномірно різноміжно заряджених нескінчених пластин*: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$.

Електричне поле зосереджене між пластинами, у навколошньому просторі за пластинами $E = 0$ (мал. 8, б).



Мал. 7. Графіки залежності напруженості електричного поля від відстані від центра:
а — сфера; б — куля



Мал. 8. Графічне зображення електричного поля: а — пластина; б — двох різноміжно заряджених пластин



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Назвіть основні властивості електричного поля.
2. Що називають напруженістю електричного поля? Як вона визначається? Який напрямок має вектор напруженості?
3. У чому полягає принцип суперпозиції?
4. Для чого служать лінії напруженості електричного поля?
5. Яке електричне поле називають однорідним?

Приклади розв'язування задач

Задача. На діелектричній нитці висить кулька масою m . Уся ця система перебуває в однорідному електростатичному полі, напруженість якого \vec{E} направлена вертикально вгору. Визначте силу пружності нитки, коли кулька не заряджена та коли її надають негативний заряд $-q$.

Дано:

m

E

$-q$

$F - ?$

Розв'язання:

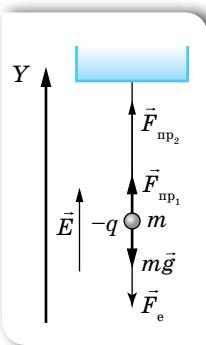
На незаряджену кульку діє сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила пружності $\vec{F}_{\text{пп}_1}$. Якщо кульку зарядити, виникне ще й електрична сила \vec{F}_e (мал. 9), у результаті чого сила пружності зміниться — $\vec{F}_{\text{пп}_2}$.

Спроектуємо ці сили на вісь Y . Оскільки і в першому, і в другому випадках кулька перебуває в рівновазі, то сума проекцій сил, що діють на неї, дорівнює нулю.

У першому випадку $F_{\text{пп}_1} - mg = 0$, тобто $F_{\text{пп}_1} = mg$.

У другому випадку $F_{\text{пп}_2} - mg - F_e = 0$, тобто $F_{\text{пп}_2} = mg + F_e = mg + qE$.

Відповідь: $F_{\text{пп}_1} = mg$; $F_{\text{пп}_2} = mg + qE$.



Мал. 9



Вправа 2

- Два заряди, один з яких за модулем у 4 рази більший за другий, розташували на відстані a один від одного. У якій точці поля напруженість дорівнює нулеві, якщо заряди однотипні; різного типу?
- В однорідному полі, напруженість якого $40 \frac{\text{КН}}{\text{Кл}}$, розташували заряд 27 нКл . Визначте напруженість результуючого поля на відстані 9 см від заряду в точках: а) розташованих на силовій лінії однорідного поля, яка проходить через заряд; б) розташованих на прямій, що проходить через заряд перпендикулярно до силових ліній.
- Поле створене точковим зарядом $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Визначте напруженість поля на відстані 6 см від заряду. З якою силою буде діяти поле в цій точці на заряд, що дорівнює $1,8 \text{ нКл}$?
- Визначте напруженість поля заряду 36 нКл у точках, віддалених від нього на 9 і 18 см.
- Заряди по $0,1 \text{ мкКл}$ розташували на відстані 6 см один від одного. Визначте напруженість поля в точці, віддаленій на 5 см від кожного із зарядів. Розв'яжіть задачу для випадків: а) обидва заряди позитивні; б) один заряд позитивний, а інший негативний.

§ 3

Провідники та діелектрики в електричному полі

Електростатична індукція. Будь-яке тіло, розміщене в електричному полі, електризується. Проте процес електризації для різних речовин буде різним.

Електричні характеристики електронейтрального тіла залежать від рухливості заряджених частинок у ньому, яка визначається будовою атомів речовини та її взаємним розміщенням.

За концентрацією вільних заряджених частинок у речовині всі речовини поділяють на три основні класи: *проводники*, *діелектрики* та *напівпровідники*. До провідників належать речовини, які містять заряджені частинки, що здатні рухатися впорядковано по всьому об'єму тіла під дією електричного поля, — так звані *вільні заряди*. Провідниками є всі метали, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей, йонізовані гази.

Розглянемо поведінку в електричному полі тільки твердих металевих провідників. У металах носіями вільних зарядів є вільні електрони. Їх називають *електронами провідності*. Вільні електрони беруть участь у тепловому русі й можуть переміщуватися по шматку металу в будь-якому напрямку.

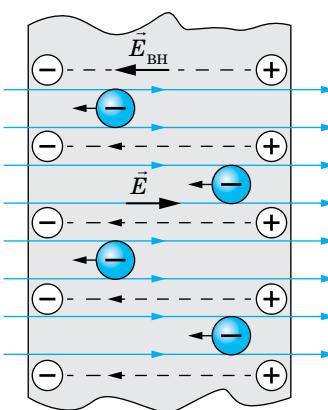
Помістимо незаряджений металевий провідник в однорідне електростатичне поле.

Під дією поля в ньому виникне впорядкований рух вільних електронів у напрямку, протилежному напрямку напруженості \vec{E} цього поля. Електрони накопичуватимуться на одному боці провідника й утворять там надлишковий негативний заряд, а їх недостача на іншому боці провідника спричинить утворення там надлишкового позитивного заряду, тобто в провіднику відбудеться розподіл зарядів. Ці нескомпенсовані різноіменні заряди з'являються на провіднику лише під дією зовнішнього електричного поля, тобто такі заряди є індукованими (наведеними). А в цілому провідник залишається незарядженим. У цьому переконуємося, виймаючи провідник з електричного поля.

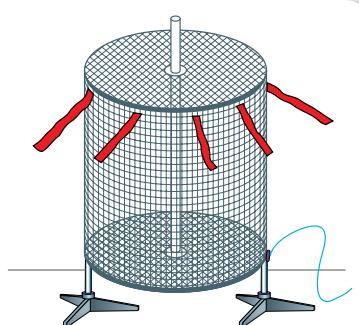
Вид електризації, за якого під дією зовнішніх електричних полів відбувається перерозподіл зарядів між частинами певного тіла, називають *електростатичною індукцією*.

Нескомпенсовані електричні заряди, що з'явилися на протилежних частинах провідника, створюють усередині провідника власне електричне поле напруженістю $\vec{E}_{\text{вн}}$. Напрямки зовнішнього і внутрішнього полів — протилежні (мал. 10).

Унаслідок переміщення вільних носіїв заряду й накопичення їх на протилежних частинах провідника напруженість $\vec{E}_{\text{вн}}$ внутрішнього поля збільшується і, нарешті, зрівнюється за модулем з напруженістю \vec{E} зовнішнього поля. Це приводить до того, що напруженість результуючого поля всередині провідника дорівнює нулю. До того ж на провіднику встановлюється рівновага зарядів.



Мал. 10. Провідник у зовнішньому електричному полі



Мал. 11. Електричне поле, сконцентроване ззовні

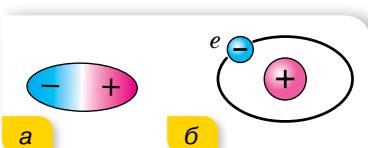
Електростатичний захист. За умови рівноваги зарядів на провіднику весь нескомпенсований заряд розміщується тільки на зовнішній поверхні провідника, а всередині нього електричного поля немає (мал. 11). Це явище використовують для створення електростатичного захисту — захисту від дії електричного поля. На відміну від гравітаційного поля, від електричного поля можна захиститися, якщо оточити провідник, наприклад, мідною сіткою. На практиці це використовують, щоб захиститися від потужного електричного поля радіолокаторів і радіостанцій, випромінювання яких може зашкодити здоров'ю людини; щоб запобігти дії електричного поля на чутливі прилади.

Види діелектриків. *Діелектриками*, або ізоляторами, називають такі тіла, крізь які електричні заряди не можуть переходити від зарядженого тіла до незарядженого. Ця властивість діелектриків зумовлена тим, що в них за певних умов немає вільних носіїв заряду. Якщо умови змінюються, наприклад, під час нагрівання, у діелектрику можуть виникнути вільні носії заряду, і він почне проводити електрику. Отже, поділ речовин на провідники й діелектрики є умовним.

До діелектриків належать усі гази за нормальніх умов, рідини (газ, спирти, ацетон, дистильована вода та ін.), тверді тіла (скло, пластмаси, сухе дерево, папір, гума тощо).

У діелектриках електричні заряди не можуть переміщуватися під дією електричного поля по всьому об'єму тіла так, як вільні заряди провідника.

Діелектрики поділяють на два види (мал. 12):

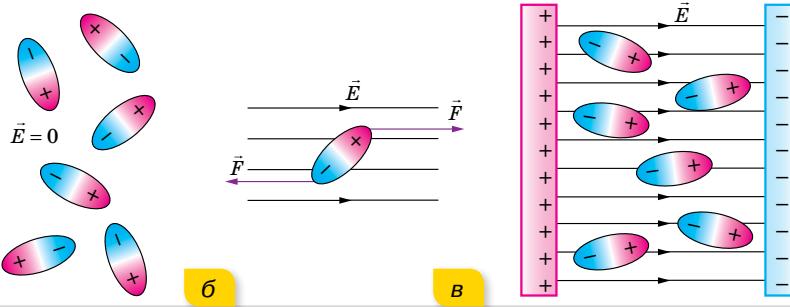


Мал. 12. Види діелектриків:
а — полярні; б — неполярні

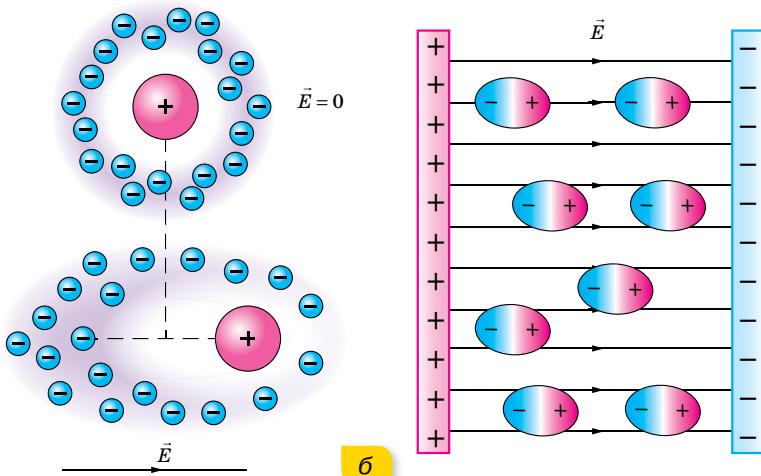
- *полярні*, що складаються з молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються (вода, спирти та ін.);
- *неполярні*, що складаються з атомів або молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються (бензол, інертні гази, поліетилен та ін.).

Поляризація діелектриків. Усередині діелектрика електричне поле може існувати. Притягання незарядженого тіла (діелектрика) до зарядженого тіла пояснюється тим, що в електричному полі відбувається *поляризація діелектрика*, тобто зміщення в протилежні боки різномінених зарядів, що входять до складу атомів і молекул таких речовин, але тут зміщення відбувається в межах кожного атома або молекули.

Молекули полярних діелектриків — це електричні диполі, що мають постійний дипольний момент унаслідок асиметрії центра мас позитивних і негативних зарядів (мал. 13, а).



Мал. 13. Поляризація полярного діелектрика



Мал. 14. Деформація та орієнтація молекул неполярного діелектрика в електричному полі

Якщо полярний діелектрик помістити в електричне поле, то ці диполі починають повертатися своїми позитивно зарядженими кінцями до негативно зарядженої пластини, а негативно зарядженими — до позитивно зарядженої пластини (мал. 13, б). У результаті на поверхні діелектрика біля позитивної пластини виникає досить тонкий шар негативних зарядів, а біля негативної — позитивних, які й створюють зустрічне поле (мал. 13, в). (Усередині діелектрика позитивні й негативні заряди сусідніх диполів компенсують дію один одного.) Однак, на відміну від провідників, це поле вже не здатне повністю скомпенсувати зовнішнє, а лише послаблює його в ϵ разів.

Молекули неполярних діелектриків, якщо відсутнє зовнішнє електричне поле, дипольного моменту не мають (мал. 14, а). Якщо ж неполярний діелектрик помістити в електричне поле, його молекули деформуються, у результаті чого утворюються диполі, які поводять себе, як і диполі полярного діелектрика. У полярних діелектриках також відбувається поляризація молекул, унаслідок чого в електричному полі дипольний

моменткою молекули дещо збільшується (мал. 14, б; с. 17). Але поляризація неполярних діелектриків пояснюється лише виникненням дипольного моменту в молекулі внаслідок її деформації в зовнішньому електричному полі. Залежно від хімічного зв'язку вона може бути результатом деформації електронних оболонок окремих атомів і йонів (електронна поляризація) або наслідком зміщення позитивних і негативних йонів у різні боки вздовж силових ліній зовнішнього електричного поля (йонна поляризація). Наведений дипольний момент зростає зі збільшенням напруженості електричного поля.

Таким чином, у діелектриках, як і в провідниках, спостерігається індукція електричних зарядів. Однак, якщо в електричному полі розділити діелектрик на дві частини, то ми не одержимо різноманітно заряджених тіл. У цьому полягає відмінність індукції в діелектриках від індукції в провідниках.

Діелектрична проникність речовини. Для характеристики електричних властивостей діелектриків уведено особливу величину, яку називають **діелектричною проникністю**. Це фізична стала, яка показує, у скільки разів модуль напруженості електричного поля всередині діелектрика $E_{\text{вн}}$ менший від модуля напруженості E_0 у вакуумі:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E_{\text{вн}}}.$$

Діелектрична проникність визначена для всіх діелектриків і занесена до таблиць. Для дистильованої води $\epsilon = 81$, а для гасу $\epsilon = 2$.

Про особливості поведінки деяких діелектриків в електричному полі, практичне використання рідких кристалів читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Що відбувається в разі внесення провідника в електричне поле?
- Як зарядити два тіла різноманітно, не доторкуючись до них зарядженим тілом?
- Укажіть схожість і відмінності процесів електризації провідника та поляризації діелектрика.
- У якому агрегатному стані — рідкому, твердому чи газоподібному — діелектрична проникність діелектрика буде найбільшою?

§ 4

Робота з переміщенням заряду в електричному полі

Обчислення роботи електричного поля з переміщенням заряду. Ми вже вказували на подібність законів взаємодії електрично заряджених тіл (закон Кулона) та масивних тіл (закон всесвітнього тяжіння). В обох випадках $F \sim \frac{1}{r^2}$. Відповідно і наслідки із законів мають бути схожими.

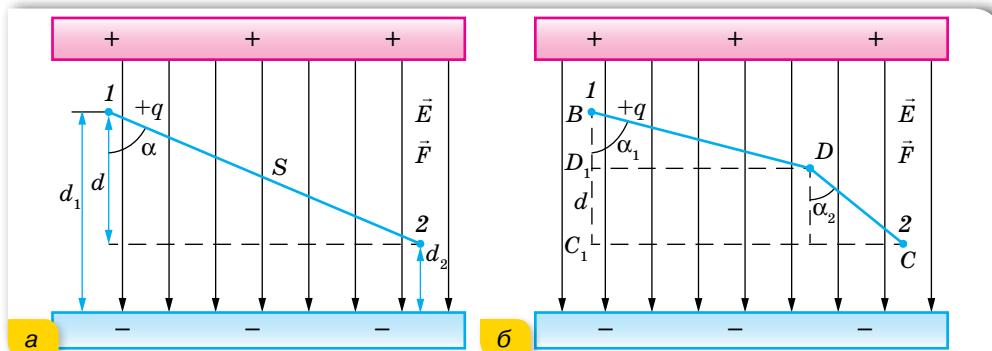
У курсі механіки ми з'ясували, що сила всесвітнього тяжіння є **консервативною силою**, оскільки її робота з переміщенням тіла масою m у просторі не залежить від траєкторії руху тіла, а визначається лише його початковим і кінцевим положеннями. Робота з переміщення тіла замкненою траєкторією дорівнює нулю. Робота сили земного тяжіння (біля поверхні Землі) $A = mg(h_1 - h_2)$ (мал. 15). Нагадуємо, силове поле, у якому робота не залежить від форми траєкторії, називається **потенціальним**.

У кожній точці поля тіло має певну потенціальну енергію відносно вибраного нульового рівня. Значення потенціальної енергії тіла в даній точці простору визначається роботою поля з переміщення тіла від цієї точки на нульовий рівень. Робота сили тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії тіла $A = -(E_{n_2} - E_{n_1})$.

Ці висновки отримано із закону всесвітнього тяжіння Ньютона, подібні висновки мають бути отримані й для електростатичних сил, що діють в електричному полі.

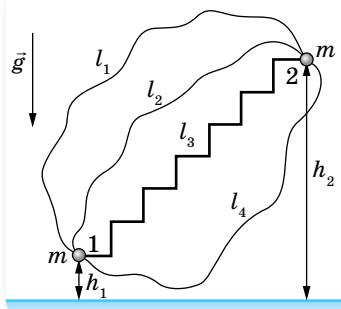
Розглянемо рух точкового заряду в однорідному електричному полі. Нехай однорідне поле створюють великі металеві пластини, що мають заряди протилежних знаків. Це поле діє на точкове тіло сталою силою $\vec{F} = q\vec{E}$, подібно до того, як поле тяжіння діє зі сталою силою $\vec{F} = mg\vec{g}$ на тіло поблизу поверхні Землі.

Нехай пластини розміщені горизонтально. Обчислимо роботу, яку виконує електростатичне поле, переміщуючи позитивний заряд q з точки 1, розташованої на відстані d_1 від негативно зарядженої пластини, у точку 2, віддалену на відстань d_2 , по прямолінійній траєкторії (мал. 16, а).



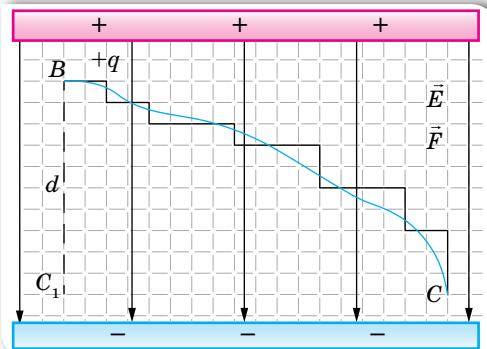
Мал. 16. Переміщення позитивного заряду в однорідному електричному полі:
а — по прямолінійній траєкторії; б — по ламаній

Як відомо з курсу механіки, робота з переміщення тіла визначається формуллою $A = Fscosa$, де α — кут між векторами сили та переміщення.



Мал. 15. До визначення роботи сили тяжіння

Відповідно електричне поле на ділянці 1–2 виконує роботу $A = Fd$, де $d = s \cos \alpha$. З урахуванням того, що $F = qE$, отримуємо $A = qEd = qE(d_1 - d_2)$. Ця робота не залежить від форми траєкторії, подібно до того, як не залежить від форми траєкторії робота сили тяжіння. Доведемо це. Нехай тепер позитивний заряд q переміщується з точки 1 у точку 2 ламаною BDC (мал. 16, б; с. 19). Тоді поле виконує роботу $A = qE(BD \cos \alpha_1 + DC \cos \alpha_2) = qE(BD_1 + D_1 C_1) = qEd$.

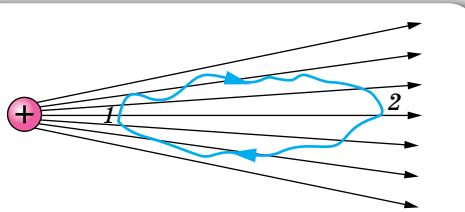


Мал. 17. Криволінійну траєкторію можна замінити траєкторією у вигляді ламаної лінії з якою завгодно точністю, якщо взяти достатньо малі сходинки

Такого самого висновку ми дійдемо за будь-якого вигляду траєкторії руху точкового заряду, адже будь-яку криву можна замінити переміщенням по ламаній траєкторії з достатньо малими сходинками (мал. 17).

Ми довели, що в однорідному електричному полі робота електростатичних сил не залежить від форми траєкторії. Отже, робота з переміщенням заряду замкненою траєкторією дорівнює нулю.

Можна довести, що цей висновок справджується і для неоднорідних полів, наприклад, для поля точкового заряду (мал. 18).



Мал. 18. Робота з переміщенням заряду в неоднорідному полі

Отже, електростатичні сили взаємодії між нерухомими точковими зарядами є консервативними. А поле консервативних сил є потенціальним. Відповідно електричне поле, так само, як і гравітаційне поле, — потенціальне. І робота сил електричного поля може бути визначена через зміну потенціальної енергії точкового заряду в цьому полі.

Потенціальна енергія взаємодії точкових зарядів. Подібно до того як будь-яке тіло, що взаємодіє із Землею за законом всесвітнього тяжіння, на різних відстанях від її центра має різну потенціальну енергію, електричний заряд q на різній відстані від іншого заряду q_0 має різну потенціальну енергію¹ — W . Якщо заряд q переміщується в електричному полі з точки 1, де його потенціальна енергія була W_1 , у точку 2, де його енергія стала W_2 , робота сил поля $A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1) = -\Delta W$. Як видно з формули, A і ΔW мають протилежні знаки. Це пояснюється тим, що якщо заряд q переміщується під дією сил поля (тобто робота поля A додатна), то його потенціальна енергія зменшується, приріст енергії ΔW — від'ємний. Якщо ж заряд переміщується проти сил поля

¹ Оскільки літерою E позначається напруженість електричного поля, то енергію в електродинаміці прийнято позначати літерою W .

(A — від'ємна), то потенціальна енергія заряду збільшується. (Таке само співвідношення між потенціальною енергією та роботою сили тяжіння.)

Як відомо, значення потенціальної енергії залежить від вибору нульового рівня. В електростатиці¹ умовились потенціальну енергію заряду, розміщеного в точці, нескінченно віддаленій від зарядженого тіла, що створює поле, вважати за нуль, $W_{\infty} = 0$. Тоді, в разі переміщення заряду q з точки 1 у нескінченості, робота поля $A = W_1 - W_{\infty} = W_1$. Тобто потенціальна енергія заряду q , розміщеного в якій-небудь точці поля, чисельно дорівнює роботі, яку виконують сили поля, переміщуючи цей заряд із вказаної точки в нескінченості: $W = qEd$, де d — відстань від джерела поля до точки, у якій перебуває заряд q .

Якщо поле створено позитивним зарядом, то значення потенціальної енергії іншого позитивного заряду, розміщеного в деякій точці цього поля, буде додатним, якщо ж поле створено негативним зарядом, то значення потенціальної енергії позитивного заряду — від'ємне. Для негативного заряду, розміщеного в електричному полі, все буде навпаки. (Подумайте чому.) Коли поле створено відразу кількома зарядами, потенціальна енергія заряду q , розміщеного в якій-небудь точці такого поля, дорівнює алгебраїчній сумі енергій, зумовлених полем кожного заряду в цій точці.



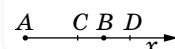
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як обчислюється робота з переміщення зарядженого тіла в однорідному електричному полі?
2. У тексті параграфа показано, що робота переміщення заряду з точки 1 у точку 2 дорівнює qEd . Якою буде робота, якщо цей самий заряд переміщується з точки 2 в точку 1?
3. Чи завжди робота сил електричного поля вздовж замкненої траєкторії дорівнює нулю? Наведіть приклад.



Вправа 3

- Поле створено точковим зарядом $1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл. Визначте напруженість поля на відстані 6 см від заряду. З якою силою буде діяти поле в цій точці на заряд, що дорівнює 1,8 нКл?
- Визначте напруженість поля заряду 36 нКл у точках, віддалених від нього на 9 і 18 см.
- У точці A (мал. 19) розташували заряд q_1 , а в точці B — заряд q_2 . Визначте проекції на вісь вектора напруженості результуючого поля в точках C і D , якщо $|AC| = 6$ см, $|CB| = |BD| = 3$ см. Розв'яжіть задачу для таких значень зарядів: а) $q_1 = 40$ нКл, $q_2 = 10$ нКл; б) $q_1 = 40$ Кл, $q_2 = -10$ нКл; в) $q_1 = -40$ нКл, $q_2 = 10$ нКл; г) $q_1 = -40$ нКл, $q_2 = -10$ нКл.
- Заряди по $0,1$ мкКл розташували на відстані 6 см один від одного. Визначте напруженість поля в точці, віддаленій на 5 см від кожного із зарядів. Розв'яжіть задачу для випадків, коли: а) обидва заряди позитивні; б) один заряд позитивний, а інший негативний.
- Два заряди, один з яких за модулем у 4 рази більший за другий, розташували на відстані a один від одного. У якій точці поля напруженість дорівнює нулю, якщо заряди однотипні; різномірні?



Мал. 19

¹ В електротехніці, на відміну від електростатики, за нуль часто вважають потенціальну енергію заряду, розміщеного на Землі.

§ 5

Потенціал електричного поля

Потенціал. Еквіпотенціальні поверхні. У механіці взаємодію тіл характеризують силою або потенціальною енергією. Електричне поле, що забезпечує взаємодію між електрично зарядженими тілами, також характеризують двома величинами. Напруженість електричного поля — це *силова характеристика*. Тепер уведемо *енергетичну характеристику* — *потенціал*. За допомогою цієї величини можна буде порівнювати між собою будь-які точки електричного поля. Отже, потенціал як характеристика поля не має залежати від значення заряду, що міститься в цих точках. Поділимо обидві частини формули $A = W_1 - W_2$ на заряд q . Отримаємо $\frac{A}{q} = \frac{W_1}{q} - \frac{W_2}{q}$. Відношення $\frac{W}{q}$ не залежить від значення заряду і приймається за енергетичну характеристику, яку називають *потенціалом* поля в даній точці. Позначають потенціал літерою ϕ .

Потенціал електричного поля ϕ — скалярна енергетична характеристика поля, що визначається відношенням потенціальної енергії W позитивного заряду q в даній точці поля до величини цього заряду, $\phi = \frac{W}{q}$.

Одиниця потенціалу — вольт, $1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В.}$

Подібно до потенціальної енергії, значення потенціалу в даній точці залежить від вибору нульового рівня для відліку потенціалу. Найчастіше в електродинаміці за нульовий рівень беруть потенціал точки, що лежить у нескінченості, а в електротехніці — на поверхні Землі.

Із уведенням потенціалу формулу для визначення роботи з переміщення заряду між точками 1 і 2 можна записати у вигляді $\frac{A}{q} = \phi_1 - \phi_2$. Оскільки під час переміщення позитивного заряду в напрямку вектора напруженості електричне поле виконує додатну роботу $A = q(\phi_1 - \phi_2) > 0$, то потенціал ϕ_1 більший за потенціал ϕ_2 . Таким чином, напруженість електричного поля направлена в бік зменшення потенціалу.

Якщо заряд переміщати з певної точки поля в нескінченність, робота $A = q(\phi - \phi_\infty)$. Оскільки $\phi_\infty = 0$, то $A = q\phi$. Таким чином, величина потенціалу ϕ певної точки поля визначається роботою, яку виконує електричне поле, переміщуючи одиничний позитивний заряд із цієї точки в нескінченність, $\phi = \frac{A}{q}$.

Якщо електричне поле створюється точковим зарядом q , то в точці, що лежить на відстані r від нього, потенціал обчислюють за формулою $\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$. За цією формулою розраховують і потенціал поля зарядженої

кулі. У такому разі r — це відстань від центра кулі до вибраної точки поля. Із цієї формули видно, що на однакових відстанях від точкового заряду, який створює поле, потенціал є однаковим. Усі ці точки лежать на поверхні сфери, описаної радіусом r навколо точкового заряду. Таку сферу називають *еквіпотенціальною поверхнею*.

Еквіпотенціальні поверхні — геометричне місце точок в електричному полі, які мають одинаковий потенціал (мал. 20), — один з методів наочного зображення електричних полів.

Силові лінії завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь. Це означає, що робота сил поля з переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

У разі накладання електричних полів, створених кількома зарядами, потенціал електричного поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створених окремими зарядами, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$.

Різниця потенціалів. Практичне значення має не сам потенціал у точці, а зміна (різниця) потенціалу $\varphi_1 - \varphi_2$, яка не залежить від вибору нульового рівня відліку потенціалу. Різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ ще називають *напругою* і позначають латинською літерою U . Тоді формула для роботи

з переміщення заряду набуває вигляду $\frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = U$.



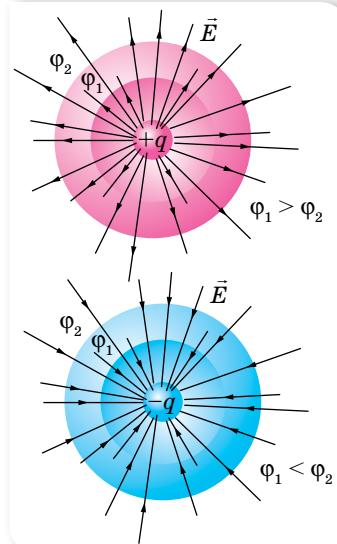
Напруга U — це фізична величина, яка визначається роботою електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду між двома точками поля, $U = \frac{A}{q}$.

Одиниця різниці потенціалів (напруги), як і потенціалу, — вольт, $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Оскільки робота сил поля з переміщення заряду залежить лише від різниці потенціалів, то в разі переміщення заряду з першої еквіпотенціальної поверхні на другу (потенціали яких відповідно φ_1 і φ_2) виконана робота не залежить від траєкторії цього руху.

Зв'язок напруженості електричного поля з напругою. З формул $A = Eqd$ та $A = qU$ можна встановити зв'язок між напруженістю й напругою електричного поля: $Ed = U$. Із цієї формули випливає:

- що менше змінюється потенціал на відстані d , то меншою є напруженість електричного поля;
- якщо потенціал не змінюється, то напруженість дорівнює нулю;



Мал. 20. Еквіпотенціальні поверхні електричних полів, створених точковими зарядами різних знаків

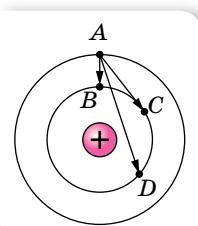
- напруженість електричного поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.

Оскільки $E = \frac{U}{d}$, то саме із цієї формули й виводиться ще одна одиниця напруженості — вольт на метр, $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Що називають потенціалом електричного поля? Яка формула відображає зміст цього поняття?
- Що називають різницею потенціалів між двома точками поля? Яка формула відображає зміст цього поняття?
- Які поверхні називають еквіпотенціальними?
- Яка формула задає зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів в однорідному електричному полі?
- Порівняйте роботи, виконані полем під час переміщення заряду з точки A в точки B , C і D (мал. 21).
- Проаналізуйте формулі законів усесвітнього тяжіння і Кулона, які подібні за формулою, хоча й описують явища різної природи, та з'ясуйте: а) яка фізична величина в законі всесвітнього тяжіння є аналогом заряду в законі електростатики Кулона; б) яка величина в полі тяжіння відіграє роль, подібну до напруженості електричного поля (запишіть формулу для обчислення цієї величини); в) який вигляд має формула потенціалу гравітаційного поля, якщо потенціал електричного поля $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$.



Мал. 21



Приклади розв'язування задач

Задача. Електричне поле створене точковим зарядом $5 \cdot 10^{-7}$ Кл, уміщеним у середовище з діелектричною проникністю $\epsilon = 2$. Визначте різницю електричних потенціалів точок, віддалених від заряду відповідно на 5 см і 0,2 м. Яка робота виконується з переміщення електричного заряду $0,3 \cdot 10^{-7}$ Кл між цими точками?

Дано:

$$\begin{aligned} q &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \\ q_0 &= 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \\ \epsilon &= 2 \\ r_1 &= 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ r_2 &= 2 \cdot 10^{-1} \text{ м} \\ U &- ?; A - ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Використовуючи формулу $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$, визначимо різницю електричних потенціалів точок 1 і 2 електричного поля:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Роботу з переміщення заряду в електричному полі визначимо за формулою $A = q_0 U$.

Підставимо числові значення, отримаємо:

$$U = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 2} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} - \frac{1}{2 \cdot 10^{-1} \text{ м}} \right) \approx 34 \text{ кВ.}$$

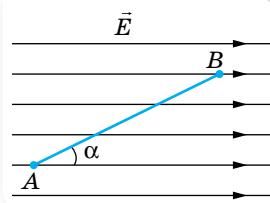
$$A \approx 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot 34 \cdot 10^3 \text{ В} \approx 10^{-3} \text{ Дж} = 1 \text{ мДж.}$$

Відповідь: 34 кВ; 1 мДж.



Вправа 4

- Точки A і B лежать на відстані 10 см одна від одної й розташовані в однорідному полі, напруженість якого $60 \frac{\text{kV}}{\text{м}}$. Визначте різницю потенціалів між цими точками. Розгляньте випадки, коли точки A і B лежать: а) на одній лінії напруженості; б) на прямій, перпендикулярній до лінії напруженості; в) на прямій, напрямленій під кутом 45° до лінії напруженості.
- Визначте напругу між точками A і B (мал. 22), якщо $|AB| = 8 \text{ см}$, $\alpha = 30^\circ$ і напруженість поля становить $50 \frac{\text{kV}}{\text{м}}$.
- Якої швидкості набуває електрон, рухаючись між точками електричного поля, якщо різниця потенціалів між ними 200 В?



Мал. 22

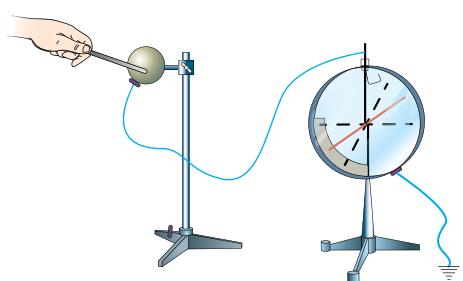
§ 6

Електроємність. Конденсатори

Електроємність провідників різної форми. Ми вже дізналися, що в провіднику, вміщеному в електричне поле, відбувається перерозподіл зарядів доти, поки зовнішнє поле всередині провідника не скомпенсується власним полем розділених зарядів. Усі заряди розміщаються на зовнішній поверхні провідника, яка є еквіпотенціальною. Потенціал будь-якої точки цієї поверхні вважається потенціалом усього провідника.

З'ясуємо, як змінюватиметься потенціал провідника за зміни його заряду. Візьмемо провідник (наприклад, металеву кулю), ізольований від Землі та інших провідників, і, не змінюючи його положення відносно інших провідників, будемо його електризувати (збільшувати заряд) (мал. 23). За допомогою електрометра¹ вимірюватимемо відповідні значення потенціалу провідника.

У скільки разів збільшується заряд кулі, у стільки ж зростає її потенціал, тобто заряд провідника прямо пропорційний потенціалу, $q \sim \varphi$. Уводячи коефіцієнт пропорційності, отримуємо $q = C\varphi$, де C — коефіцієнт пропорційності, сталий для умов даного досліду. Якщо ми замінимо провідник іншим



Мал. 23. Дослідження залежності потенціалу провідника від зміни його заряду

¹ Електрометр, або електростатичний вольтметр, — прилад для вимірювання потенціалу зарядженого провідника відносно Землі або відносно іншого зарядженого провідника.

(наприклад, кулею більших розмірів) або змінено зовнішні умови досліду, то значення коефіцієнта C буде іншим. Цей коефіцієнт пропорційності називають **ємністю** (або **електроємністю**)¹ провідника.

Електроємність C — скалярна фізична величина, що характеризує здатність провідників накопичувати й утримувати певний електричний заряд. Вона вимірюється відношенням заряду q , який надали відокремленому провідникові, до його потенціалу ϕ , $C = \frac{q}{\phi}$.

Одиниця електроємності — фарад, 1 Ф.

Електроємність провідника правильної форми можна розрахувати. Наприклад, обчислимо ємність окремої провідної кулі радіусом r . Потенціал зарядженої кулі $\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$, підставляючи цей вираз у формулу для ємності, отримуємо: $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$.

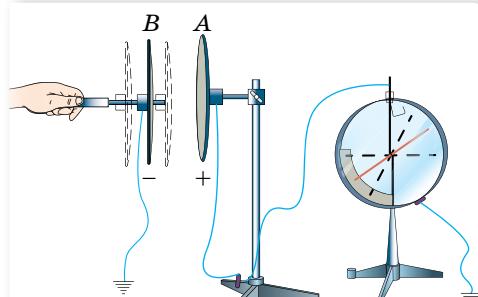
Слід зазначити, що ємність 1 Ф є дуже великою. Так, за допомогою останньої формули можна показати, що у вакуумі електроємність в 1 Ф має куля радіусом $9 \cdot 10^9$ м (що в 23 рази більше за відстань від Землі до Місяця). Ємність Землі, радіус якої $6,4 \cdot 10^6$ м, дорівнює $7 \cdot 10^{-4}$ Ф.

Тому на практиці найчастіше використовують мікро- та пікофаради: 1 мкФ = 10^{-6} Ф, 1 пФ = 10^{-12} Ф.

Досліди показують, що ємність провідника залежить від його розмірів і форми. Проте не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми та розмірів порожнини всередині провідника (поясніть самостійно чому). З'ясуємо умови, від яких залежить електроємність провідника.

Оскільки провідник електризується через вплив, електроємність провідника має залежати від розміщення поблизу нього інших провідників і від навколишнього середовища. Покажемо це на досліді. Візьмемо два

металеві диски, закріплені на підставках з діелектрика (мал. 24). Диск A з'єднаємо з електрометром, корпус якого заземлений, а диск B відсунемо від диска A . Наелектризуємо диск A , надавши йому заряд, який надалі не змінюватиметься. Визначивши значення потенціалу диска A за показами електрометра, почнемо наблизяти до нього диск B , одночасно спостерігаючи за стрілкою приладу. Виявляється, що потенціал диска A при цьому зменшується.



Мал. 24. Дослід з визначенням залежності електроємності провідників від відстані між ними

¹ Цей термін було введено в XVII ст., коли ще не було обґрунтовано сучасні положення електродинаміки, а здатність провідника накопичувати електричний заряд пояснювали тим, що заряд можна «вливати» до нього й «виливати» з нього.

Ще різкіше зменшення потенціалу диска A можна спостерігати, якщо заземлити диск B , який наближається¹. Уявивши до уваги, що заряд на диску A при цьому не змінюється, робимо висновок, що зменшення потенціалу зумовлене збільшенням електроемності системи дисків. Замінивши повітря між дисками іншим діелектриком, знову зауважимо збільшення електроемності системи дисків.

Результати дослідів можна пояснити так. Коли диск B потрапляє в поле диска A , він електризується через вплив і створює своє поле. Якщо з'єднати диск B із землею, на ньому залишаться лише заряди протилежного знака порівняно із зарядами на диску A . Це підсилює поле диска B , яке ще більше зменшує потенціал диска A . Якщо внести між диски діелектрик, то він поляризується. Поляризаційні заряди, розміщені поблизу поверхні диска A , компенсують частину його заряду, отже, електроемність диска зростає.

Конденсатор. Електроемність плоского конденсатора. Розглянута система провідників є основою для пристрій, які називають **конденсаторами**. Конденсатори широко використовують у радіотехніці як пристрій для накопичування й утримання електричного заряду.

Найпростіший конденсатор складається з двох або більше різномінено заряджених і розділених діелектриком провідників, які називають **обкладками** конденсатора. Останні мають однакові за абсолютною значенням різноміненні заряди й розміщені одна відносно одної так, що поле в цій системі сконцентроване в обмеженому просторі між обкладками. Діелектрик між обкладками відіграє подвійну роль: по-перше, він збільшує електроемність, по-друге — не дає зарядам нейтралізуватись. Тому діелектрична проникність і електрична міцність на пробій (пробій діелектрика означає, що він стає провідним) мають бути досить великими. Щоб захистити конденсатор від механічних зовнішніх дій, його вставляють у корпус.

Накопичення зарядів на обкладках конденсатора називають його заряджанням. Щоб зарядити конденсатор, його обкладки приєднують до полюсів джерела напруги, наприклад, до полюсів батареї акумуляторів. Можна також сполучити одну обкладку з полюсом батареї, другий полюс якої заземлено, а другу обкладку конденсатора теж заземлити. Тоді на заземленій обкладці залишиться заряд, протилежний за знаком, а за модулем він дорівнюватиме заряду іншої обкладки. Такий самий за модулем заряд піде в землю.

Під зарядом конденсатора розуміють абсолютное значення заряду однієї з обкладок. Він прямо пропорційний різниці потенціалів (напру Zi) між обкладками конденсатора. У такому разі емність конденсатора (на відміну від відокремленого провідника) визначається за формулою $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$.

За формою обкладок конденсатори бувають плоскі, циліндричні й сферичні (мал. 25; с. 28). Як діелектрик у них використовують парафіновий папір, слюду, повітря, пластмаси, кераміку тощо. Типовий плоский

¹ Заземлення провідників — це з'єднання їх із землею (дуже довгим провідником) за допомогою металевих листів, закопаних у землю, водопровідних труб тощо.



Мал. 25. Конденсатори різної форми та їх схематичне позначення

конденсатор складається з двох металевих пластин площею S , простір між якими розділений діелектриком товщиною d .

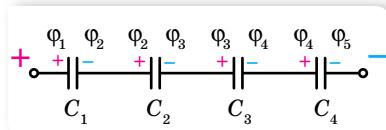
Виведемо формулу для ємності плоского конденсатора. Ураховуючи, що

$C = \frac{q}{U}$, підставимо в цю формулу вираз $U = Ed$, де E — напруженість поля, створюваного двома пластинами, $E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}$.

У результаті отримаємо: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$.

Таким чином, електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі перекривання пластин і відносній діелектричній проникності діелектрика й обернено пропорційна відстані між пластинами. З формулі випливає, що, зменшуючи товщину діелектрика між пластинами або збільшуючи площину перекривання пластин, можна дістати конденсатор більшої ємності.

З'єднання конденсаторів. У багатьох випадках, щоб створити потрібну електроємність, конденсатори з'єднують у групу, яка називається батареєю.

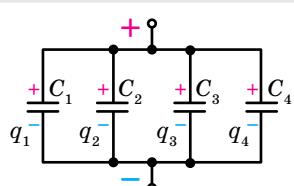


Мал. 26. Послідовне з'єднання конденсаторів

будуть і потенціали обкладок, з'єднаних між собою провідниками.

Урахувавши це, виведемо формулу для обчислення електроємності батареї послідовно з'єднаних конденсаторів. Напруга на батареї U_b дорівнює сумі напруг на послідовно з'єднаних конденсаторах, справді: $(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = \varphi_1 - \varphi_n$ або $U_1 + U_2 + \dots + U_n = U_b$. Використавши співвідношення $q = CU$, дістанемо $\frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} = \frac{q}{C_b}$. Скоротив-

ши на q , матимемо $\frac{1}{C_b} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$. Отже, для послідовного з'єднання



Мал. 27. Паралельне з'єднання конденсаторів

електроємність батареї менша від найменшої з електроємностей окремих конденсаторів.

Паралельним називається з'єднання конденсаторів, за якого всі позитивно заряджені обкладки приєднані до одного провідника, а негативно заряджені — до іншого (мал. 27). У цьому разі напруги на всіх конденсаторах однакові й дорівнюють U , а заряд на батареї дорівнює сумі зарядів на

окремих конденсаторах, $q_6 = q_1 + q_2 + \dots + q_n$, звідки $C_6 U = C_1 U + C_2 U + \dots + C_n U$. Після скорочення отримуємо формулу для обчислення електроемності батареї паралельно з'єднаних конденсаторів, $C_6 = C_1 + C_2 + \dots + C_n$. Для паралельного з'єднання електроемність батареї більша, ніж найбільша з електроемностей окремих конденсаторів.

Енергія зарядженого конденсатора. Як і будь-яка система заряджених тіл, конденсатор має енергію. Для того щоб зарядити конденсатор, потрібно виконати роботу, що витрачається на розділення позитивних і негативних зарядів. Згідно із законом збереження енергії, ця робота дорівнює енергії конденсатора $A = W_{\text{ел}}$.

Як відомо, робота сил електричного поля з переміщенням заряду на певну відстань дорівнює $A = qU$, якщо напруга постійна ($U = \text{const}$). У випадку заряджання конденсатора напруга на його обкладках зростає від нуля до U , її, обчислюючи роботу поля, у цьому разі потрібно використовувати її середнє значення $A = qU_{\text{ср}} = q \frac{U}{2}$. Відповідно енергія зарядженого конденсатора $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$. Оскільки $q = CU$, то матимемо ще дві

формули для обчислення енергії конденсатора: $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ та $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$.



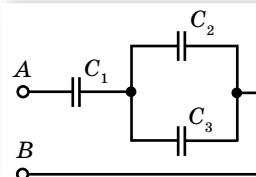
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Дайте визначення електроемності. У яких одиницях її вимірюють?
- Між якими величинами у визначенні електроемності двох провідників $C = \frac{q}{U}$ існує функціональна залежність? Яка саме? Що є функцією, а що — аргументом?
- Що таке конденсатор?
- Виведіть формулу електроемності плоского конденсатора.
- Які існують види конденсаторів?
- Для чого конденсатори з'єднують у батареї?
- Чого досягають, з'єднавши конденсатори паралельно; послідовно?



Приклади розв'язування задач

Задача. Три конденсатори ємностями $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$, $C_2 = C_3 = 0,4 \text{ мкФ}$ з'єднані між собою, як показано на малюнку 28, і приєднані до джерела постійного струму $U_{AB} = 250 \text{ В}$. Визначте загальний електричний заряд, заряд і різницю потенціалів на кожному з конденсаторів.



Мал. 28

Дано:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,2 \text{ мкФ} \\ C_2 &= C_3 = 0,4 \text{ мкФ} \\ U_{AB} &= 250 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q &=?; q_1 = ?; q_2 = ? \\ q_3 &=?; U_1 = ?; U_2 = ? \\ U_3 &=? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Загальний заряд визначимо за формулою $q = CU_{AB}$, де C — ємність батареї конденсаторів, яку знайдемо з формули змішаного з'єднання:

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + 2C_2}.$$

$$\text{Заряд, накопичений батареєю, } q = \frac{2C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_{AB}.$$

Підставимо числові значення:

$$q = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \Phi \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \Phi \cdot 250 \text{ В}}{0,2 \cdot 10^{-6} \Phi + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \Phi} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Заряд першого конденсатора такий самий, як і загальний заряд, $q_1 = q$, а заряди на двох інших конденсаторах — $q_2 = q_3 = \frac{q}{2}$. Отже, заряди на окремих конденсаторах: $q_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$, $q_2 = q_3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$.

Знаючи ємність і заряд кожного конденсатора, можемо визначити різницю потенціалів на їх обкладках.

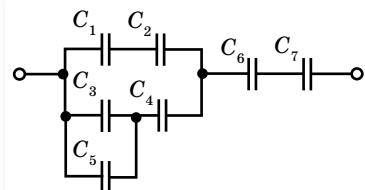
$$U_1 = \frac{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,2 \cdot 10^{-6} \Phi} = 200 \text{ В}; U_2 = U_3 = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,4 \cdot 10^{-6} \Phi} = 50 \text{ В.}$$

Відповідь: $q = q_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$; $q_2 = q_3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$; $U_1 = 200 \text{ В}$; $U_2 = U_3 = 50 \text{ В}$.



Вправа 5

- Три конденсатори ємностями 1, 2 і 3 мкФ з'єднані послідовно й під'єднані до джерела струму напругою 220 В. Які заряди та напруги на кожному конденсаторі?
- Визначте ємність системи конденсаторів (мал. 29).
- При наданні провідній кулі заряду 30 нКл її потенціал дорівнює 6 кВ. Визначте радіус кулі та її ємність у повітрі.
- У скільки разів зміниться ємність конденсатора, якщо робочу площину його частин зменшити у 2 рази, а відстань між ними — у 3 рази?
- При введені у простір між пластинами повітряного конденсатора твердого діелектрика напруга на конденсаторі зменшилася з 400 В до 50 В. Яку діелектричну проникність має діелектрик?
- Визначте ємність плоского конденсатора, що складається з двох круглих пластин діаметром 20 см, відокремлених одна від одної парафіновим прошарком завтовшки 1 мм.



Мал. 29

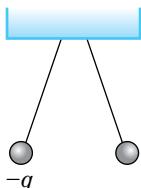


Виконуємо навчальні проекти

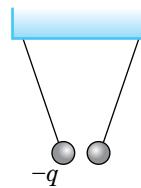
- ▶ Електростатичні явища в науці, техніці й побуті.
- ▶ Електростатичний захист.
- ▶ Підкорювачі блискавки. Скільки коштує блискавка?
- ▶ Від лейденської банки до сучасного конденсатора.

Перевірте себе (§ 1–6)

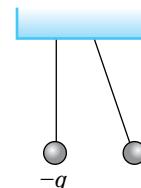




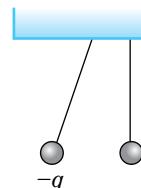
A



B



1



11

§ 7

Електричний струм. Закон Ома для однорідної ділянки кола

Електричний струм. Ми з'ясували, що рухомі носії зарядів у провіднику переміщуються під дією зовнішнього електричного поля доти, доки не вирівнюються потенціали всіх точок провідника. Проте якщо у двох точках провідника якимось чином штучно підтримувати різні потенціали, то це поле забезпечуватиме безперервний рух зарядів: позитивних — від точок з більшим потенціалом до точок з меншим потенціалом, а негативних — навпаки. Коли ця різниця потенціалів не змінюється із часом, то в провіднику встановлюється **постійний електричний струм**.

Пригадаймо з курсу фізики 8 класу деякі відомості про електричний струм.

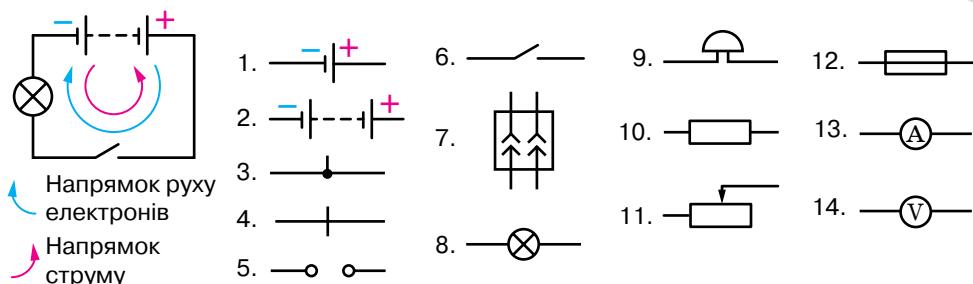
Напрямлений рух вільних зарядів у провіднику називається **електричним струмом провідності**, або **електричним струмом**.

Основними умовами існування електричного струму є:

- наявність вільних заряджених частинок;
- наявність джерела струму, що створює електричне поле, дія якого зумовлює напрямлений рух вільних заряджених частинок;
- замкненість електричного кола, що забезпечує циркуляцію вільних заряджених частинок.

Залежно від величини питомого опору, який речовини чинять постійному струму, вони поділяються на провідники, напівпровідники, діелектрики.

Залежно від середовища розрізняють особливості проходження електричного струму, зокрема в металах, рідинах і газах, де носіями струму можуть бути вільні електрони, позитивні й негативні йони.



Мал. 30. Схема електричного кола й умовні зображення елементів електричних кіл: 1 — гальванічний елемент або акумулятор; 2 — батарея гальванічних елементів або акумуляторів; 3 — з'єднання провідників; 4 — перетин провідників (без з'єднання); 5 — затискачі для під'єднання споживача електричного струму (клеми); 6 — вимикач (електричний ключ); 7 — розетка; 8 — електрична лампа; 9 — електричний дзвоник; 10 — провідник, що має деякий опір (резистор); 11 — реостат; 12 — плавкий запобіжник; 13 — електровимірювальний прилад (амперметр); 14 — електровимірювальний прилад (вольтметр)

Повне електричне коло (мал. 30) містить джерело і споживач електричного струму, пристрій для замикання (розмикання) електричного кола. За напрямок струму в колі умовно обирають напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного (реальний рух носіїв струму — електронів — відбувається у зворотному напрямку).

Основними фізичними величинами, що характеризують електричний струм, є:



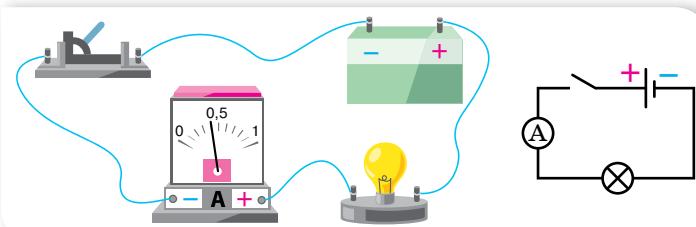
Сила струму¹ I — фізична величина, яка характеризує швидкість перерозподілу електричного заряду в провіднику й визначається відношенням заряду q , що проходить через будь-який переріз провідника за час t , до величини цього інтервалу часу, $I = \frac{q}{t}$.

Одиниця сили струму — ампер, $1 \text{ A} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}$.

1 A дорівнює силі струму, який, проходячи у двох паралельних прямо-лінійних провідниках нескінченної довжини та малої площині поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би на кожній ділянці провідників довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Для організму людини вважається безпечною сила струму, значення якої не перевищує 1 mA ; сила струму 100 mA може призвести до серйозних уражень.

Силу струму в колі вимірюють за допомогою спеціального приладу — амперметра, котрий вмикають послідовно з провідником, у якому вимірюють силу струму (мал. 31). Не можна приєднувати амперметр до кола, у якому відсутній споживач струму.



Мал. 31. Вмикання амперметра в електричне коло



Електричний опір R — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.

Одиниця електричного опору — ом, 1 Ом .

¹ Термін «сила струму» запропонували задовго до встановлення наукових положень електродинаміки. Він дещо невдалий, оскільки жодного стосунку до «сили» він не має.

Опір провідника залежить від його фізичних параметрів — довжини l , площині поперечного перерізу S та від питомого опору речовини ρ , з якої його виготовлено: $R = \rho \frac{l}{S}$.

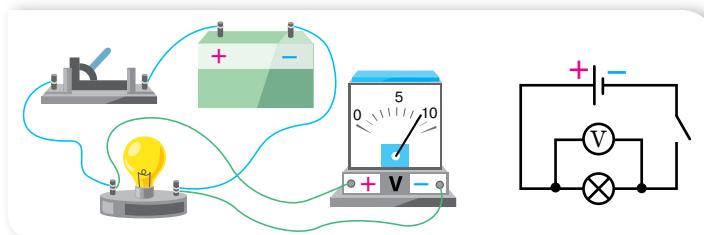
Питомий опір характеризує електричні властивості речовини. Значення питомого опору речовини зумовлене хімічною природою речовини та істотно залежить від температури. Одиниця питомого опору в СІ — омметр, 1 Ом · м.

Утворення струму в провіднику зумовлює наявність різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$, яку ще називають напругою.

Напруга U — це фізична величина, яка визначається роботою електричного поля з переміщення одиничного позитивного заряду між двома точками поля, $U = \frac{A}{q}$.

Одиниця напруги — вольт, 1 В.

Прилад для вимірювання напруги називають вольтметром. Вольтметр приєднують до електричного кола паралельно ділянці кола, на якій необхідно виміряти напругу (мал. 32).



Мал. 32. Вмикання вольтметра в електричне коло

Закон Ома для однорідної ділянки кола. Закон Ома встановлює залежність сили струму від різниці потенціалів (електричної напруги) між двома фіксованими точками електричного кола. Відкритий у 1826 р. Георгом Омом. Відповідно до особливостей електричних кіл, закон Ома має кілька формулувань.

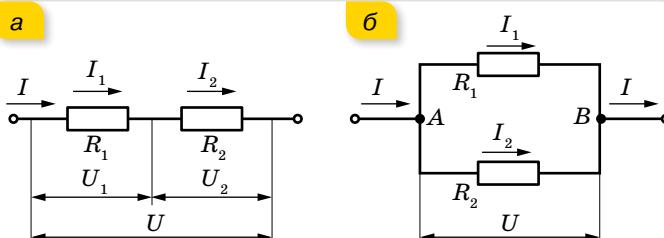
Коло постійного струму можна розбити на окремі ділянки. Ті ділянки, що не містять джерел струму, називають *однорідними*. Ділянки, що включають джерела струму, називають відповідно *неоднорідними*. Для однорідної ділянки кола сила струму I прямо пропорційна напрузі на даній ділянці кола U й обернено пропорційна її опору R :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Пригадаймо співвідношення між струмами й напругами на ділянках кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників (табл. 1).

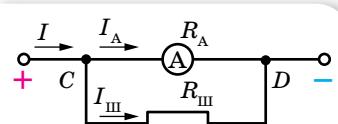
Таблиця 1

У разі послідовного з'єднання провідників (мал. 33, а) виконуються такі співвідношення:	У разі паралельного з'єднання провідників (мал. 33, б) виконуються такі співвідношення:
1) сила струму в усіх провідниках одна-кова, $I = I_1 = I_2$;	1) спад напруг на окремих провідниках і на всьому з'єднанні — одинаковий: $U = U_1 = U_2$;
2) напруга на всьому з'єднанні дорівнює сумі спадів напруг на кожному провіднику, $U = U_1 + U_2$;	2) сила струму до розгалуження дорівнює сумі сил струму в кожному провіднику, $I = I_1 + I_2$;
3) напруга на кожному провіднику прямо пропорційна опору провідників, $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$;	3) сила струму в окремих провідниках обернено пропорційна опорам цих провідників, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$;
4) загальний опір з'єднання дорівнює сумі опорів кожного провідника, $R = R_1 + R_2$. У випадку з'єднання N провідників їх загальний опір $R = \sum_{i=1}^N R_i$.	4) величина, обернена до загального опору, дорівнює сумі обернених величин опорів кожного провідника, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. У випадку з'єднання N провідників $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$.

Мал. 33. З'єднання провідників:
а — послідовне; б — паралельне

Розширення меж вимірювальних приладів. Для вимірювання сили струму, що перевищує значення, на яке розрахованій прилад, тобто для розширення меж його вимірювання, до амперметра підключають шунт, який на малюнку 34 позначене $R_{ш}$.

Шунт — це звичайний резистор, який під'єднують до приладу паралельно. Визначимо опір шунта, який необхідно підключити до амперметра у випадку, якщо потрібно виміряти силу струму, що в n разів перевищує силу струму, на яку розрахований прилад, тобто $n = \frac{I}{I_A}$. Опір амперметра позначимо R_A .



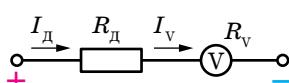
Мал. 34. Схема під'єднання шунта

У цьому разі сила струму I , яку вимірюють, дорівнює сумі струмів, що проходять через шунт і амперметр: $I = I_A + I_{\text{ш}}$. Оскільки I_A менша від вимірюваної I в n разів, то ціна поділки амперметра (якщо шкала приладу рівномірна) зросте також в n разів. Тобто відхиленню стрілки амперметра на одну поділку відповідатиме в n разів більша сила струму.

За законом Ома для ділянки кола: $R_{\text{ш}} = \frac{U}{I_{\text{ш}}}$. Ураховуючи, що $I_{\text{ш}} = I - I_A$ та $U = U_A = I_A R_A$, отримаємо: $R_{\text{ш}} = \frac{I_A}{I - I_A} R_A$. Оскільки $I = nI_A$, остання формула набуде вигляду $R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}$.

А струм, який тече через шунт, дорівнюватиме:

$$I_{\text{ш}} = nI_A - I_A = (n - 1)I_A.$$



Мал. 35. Схема під'єднання додаткового опору

Розширення меж вимірювання вольтметром здійснюють за допомогою підключення до приладу резистора (який називають додатковим опором). Додатковий опір R_d під'єднують до вольтметра послідовно (мал. 35), тому сила струму в ньому та на приладі — однакові: $I = I_d = I_v$.

Напруга, яку вимірює вольтметр U , дорівнює сумі напруг на вольтметрі U_v (U_v — максимальна напруга, яку може виміряти вольтметр) та на додатковому опорі U_d : $U = IR + IR_v$, звідки $R_d = \frac{U - IR_v}{I}$, де I — максимально допустима сила струму для вольтметра, яку розраховують за формулою $I = \frac{U_v}{R_v}$.

Якщо позначити збільшення межі вимірювання вольтметра через n $\left(n = \frac{U}{U_v} \right)$ і підставити значення I та n у формулу додаткового опору, отримаємо: $R_d = R_v \frac{U - U_v}{U_v} = R_v(n - 1)$. Тоді напруга на додатковому опорі дорівнює $U_d = U - U_v = U_v(n - 1)$. Використовуючи резистори для розширення меж вимірювання вольтметра й амперметра, можна досить легко та економічно вигідно збільшити межу їх вимірювання, що дає змогу використовувати дані прилади в колах, параметри яких перевищують межу вимірювання цих пристроїв.



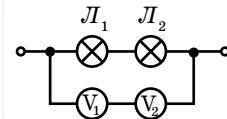
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЧУМІЮ

- Сформулюйте умови виникнення та існування електричного струму.
- Схарактеризуйте такі фізичні величини: сила струму, напруга, електричний опір.
- Які співвідношення справджаються в разі послідовного й паралельного з'єднання провідників?
- Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра; амперметра?



Експериментуємо

- Як, використовуючи два вольтметри, шкали яких розраховані до 150 В, виміряти напругу на ділянці кола, якщо вона перевищує 200 В?
- До двох послідовно з'єднаних ламп під'єднано вольтметри так, як показано на малюнку 36. Показання першого вольтметра 6 В, другого — 20 В. Опір першого вольтметра 4000 Ом. Визначте опір другого вольтметра.
- Маємо: електричну лампу, реостат, ключ, вольтметр, джерело струму. Накресліть схему з'єднання елементів кола, щоб за допомогою реостата можна було регулювати силу струму, що проходить через лампу, а за допомогою вольтметра — вимірювати сумарну напругу на реостаті та лампі.



Мал. 36

Ознайомтесь із рекомендаціями щодо розв'язування задач в електронному додатку.

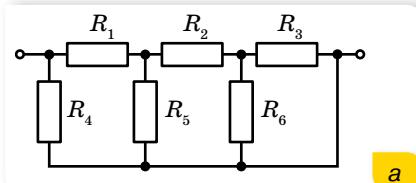


Приклади розв'язування задач

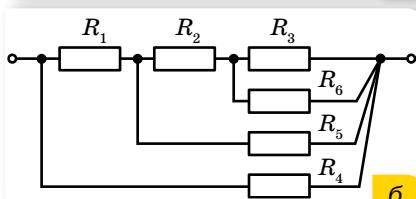
Задача. У схемі, наведеній на малюнку 37, а, $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 9 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_6 = 6 \text{ Ом}$. Визначте опір цього кола.

Дано:

$$\begin{aligned} R_1 &= 3 \text{ Ом}; R_2 &= 9 \text{ Ом} \\ R_3 &= R_4 = 6 \text{ Ом} \\ R_5 &= 4 \text{ Ом}; R_6 &= 6 \text{ Ом} \\ R &- ? \end{aligned}$$



a



б

Мал. 37. а — до умови задачі; б — еквівалентна схема

Розв'язання:

Зобразимо схему трохи інакше (мал. 37, б). Тепер обчислення опору кола зводиться до знаходження опору паралельного та послідовного з'єднання провідників і не становить труднощів:

$$R_{3-6} = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}, R_{3-6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{2-3-6} = R_2 + R_{3-6}, R_{2-3-6} = 12 \text{ Ом};$$

$$R_{5-2-3-6} = \frac{R_5 \cdot R_{2-3-6}}{R_5 + R_{2-3-6}}, R_{5-2-3-6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{1-5-2-3-6} = R_1 + R_{5-2-3-6}, R_{1-5-2-3-6} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{4-1-5-2-3-6} = \frac{R_4 \cdot R_{1-5-2-3-6}}{R_4 + R_{1-5-2-3-6}},$$

$$R_{4-1-5-2-3-6} = 3 \text{ Ом}.$$

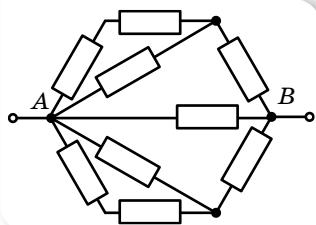
Відповідь: 3 Ом.



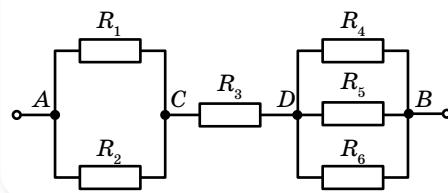
Вправа 6

- Чотири провідники опором по 1,5 Ом кожний необхідно з'єднати так, щоб отримати опір 2 Ом. Як це здійснити?

- Два провідники за послідовного з'єднання мають опір 27 Ом, за паралельного — 6 Ом. Визначте опір цих провідників.
- Коло складене з дев'яти однакових провідників за схемою, показаною на малюнку 38. Загальний опір дорівнює 1,5 Ом. Визначте опір одного провідника.
- Визначте розподіл струмів і напруги електричного кола (мал. 39), якщо напруга $U = 48$ В, а опір резисторів $R_1 = R_3 = 3$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_4 = 5$ Ом, $R_5 = 10$ Ом, $R_6 = 30$ Ом.

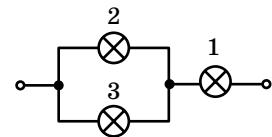


Мал. 38



Мал. 39

- Електричну лампу опором 240 Ом, розраховану на напругу 120 В, треба живити від мережі напругою 220 В. Якої довжини ніхромовий провідник перерізом $0,55 \text{ mm}^2$ треба ввімкнути послідовно з лампою?
- До кола, зображеного на малюнку 40, підведено напругу 90 В. Опір лампи 2 дорівнює опорові лампи 1, а опір лампи 3 — у 4 рази більший за опір лампи 1. Сила струму, яка споживається від джерела, дорівнює 0,5 А. Визначте опір кожної лампи, напругу на лампах 2 і 3, а також силу струму в них.
- Кабель складається з двох сталевих провідників перерізом $0,6 \text{ mm}^2$ кожен і чотирьох мідних провідників перерізом $0,85 \text{ mm}^2$ кожен. Визначте спад напруги на кожному кілометрі кабелю, якщо сила струму дорівнює 0,1 А.
- Який додатковий опір необхідно під'єднати до вольтметра, опір якого $1,5 \text{ k}\Omega$, щоб ціна поділки його шкали збільшилась у п'ять разів?
- У скільки разів збільшиться верхня межа шкали вольтметра, опір якого $1 \text{ k}\Omega$, якщо приєднати до нього послідовно додатковий опір $9 \text{ k}\Omega$?



Мал. 40

§ 8

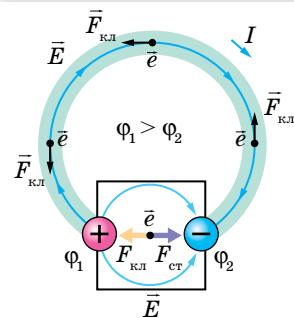
Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола

Електрорушійна сила. Якщо під'єднати до полюсів джерела провідник, то, завдяки наявності різниці потенціалів, вільні електрони провідності, не припиняючи хаотичного руху, під дією кулонівських сил почнуть рухатися напрямлено — від кінця провідника з нижчим потенціалом до кінця з вищим, тобто від негативного полюса джерела струму до позитивного (мал. 41). Але сили електричного поля не можуть перемістити електричні заряди між полюсами всередині джерела, оскільки діють на них у протилежний бік. Тому всередині джерела, крім електричних сил $F_{\text{ел}}$, діють їй сторонні сили $F_{\text{ст}}$. Природа сторонніх сил може бути різною: у хімічних елементах — це дія хімічних реакцій, у фотоелементах —

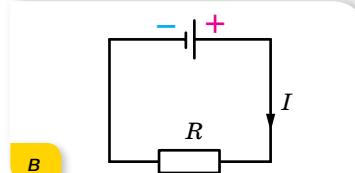
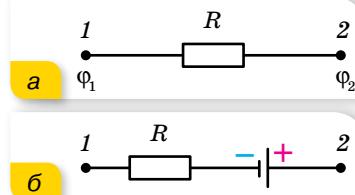
дія сонячного випромінювання, в електро-генераторах — зміна магнітного потоку.

Сторонні сили переміщують негативні заряди від позитивного полюса батареї до негативного та протидіють електричним силам, які прагнуть вирівняти потенціали на полюсах. Завдяки цьому заряди циркулюють по замкненому колу, створюючи струм. Як було зазначено в попередньому параграфі, ділянку кола, у якій заряди рухаються під дією кулонівських сил, називають *однорідною* (мал. 42, а), а тут, в якій носії заряду рухаються під дією як кулонівських, так і сторонніх сил, — *неоднорідною* (мал. 42, б). Якщо з'єднати кінці неоднорідної ділянки, отримаємо повне коло, у якому ту частину замкненого кола, де заряди рухаються під дією кулонівських сил (електростатичної різниці потенціалів), називають *зовнішньою*, а тут, в якій носії заряду рухаються під дією сторонніх сил, — *внутрішньою*. Поляси джерела струму розділяють внутрішню та зовнішню ділянки кола (мал. 42, в).

На переміщення зарядів затрачається відповідна робота $A_{\text{ст}}$, яку виконують сторонні сили. Що більший заряд переміщується, то більша робота затрачається. Іншими словами, $A_{\text{ст}} \sim q$ або, використовуючи знак рівності, $A_{\text{ст}} = \varepsilon q$, де ε — постійний коефіцієнт пропорційності, що характеризує відповідне джерело й називається *електрорушійною силою джерела*¹ (скорочено ЕРС).



Мал. 41. Рух носіїв заряду в повному електричному колі



Мал. 42. Електричне коло:
а — однорідна ділянка;
б — неоднорідна ділянка;
в — повне коло, що містить зовнішню та внутрішню частини

Електрорушійна сила ε — це фізична величина, що характеризує енергію сторонніх сил джерела струму й вимірюється роботою сторонніх сил (тобто сил неелектростатичного походження), виконаною для

переміщення одиничного позитивного електричного заряду, $\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

Одиниця електрорушійної сили — вольт, $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Унаслідок розділення всередині джерела позитивних і негативних зарядів джерело набуває запасу потенціальної електричної енергії, яка

¹ Термін «електрорушійна сила» виник до того, як були з'ясовані процеси, що відбуваються в електричному колі. Як видно з означення, ідеється про енергетичну характеристику джерела, а не про силову.

витрачається на виконання роботи з переміщення зарядів по всьому колу. Робота сторонніх сил дорівнює сумі робіт, що виконуються по переміщенню заряду на внутрішній і зовнішній ділянках кола.

У джерелах струму постійно відбувається розділення позитивних і негативних зарядів, які зосереджуються на його полюсах, що спричиняє появу електричного поля (станціонарного). Властивості цього поля відрізняються від електричного поля нерухомих зарядів, яке ми вивчали в електростатиці. У таблиці 2 подано порівняння властивостей електричних полів рухомих і нерухомих зарядів.

Таблиця 2

Електростатичне поле нерухомих зарядів	Станціонарне електричне поле рухомих зарядів
<ul style="list-style-type: none"> ► Лінії напруженості є незамкненими. ► Робота поля по замкненому контуру дорівнює нулю (є потенціальним) 	<ul style="list-style-type: none"> ► Має замкнені лінії напруженості. ► Робота поля з переміщення заряду вздовж замкненої лінії напруженості не дорівнює нулю (не є потенціальним). Таке поле називають вихровим

Закон Ома для повного кола. Джерело струму, як і будь-який провідник, має певний опір, який називають *внутрішнім опором* джерела й позначають r , на відмінну від опору зовнішнього кола R .

Відповідно до закону Ома для зовнішньої та внутрішньої ділянок кола, можна записати $U_{\text{вн}} = Ir$, $U_{\text{зн}} = IR$. Тоді $\varepsilon = IR + Ir$, сума спадів напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола дорівнює ЕРС джерела.

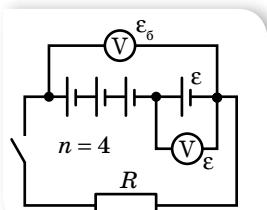
Співвідношення, записане у вигляді $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, називають *законом Ома для повного кола*: сила струму в замкненому електричному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела струму й обернено пропорційна повному опору кола.

Отже, сила струму в колі залежить від трьох величин, дві з яких (ЕРС і внутрішній опір) характеризують джерело, а третя залежить від самого кола. Якщо користуватись певним джерелом електричної енергії, то ε і r можна вважати сталими величинами. Якщо змінювати опір зовнішнього кола, то відповідно змінюватиметься сила струму I в колі та спад напруги IR на зовнішній частині кола. Зі збільшенням опору зовнішнього кола сила струму зменшується, напруга ж зростає. Якщо $R = \infty$ (коло розімкнене), то $I = 0$, спад напруги всередині джерела відсутній, а напруга на полюсах джерела дорівнює його ЕРС. На цьому ґрунтуються наближене вимірювання ЕРС джерела. Вольтметр приєднують до полюсів джерела при розімкненому зовнішньому колі. До того ж вольтметр показує спад напруги IR на самому собі. А оскільки опір вольтметра зазвичай дуже великий, тобто $R \gg r$, $U = IR \approx \varepsilon$. Що більший опір вольтметра порівняно з внутрішнім опором джерела струму, то точнішим буде виміряне значення ЕРС.

Послідовне і паралельне з'єднання джерел струму. На практиці однакові джерела струму з'єднують у батарею (табл. 3).

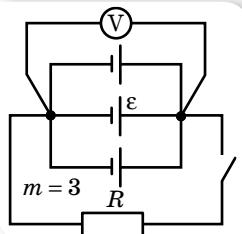
Таблиця 3

У разі послідовного з'єднання джерел струму в батарею (мал. 43) позитивний полюс попереднього джерела з'єднують з негативним полюсом наступного.



Мал. 43

У разі паралельного з'єднання джерел струму в батарею (мал. 44) всі їхні позитивні полюси приєднують до однієї клеми, а негативні — до іншої.



Мал. 44

ЕРС батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів

Заряди, які проходять через один елемент живлення, не потрапляють в інші, тобто ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного елемента

Закон Ома для всього кола з послідовним з'єднанням однакових елементів живлення: $I = \frac{\varepsilon n}{R + rn}$, де n — кількість елементів, ε — ЕРС одного елемента, r — внутрішній опір одного елемента

Закон Ома для кола з однаковими паралельно з'єднаними елементами живлення:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{m}}, \text{ де } m \text{ — кількість елементів, } \varepsilon \text{ — ЕРС одного елемента, } r \text{ — внутрішній опір одного елемента}$$

У разі змішаного з'єднання однакових елементів живлення в батарею закон Ома:

$$I = \frac{\varepsilon n}{R + \frac{rn}{m}}$$

Коротке замикання. Зі зменшенням опору зовнішнього кола, $R \rightarrow 0$, максимального значення набуває сила струму $I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r}$. Цей випадок називають *коротким замиканням*.

Для джерел, де порівняно малий внутрішній опір (наприклад, у свинцевих акумуляторах $r \approx 0,1 \div 0,001$ Ом), сила струму короткого замикання може досягти дуже великих значень. Провідники можуть розплавитись, а саме джерело — вийти з ладу. Особливо небезпечні короткі замикання в освітлювальних мережах, що живляться від трансформаторних підстанцій, ЕРС яких вимірюється сотнями вольтів. Сила струму короткого замикання в них може сягти кількох тисяч амперів.



1. У чому полягає фізична суть електрорушійної сили джерела струму? Що вона характеризує? Яким вольтметром і за яких умов можна виміряти ЕРС джерела струму безпосередньо?
2. Розкажіть про енергетичні перетворення в електричному колі.
3. Чи може тривалий час існувати електричний струм у колі, якщо на рухливі носії заряду діють тільки кулонівські сили? Чим електричне поле провідника зі струмом відрізняється від електричного поля нерухомих зарядів?



Експериментуємо

- Перевірте на досліді, як залежить напруга на затискачах джерела струму від опору зовнішнього кола. Побудуйте графік цієї залежності. Обладнання доберіть самостійно.
- У вашому розпорядженні батарея акумуляторів з ЕРС, що дорівнює ε , вольтметр і великий набір резисторів найрізноманітніших опорів R . За допомогою цього обладнання визначте внутрішній опір r батареї. Перевірте ваш спосіб на досліді.

Приклади розв'язування задач

Задача. Батарея акумуляторів з ЕРС $\varepsilon = 2,8$ В включена в коло за схемою, яка показана на малюнку 45, де $R_1 = 1,8$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом. Амперметр показує силу струму $I_2 = 0,48$ А. Визначте внутрішній опір батареї. Опором амперметра — знехайтесь.

Дано:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 2,8 \text{ В} \\ R_1 &= 1,8 \text{ Ом} \\ R_2 &= 2 \text{ Ом} \\ R_3 &= 3 \text{ Ом} \\ I_2 &= 0,48 \text{ А} \\ r &— ?\end{aligned}$$

Розв'язання:

Внутрішній опір батареї можна визначити із закону Ома для повного кола: $I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{зар}} + r}$, $r = \frac{\varepsilon - IR_{\text{зар}}}{I}$. Оскільки $I = I_1 = I_2 + I_3$, спочатку визначимо силу струму в третьому провіднику, а потім загальну: $\frac{R_2}{R_3} = \frac{I_3}{I_2}$, $I_3 = I_2 \cdot \frac{R_2}{R_3}$.

Таким чином, $I = I_2 \cdot \frac{R_3 + R_2}{R_3}$.

Оскільки R_1 з'єднано послідовно з розгалуженням, то маємо $R_{\text{зар}} = R_1 + R_{\text{екв}}$, де $R_{\text{екв}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Отже, $R_{\text{зар}} = \frac{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Тоді будемо мати: $r = \frac{\varepsilon R_3}{I_2(R_3 + R_2)} - \frac{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}{R_2 + R_3}$. Підставляючи числові значення, розрахуємо r :

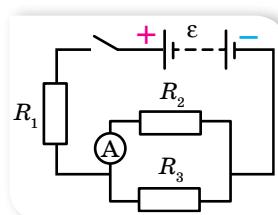
$$r = \frac{2,8 \text{ В} \cdot 3 \text{ Ом}}{0,48 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом}} - \frac{1,8 \text{ Ом} \cdot 5 \text{ Ом} + 6 \text{ Ом}^2}{5 \text{ Ом}} = 0,5 \text{ Ом}.$$

Відповідь: $r = 0,5$ Ом.

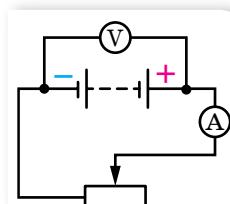


Вправа 7

- Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали коло за схемою, зображену на малюнку 46. За деякого положення ковзного контакту реостата амперметр показав 0,5 А, а вольтметр — 4 В. Коли контакт перемістили трохи ліворуч, амперметр показав 0,9 А, а вольтметр — 3,6 В. Обчисліть ЕРС і внутрішній опір джерела.

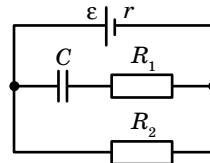


Мал. 45



Мал. 46

- Джерелом струму в колі є батарея з ЕРС 30 В. Напруга на клемах батареї $U = 18$ В, а сила струму в колі $I = 3$ А. Визначте зовнішній R і внутрішній r опори електричного кола.
- У провіднику опором 2 Ом, приєднаному до елемента з ЕРС 1,1 В, проходить струм 0,5 А. Яка сила струму під час короткого замикання елемента?
- Визначте заряд на обкладках конденсатора (мал. 47), якщо ЕРС джерела ε , його внутрішній опір r . Опори резисторів R_1 та R_2 відомі. Ємність конденсатора C .
- Вольтметр, приєднаний до затискачів джерела струму, показав 6 В. Коли до тих самих затискачів приєднали лампу, вольтметр почав показувати 3 В. Що покаже вольтметр, якщо замість однієї приєднати дві такі самі лампи, з'єднані послідовно; паралельно?



Мал. 47

§ 9

Робота й потужність електричного струму

Робота й потужність електричного струму. Електричне поле, створюючи впорядкований рух заряджених частинок у провіднику, виконує роботу, яку прийнято називати *роботою струму*.



Робота електричного струму A — фізична величина, що характеризує зміну електричної енергії струму — перетворення її на інші види.

Одиниця роботи електричного струму — джоуль, 1 Дж.

У побуті й техніці використовують також позасистемну одиницю — кіловат·годину ($\text{kBt} \cdot \text{год}$), $1 \text{ kBt} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6$ Дж.

Якщо розглядати зовнішню ділянку електричного кола, то робота струму визначається як $A = qU = UIt$, де q — заряд, що пройшов через по-перечний переріз провідника за час t , U — електрична напруга на ділянці кола, I — сила струму в ній.

Якщо на ділянці кола, якою проходить струм, не виконується механічна робота й не відбуваються хімічні реакції, то результатом роботи електричного струму буде тільки нагрівання провідників. Нагрітий провідник унаслідок теплообміну віддає отриману енергію в навколошне середовище. Згідно із законом збереження енергії, кількість виділеної теплоти дорівнює роботі струму: $Q = A$ — їй обчислюється за *законом Джоуля — Ленца*: кількість теплоти Q , що виділяється за час t в провіднику з опором R під час проходження по ньому струму силою I , дорівнює $Q = I^2Rt$.

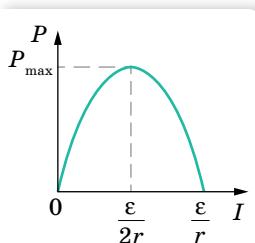
Скориставшись законом Ома $I = \frac{U}{R}$, математично можна отримати й такі формули закону Джоуля — Ленца: $Q = \frac{U^2t}{R}$ і $Q = UIt$. Проте, якщо в колі виконується механічна робота або відбуваються хімічні реакції, ці формули використовувати не можна.

Потужність електричного струму P — фізична величина, що характеризує здатність електричного струму виконувати певну роботу й вимірюється роботою, виконаною за одиницю часу, $P = \frac{A}{t}$, тут A — робота електричного струму, t — час, за який цю роботу виконано.

Потужність у зовнішній ділянці електричного кола можна також визначити за формулами $P = UI$, $P = I^2R$, $P = \frac{U^2}{R}$, де U — електрична напруга, I — сила струму, R — електричний опір ділянки кола.

Одиниця потужності — ват, $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Якщо коло складається з кількох споживачів, то за будь-якого їх з'єднання загальна потужність струму в усьому колі дорівнює сумі потужностей окремих споживачів. Це варто взяти до уваги. У побуті ми користуємося потужними електричними пристроями. Якщо одночасно їх увімкнути, то загальна потужність може перевищувати ту, на яку розрахована електрична мережа в помешканні.



Мал. 48. Графік залежності потужності, що споживається в зовнішній частині кола, від сили струму

З'ясуємо, у якому разі в електричному колі виділяється максимальна потужність. Скористаємося графічним способом і для цього запишемо закон Ома для повного кола в такому вигляді: $\varepsilon = IR + Ir$. Помноживши обидві частини рівняння на I , отримаємо: $\varepsilon I = I^2R + I^2r$, де εI — повна потужність, яку розвиває джерело струму, I^2R — потужність споживачів зовнішньої ділянки кола, I^2r — потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яка споживається зовнішньою частиною кола, становить: $P = \varepsilon I - I^2r$. Графіком залежності $P(I)$ є парабола (мал. 48), вершина якої має координати $\left(\frac{\varepsilon}{2r}; \frac{\varepsilon^2}{4r}\right)$. Із графіка видно, що максимальна

потужність споживається в зовнішньому колі за сили струму $I = \frac{\varepsilon}{2r}$

і дорівнює нулю, коли $I = 0$, і $I = \frac{\varepsilon}{r}$.

Порівнюючи формули $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ і $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, бачимо, що максимальна потужність споживається зовнішнім навантаженням у випадку, коли $R = r$.

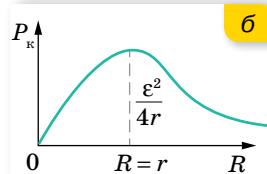
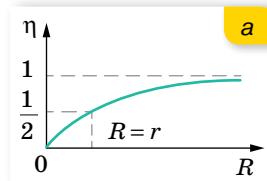
Коефіцієнт корисної дії джерела струму. Коефіцієнт корисної дії джерела струму η визначається як відношення потужності P_{κ} , яку споживає зовнішня частина кола (корисна потужність), до повної потужності P_{π} , яку розвиває джерело струму: $\eta = \frac{P_{\kappa}}{P_{\pi}}$.

Оскільки корисна потужність $P_{\text{к}} = IU$, а повна $P_{\text{п}} = I\varepsilon$, отримуємо: $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$. Ураховуючи, що $U = \varepsilon - Ir$, $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, тобто $U = \varepsilon \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, маємо: $\eta = \frac{R}{R+r}$.

Залежність коефіцієнта корисної дії джерела струму η від зовнішнього опору R графічно має вигляд, як на малюнку 49, а.

Аналіз формули та графіка $\eta(R)$ показує, що $\eta \rightarrow 1$ коли $\frac{r}{R} \ll 1$. Тобто для збільшення ККД джерела необхідно за можливості зменшити його внутрішній опір.

Залежність корисної потужності $P_{\text{к}}$ від зовнішнього опору R набуває вигляду $P_{\text{к}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$. Графік залежності $P_{\text{к}}(R)$ зображенний на малюнку 49, б.



Мал. 49. Графіки залежності: а — $\eta(R)$; б — $P_{\text{к}}(R)$



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У якій із двох ламп, потужністю 100 Вт чи 75 Вт, протікає струм більшої сили?
2. Як визначають потужність електричного струму на різних ділянках повного кола?
3. За яких умов робота електричного струму та кількість теплоти, що виділяється при проходженні струму, мають однакове значення?



Приклади розв'язування задач

Задача. У мережу з напругою 220 В послідовно підключили дві лампи потужністю 60 і 250 Вт, кожна з яких розрахована на напругу 110 В. Як розподілиться напруга на лампах? Яку потужність споживає кожна лампа? Яка кількість теплоти виділиться за 30 хв світіннякої лампи?

Дано:

$$U = 220 \text{ В}$$

$$U_1 = U_2 = 110 \text{ В}$$

$$n = 2$$

$$P_1 = 60 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 250 \text{ Вт}$$

$$t = 1800 \text{ с}$$

$$U'_1 = ?; U'_2 = ?$$

$$P'_1 = ?; P'_2 = ?$$

$$Q'_1 = ?; Q'_2 = ?$$

Розв'язання:

Напруга на кожній з послідовно з'єднаних ламп прямо пропорційна їх опорам. Тому спочатку розрахуємо опір кожної лампи: $R_1 = \frac{U_1^2}{P_1}$, $R_2 = \frac{U_2^2}{P_2}$, $\frac{U'_1}{U'_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Оскільки $U'_1 + U'_2 = U$, то $\frac{U'_1}{U - U'_1} = \frac{R_1}{R_2}$.

За законом Ома визначимо силу струму в лампах:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Підставляючи числові значення, визначимо опір кожної з ламп і напруги в них:

$$R_1 = \frac{(110 \text{ В})^2}{60 \text{ Вт}} \approx 200 \text{ Ом}, R_2 = \frac{(110 \text{ В})^2}{250 \text{ Вт}} \approx 48 \text{ Ом},$$

$$\frac{U'_1}{220 \text{ В} - U'_1} \approx \frac{200 \text{ Ом}}{48 \text{ Ом}}, U'_1 \approx 177 \text{ В}, U'_2 = 43 \text{ В.}$$

Визначимо силу струму в лампах: $I \approx \frac{220 \text{ В}}{248 \text{ Ом}} \approx 0,9 \text{ А.}$

Знаючи силу струму в лампах, їх опір і час світіння, розрахуємо потужності, які мають лампи за їх послідовного підключення, і кількість виділеної теплоти:

$$P'_1 = IU'_1; P'_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \approx 159 \text{ Вт}, P'_2 = IU'_2; P'_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} = 39 \text{ Вт},$$

$$Q'_1 = IU'_1 t; Q'_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 290 \text{ кДж},$$

$$Q'_2 = IU'_2 t; Q'_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 70 \text{ кДж.}$$

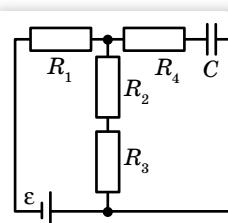
А чи звернули ви увагу на те, що напруга на одній з ламп виявилася 177 В? До чого це може привести в реальних умовах?

Відповідь: $U'_1 \approx 177 \text{ В}, U'_2 = 43 \text{ В}; P'_1 \approx 159 \text{ Вт}, P'_2 = 39 \text{ Вт}, Q'_1 \approx 290 \text{ кДж}, Q'_2 \approx 70 \text{ кДж.}$



Вправа 8

- Визначте внутрішній опір та ЕРС джерела струму, якщо за сили струму 30 А потужність у зовнішньому колі становить 180 Вт, а за сили струму 10 А ця потужність дорівнює 100 Вт.
- Від генератора, що має ЕРС 250 В і внутрішній опір 0,1 Ом, необхідно протягти до споживача двопроводову лінію завдовжки 100 м. Яку масу алюмінію треба використати для виготовлення підвідних проводів, якщо споживач має максимальну потужність 22 кВт і розрахованій на напругу 220 В?
- Джерело струму, що має ЕРС 9 В і внутрішній опір 1 Ом, живить через реостат три паралельно з'єднані лампи, розраховані на напругу 6,3 В і силу струму 0,3 А. Реостат поставлено в таке положення, що лампи працюють у номінальному режимі. Одна з ламп зіпсувалася. У скільки разів змінилась потужність кожної з двох ламп, які залишилися, порівняно з номінальною?
- Джерело струму замикають спочатку на опір 2 Ом, а потім — на опір 8 Ом. І в першому і в другому випадках в опорах за одиницю часу виділяється однаакова кількість теплоти. Визначте внутрішній опір джерела струму.
- Визначте ККД джерела електричної енергії з ЕРС 1,45 В і внутрішнім опором 0,4 Ом при силі струму 2 А.
- Джерело струму під час короткого замикання дає силу струму 1,5 А. Якщо джерело замкнути на зовнішній опір 4 Ом, то потужність струму в зовнішньому колі буде дорівнювати 1 Вт. Визначте ЕРС і внутрішній опір джерела струму.
- Лампи, опори яких дорівнюють 3 та 12 Ом, по черзі присоединували до деякого джерела струму, і вони споживали однакову потужність. Визначте внутрішній опір джерела та ККД кола в кожному випадку.
- Вважаючи відомими величини, вказані на схемі (мал. 50), визначте заряд на конденсаторі. Як зміниться величина заряду, якщо R_1 та R_2 вимкнути?



Мал. 50



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Заходи та засоби безпеки під час роботи з електричними пристроями.
- ▶ Чому автомобілі з «електричним серцем» захоплюють світ?
- ▶ Сучасні українські вчені, які зробили вагомий внесок у розвиток фізики й астрономії.
- ▶ Технології енергозбереження на рівнях: робочого місця, власного житла, населеного пункту, регіону, країни, планети.
- ▶ Струм лікує? Вплив струму на організм людини.
- ▶ Дива провідників та ізоляторів. Чи проводить пластмаса електричний струм?

§ 10

Електричний струм у металах

Класична та квантова теорії провідності металів. Численні експерименти з електрики, виконані різними вченими в XIX–XX ст., стали підґрунтам для створення теорії електричної провідності металів. Її назвали *класичною електронною теорією електропровідності металів*. Класична електронна теорія спирається на кілька фундаментальних припущень, зокрема:

- 1) усі метали мають кристалічну будову;
- 2) простір між вузлами кристалічних ґраток заповнений електронним газом (так називають сукупність вільних електронів — електронів провідності, що втратили зв'язки з атомами, яким вони належали);
- 3) у середньому кожний атом металу втрачає один електрон (іншими словами, концентрація електронів провідності в металах дорівнює кількості атомів в одиниці об'єму металу, $n_e = n_a$);
- 4) до електронного газу в металах застосовні всі закони молекулярно-кінетичної теорії, тобто електронний газ розглядається як ідеальний газ;
- 5) рух вільних електронів у металі підпорядковується класичним законам механіки;
- 6) при зіткненнях електронів з іонами електрони повністю передають їм свою кінетичну енергію.

Незважаючи на те, що деякі припущення спотворюють дійсну картину електропровідності металів, на підставі цієї теорії все ж вдалося пояснити основні закони проходження електричного струму в металах.

Більш точний опис (зокрема й тих процесів, які не могла пояснити класична теорія) дає *квантова теорія провідності твердих тіл*.

Пояснення електропровідності металів на основі класичної електронної теорії провідності. Спираючись на основні положення класичної електронної теорії, розглянемо закономірності електричного струму в металах.

Як йони кристалічних ґраток, так і електрони беруть участь у тепловому русі. Йони здійснюють теплові коливання поблизу положень рівноваги — вузлів кристалічних ґраток. Вільні електрони рухаються хаотично і під час свого руху стикаються з іонами ґраток. У результаті таких зіткнень установлюється термодинамічна рівновага між електронним газом та іонами ґраток. Згідно з класичною теорією, можна оцінити середню швидкість теплового руху електронів за формулами молекулярно-кінетичної теорії. За кімнатної температури вона наближено дорівнює $10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У зовнішньому електричному полі в металевому провіднику, крім теплового руху електронів, виникає їхній упорядкований рух. Оцінимо швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику, скориставшись прийомом, який ми використовували для виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.

За час Δt через поперечний переріз провідника S пройдуть усі електрони, які містяться в об'ємі $V = S\bar{v}\Delta t$, де \bar{v} — середня швидкість упорядкованого руху електронів.

Кількість електронів N у виділеному об'ємі можна визначити через їхню концентрацію n :

$$N = nV.$$

Підставивши значення об'єму V , отримаємо:

$$N = n\bar{v}\Delta t S.$$

Якщо за час Δt через поперечний переріз провідника площею S проходить N електронів, то загальний заряд, який вони переносять, $q = eN = en\bar{v}\Delta t S$.

Оскільки сила струму визначається формулою $I = \frac{q}{\Delta t}$, то $I = en\bar{v}S$.

Звідки середня швидкість упорядкованого руху електронів $\bar{v} = \frac{I}{enS}$.

Оцінимо величину швидкості упорядкованого руху електронів для мідного провідника з площею перерізу 1 мм^2 , по якому проходить струм силою 1 А . Зауважимо, що $n_e = n_a$ і для міді концентрація атомів становить величину порядку 10^{29} м^{-3} .

Підставляючи значення вказаних величин, отримуємо:

$$\bar{v} = \frac{1 \text{ А}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Як видно з розрахунків, швидкість упорядкованого руху електронів майже в 10^9 разів менша від швидкості їх теплового (хаотичного) руху). Але з практики відомо, що всі електроприлади, увімкнені в коло, починають працювати одночасно (відразу після замикання кола). Звідси випливає, що **швидкість поширення електричного струму в провіднику і швидкість упорядкованого руху електронів в ньому — це не одне й те саме!**

Класична теорія провідності пояснює механізм проходження електричного струму в металевих провідниках. За відсутності електричного поля у провіднику електрони беруть участь у тепловому (хаотичному)

руси. У разі створення на кінцях провідника різниці потенціалів на електрони діє електрична сила $\vec{F} = e\vec{E}$, що надає їм прискорення, яке вони швидко втрачають через зіткнення з іонами кристалічних ґраток. У результаті встановлюється деяка середня швидкість упорядкованого руху електронів — її називають *середньою швидкістю дрейфу*. Як відомо, тепловий рух електронів не припиняється ніколи, тому електрони з величезними швидкостями рухаються в усіх напрямках, і на тлі цього хаотичного руху відбувається повільний «дрейф» у напрямку, протилежному напрямку напруженості електричного поля. Швидкість поширення електричного поля в провіднику (як і швидкість поширення будь-якого електромагнітного випромінювання) становить близько $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Отже, кожний вільний електрон металу починає «дрейф», відчувши дію електричного поля, практично в мить замикання поля.

Класична теорія провідності пояснює також механізм виникнення електричного опору металевих провідників. Опір металів зумовлений взаємодією електронів, що рухаються в провіднику, з іонами кристалічних ґраток. У процесі взаємодії електрони втрачають частину енергії, яку вони отримують в електричному полі. Ця енергія перетворюється на внутрішню енергію. Отже, під час проходження по металевому провіднику електричного струму він нагрівається. З підвищеннем температури амплітуда коливань іонів зростає, і частішими стають співудари електронів з іонами. Тому можна стверджувати, що опір металів має залежати від температури.

Залежність опору металів від температури. Досліджуючи явище проходження електричного струму через металеві провідники в курсі фізики основної школи, ми встановили залежність опору металів від температури, а саме: $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$, де R_0 — опір провідника за $T = 273$ К (0°C), R — опір за температури T , ΔT — різниця температур, α — температурний коефіцієнт опору.

У процесі нагрівання провідника збільшення його довжини та площині перерізу взаємно компенсуються, тому здебільшого змінюється питомий опір: $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Зміна питомого опору речовини характеризується сталою для цієї речовини величиною — температурним коефіцієнтом опору α . Він дорівнює відносній зміні питомого опору провідника за його

нагрівання на 1 К, $\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}$, тут ρ_0 — питомий опір за температури $T = 273$ К (0°C), а ρ — питомий опір за температури T .

Для чистих металів температурні коефіцієнти опору відрізняються мало і приблизно дорівнюють $0,004 \text{ K}^{-1}$. Температурні коефіцієнти опору сплавів значно менші, ніж у чистих металів. Існують спеціальні сплави, опір яких майже не змінюється зі зміною температури. Такими сплавами є константан, мanganін. Температурний коефіцієнт опору в манганину майже в 400 разів менший, ніж у міді. Властивості цих матеріалів використовують для виготовлення точних електровимірювальних приладів та еталонів опору. Для вимірювання температури використовують термометри опору.

Надпровідність. У 1911 р. голландський фізик Гейке Камерлінг-ОНнес уперше виявив зникнення електричного опору в ртуті за її охолодження до температури, нижчої від 4,12 К. У 1913 р. цей ефект було виявлено в білого олова (за температури 3,69 К) та свинцю (7,26 К). У лабораторних дослідженнях у посудині Дьюара¹ з рідким гелієм протягом трьох років зберігалося надпровідне свинцеве кільце зі струмом без джерела живлення. За цей час найчутливіші прилади не виявили жодного зменшення значення сили струму в кільці. Це явище назвали *надпровідністю*.

Надпровідність — властивість деяких провідників стрибкоподібно зменшувати питомий опір до нуля за умови охолодження нижче певної *критичної* температури.

Речовини в надпровідному стані мають надзвичайно цікаві властивості. Про одну з них ми вже сказали — у кільцевому провіднику в надпровідному стані сила струму може не змінюватись як завгодно довго без підтримки від джерела живлення. Другою важливою особливістю надпровідників є неможливість створення всередині речовини в надпровідному стані магнітного поля. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників. І третя особливість надпровідників — надпровідний стан руйнується в достатньо сильному магнітному полі.

Дослідження надпровідності триває й досі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим зумовлена провідність металів?
2. Як рухаються електрони провідності в металічному провіднику, коли в ньому: а) немає електричного поля; б) створене електричне поле?
3. Чому на всіх ділянках електричного кола прилади починають діяти майже миттєво, незважаючи на малу швидкість дрейфу електронів?
4. Коли через спіраль електричної лампи протікає більший електричний струм: у момент увімкнення чи коли вона починає світитись?
5. У чому полягає явище надпровідності металів, які ефекти підтверджують його існування?



Експериментуємо

1. Є моток тонкого мідного дроту (без ізоляції). Визначте довжину дроту й площину поперечного перерізу. Обладнання: терези, омметр.
2. В одній непрозорій коробці міститься електрична лампа, клеми якої виведено назовні коробки, в іншій — резистор. Визначте, у якій з коробок міститься резистор. Обладнання: джерело струму, міліамперметр, два мілівольтметри, з'єднувальні провідники, вимикач.

¹ Дьюарівська посудина (термос) — ємність, стінки якої мають високу теплоізоляційну здатність. Посудина Дьюара була винайдена шотландським фізиком і хіміком сером Джеймсом Дьюаром в 1892 р. Перші дьюарівські посудини для комерційного використання випустили в 1904 р., коли була заснована німецька компанія «Термос» (нім. Thermos GmbH).



Вправа 9

- Опір 100-ватної електролампи, що працює під напругою 120 В, у розжареному стані в 10 разів більший, ніж у холодному. Визначте її опір у холодному стані (за $t_1 = 20^\circ\text{C}$) і середній температурний коефіцієнт опору, якщо температура розжарення нитки $t_2 = 2000^\circ\text{C}$.
- Визначте довжину нікелінового провідника діаметром 0,5 мм, який використали для виготовлення нагрівального приладу, що має опір 48 Ом за температури 800°C . Температурний коефіцієнт опору нікеліну $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а питомий опір його $\rho = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
- Мідний і графітовий стержні однакової товщини з'єднані послідовно. За якого співвідношення їхніх довжин опір цієї системи не буде залежати від температури?
- На скільки відрізняється опір лінії електропередачі взимку та влітку, якщо її виготовлено із залізного дроту перерізом S ? Температура змінюється від $-t$ до t . Довжина дроту за 0°C дорівнює l_0 . Як зміниться відповідь, якщо врахувати лінійне розширення дроту за нагрівання?

§ 11

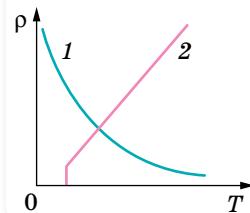
Електричний струм у напівпровідниках

Власна й домішкова провідності напівпровідників. Як відомо з курсу фізики 8 класу, до напівпровідників належать речовини, що за питомим опором займають проміжне місце між провідниками й ізоляторами (діелектриками). До напівпровідників належить значно більше речовин, ніж до провідників і діелектриків разом. Напівпровідниками є ряд хімічних елементів (Силіцій, Германій, Селен тощо) та деякі оксиди, сульфіди, телуриди.

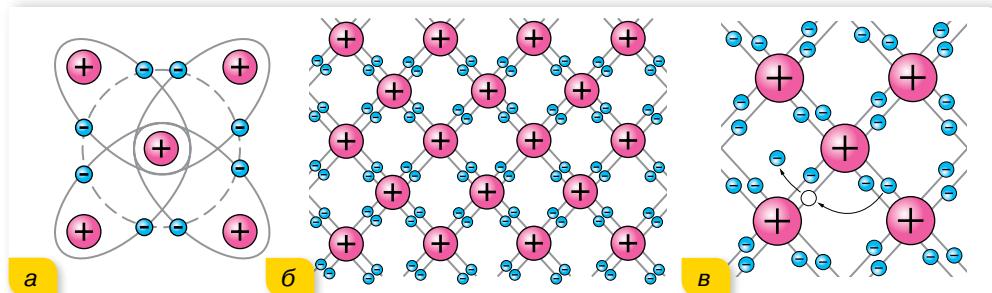
Питомий опір напівпровідників з підвищенням температури не зростає, як у металів, а навпаки, різко зменшується. На малюнку 51 наведено залежності питомого опору від температури для напівпровідника (1) та для металу (2).

Як видно з графіка, з наближенням до абсолютноого нуля питомий опір напівпровідника різко зростає, тобто за низьких температур напівпровідник веде себе як діелектрик. Зі збільшенням температури питомий опір напівпровідників швидко зменшується за експоненціальним законом. Електропровідність напівпровідників залежить також від освітленості (фотопровідності) і від уведення в них атомів деяких інших елементів (домішок).

Пояснимо властивості напівпровідників, розглянувши їхню будову на прикладі чотиривалентного елемента Германію (мал. 52, а; с. 52). Взаємодія пари сусідніх атомів у кристалі германію здійснюється завдяки ковалентному (парноелектронному) зв'язку (мал. 52, б; с. 52).



Мал. 51.
Залежності
питомого опору
від температури для
напівпровідника (1)
та провідника (2)



Мал. 52. Схеми: а — будови атома Германію; б — парноелектронного зв'язку в кристалі германію; в — утворення пари електрон — дірка

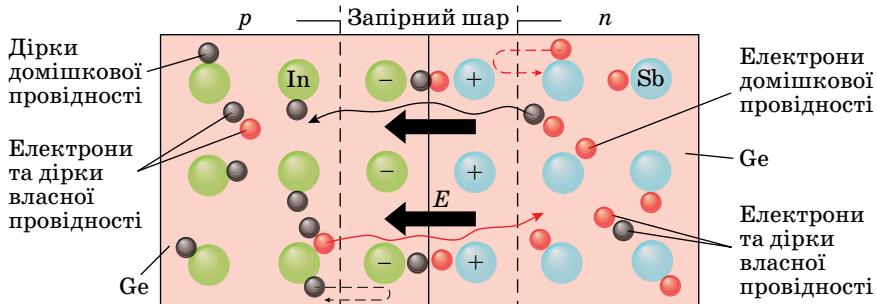
У темряві та за низьких температур усі електрони задіяні в ковалентних зв'язках. Вільних носіїв у кристалі напівпровідника немає, тому кристал не проводить струм і його опір великий. За цих умов кристал є ізолятором. За підвищення температури кристала (або під дією опромінення світлом, рентгенівськими променями, або за впливу сильних електричних чи магнітних полів) деякі ковалентні зв'язки руйнуються. На місці кожного розірваного зв'язку утворюється вакантне місце з нестачею електрона (мал. 52, в). Така конфігурація називається *діркою*. Електрони й дірки рухаються хаотично. Електрони займають місця дірок (рекомбінують) або вивільняються, розриваючи парноелектронні зв'язки (генеруються вільні електрони й дірки). Процеси генерації та рекомбінації відбуваються безперервно.

Якщо до такого кристала прикласти напругу, то вільні електрони будуть рухатись до позитивного полюса поля. Поки діє електричне поле, розриваються міжатомні зв'язки — з них вивільняються валентні електрони, залишаючи дірки, а розірвані раніше міжатомні зв'язки (дірки) заповнюються електронами, що вивільнилися з інших міжатомних зв'язків. Виникає враження, що в напівпровіднику, крім руху електронів (*n*-провідність), існує рух позитивно заряджених частинок — дірок (*p*-провідність).

Провідність чистих напівпровідників, що не мають ніяких домішок, називають *власною провідністю напівпровідників*. Власна провідність напівпровідників невелика, оскільки малою є кількість вільних носіїв струму — електронів і дірок. Дуже важлива особливість напівпровідників полягає в тому, що за наявності домішок у них поряд із власною провідністю виникає додаткова — *домішкова провідність*. Домішки, що легко віддають електрони, а отже, збільшують кількість вільних електронів, називають *донорними домішками*. Напівпровідники, в яких електрони є основними носіями заряду, називають *напівпровідниками n-типу*. Домішки, що приймають електрони, називають *акцепторними*. Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають *напівпровідниками p-типу*. Змінюючи концентрацію домішок, можна істотно змінити кількість носіїв заряду того чи того знака, а отже, створити напівпровідники з переважною концентрацією або позитивно, або негативно заряджених носіїв.

Електронно-дірковий перехід, його властивості й застосування. Цікаві явища спостерігаються в місці контакту напівпровідників *n*- і *p*-типів. Контакт таких двох напівпровідників називають *p-n*-переходом.

З'єднаємо два напівпровідники: один з донорною, а другий з акцепторною домішкою (мал. 53).

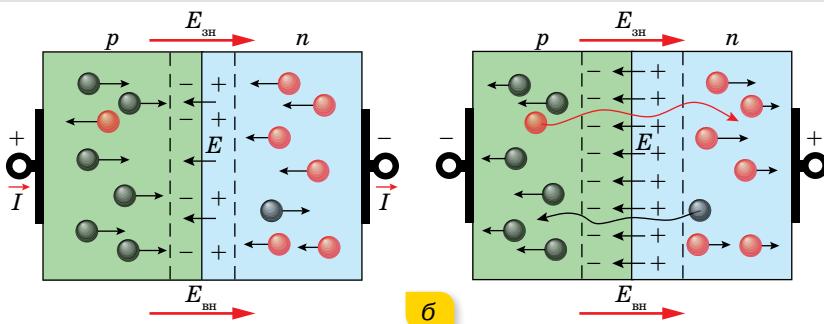


Мал. 53. Рух носіїв заряду в місці контакту напівпровідників *n*- і *p*-типів

Відразу ж почнеться рух через контакт: електрони переходитимуть з напівпровідника *n*-типу (де їх багато) у напівпровідник *p*-типу, а дірки — навпаки (на мал. 53 це відображене суцільними хвилястими стрілочками). Ця дифузія електронів і дірок відбувалась би до повного вирівнювання їх концентрацій в обох контактуючих напівпровідниках, якби ці частинки не переносили зарядів. Дійсно, унаслідок такого переміщення *n*-область заряджається позитивно, а *p*-область — негативно. Виникає контактна різниця потенціалів. Електричне поле перешкоджає дальшій дифузії основних носіїв через межу, відкидаючи основні носії назад у свої області (пунктирні стрілочки на малюнку 53). Крім того, оскільки частина електронів, що перейшли в *p*-область, рекомбінувала з дірками, і відповідна рекомбінація відбулася в *n*-області, то утворився шар, збіднений носіями заряду, опір якого досить великий, — запірний шар.

Ділянку контакту напівпровідників *n*- і *p*-типів провідності називають *p-n*-переходом, основною властивістю якого є однобічна провідність. Якщо подати напругу на напівпровідники так, щоб до напівпровідника *p*-типу під'єдувався позитивний полюс батареї, а до напівпровідника *n*-типу — негативний, то поле в переході буде ослаблене, запірний шар звузиться або зникне і дифузійні потоки основних носіїв (дірок з *p*-області й електронів з *n*-області) прямуватимуть через переход. Такий переход називають *прямим* (мал. 54, *a*; с. 54). Сила струму за збільшення напруги зростає дуже швидко, і закон Ома не виконується.

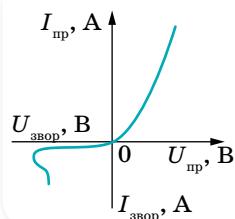
Під'єднаємо полюси батареї навпаки (мал. 54, *b*; с. 54). У цьому разі зовнішня напруга збігається за знаком з контактною різницею потенціалів. Зовнішнє поле підсилює поле *p-n*-переходу, і дифузійні потоки основних носіїв струму через переход значно зменшуються. Струм *I* в колі стане незначним за тієї ж напруги *U*, оскільки струм через *p-n*-переход забезпечується неосновними носіями заряду, провідність зразка стає незначною, а опір великим. Цей переход називають *зворотним*.



Мал. 54. Механізм дії прямого (а) та зворотного (б) переходу

На вольт-амперній характеристиці залежність сили прямого струму від напруги зображене лінією, що зростає в додатному напрямку осі напруг U (мал. 55). Після перемикання полюсів батареї, коли потенціал напівпровідника p -типу стає від'ємним, а потенціал напівпровідника n -типу — додатним, опір переходу зростає, а струм стає незначним. Сила зворотного струму майже не змінюється в разі зміни напруги. Різке збільшення зворотного струму на краю кривої пов'язане з пробоєм напівпровідника.

Властивості напівпровідників (зокрема, термо- й фотопровідність) і контактні явища від одного або двох $p-n$ -переходів широко використовують у різних напівпровідникових пристроях (табл. 4). Стрімкий розвиток техніки й технологій став можливим завдяки використанню напівпровідниковых приладів. Їх використовують у звичайному радіоприймачі, мобільному телефоні, квантовому генераторі (лазері) тощо. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми є основою сучасної обчислювальної техніки, комп'ютерів, іншої цифрової техніки та гаджетів.



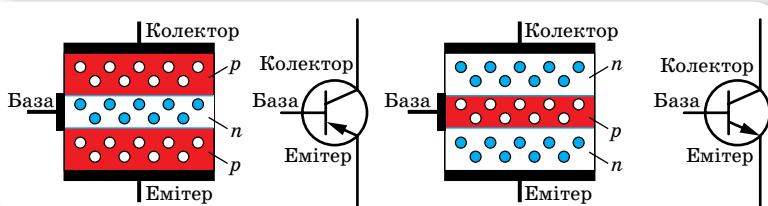
Мал. 55.
Вольт-амперна
характеристика
 $p-n$ -переходу

Таблиця 4

Приклади напівпровідникових пристрій

Термо- і фоторезистори — пристали, дія яких ґрунтуються на використанні залежності опору напівпровідників від температури (освітленості).

Транзистор — напівпровідниковий елемент електронних схем із трьома електродами, один з яких служить для керування струмом між двома іншими.



Світлодіод (англ. *LED — light-emitting diode*) — напівпровідниковий пристрій, що випромінює світло, коли через нього проходить електричний струм.



Інтегральна мікросхема — мініатюрний мікроелектронний виріб, елементи якого нерозривно зв'язані конструктивно, технологічно та електрично.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як виникають електронна та діркова провідність напівпровідників?
2. Чому зменшується питомий опір напівпровідників з підвищеннем температури?
3. Чому в напівпровіднику з домішковою провідністю існують як основні, так і неосновні носії електричного струму?
4. Є напівпровідникова пластинка з домішковою провідністю. Як дослідним шляхом визначити, якого типу — *n*- чи *p*- — є цей напівпровідник?



Експериментуємо

У двох непрозорих коробках вміщено по одному резистору, клеми яких виведено назовні. Визначте, в якій з коробок міститься напівпровідниковий резистор. Обладнання: термістор, омічний резистор, джерело живлення, гальванометр, реостат, сухий спирт, з'єднувальні провідники, вимикач.

§ 12

Електричний струм у рідинах

Електролітична дисоціація. Електроліз. З курсів хімії та фізики основної школи ми дізналися, що речовини поділяють на *електроліти* та *неелектроліти*. Електроліти — це речовини, що мають іонну провідність. Але у твердому стані йони міцно зв'язані один з одним, оскільки мають протилежні електричні заряди, тому їхня рухливість ускладнена. У розплаві або розчині рухливість іонів збільшується. У розчині під впливом полярних молекул води речовина-електроліт розпадається на позитивно й негативно заряджені іони.



Розпад деяких речовин на іони під дією полярних молекул води називається **електролітичною дисоціацією**.

Якщо в такому розчині створити електричне поле, то позитивно заряджені йони рухатимуться до катода (негативно заряджений електрод), а негативно заряджені йони — до анода (позитивно заряджений електрод). Відповідно позитивно заряджені йони назвали **катіонами**, а негативно заряджені — **аніонами**.

Особливістю проходження електричного струму через електроліт є те, що йони переносять хімічні складники електроліту й ті виділяються на електродах — відкладаються у вигляді твердого шару або виділяються в газоподібному стані.

Процес виділення речовини на електродах, пов’язаний з окисно-відновними реакціями, що відбуваються на електродах під час проходження струму, називають **електролізом**. У процесі електролізу катод є відновником, оскільки він віддає електрони катіонам, а анод — окисником, оскільки він приймає електрони від аніонів.

Закони електролізу. З курсу фізики 8 класу нам відомо, що, вивчаючи проходження електричного струму через електроліти, англійський фізик Майл Фарадей експериментально встановив закони електролізу.

1-й закон Фарадея

Маса речовини m , що виділилася на електроді в результаті електролізу, прямо пропорційна силі струму I і часу t проходження струму через електроліт, $m = kIt$, де k — коефіцієнт пропорційності (електрохімічний еквівалент).

Електрохімічний еквівалент речовини дорівнює масі речовини, яка виділяється на електроді за 1 с під час проходження через електроліт струму силою 1 А.

2-й закон Фарадея

Електрохімічний еквівалент речовини k пропорційний хімічному еквіваленту $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}$, де M — молярна маса, F — стала Фарадея, n — валентність речовини.

Фізичний зміст законів Фарадея легко пояснити, використавши електронно-йонну теорію. Маса речовини, що виділяється на електродах при електролізі, визначається масою N йонів, що осідають на електроді. Кількість йонів дорівнює $N = \frac{m}{M} N_A$, де m — маса речовини, M — її молярна маса, N_A — число Авогадро.

З іншого боку, кількість йонів, що осіли, можна визначити через величину заряду $q = It$, що пройшов крізь електроліт, і заряд одного йона q_0 , $N = \frac{q}{q_0} \cdot \frac{m}{M} N_A = \frac{q}{q_0} \cdot \frac{Mq}{q_0 N_A}$. Звідки $m = \frac{Mq}{q_0 N_A}$.

Модуль заряду будь-якого йона дорівнює модулю заряду електрона, помноженому на валентність йона, $|q_0| = |e|n$. Отже, $m = \frac{M|q|}{|e|nN_A}$.

Величини N_A і e є універсальними сталими, а M і n — сталі для даної речовини.

Тож вираз $\frac{M}{|e|nN_A} = k$ є електрохімічним еквівалентом речовини.

Добуток $N_A|e| = F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ — стала Фарадея — фізична константа.

Як видно з формули, стала Фарадея — це модуль електричного заряду 1 моля електронів.

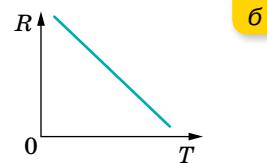
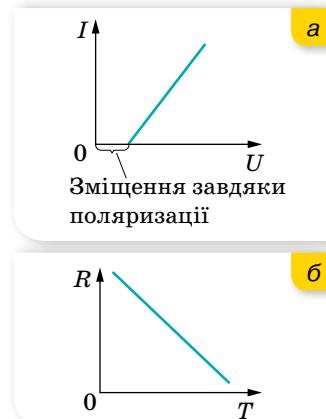
Закони Фарадея можна записати в об'єднаному вигляді так:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It.$$

Електричний заряд будь-якого йона $q = \pm \frac{nF}{N_A}$.

Вольт-амперна характеристика проходження електричного струму крізь електроліт має лінійний характер, як і в металах, але відрізняється тим, що для створення електричного струму в електроліті необхідна певна робота зовнішнього електричного поля — для поляризації електроліту (напруга цього поля для різних електролітів має різне значення) (мал. 56, а).

Залежність опору електроліту від температури (мал. 56, б) — лінійна. Це пояснюється тим, що за зростання температури тепловий рух молекул стає інтенсивнішим, і тому кількість іонів у розчині та їх концентрація зростають, а отже, змінюється питомий опір електроліту ρ . Його зміну можна розрахувати за рівнянням, яке використовували в аналогічних розрахунках для металів: $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$, де ρ_0 — питомий опір електроліту при 273 К (0°C); α — термічний коефіцієнт опору. Для електролітів термічний коефіцієнт опору завжди є від'ємним, а отже, за нагрівання провідність електроліту зростає, а його опір зменшується.



Мал. 56. Графіки залежностей:
а — сили струму від напруги $I(U)$;
б — опору від температури $R(T)$ для електролітів

Явище електролізу широко застосовують.
Детальніше — в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВІДОМУ, РОЗУМІЮ

1. Дистильована вода не проводить електричний струм. Чому вона стає провідником при розчиненні в ній солей, кислот, лугів?
2. Чому вольт-амперна характеристика електроліту не починається з початку координат?
3. Що називають електрохімічним

еквівалентом речовини? Який фізичний зміст сталої Фарадея? 4. Чому опір розчинів електролітів залежить від температури?



Експериментуємо

Визначте масу йона міді. Обладнання: джерело постійного струму, набір обладнання для електролізу, розчин Купрум(II) сульфату (мідного купоросу), терези з важками, амперметр, секундомір, з'єднувальні провідники, вимикач.



Приклади розв'язування задач

Задача. Який найменший заряд повинен мати акумулятор, щоб під час електролізу підкисленої води вивільнилось 5 л кисню за температури 27°C і нормального атмосферного тиску?

Дано:

$$V = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$P = 101,3 \text{ кПа}$$

$$k = 8,29 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$q — ?$$

Розв'язання:

Необхідний для електролізу заряд акумулятора визначимо з співвідношення $m = kq$.

Масу газу визначимо із рівняння стану ідеального газу $pV = \frac{m}{M} RT$, $m = \frac{pVM}{RT}$.

$$\text{Таким чином, } q = \frac{pVM}{RTk}.$$

Підставимо числові значення, отримуємо:

$$q = \frac{101,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К} \cdot 8,29 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}} = 78,4 \text{ кКл.}$$

Відповідь: 78,4 кКл.



Вправа 10

- Скільки часу потрібно для того, щоб при нікелюванні виробу на його поверхні утворився шар двовалентного нікелю завтовшки 0,03 мм? Скільки енергії буде затрачено для цього? Площа поверхні виробу дорівнює 120 см². Напруга на клемах ванни — 1,8 В, опір розчину — 3,75 Ом.
- Скільки алюмінію виділиться за витрати електричної енергії 1 кВт · год, якщо електроліз проводиться під напругою 5 В, а ККД всієї установки — 80 %?
- У електролітичній ванні за 20 хв виділилося 1,98 г міді. Визначте електричну потужність, що витрачається на нагрівання електроліту. Опір розчину ванни становить 0,8 Ом.
- Під час електролізу розчину сірчаної кислоти за 2 год 23 хв виділяється 5 л водню за нормальних умов. Визначте опір розчину, якщо потужність струму дорівнює 32,5 Вт.
- При електролізі води через ванну пройшов заряд 4 кКл, і при цьому виділилося 0,4 л водню за тиску 128 кПа. Визначте температуру водню.

§ 13

Електричний струм у газах

Механізм електропровідності газів. З курсу фізики 8 класу нам відомо, що в природі гази є діелектриками, бо за цих умов у газах майже немає вільних носіїв заряду, рух яких міг би створити електричний струм. Проте під зовнішнім впливом, наприклад, високої температури, у газі з'являються заряджені частинки. Вони виникають унаслідок відщеплення від атомів газу одного або кількох електронів, як результат — замість нейтрального атома виникають позитивний іон і електрони. Частина електронів, що утворилися, може бути при цьому захоплена іншими нейтральними атомами, і тоді з'являється ще й негативні іони. Розпад молекул газу на електрони та іони називають **йонізацією газів**.

Нагрівання газу до високої температури — не єдиний спосіб йонізації молекул або атомів газу. Йонізація газу може відбуватися під впливом інших зовнішніх чинників: рентгенівських променів, променів, що виникають під час радіоактивного розпаду, космічних променів (фотойонізація).

Разом із процесом йонізації відбувається і процес рекомбінації: іони й електрони, що беруть участь у тепловому русі, стикаються один з одним і можуть з'єднатися в нейтральний атом.

Йонізований газ є провідником. Явище проходження електричного струму через газ називають **газовим розрядом**.

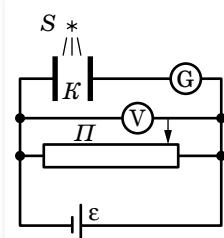
Несамостійний і самостійний газові розряди.

Розглянемо схему, зображену на малюнку 57.

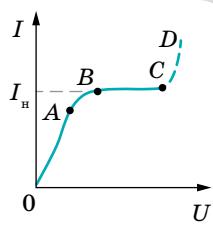
Між пластинами плоского конденсатора K міститься повітря за атмосферного тиску й кімнатної температури. Якщо до конденсатора прикладено напругу в кілька сотень вольт, а іонізатор S не працює, то гальванометр G струму не реєструє. Тільки-но простір між пластинами конденсатора починає йонізуватися (наприклад, потоком ультрафіолетового випромінювання від джерела S), гальванометр починає реєструвати струм. Цей струм і є **несамостійним розрядом**.

Отже, **несамостійний розряд** у газі є результатом перенесення заряду електронами, позитивними й негативними іонами, наявність і кількість яких зумовлені дією іонізатора (радіоактивного випромінювання, світла, космічних променів тощо), тиском газу й напруженістю електричного поля в газовому проміжку.

Одночасно з процесом йонізації в газі протікає і протилежний процес рекомбінації іонів. Якщо до конденсатора не прикладено зовнішньої напруги, то в певний момент часу в робочому об'ємі конденсатора встановлюється динамічна рівновага, за якої швидкість йонізації (кількість іонів, що утворюються за одиницю часу) починає дорівнювати швидкості рекомбінації іонів. Якщо між пластинами конденсатора існує електричне поле, то частина



Мал. 57. Схема для дослідження розряду в газі



Мал. 58.
Вольт-амперна
характеристика
газового розряду

йонів досягне пластиин, інша частина — рекомбінує. Зі збільшенням напруги між пластиинами конденсатора процес йонізації молекул газу починає переважати процес рекомбінації.

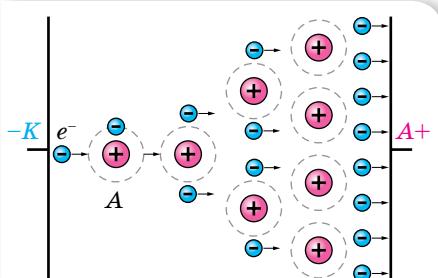
На малюнку 58 зображене *вольт-амперну характеристику газового розряду*. З малюнка видно, що за невеликих напруг сила струму лінійно залежить від напруги (ділянка OA), отже, тут справджується закон Ома. На ділянці AB струм зростає повільніше від напруги — тут залежність нелінійна і закон Ома не виконується. Ділянка BC характеризується струмом насиження I_n — максимальною силою струму, можливою за даних інтенсивності йонізації, тиску газу та напруженості електричного поля, коли всі утворені йони й електрони, не встигаючи рекомбінувати, досягають електродів. Якщо й надалі підвищувати напругу, відбудеться пробій газового проміжку (ділянка CD) й несамостійний розряд перетвориться на *самостійний*, тобто такий газовий розряд, який відбувається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.

Електричний розряд у газі, що зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, називається **самостійним газовим розрядом.**

Які саме причини різкого збільшення сили струму за великої напруги? Розглянемо пару заряджених частинок (позитивний йон і електрон), що утворилася завдяки дії зовнішнього йонізатора. Вільний електрон, що з'явився в такий спосіб, починає рухатися до позитивного електрода — анода, а позитивний йон — до катода. На своєму шляху електрон зустрічає йони та нейтральні атоми. У проміжках між двома послідовними зіткненнями енергія електрона збільшується за рахунок роботи сил електричного поля.

Що більшою є різниця потенціалів між електродами, то більша напруженість електричного поля. Кінетична енергія електрона перед черговим зіткненням пропорційна напруженості поля та довжині вільного пробігу електрона.

Якщо кінетична енергія електрона перевищує енергію йонізації, то, зіткнувшись з атомом (або молекулою), він їх йонізує. У результаті замість одного електрона матимемо два (другий — вибитий з атома). Уже два електрони прискорюються полем та йонізують зустрічні атоми й т. д. Унаслідок цього кількість заряджених частинок швидко наростає, виникає *електронна лавина* (мал. 59). Що стосується йонів, то вони, рухаючись в



Мал. 59. Схема процесу ударної йонізації

електричному полі, також збільшують свою енергію. Але повністю віддати її нейтральному атому (молекулі), тим самим іонізуючи його, іон не може, оскільки має масу, майже однакову з масою атома. Під час зіткнення відбувається лише передавання частини кінетичної енергії (як між більйардними кулями). Легенький же електрон налітає на атом, як на стіну, повністю віддаючи йому свою набуту енергію.

Описаний процес називають *іонізацією електронним ударом*. Але іонізація електронним ударом не може забезпечити підтримки самостійного розряду. Справді, адже всі електрони, що виникають у такий спосіб, рухаються в напрямку до анода і, після досягнення анода, «вибувають із гри». Для підтримки розряду необхідна емісія електронів з катода, якої можна досягти кількома способами.

Залежно від властивостей і стану газу, характеру й розташування електродів, а також від прикладеної до електродів напруги виникають різні види самостійного розряду: тліючий, коронний, іскровий та дуговий розряди (табл. 5).

Таблиця 5

Тліючий розряд спостерігається в газах або парах за низького тиску (в межах кількох десятків міліметрів ртутного стовпа та меншого)



За нормального тиску в газі, що перебуває в сильно неоднорідному електричному полі (наприклад, біля загострень або дротів ліній високої напруги), спостерігається розряд, світла область якого часто нагадує корону. Тому його й назвали **коронним розрядом**

Іскровий розряд виникає в газі за нормального тиску за наявності електричного поля напруженістю, не меншою від напруження пробою (для повітря це $3 \frac{МВ}{м}$)



Якщо приєднати до полюсів великої електричної батареї два шматочки деревного вугілля, доторкнути їх, а потім злегка розсунути, то між кінцями вугілля утворюється яскраве полум'я, а кінці шматочків вугілля розжарюються, випускаючи **дуговий розряд** (або електричну дугу)

Плазма. За подальшого нагрівання газу (або опромінення) можна отримати такий його стан, у якому атоми й молекули будуть частково або повністю іонізованими, а густина позитивних і негативних зарядів — практично однаковою. Такий газ називають плазмою. Плазма має специфічні властивості, що дає змогу розглядати її як особливий — четвертий стан речовини. На відміну від нейтрального газу, між молекулами якого існують короткодіючі сили, між зарядженими частинками плазми діють кулонівські сили, що порівняно повільно зменшуються з відстанню. Кожна частинка взаємодіє відразу з великою кількістю навколошніх частинок. Завдяки цьому разом з хаотичним тепловим рухом частинки плазми можуть брати участь у різноманітних упорядкованих рухах. У плазмі легко збуджуються різного роду коливання та хвилі.

Плазма характеризується ступенем іонізації: відношенням об'ємної концентрації заряджених частинок до загальної об'ємної концентрації частинок. Залежно від ступеня іонізації плазму поділяють на слабко іонізовану (становить частки відсотків), частково іонізовану (порядку декількох відсотків) і повністю іонізовану (близьку до 100 %). Слабо іонізованою плазмою в природних умовах є верхні шари атмосфери — йоносфера. Сонце, гарячізорій міжзоряна речовина — це повністю іонізована плазма, яка утворюється за високих температур. Зважаючи на масштаби Всесвіту, можемо стверджувати, що основним станом речовини є стан плазми.

Розглядають високотемпературну ($T > 10^6$ °C) і низькотемпературну ($T < 10^5$ °C) плазми. Низькотемпературна плазма застосовується в газорозрядних джерелах світла. У сучасних плоских екранах моніторів і телевізорів використовують або рідкокристалічні матриці, або пікселі, наповнені плазмою. Кожний піксель містить капсули, покриті червоним, синім і зеленим люмінофором, що світяться завдяки вміщенню у них плазмі, свічення якої регулює подача електричних сигналів.

Про електричний струм у вакуумі читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як відбувається іонізація газів? Наведіть приклади іонізаторів газу.
2. Поясніть вольт-амперну характеристику несамостійного розряду в газі.
3. Поясніть явище ударної іонізації.
4. Який розряд називають самостійним? Наведіть приклади самостійних розрядів і поясніть умови їх виникнення.



Перевірте себе (§ 7–13)

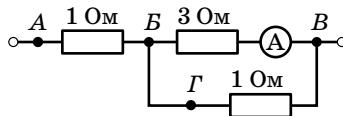


1. Укажіть назву величини, що характеризує швидкість перенесення електричного заряду через поперечний переріз провідника.

А робота струму	В сила струму
Б електрорушійна сила	Г потужність струму
2. У якому середовищі здійснюється перенесення речовини під час проходження струму?

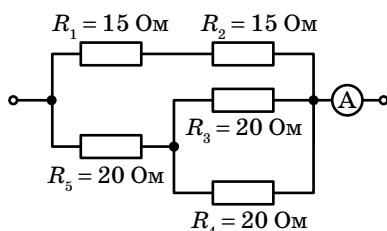
А у металах	В у напівпровідниках
Б в електролітах	Г у будь-якому середовищі
3. Укажіть рядок, у якому наведено лише діелектрики.

А вода, ртуть, олія	
Б залізо, алюміній, магній	
В повітря, скло, водний розчин соляної кислоти	
Г слюда, парафін, спирт	
4. У колі, зображеному на малюнку, амперметр показує 1 А. До яких точок кола потрібно під'єднати вольтметр, щоб його покази були 4 В?



- | | |
|------------------|------------------|
| A до точок А і Б | B до точок В і Г |
| B до точок Б і В | G до точок А і В |
5. Укажіть джерело світла, в якому використовується розряд у газі.

A люмінесцентна лампа	B світлодіод
B лампа розжарення	G прожектор
 6. За даними малюнка визначте кількість теплоти, яка виділяється в колі протягом 20 хв.



7. Через розчин сірчаної кислоти пропустили заряд $2 \cdot 10^5$ Кл. Визначте масу та об'єм утвореного водню за нормальних умов ($p_{\text{атм}} = 10^5$ Па, $T = 273$ К), густина водню $0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
8. Три гальванічні елементи, ЕРС яких 2,2 В; 1,1 В; 0,9 В, а внутрішні опори відповідно 0,2 Ом; 0,4 Ом; 0,5 Ом, увімкнені в коло послідовно та створюють струм 1 А. Визначте зовнішній опір кола.

§ 14

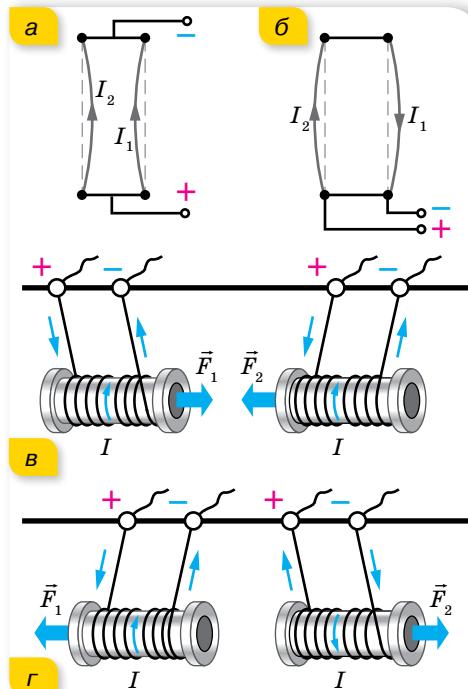
Магнітна взаємодія. Закон Ампера

Електрична та магнітна взаємодія.

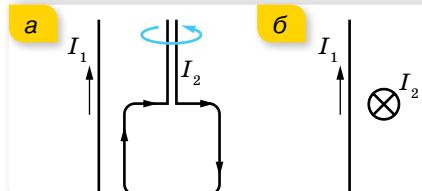
Як ми знаємо, нерухомі електричні заряди взаємодіють між собою через електричне поле. Рухомі — через електричне й магнітне. Якщо по двох паралельних гнучких провідниках проходять струми в одному напрямку (мал. 60, а), то провідники притягуються один до одного. Якщо струми протилежних напрямків — провідники відштовхуються (мал. 60, б). Взаємодіють між собою, притягуючись або відштовхуючись, не лише прямолінійні провідники зі струмом, а й провідники довільної форми, по яких протікає струм, наприклад, провідники у вигляді прямокутних рамок, витків. Така сама взаємодія відбувається й між катушками зі струмом (мал. 60, в, г).

Взаємодія провідників зі струмом не завжди обмежується притяганням або відштовхуванням. Якщо, наприклад, маленьку прямокутну рамку, по якій тече електричний струм, розташувати поблизу прямолінійного провідника зі струмом, то рамка повернеться та розташуватиметься так, щоб її площаина перебувала у площині провідника (мал. 61, а). Ще один приклад. Два прямолінійні провідники зі струмом, розташовані так, як показано на малюнку 61, б (у провіднику 2 струм напрямлений від нас), взагалі не взаємодіють.

Описані взаємодії між електричними струмами¹ (тобто рухомими електричними зарядами) не можна пояснити, виходячи із законів електростатики. Такий тип взаємодії називають *магнітною*. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на один, називають *магнітними силами*.



Мал. 60. Взаємодія провідників зі струмом: а, в — притягання; б, г — відштовхування



Мал. 61. Обертання рамки зі струмом — а; відсутність взаємодії двох взаємно перпендикулярних провідників, по яких проходять струми, — б

¹ Словом «струми» для спрощення замінюється фраза «проводники, якими проходить електричний струм».

Індукція магнітного поля. Під час з'ясування природи взаємодії провідників зі струмом постає таке саме питання, як у випадку вивчення взаємодії заряджених тіл. Яким чином передається взаємодія на відстані?

Як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле, так у просторі, що оточує рухомі електрично заряджені частинки, виникає, крім електричного поля, ще й магнітне. І тому, розглядаючи взаємодію струмів, маємо не просто говорити, що один струм діє на інший, а що електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на елемент струму в другому провіднику.

Магнітне поле (стационарне) — форма матерії, окрім вияв електромагнітного поля. Породжується рухомими електричними зарядами (струмами).

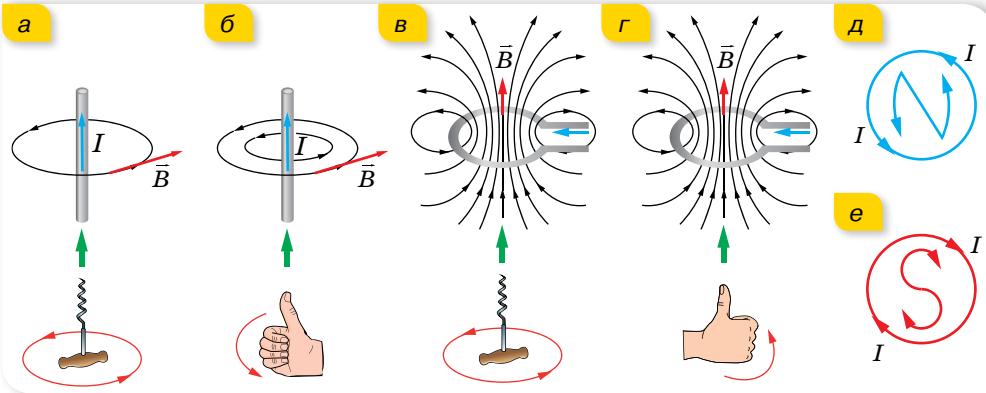
Дослідження, присвячені взаємодії струмів, доводять, що магнітні поля різних струмів відрізняються силою своєї дії. До того ж поле одного й того самого струму на різних відстанях від нього різне. Це спонукає до введення фізичної величини, яка б кількісно описувала магнітне поле. Пригадаймо, вивчаючи електростатичне поле, ми ввели силову характеристику — *напруженість* \vec{E} цього поля, яка визначається відношенням сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд у певній точці поля, до значення цього заряду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Провівши аналогічні дослідження магнітного поля, було введено силову характеристику, яка називається *індукцією магнітного поля*. Позначають вектор магнітної індукції літерою \vec{B} .

Оскільки сила F магнітного поля діє на елемент струму $I\Delta l$, модуль вектора магнітної індукції визначається співвідношенням $B = \frac{F}{I\Delta l}$.

Магнітна індукція \vec{B} — це фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля й вимірюється відношенням сили, з якою магнітне поле діє на елемент струму, розташований у деякій точці простору, до величини цього елемента струму.

Одиниця магнітної індукції — тесла, її названо на честь сербського вченого, електротехніка Ніколи Тесли, $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$.

Наочну картину магнітного поля можна отримати, якщо побудувати **силові лінії поля (лінії магнітної індукції)**. Це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямком з вектором магнітної індукції \vec{B} . Важливою особливістю ліній магнітної індукції є те, що вони не мають ні початку, ні кінця. Вони завжди замкнені. Поля із замкненими силовими лініями, як ви вже знаєте, називають **вихровими**.



Мал. 62. Визначення напрямку вектора індукції магнітного поля за правилом:
а, в — свердлика; б, г — правої руки; д, е — букв

Індукція магнітного поля, так само як і напруженість електричного поля, — векторна величина. На відміну від вектора напруженості електричного поля, який напрямлений так само, як і сила, що діє на позитивний заряд, розміщений у цьому полі, напрямок вектора індукції магнітного поля не збігається з напрямком вектора сили, що діє на елемент струму в магнітному полі. Для визначення напрямку вектора \vec{B} існують певні правила (сформулюйте їх, розглядаючи малюнок 62).

Залежно від форми провідників, індукція створюваних ними магнітних полів визначається за такими формулами (табл. 6).

Таблиця 6

Індукція прямолінійного провідника зі струмом:	Індукція в центрі колового витка радіусом r , по якому тече струм I , $B = \mu_0 \frac{I}{2r}$	Індукція всередині котушки: $B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$, тут N — кількість витків, а l — її довжина
$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$		

Для складного магнітного поля, як і для електростатичного, виконується *принцип суперпозиції*:

індукція магнітного поля, створеного кількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, створених кожним із цих струмів окремо, $\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$.



ВІДВІДОВУЮЩІ ВІДВІДОВУЮЩІ

- Як взаємодіють між собою паралельні струми? Що спричинює їх взаємодію?
- Дайте визначення одиниці сили струму в системі одиниць СІ.
- Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження

потрібно розуміти? 4. Для вивчення електричного поля користуються пробним електричним зарядом. Чим, за аналогією користуються, вивчаючи магнітне поле? 5. Яка з величин, що характеризують магнітне поле, є аналогом напруженості електричного поля? У чому основна відмінність цих величин?



Експериментуємо

Визначте напрямок струму в провіднику. Обладнання: джерело струму з прихованими позначеннями полюсів, магнітна стрілка, з'єднувальні провідники, вимикач.



Приклади розв'язування задач

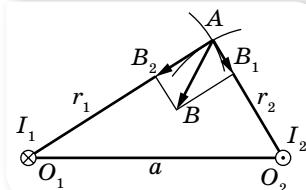
Задача. Два довгі прямолінійні паралельні провідники розміщені на відстані 50 см один від одного. У першому провіднику сила струму дорівнює 20 А, у другому — 24 А. Визначте індукцію магнітного поля в точці A , яка розміщена на відстані 40 см від першого провідника і 30 см від другого, якщо струми в них напрямлені в протилежні боки. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.

Дано:

$$\begin{aligned} I_1 &= 20 \text{ А} \\ I_2 &= 24 \text{ А} \\ a &= 0,5 \text{ м} \\ r_1 &= 0,4 \text{ м} \\ r_2 &= 0,3 \text{ м} \\ \mu &= 1 \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \\ B &=? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Зробимо малюнок до задачі (мал. 63). Проведемо з точки O_1 , де розміщено перший провідник, дугу кола радіусом r_1 . Аналогічно проведемо дугу кола радіусом r_2 з точки O_2 . Оскільки вектор індукції напрямлений по дотичній до магнітної силової лінії, то $\vec{B}_1 \perp O_1A$, $\vec{B}_2 \perp O_2A$.



Мал. 63

Згідно з принципом суперпозиції, індукція \vec{B} магнітного поля в точці A є векторною сумою \vec{B}_1 і \vec{B}_2 , утворених у цій точці струмами I_1 і I_2 . Модуль індукції поля, утвореного кожним струмом окремо, визначається формулою $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$. Модуль сумарного вектора \vec{B} визначимо за теоремою Піфагора: $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$, оскільки трикутник AO_1O_2 прямокутний. Підставимо в цю формулу вирази для B_1 і B_2 та обчислимо числове значення B :

$$B = \sqrt{\frac{\mu^2 \mu_0^2 I_1^2}{4\pi^2 r_1^2} + \frac{\mu^2 \mu_0^2 I_2^2}{4\pi^2 r_2^2}} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2}};$$

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{20^2 \text{ А}^2}{0,16 \text{ м}^2} + \frac{24^2 \text{ А}^2}{0,09 \text{ м}^2}} = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$$

Відповідь: $B = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$



Вправа 11

- По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямку течуть струми I_1 і I_2 . Визначте індукцію магнітного поля в точці A , що лежить на продовженні прямої, яка сполучає провідники, на відстані s від другого провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
- Два паралельні провідники, з однаковою силою струму в них, розташовані на відстані 8,7 см один від одного й притягуються із силою $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Визначте силу струму в провідниках, якщо довжина кожного з них 320 см, струми напрямлені в один бік. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
- По двох довгих прямих провідниках, що розміщені на відстані 5 см один від одного, протікають струми по 10 А в одному напрямку. Визначте індукцію магнітного поля в точці, що лежить на відстані 3 см від кожного провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.

§ 15

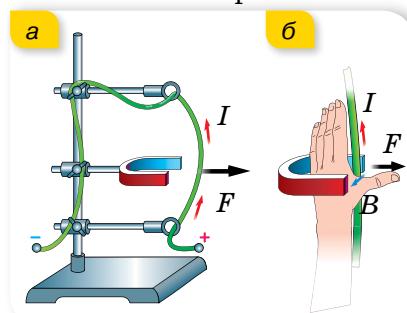
Дія магнітного поля

Сила Ампера. Якщо прямий провідник розмістити між полюсами постійного магніту та пропустити по провіднику струм, то він почне відхилятися від початкового положення (мал. 64, а). Рух провідника пояснюється взаємодією двох полів: магнітного поля, що створюється струмом, і поля постійного магніту. У 9 класі ми вже дослідили, від чого залежить сила, яка діє на провідник зі струмом, що міститься в однорідному магнітному полі (її називають силою Ампера). Пригадаймо.

Сила Ампера, що діє на провідник у магнітному полі, тим більша, що більший струм проходить провідником і що сильнішим є магнітне поле, в якому він розміщений. Також сила Ампера залежить від довжини провідника зі струмом і його розташування в магнітному полі. До речі, пригадаймо, що ділянку магнітного поля між полюсами магніту можна вважати однорідним магнітним полем, силові лінії якого паралельні.

У випадку однорідного магнітного поля сила Ампера визначається за формулою $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, тут α — кут між напрямком струму I в провіднику та індукцією магнітного поля B . Максимальне значення сили Ампера має, коли провідник розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля, $F_{A\max} = BI\Delta l$.

Напрямок сили Ампера визначають за правилом **лівої руки** (мал. 64, б): якщо розмістити ліву руку вздовж провідника так, щоб чотири пальці вказували напрямок струму в ньому, а лінії маг-



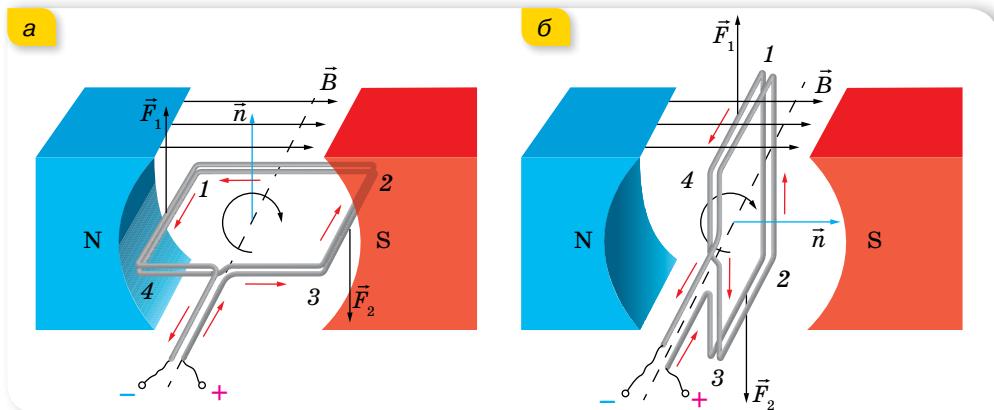
Мал. 64. До визначення сили Ампера: а — схема установки для дослідження дії магнітного поля на провідник зі струмом; б — ілюстрація правила лівої руки

нітної індукції входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом.

Обертання прямокутної рамки зі струмом у магнітному полі. Розглянемо прямокутний контур (рамку), що може обертатися навколо горизонтальної осі (мал. 65, а). У початковий момент площаина рамки паралельна лініям індукції однорідного магнітного поля постійного магніту. У більшості випадків розглядають орієнтацію рамки, вказуючи, як розташована нормаль \vec{n} до рамки щодо ліній індукції магнітного поля.

Пропустимо електричний струм рамкою (напрямок струму вказано червоними стрілочками). Цей струм створює магнітне поле, вектор індукції якого можна визначити за правилом свердлика. Оскільки цей напрямок збігається з вектором нормалі до площини рамки, то на малюнку показано тільки його позначення.

У провідниках 1–4 і 2–3 магнітні сили \vec{F}_1 і \vec{F}_2 утворюють пару сил, які обертають рамку. У нашому випадку — за годинниковою стрілкою. У положенні б ці сили вже не обертають рамку, а деформують її.



Мал. 65. Дія сил Ампера: а — повертають рамку за ходом годинникової стрілки; б — розтягають рамку

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в електрических двигунах.

Дія магнітного поля на провідник зі струмом лежить в основі принципу роботи електровимірювальних приладів. Детальніше про це прочитайте в електронному додатку.



Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі. Голландський учений Гендрік Лоренц пояснив існування сили Ампера тим, що магнітне поле діє на рухомі заряди в провіднику зі струмом. Оскільки ці заряди вирватися з провідника не можуть, загальна сила, яка діє на них, прикладена до всього провідника. Таким чином, сила Ампера є сумою сил, які діють на вільні заряди в провіднику зі струмом. Це припущення дає змогу визначити силу, що діє на один рухомий заряд у магнітному полі. Цю силу називають *силою Лоренца*.

Сила Лоренца F_L — сила, що діє з боку магнітного поля на рухому зарядженню частинку.

Одержано вираз для визначення сили Лоренца з виразу для сили Ампера, підрахувавши кількість рухомих заряджених частинок у провіднику. Нехай N — загальна кількість вільних зарядів у провіднику зі струмом. У металі такими зарядами є електрони і, як відомо, $I = vneS$, де e — заряд електрона, v — модуль швидкості його руху, S — площа по-перечного перерізу провідника, n — концентрація вільних електронів.

Тоді $F_A = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneSl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneV}{N} \sin \alpha$. Ураховуючи, що $nV=N$, отримуємо вираз для обчислення сили Лоренца $F_L = eBv \sin \alpha$, тут α — кут між векторами швидкості \vec{v} та індукції \vec{B} .

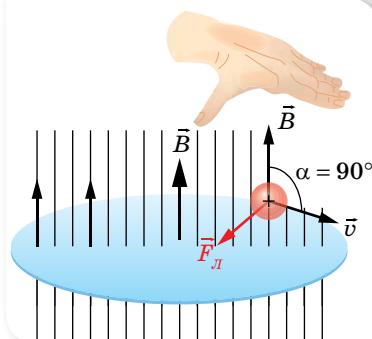
У загальному випадку (для довільних заряджених частинок) вираз для обчислення сили Лоренца має вигляд $F_L = qBv \sin \alpha$, де q — електричний заряд частинки.

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом *лівої руки* (мал. 66). Застосовуючи його, слід пам'ятати, що коли в магнітному полі рухається *позитивно заряджена частинка*, то чотири пальці треба спрямувати в бік її руху, якщо ж рухається *негативно заряджена частинка*, то витягнуті чотири пальці треба спрямувати проти вектора швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{v} та \vec{B} , а отже, напрямку переміщення частинки, вона не виконує роботи й не може змінювати кінетичну енергію частинки. Сила Лоренца лише викриває траекторію руху частинки, тобто є доцентровою силою. Припустимо, що заряджена частинка, заряд якої q і маса m , влітає зі швидкістю \vec{v} в однорідне магнітне поле індукцією \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$) (мал. 67, а). Крапки на малюнку вказують на те, що лінії магнітної індукції перпендикулярні до площини сторінки й напрямлені до читача.)

Тоді $qBv = \frac{mv^2}{r}$. У цьому разі заряд рухатиметься по колу радіусом $r = \frac{m}{qB} v$.

Якщо швидкість частинки напрямлена під кутом α до ліній індукції, то заряд рухатиметься по гвинтовій траекторії навколо ліній індукції поля (мал. 67, б). Дійсно, вектор \vec{v} можна розкласти на складові v_{\parallel} (уздовж ліній індукції) та v_{\perp} (перпендикулярно до ліній індукції). v_{\perp} визначає радіус витка r , а v_{\parallel} з часом не змінюється (у цьому напрямку не діє сила).

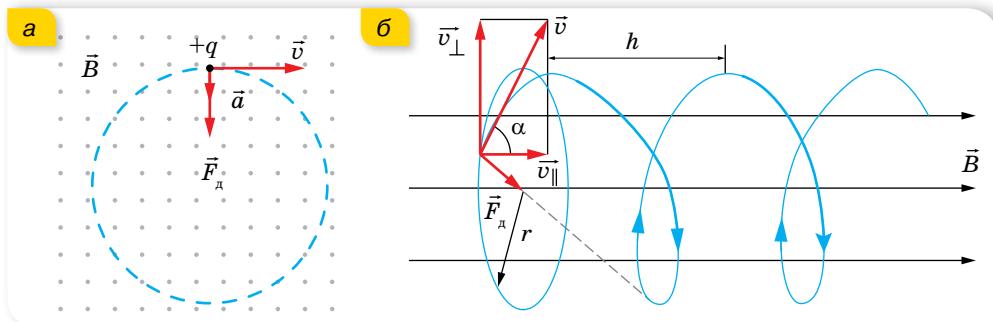


Мал. 66. Визначення напрямку сили Лоренца

Про використання сили Лоренца в техніці читайте в електронному додатку.



Якщо заряджена частинка зробить один виток протягом часу T , то вздовж лінії індукції за цей час вона зміститься на відстань $h = v_{\parallel}T$ ($v_{\parallel} = v \cos \alpha$, $v_{\perp} = v \sin \alpha$, а h є кроком гвинтової лінії).



Мал. 6.7. Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі: а — за умови $\vec{v} \perp \vec{B}$; б — за умови, що напрямок швидкості утворює кут α відносно лінії індукції



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Від чого залежить модуль сили Ампера? Як визначити її напрямок?
- Прискорена заряджена частинка влітає першого разу в поперечне електричне поле, другого разу — у поперечне магнітне поле. Поля протяжні й частинка не вилітає за їх межі. Якими будуть траєкторії частинки в кожному випадку?



Приклади розв'язування задач

Задача. Йони двох ізотопів Калію масами 39 і 41 а.о.м., одержавши кінетичну енергію в електричному полі, влітають в однорідне магнітне поле з індукцією 0,16 Тл перпендикулярно до ліній індукції. Визначте, на скільки будуть відрізнятися радіуси траєкторій іонів ізотопів у магнітному полі, якщо їх рух відбувається у вакуумі, заряд кожного йона дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а в електричному полі всі йони проходять різницю потенціалів 500 В.

Дано:

$$m_{39} = 39 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$m_{41} = 41 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$U = 500 \text{ В}$$

$$B = 0,16 \text{ Тл}$$

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\Delta r — ?$$

Розв'язання:

Оскільки сила Лоренца, що діє на іон ізотопу Калію в магнітному полі, є відцентровою силою, радіус траєкторії цього йона можна визначити із співвідношення $Bvq = \frac{mv^2}{r}$.

Швидкість руху йона можна визначити з формули для кінетичної енергії, урахувавши, що цю енергію одержано завдяки роботі сил електричного поля, тобто $\frac{mv^2}{2} = qU$. Звідси визначимо швидкість руху йона $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$.

Визначимо r з виразу для відцентрової сили:

$$r = \frac{mv}{Bq} = \frac{m}{Bq} \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2qUm^2}{q^2m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{q}}.$$

Обчислюємо радіуси r_2 і r_1 траєкторій йонів різних ізотопів і визначаємо різницю $r_2 - r_1$:

$$r_1 = \frac{1}{0,16 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \text{ В} \cdot 39 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,1257 \text{ м},$$

$$r_2 = \frac{1}{0,16 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \text{ В} \cdot 41 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,129 \text{ м},$$

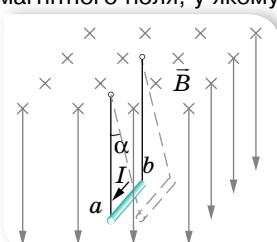
$$\Delta r = r_2 - r_1 = 0,129 \text{ м} - 0,1257 \text{ м} = 0,0033 \text{ м.}$$

Відповідь: 0,0033 м.



Вправа 12

- По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А. Визначте індукцію (модуль і напрямок) магнітного поля, у якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.
- Провідник ab , що має довжину l і масу m , підвісили на тонких дротинках. По провіднику пропустили струм I , і він відхилився в однорідному магнітному полі (мал. 68) так, що дротинки утворили кут α з вертикальлю. Визначте індукцію магнітного поля. Якщо є можливість, визначте в такий спосіб середню індукцію магнітного поля підковоподібного магніту.
- Визначте магнітний момент електрона атома Гідрогену, що рухається по коловій орбіті радіусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м навколо ядра.
- В однорідне магнітне поле з індукцією 0,085 Тл влітає електрон зі швидкістю $4,6 \cdot 10^7 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, направленою перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте силу, яка діє на електрон в магнітному полі, і радіус дуги кола, по якій він рухається. Рух відбувається у вакуумі.
- Протон та електрон влітають в однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярно до ліній індукції. У скільки разів радіус кривизни траєкторії протона більший за радіус кривизни траєкторії електрона?



Мал. 68



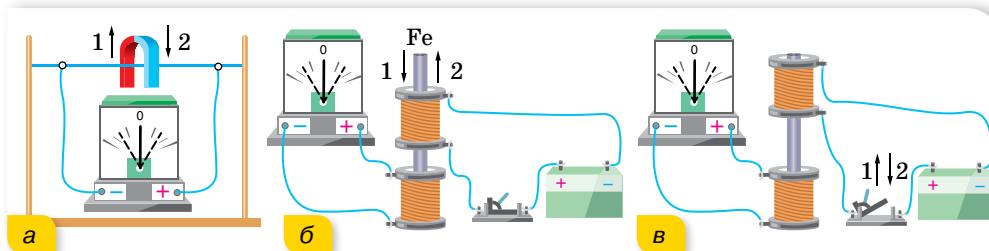
Виконуємо навчальні проекти

- Роль магнітосфери в еволюції Землі.
- Магнітні поля у Всесвіті.
- Вплив магнітного поля на організми.

§ 16

Електромагнітна індукція

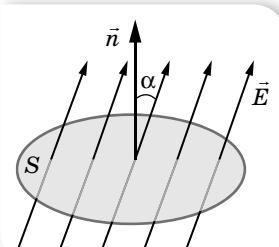
Потік магнітної індукції. Після відкриття Ганса Ерстеда, який довів, що навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, природно було б поставити питання про можливість утворити електричний струм у провідниках за допомогою магнітного поля. Як ви знаєте з курсу фізики 9 класу, над розв'язанням цієї проблеми працював англійський фізик Майкл Фарадей. Відкрите ним явище називається **електромагнітною індукцією**, суть якого в тому, що в замкнутому провіднику (контурі) виникає електричний струм (індукційний струм) за умови зміни магнітного поля, що проходить крізь контур (мал. 69). Для реалізації цього явища не важливо, рухається провідник або джерело магнітного поля чи ні.



Мал. 69. Досліди з виявлення явища електромагнітної індукції

Щоб дати точне кількісне пояснення розглянутого явища, треба ввести величину — **потік магнітної індукції** (або, як кажуть, **магнітний потік**).

Потік магнітної індукції Φ — це фізична величина, яка характеризує магнітне поле, що пронизує певну поверхню площею S . Якщо індукція B в усіх точках поверхні одна, то $\Phi = BS \cos \alpha$, де α — кут між вектором магнітної індукції та нормаллю до поверхні (мал. 70).



Мал. 70.
До визначення
магнітного потоку

Одиниця магнітного потоку — вебер, $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{А}}$.

Визначення явища електромагнітної індукції відповідно формулюють так: явище виникнення в замкненому провіднику електричного струму внаслідок зміни магнітного потоку, що пронизує контур провідника.

Якщо в котушку, сполучену з гальванометром, вставити магніт, а потім рухати його разом так, щоб вони одне відносно одного залишались у спокої, то індукційний струм не виникнеть (магнітний потік, що пронизує контур котушки, залишається сталою). Не виникає індукційний струм і в разі

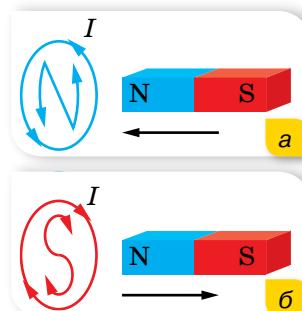
поступального руху замкненого провідника в однорідному полі вздовж силових ліній.

Напрямок індукційного струму. Правило Ленца. Майкл Фарадей, аналізуючи проведені досліди, встановив, що напрямок індукційного струму в провіднику залежить від того, збільшується ($\Delta\Phi > 0$) чи зменшується ($\Delta\Phi < 0$) магнітний потік через його контур. Загальне правило, за допомогою якого можна визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику, сформулював у 1833 р. російський фізик Емілій Християнович Ленц (1804–1865).

Індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрямок, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм. (Правило Ленца випливає із закону збереження енергії.)

Поєднуючи правило Ленца з правилом свердлика (букв), за допомогою якого визначають напрямок вектора індукції магнітного поля в центрі колового струму, легко визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику. Припустімо, що до замкненого витка (чи котушки) наближається зі швидкістю v постійний магніт північним полюсом N (мал. 71, а). При цьому магнітний потік через контур витка зростає ($\Delta\Phi > 0$). Отже, за правилом Ленца, у витку повинен виникнути індукційний струм такого напрямку, щоб власним магнітним полем протидіяти зростанню зовнішнього магнітного потоку. Для цього потрібно «не пустити» магніт у виток, тобто відштовхнути його. Це означає, що внутрішнє магнітне поле індукційного струму буде напрямлене проти зовнішнього поля постійного магніту. Отже, робимо висновок, що з того боку витка (чи котушки), який повернуто до магніту, з'являється однайменний полюс N (якби до витка наблизився магніт південним полюсом S , то з цього боку виникав би південний полюс магнітного поля індукційного струму). Далі міркуємо так. Для того щоб назустріч постійному магніту утворився полюс N індукційного струму, потрібно, аби поступальне переміщення свердлика відбувалось зліва-направо, тобто його ручку треба обертати проти стрілки годинника (дивимось на виток з боку магніту). Напрямок цього обертання і вказує напрямок індукційного струму. (Замість правила свердлика можна також скористатися правилом букв, уписаних у виток (мал. 71).)

З віддаленням постійного магніту від витка (мал. 71, б) магнітний потік через його контур зменшується ($\Delta\Phi < 0$). Щоб протидіяти цьому, потрібно «не відпускати» магніт, тобто притягувати його. Це означає, що магнітне поле індукційного струму буде однакового напрямку із зовнішнім, тобто з боку магніту матиме південний полюс S . За правилом



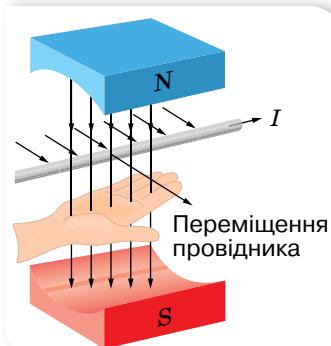
Мал. 71. Визначення напрямку індукційного струму

свердлика (чи букв) з'ясовуємо, що індукційний струм у витку має проходити за стрілкою годинника.

У випадку виникнення індукційного струму в прямому провіднику (який є ділянкою замкненого кола і рухається в зовнішньому магнітному полі перпендикулярно до ліній індукції, тобто перетинає їх), напрямок індукційного струму можна визначити за правилом *правої руки*:



праву руку треба розмістити в магнітному полі так, щоб силові лінії входили в долоню, а відставлений під прямим кутом великий палець збігався з напрямком переміщення провідника. Тоді чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок індукційного струму в цьому провіднику (мал. 72).



Мал. 72. Визначення напрямку індукційного струму за правилом правої руки

Закон електромагнітної індукції. Переїдемо до кількісного формулювання закону електромагнітної індукції. Індукційний струм I_i у замкненому провіднику опором R виникає під дією електрорушійної сили індукції ε_i , яку можна виразити за законом Ома: $\varepsilon_i = I_i R$.

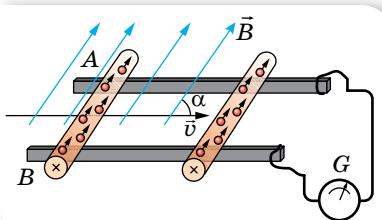
Оскільки та само ЕРС у провідниках з різними опорами створює неоднакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватися величиною ЕРС індукції ε_i , а не силою індукційного струму I_i .

Майкл Фарадей у ході досліджень установив, що ЕРС індукції, яка виникає при зміні магнітного потоку через контур провідника, прямо пропорційна швидкості зміни цього потоку $\varepsilon_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Якщо ЕРС індукції спостерігається в катушці з N витків, то її величина буде відповідно в N разів більшою, ніж для одного витка, тобто $\varepsilon_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

ЕРС індукції, як і електрорушійна сила будь-якого іншого походження, вимірюється у вольтах. Тоді одиницю магнітного потоку в СІ — вебер — можна записати так: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Виникнення ЕРС під час руху провідника в магнітному полі. Звернемося до питання про природу ЕРС індукції. Спочатку розглянемо механізм виникнення ЕРС індукції під час руху провідника в стаціонарному магнітному полі.

Нехай в однорідному магнітному полі індукцією B розміщено прямолінійний металевий провідник, довжиною l , який може ковзати по паралельних стержнях (мал. 73, с. 76). При цьому швидкість руху провідника v направлена під кутом α до вектора \vec{B} . Під час руху провідника зі швидкістю v будуть рухатись і його власні електрони та іони. А оскільки вони рухаються в магнітному полі, то на кожний іон та електрон діє сила



Мал. 73. До пояснення механізму виникнення ЕРС у рухомому провіднику

Лоренца. Якщо йони під впливом сили Лоренца не покидають положень стійкої рівноваги у вузлах кристалічних граток, то вільні електрони провідника зміщуються до одного його кінця *A*, залишаючи на другому кінці *B* надлишок позитивних зарядів. Це розділення зарядів триватиме доти, поки вони не створять усередині провідника таке електростатичне поле (напрямлене від *B* до *A*), у якому на електричні заряди провідника діятиме сила, рівна за значенням і протилежна за напрямком силі Лоренца. Отже, зміщення електронів до кінця *A* припиниться за умови: $F_e = F_{\text{л}}$. Оскільки $F_e = eE = e \frac{U}{l}$, а $F_{\text{л}} = evB \sin \alpha$, маємо $e \frac{U}{l} = evB \sin \alpha$, звідки $U = Blv \sin \alpha$.

Оскільки напруга на полюсах в разі розімкненого кола дорівнює ЕРС, то ЕРС індукції, яка виникає в провіднику під час його руху в магнітному полі, визначається формулою $\epsilon_i = Blv \sin \alpha$.

Таким чином, причиною виникнення ЕРС індукції в рухомому провіднику є сила Лоренца.

ЕРС індукції такої природи виникає в будь-якому провіднику, коли він рухається в магнітному полі так, що його швидкість перпендикулярна до його власної довжини й утворює з вектором індукції магнітного поля кут α (іншими словами, коли він перетинає лінії індукції магнітного поля). Провідник стає джерелом ЕРС. Цю властивість використовують на електростанціях.

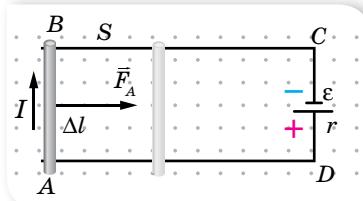
Індукційне електричне поле. Розглянемо випадок утворення індукційного струму в замкненому провіднику, коли змінюється магнітний потік через площину, обмежену цим провідником, але ніякого відносного руху немає. Магнітне поле, що пронизує контур, у цьому разі привести заряди в рух не може, оскільки воно діє лише на рухомі заряди (розуміло, хаотичний тепловий рух не враховуємо). Проте на нерухомі заряди може діяти електричне поле. Якщо це так, то звідки це поле з'являється? Можливо, саме змінне магнітне поле може створювати (індукувати) електричне поле, яке вже й збуджує в замкненому провіднику індукційний струм?

Таке припущення вперше висловив Джеймс Максвелл. Розвиваючи цю ідею, він створив теорію **електромагнітного поля**, яка була підтверджена численними дослідами. За теорією Максвелла, у просторі, де існує змінне магнітне поле, обов'язково виникає так зване **індукційне електричне поле**. Водночас 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 індукційним електричним струмом.

Тепер явище електромагнітної індукції постає перед нами в новому світлі. Головне в ньому — це *процес утворення змінним магнітним полем*

індукційного електричного поля. Суть явища електромагнітної індукції в нерухомому провіднику полягає не стільки у виникненні індукційного струму, скільки у виникненні електричного поля, яке приводить у рух електричні заряди.

Видатний німецький дослідник Герман Гельмгольц (1821–1894) вивів формулу для обчислення ЕРС індукції теоретично із закону збереження енергії. Спробуймо й ми. Умістимо в однорідне магнітне поле індукцією B провідник довжиною Δl та опором R , який є ділянкою замкненого кола $ABCD$ (мал. 74). Опором з'єднувальних провідників BC , CD і AD нехтуємо.



Мал. 74. Рух провідника в магнітному полі

Джерело постійного струму, що має ЕРС ε та внутрішній опір r , створює в замкненому колі струм $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, який у провіднику проходить перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля. Водночас на провідник довжиною Δl діє сила Ампера $F_A = BI\Delta l$, у результаті чого провідник переміщується прискорено, і за час Δt пройде шлях s . Під час проходження струму I в замкненому колі $ABCD$ протягом часу Δt виділяється ленц-джоулеве тепло $Q = I^2(R+r)\Delta t$ та виконується механічна робота з переміщення провідника на шляху s : $A = F_A s = BI\Delta l s = BI\Delta S = I\Delta\Phi$. За законом збереження енергії, ці витрати повинні дорівнювати повній роботі джерела струму $A' = \varepsilon I \Delta t$, тобто $\varepsilon I \Delta t = I^2(R+r)\Delta t + I\Delta\Phi$. Після спро-

$\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ щень отримуємо вираз $I = \frac{\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R+r}$. Ця формула виражає закон Ома для замкненого кола, вміщеного в магнітне поле. Роль діючої електрорушійної сили в такому колі відіграє вираз $\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ або $\varepsilon + \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$. Це означає,

що додатковий член $\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$, який відрізняється від нуля тільки при зміні магнітного потоку через контур кола, повинен мати розмірність ЕРС. Отже, він і визначає ЕРС індукції $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Якщо контур складається з N витків, то $\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Цей вираз називають основним законом електромагнітної індукції, або законом Фарадея–Максвелла.

ЕРС індукції ε_i у замкнутому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур, із протилежним знаком, $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Знак « $-$ » є відображенням дії правила Ленца.

Приклади застосування закону електромагнітної індукції. Розглянемо кілька прикладів застосування основного закону електромагнітної індукції для обчислення ЕРС індукції в поодиноких випадках.

Для випадку нестационарного магнітного поля, коли вектор індукції магнітного поля змінюється із часом за незмінних площі контура та його орієнтації ($S = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$), $\varepsilon_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha$.

У разі зміни орієнтації поля (якщо $|\vec{B}| = \text{const}$) або зміни орієнтації контура в стаціонарному полі ($S = \text{const}$), $\varepsilon_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\Delta t}$, де α_1 і α_2 — кути між нормаллю до контура та вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Коли магнітне поле стаціонарне ($\vec{B} = \text{const}$), а орієнтація контура незмінна ($\alpha = \text{const}$), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контура. Її розраховують за формулою $\varepsilon_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{B(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos \alpha$, де S_1 і S_2 — площі контура, на початку й наприкінці, наприклад, руху ділянки контура.

Ці формули можна використовувати для розв'язування багатьох задач.



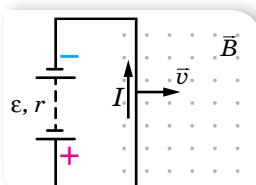
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Щоб одержати індукційний струм у кільці за допомогою магніту, кільце й магніт рухали з відносною швидкістю, що дорівнювала нулю. Чи виникав за таких умов індукційний струм у кільці?
- Чи завжди утворюється індукційний струм у металевому кільці зі зміною в його площині: а) магнітного потоку; б) індукції магнітного поля?
- Магніт у вакуумі вільно падає південним полюсом у центр дротяного кільця. Яким буде напрямок індукційного струму при наближенні магніту до кільця?
- Крізь провідне кільце, розташоване горизонтально, падають з однакової висоти алюмінієвий брускок і магніт. Що впаде першим?



Приклади розв'язування задач

Задача. Прямолінійний провідник завдовжки 1,2 м за допомогою гнуучких дротів приєднали до джерела електричного струму з ЕРС 24 В і внутрішнім опором 0,5 Ом. Провідник розміщують в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 0,8 Тл, направленою на читача (мал. 75). Опір усього зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом. Визначте силу струму в провіднику, коли він рухається перпендикулярно до ліній індукції поля зі швидкістю $12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У скільки разів зміниться сила струму, якщо провідник зупиниться?



Мал. 75

Дано:

$$l = 1,2 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 24 \text{ В}$$

$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$B = 0,8 \text{ Тл}$$

$$v = 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$R = 2,5 \text{ Ом}$$

$$I_1 - ?; \frac{I_2}{I_1} - ?$$

Розв'язання:

Силу струму визначимо із закону Ома для повного кола:

$I = \frac{\varepsilon_0}{r + R}$, де ε_0 — ЕРС, що діє в колі. Під час руху провідника в магнітному полі, крім ЕРС батареї ε , у колі діє ЕРС індукції ε_i . Обчислимо її. Нехай у початковий момент часу площа контура, що перетинає магнітне поле, S_1 . Через час Δt площа $S_2 = S_1 + vl\Delta t$. Тоді $\Delta S = vl\Delta t$, а $\varepsilon_i = -\frac{B\Delta S}{\Delta t} = -Bvl$.

Таким чином, $\varepsilon_0 = \varepsilon + \varepsilon_i$, а $I_1 = \frac{\varepsilon + \varepsilon_i}{r + R}$.

При зупинці провідника ε_i зникає, тому ε_0 буде дорівнювати ε .

Обчислимо ε_i . $\varepsilon_i = -0,8 \text{ Тл} \cdot 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,2 \text{ м} = -12 \text{ В}$.

Сила струму в рухомому провіднику: $I_1 = \frac{24 \text{ В} - 12 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} + 2,5 \text{ Ом}} = 4 \text{ А}$.

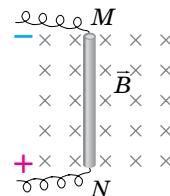
Сила струму в нерухомому провіднику: $I_2 = \frac{24 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} + 2,5 \text{ Ом}} = 8 \text{ А}$.

Визначимо відношення струмів: $\frac{I_2}{I_1} = \frac{8 \text{ А}}{4 \text{ А}} = 2$.

Відповідь: 4 А, 2 рази.

**Вправа 13**

- Провідник MN (мал. 76), довжина активної частини якого 1 м, а опір 2 Ом, міститься в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Провідник приєднали до джерела, ЕРС якого дорівнює 1 В (внутрішнім опором джерела та опором підвідних проводів знектуйте). Визначте силу струму в провіднику, якщо він: а) перебуває в стані спокою; б) рухається праворуч зі швидкістю $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; в) рухається ліворуч з тією самою швидкістю. У якому напрямку і з якою швидкістю треба переміщувати провідник, щоб у ньому не проходив струм?
- Рамка із 25 витків міститься в магнітному полі. Визначте ЕРС індукції, яка виникає в рамці при зміні магнітного потоку в ній від 0,098 до 0,013 Вб за 0,16 с.
- У катушці із 75 витків магнітний потік дорівнює $4,8 \cdot 10^{-3}$ Вб. За який час повинен зникнути цей потік, щоб в катушці виникла середня ЕРС індукції, яка дорівнює 0,74 В?
- Скільки витків повинна мати катушка, щоб при зміні магнітного потоку всередині її від 0,024 до 0,056 Вб за 0,32 с в ній виникла середня ЕРС індукції, яка дорівнює 10 В?
- Прямолінійний провідник рухається зі швидкістю $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ в однорідному магнітному полі з індукцією 0,0038 Тл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Чому дорівнює довжина провідника, якщо на його кінцях різниця потенціалів становить 28 мВ?



Мал. 76

§ 17

Самоіндукція

ЕРС самоіндукції. За законом Фарадея–Максвелла, $\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, електрорушійна сила індукції виникає за будь-яких змін магнітного потоку через контур провідника незалежно від природи цього потоку. *Будь-які зміни власного магнітного потоку, що їх створює струм у провіднику, також спричиняють виникнення в ньому індукційного струму.*

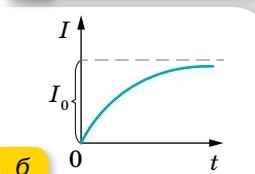
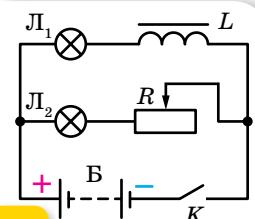
Розглянемо катушку, у якій тече струм силою I від зовнішнього джерела. Цей струм створює в катушці магнітне поле, і тому її витки пронизує власний магнітний потік Φ . Якщо якимось способом змінювати силу струму в катушці (наприклад, за допомогою реостата або замиканням і розмиканням кола), то змінюватиметься і власний магнітний потік катушки. Як показують досліди, одночасно в катушці виникає ЕРС індукції, величину якої можна обчислити за загальним законом Фарадея–Максвелла.

Явище виникнення в провіднику електрорушійної сили індукції за умови зміни власного магнітного потоку, що спричинена зміною сили струму в цьому провіднику, називається самоіндукцією.

Самоіндукція — це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Електрорушійну силу в цьому разі називають ЕРС самоіндукції ε_{ci} . Оскільки власний магнітний потік катушки пропорційний струму I в ній, то ε_{ci} зручніше пов'язати зі швидкістю зміни струму в катушці. Очевидно, $\varepsilon_{ci} \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$ або $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де L — коефіцієнт, що характеризує індивідуальні властивості катушки. Його називають *коефіцієнтом самоіндукції*, або *індуктивністю провідника*.

Визначимо одиницю індуктивності провідника в СІ: $L = -\frac{\varepsilon_{ci} \Delta t}{\Delta I}$; $[L] = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн}$. Одиницю індуктивності назвали на честь американського фізика Джозефа Генрі (1799–1878).

Явище самоіндукції найяскравіше виявляється у виникненні так званих струмів замикання і струмів розмикання в колах, що містять катушки великої індуктивності. Струми замикання можна спостерігати в колі, складеному за схемою, що зображенна на малюнку 77, а. Дві однакові лампи L_1 і L_2 від кишеневого ліхтарика ввімкнено у дві паралельні вітки, одна з яких містить катушку індуктивністю L , а друга — повзунковий реостат R ,



Мал. 77. а — схема для спостереження струмів замикання; б — графік залежності сили струму замикання від часу

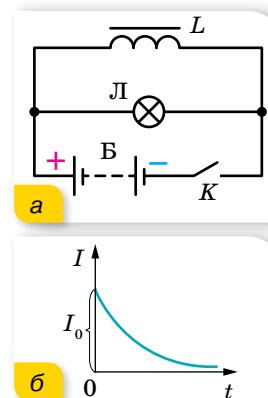
за допомогою якого активні опори обох віток роблять однаковими. Замкнувши коло вимикачем K , ми побачимо, що лампа L_1 починає світити дещо пізніше. Справді, в початковий момент часу сила струму зростає від нуля до деякого значення I_0 (мал. 77, б). Але зі зростанням струму у вітці, що містить катушку індуктивності, зростатиме і власний магнітний потік катушки. До того ж унаслідок явища самоіндукції у вітці з катушкою виникатиме індукційний струм, який, за правилом Ленца, буде напрямлений проти струму, створюваного зовнішнім джерелом ЕРС. Отже, результатуючий струм у вітці, що містить катушку індуктивністю L та опором R , у початковий момент часу буде меншим, ніж у вітці з таким самим за величиною опором R , але без індуктивності. Тому максимальне світіння лампи L_1 у першій вітці настане дещо пізніше, ніж у другій вітці.

Струми розмикання виникають у момент розриву електричного кола, і якщо коло містить катушку великої індуктивності, ці струми можуть бути значними. Струм розмикання наочніше можна спостерігати за допомогою схеми, зображененої на малюнку 78, а. Замкнувши ключ K , почекаємо рівномірного світіння лампи L і розімкнемо коло. Якщо катушка L має достатньо велику індуктивність, ми побачимо, що лампа згасла лише через деякий час після розмикання кола. І в цьому разі зміна (спадання) струму в момент вимикання приводить до виникнення змінного магнітного потоку в катушці, а отже, до виникнення струму самоіндукції.

До того ж, за правилом Ленца, струм розмикання має такий самий напрямок, як і основний струм від зовнішнього джерела. Наявність великої індуктивності в електричному колі або дуже швидка зміна сили струму можуть привести до того, що, нехай і короткочасно, але загальна сила струму значно перевищить робочу силу струму. Як наслідок, прилади, включені в таке коло, вийдуть із ладу. Тому електричні кола з великими індуктивностями вимикають поступово за допомогою реостата, і з тієї ж причини електролампи перегорають найчастіше в момент вимикання або вмикання струму в них.

Явище самоіндукції подібне до явища інерції в механіці. Унаслідок самоіндукції під час замикання кола сила струму не одразу набуває максимального значення. І, навпаки, під час вимикання джерела струм не зникає одразу, а самоіндукція підтримує його деякий час, незважаючи на опір кола. Мірою «інертності» контура відносно змін сили струму в ньому (аналогічно до маси тіла в механіці) в електродинаміці є *індуктивність*, або коефіцієнт самоіндукції контура L .

Індуктивність. Щоб розкрити фізичний зміст індуктивності, вважатимемо, що струм у катушці змінюється зі швидкістю $1 \frac{A}{c}$. Тоді $|\varepsilon_{ei}| = L —$



Мал. 78. а — схема для отримання струмів розмикання; б — графік залежності сили струму розмикання від часу

індуктивність котушки дорівнює тій електрорушійній силі самоіндукції, яка виникає в ній при змінні струму зі швидкістю $1 \frac{\text{A}}{\text{с}}$.

Ураховуючи те, що для нормального соленоїда $\Phi = BS$, а магнітна індукція всередині соленоїда з кількістю витків N і довжиною l дорівнює $B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$, формулу закону електромагнітної індукції у випадку самоіндукції можна записати так: $\varepsilon_{ci} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \frac{I}{\Delta t}$. Порівнюючи цей вираз із формuloю $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, дістаємо формулу для обчислення індуктивності нормального соленоїда: $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$. Цю формулу можна виразити через об'єм соленоїда. Оскільки $S = \frac{V}{l}$, то $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 V}{l^2} = \mu\mu_0 n^2 V$, де n — кількість витків на одиницю довжини $n = \frac{N}{l}$.

З двох виразів для ЕРС самоіндукції, а саме, $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ та $\varepsilon_{ci} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, отримуємо: $L\Delta I = N\Delta\Phi$.

Струм, що проходить у контурі, створює в навколошньому середовищі магнітне поле, причому зчеплений з контуром (або пронизує його) магнітний потік прямо пропорційний струмові.

Енергія магнітного поля. Ми розглянули дослід з виникнення у провідниках струму розмикання. Підкреслимо, що лампа продовжувала світити (струм текти) після вимкнення зовнішнього джерела. Це свідчить про те, що магнітне поле в котушці має енергію. Очевидно, при замиканні електричного кола від джерела струму додаткова енергія була затрачена на створення магнітного поля. За його зникнення енергія частково повертається в коло. Отже, магнітне поле, як і електричне, має енергію.

Енергію магнітного поля котушки індуктивності визначимо на підставі таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується згодом лінійно. У цьому разі ЕРС самоіндукції має постійне значення, що дорівнює $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де t — час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від початкового значення I до 0. За цей час в колі проходить електричний заряд $q = I_{sep}t = \frac{I}{2}t$. Робота електричного струму при цьому

$A = q\varepsilon_{ci} = \frac{It}{2} \cdot \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}$. Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності.

Енергія W_m магнітного поля котушки індуктивності дорівнює половині добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній, $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Пригадаймо, що електрична енергія виражається формулами: $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$, $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ та $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$ — і зосереджена між обкладками зарядженого конденсатора, тобто локалізована в об'ємі електричного поля.

Як і у випадку з конденсатором, магнітна енергія міститься безпосередньо в об'ємі магнітного поля.

Густина енергії магнітного поля. Установимо зв'язок між енергією, яка міститься в одиниці об'єму поля, та індукцією магнітного поля. Цей зв'язок можна встановити, розглянувши будь-який провідник зі струмом, для якого можна обчислити індуктивність та індукцію поля. Найзручніше це зробити для соленоїда, в якого магнітне поле, а отже, й енергія поля, зосереджені в межах його об'єму Sl (S — площа перерізу, l — довжина соленоїда), а індукцію магнітного поля в межах цього об'єму із задовільною точністю можна вважати скрізь однаковою і такою,

що дорівнює $B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$. Індуктивність такого соленоїда $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$.

Підставивши у формулу $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$ вираз для індуктивності $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$

та сили струму $I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$, отримаємо: $W_{\text{м}} = \frac{B^2 Sl}{2\mu\mu_0}$. Оскільки $Sl = V$, то

густина енергії $\omega_{\text{м}} = \frac{W_{\text{м}}}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$.

Цей вираз справджується не тільки для однорідного поля, а й для довільних неоднорідних магнітних полів.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Що називають явищем самоіндукції? Запишіть формулу, за якою визначають ЕРС самоіндукції.
- Який фізичний зміст індуктивності? Як зміниться індуктивність катушки, якщо збільшити її довжину, розтягуючи вздовж осі?
- Доведіть, що магнітне поле має енергію.
- Виведіть формулу для обчислення енергії магнітного поля.
- Проведіть аналогію між масою та індуктивністю.



Експериментуємо

У вас є заряджене тіло на ізоляючій підставці, а також прилади для виявлення електромагнітного поля. Як можна виявити: лише електричне поле; лише магнітне поле; електричне й магнітне поля одночасно?



Приклади розв'язування задач

Задача. Зміна сили струму від 2,5 до 14,5 А в соленоїді з 800 витками без осердя збільшує його магнітний потік на 2,4 мВб. Чому дорівнює середня ЕРС самоіндукції, яка виникає при цьому в соленоїді, якщо зміна сили струму відбувається за 0,15 с? Визначте енергію магнітного поля в соленоїді, якщо сила струму — 5 А.

Дано:

$$I_1 = 2,5 \text{ А}$$

$$I_2 = 14,5 \text{ А}$$

$$I = 5 \text{ А}$$

$$N = 800$$

$$\Delta\Phi = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

$$\Delta t = 0,15 \text{ с}$$

$$\varepsilon_{ci} — ?; W_{mag} — ?$$

Розв'язання:

Середню ЕРС самоіндукції можна визначити з формулами $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де $\Delta I = I_2 - I_1$. Індуктивність соленоїда визначимо зі співвідношення $\Phi_1 N = L I_1$ і $\Phi_2 N = L I_2$, звідки $\Delta\Phi N = L \Delta I$.

$$\text{Тоді } L = \frac{N \Delta \Phi}{\Delta I}, L = \frac{800 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}}{14,5 \text{ А} - 2,5 \text{ А}} = 0,16 \text{ Гн.}$$

Тепер обчислимо $\varepsilon_{ci} = -0,16 \text{ Гн} \frac{12 \text{ А}}{0,15 \text{ с}} = -13 \text{ В}$. Знак мінус показує, що ЕРС самоіндукції перешкоджає зростанню поля.

Магнітну енергію визначимо зі співвідношення $W_{mag} = \frac{LI^2}{2}$. Підставивши числові значення, отримаємо: $W_{mag} = \frac{0,16 \text{ Гн} \cdot 25 \text{ А}^2}{2} = 2 \text{ Дж.}$

Відповідь: -13 В ; 2 Дж.



Вправа 14

- Крізь соленоїд, що має індуктивність $0,4 \text{ мГн}$ і площину поперечного перерізу 10 см^2 , проходить струм $0,5 \text{ А}$. Визначте індукцію поля всередині соленоїда, якщо він містить 100 витків. Вважайте, що поле однорідне.
- Котушка із залізним осердям перерізом 20 см^2 має індуктивність $0,02 \text{ Гн}$. Якою має бути сила струму, щоб індукція поля в осерді становила 1 мТл , якщо котушка містить 1000 витків?
- У котушці, індуктивність якої становить $0,6 \text{ Гн}$, сила струму 20 А . Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?
- Визначте енергію соленоїда, в якому сила струму 10 А створює магнітний потік $0,5 \text{ Вб}$.
- Визначте енергію магнітного поля котушки індуктивністю $0,8 \text{ Гн}$, якщо по ній проходить струм 4 А .
- Індуктивність котушки із залізним осердям — 25 Гн . Визначте ЕРС самоіндукції в момент розмикання кола, якщо швидкість зміни сили струму в ній — $100 \frac{\text{А}}{\text{с}}$.



Виконуємо навчальні проекти

- Використання явища електромагнітної індукції в сучасній техніці: детекторі мєталу в аеропортах; поїзді на магнітній подушці; побутових СВЧ-печах; пристроях для запису й відтворення інформації.
- 11 лютого визнано Міжнародним днем жінок і дівчат у науці. За допомогою різних джерел, зберіть і поширте серед однокласників і однокласниць інформацію про жінок, які зробили вагомий внесок у розвиток фізики й астрономії.

Перевірте себе (§ 14–17)



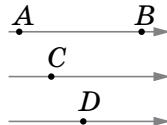
1. У якій точці на малюнку магнітного поля модуль вектора магнітної індукції має найбільше значення?

A у точці A

B у точці B

C у точках C або D

D у всіх точках одинаковий



2. Укажіть малюнок, на якому правильно розміщена магнітна стрілка біля прямого провідника зі струмом.



3. Укажіть явище, аналогічне явищу самоіндукції в електродинаміці.

A явище нагрівання речовини в молекулярній фізиці

B явище інерції в механіці

C явище протікання електричного струму в електродинаміці

D явище розпаду ядер атомів у квантовій фізиці

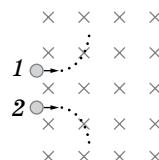
4. За фрагментами траєкторій заряджених частинок 1 і 2, що влетіли в магнітне поле з однаковою швидкістю, з'ясуйте знак заряду кожної частинки.

A частинка 1 заряджена негативно, частинка 2 заряджена позитивно

B частинка 1 заряджена позитивно, частинка 2 заряджена негативно

C обидві частинки заряджені негативно

D обидві частинки заряджені позитивно



5. До середини підвішеного на нитці легкого алюмінієвого кільця підносять штабовий магніт. Укажіть, що відбудеться з кільцем.

A нічого не відбудеться

B почне обертатися навколо вертикальної осі

C почне обертатися навколо горизонтальної осі

D відштовхнеться від магніту



6. У катушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму — 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї катушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?

7. Визначте модуль і напрямок сили \vec{F} , яка діє на провідник довжиною $l = 0,2$ м за сили струму $I = 10$ А в магнітному полі з індукцією $B = 0,13$ Тл, якщо кут α між B і l дорівнює: а) 90° ; б) 30° .

8. Електрон, прискорений різницею потенціалів 300 В. У деякий момент часу електрон пролітає на відстані 4 мм повз провідник зі струмом, при цьому вектор швидкості електрона спрямований паралельно до провідника. Яка сила буде діяти на електрон, якщо по провіднику тече струм 5 А?



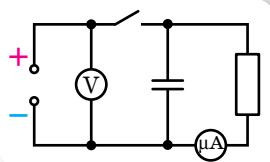
ПРАКТИКУМ

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

Обладнання: конденсатор електролітичний (10–30 В, 2000 мкФ), мікроамперметр (0–100 мкА або 0–200 мкА), вольтметр (0–6 В), резистор (50–100 кОм), джерело постійного струму (4 В), ключ, з'єднувальні провідники, секундомір.

Вказівки щодо виконання роботи

- Складіть електричне коло за схемою (мал. 79).



Мал. 79

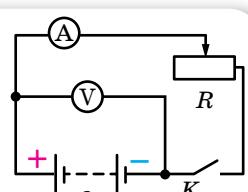
- Замкнувши коло, зарядіть конденсатор до напруги джерела U .
- Розімкніть коло. Вимірюйте силу струму в колі в різni моменти часу в процесі розрядження конденсатора через резистор і мікроамперметр.
- Побудуйте графік залежності сили струму в колі від часу t обчисліть площину фігури, обмеженої осями та графіком залежності. Ця площа відповідатиме заряду q , який пройшов через мікроамперметр за час розрядження конденсатора.
- Обчисліть електроємність конденсатора як відношення заряду q конденсатора до напруги U на його обкладках.

ВИМІРЮВАННЯ ЕРС І ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Обладнання: гальванічний елемент (акумулятор або батарейка), лабораторний амперметр, лабораторний вольтметр, реостат (6–8 Ом, 2 А), ключ, з'єднувальні провідники.

Вказівки щодо виконання роботи

- Складіть електричне коло за схемою, зображену на малюнку 80.
- Запишіть покази вольтметра при розімкнутому вимикачі K . Ця напруга приблизно дорівнює ЕРС джерела за умови, що опір вольтметра значно перевищує внутрішній опір джерела.
- Замкніть коло й реостатом відрегулюйте силу струму так, щоб відлік амперметра дорівнював цілому числу поділок.
- Запишіть значення сили струму I й напруги на зовнішній ділянці кола U .



Мал. 80

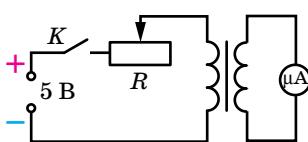
5. Обчисліть напругу на внутрішній ділянці кола $U_b = \varepsilon - U$.
6. Визначте внутрішній опір джерела струму за формuloю $r = \frac{U_b}{I}$.
7. Змінюючи положення повзунка реостата, повторіть дослід тричі. Виконайте обчислення. Визначте середнє значення внутрішнього опору джерела струму.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Обладнання: котушка з 1200 витками, дві котушки з осердями, два підковоподібні магніти, гальванометр демонстраційний, джерело постійного струму на 5–6 В, реостат на 30 Ом, реостат на 10 Ом, ключ, з'єднувальні провідники.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Приєднайте котушку з 1200 витків до гальванометра. Швидко вставте магніт у котушку, спостерігаючи при цьому за показами приладу. Залишіть магніт у котушці й спостерігайте за стрілкою приладу. Потім швидко витягніть магніт з котушки, спостерігаючи за показами гальванометра. Зробіть висновок.
2. Повільно вставте в котушку, яка замкнена на гальванометр, або витягніть з неї два магніти, складені однайменними полюсами. Повторіть дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясуйте, у яких випадках сила індукційного струму більша та як змінюється напрямок струму під час досліду.
3. Повторіть досліди, рухаючи котушку відносно нерухомого магніту. Зробіть висновок.
4. Послідовно з гальванометром приєднайте ще й реостат і приблизно з однаковою швидкістю вставляйте в котушку (або витягуйте з неї) магніт. При цьому реостат спочатку виведіть на нуль ($R = 0$), а в іншому досліді введіть повністю ($R = 10$ Ом). Зафіксуйте покази гальванометра й зробіть висновок.
5. Складіть електричне коло за схемою (мал. 81).



Мал. 81

6. Використовуючи ключ, замкніть і розімкніть коло, зафіксуйте при цьому напрямок відхилення стрілки гальванометра. За напрямком відхилення стрілки визначте напрямок індукційного струму, напрямок індукції магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрямок струму в первинній котушці та напрямок індукції магнітного поля цього струму. Поясніть, який напрямок має індукційний струм порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, а також під час збільшення та зменшення індукуючого струму. Перевірте виконання в цих дослідах правила Ленца.
7. Використовуючи те саме коло, повністю виведіть реостат, замкніть коло й за допомогою реостата швидко збільшуйте й зменшуйте опір кола. Зафіксуйте максимальне відхилення стрілки гальванометра в момент замикання кола, під час швидкого та повільного зменшення опору кола. Зробіть висновок про значення ЕРС індукції в цих дослідах.
8. Вставте й вийміть з обох котушок сталеве осердя. Увесь час спостерігайте за показами гальванометра.

Розділ 2

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

Коливання та хвилі належать до найпоширеніших процесів у природі й техніці. Коливаються висотні будинки та електричні заряди в коливальному контурі. Звук і світло — хвильові процеси.

Незважаючи на таку розмаїтість, усі вони мають між собою багато спільного, і тому описуються однаковими величинами й законами.

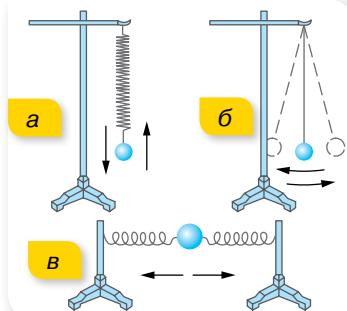
§ 18

Механічні коливання

Коливальні системи, умови виникнення вільних коливань. У 9 класі ми вже розглядали коливальні рухи і знаємо, що механічні й електромагнітні хвилі мають схожі властивості. Пригадаємо й розширимо свої знання. На малюнку 82 наведено приклади механічних пристрій, які здатні здійснювати коливання. Ці пристрої є *коливальними системами*.

Для коливальних систем характерні такі спільні ознаки.

1. Кожна коливальна система має стан рівноваги. Для нитяного маятника — це положення, в якому центр тяжіння підвішеної кульки лежить на одній вертикальній з точкою підвісу; у вертикального пружинного маятника в положенні рівноваги сила тяжіння, що діє на тягарець, зрівноважується силою пружності; у горизонтального пружинного маятника — це положення, в якому обидві пружини деформовані однаково.
2. Якщо коливальну систему вивести зі стану рівноваги, виникає сила, що повертає систему в рівноважний стан. Дляожної коливальної системи це сила різної природи. Так, для нитяного маятника — це рівнодійна сила тяжіння та сили натягу нитки.
3. Повернувшись у рівноважний стан, коливальне тіло не зупиняється, а продовжує свій рух за інерцією.



Мал. 82.

Коливальні системи:

а — вертикальний пружинний маятник;

б — нитяний маятник;

в — горизонтальний пружинний маятник



Вільними (або власними) називають коливання, які виникають у результаті початкового виведення системи з положення стійкої рівноваги та здійснюються завдяки внутрішнім силам системи, не зазнаючи впливу з боку змінних зовнішніх сил.

У всіх коливальних системах, зображеніх на малюнку 82, вільні коливання виникають, якщо: 1) коливальне тіло вивести з положення рівноваги, тобто надати коливальній системі енергії; 2) рівнодійна всіх сил, що діють на тіло, виведене з положення рівноваги, спрямована до цього положення; 3) сили тертя в системі достатньо малі.

Підкреслимо, що коливання — це явища і процеси, в яких відбувається періодичне повторення станів системи. Періодичними є й обертальні рухи, але, на відміну від обертальних рухів, у яких кожна точка рухається коловою траєкторією, під час коливальних рухів точка чи тіло зміщується в протилежних напрямках по одній і тій самій траєкторії.

Характеристики коливального руху. Основними характеристиками коливального руху є амплітуда, період і частота коливань.

Амплітуда коливань x_{\max} — це максимальне зміщення тіла від положення рівноваги.

Період коливань T — час одного повного коливання. $T = \frac{t}{N}$, де t — час, протягом якого відбувається N коливань.

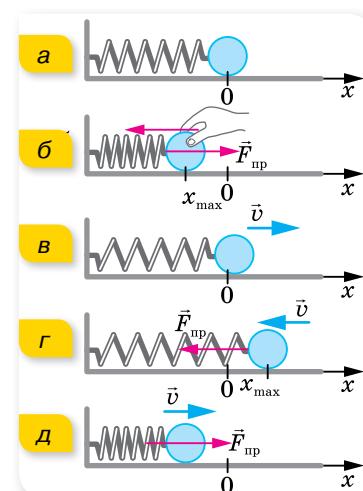
Частота коливань v — фізична величина, що визначається кількістю повних коливань за одиницю часу, $v = \frac{N}{t}$, де t — час, протягом якого відбувається N коливань.

Одиниця частоти коливань — герц, $1 \text{ Гц} = 1 \frac{1}{\text{с}}$.

З означення випливає, що $v = \frac{1}{T}$ або $T = \frac{1}{v}$.

Вільні та вимушенні коливання. Розглянемо вільні коливання горизонтального пружинного маятника (мал. 83, а).

Без тертя, рух кульки не припинився б ніколи. Однак тертя (зокрема опір повітря) впливає на рух коливного тіла. Оскільки сила опору повітря напрямлена проти швидкості руху, то амплітуда коливань поступово зменшується, допоки рух не припиниться, тобто коливання будуть *загасаючими*. Якщо опір незначний, то загасання стає помітним лише після того, як коливне тіло здійснить багато коливань. Сили тертя (опору) можуть бути й настільки великі, що в коливальній системі коливання не виникнуть. Наприклад, якщо пружинний маятник опустити



Мал. 83. Коливання горизонтального пружинного маятника

у в'язку рідину, то після відхилення тіла від положення рівноваги воно плавно повернеться в це положення і зупиниться.

Досліджуючи коливальний рух та розв'язуючи задачі на коливаннями нехтуватимемо опором і вважатимемо вільні коливання *незагасаючими*. У реальних умовах, щоб коливання були незагасаючими, необхідно поповнювати енергією коливальну систему, тобто потрібно, щоб діяла зовнішня періодична сила.

Вимушеними називають коливання, які виникають у системі внаслідок впливу на неї зовнішньої періодичної сили.

Підкresлимо, що вимущені коливання відбуваються не під впливом внутрішніх, а під впливом зовнішніх сил. Наприклад, рух поршня у двигунах внутрішнього згорання. Головна відмінність вільних коливань від вимущених полягає в тому, що вони відбуваються з власною частотою і власним періодом, які визначаються властивостями коливальної системи. Під час вимущених коливань зовнішня сила «нав'язує» коливальній системі свою частоту, свій період. Вільні коливання реальної коливальної системи внаслідок дії сил тертя є загасаючими, амплітуда ж вимущених коливань не зменшується з часом, навіть якщо в системі є тертя. Вимущені коливання — незагасаючі.

?

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. За яких умов у коливальній системі виникають вільні коливання? Наведіть приклади коливальних систем.
2. Які коливання називаються вільними, а які — вимушеними?
3. Назвіть основні характеристики коливального руху.

§19

Гармонічні коливання

Рівняння гармонічних коливань. У попередньому параграфі ми розглянули коливальний рух горизонтального пружинного маятника. Ви переконались, що в будь-якій точці траєкторії коливного тіла сила пружності направлена до положення рівноваги, тобто протилежно до зміщення тіла. У цьому прикладі горизонтальний пружинний маятник здійснює так звані *гармонічні коливання*. У гармонічних коливаннях сили, під дією яких вони відбуваються, завжди пропорційні зміщенню і направлені до положення рівноваги.

Сили, пропорційні відхиленню системи від положення рівноваги, — це не обов'язково пружні сили. Вони можуть мати різну фізичну природу, але схожі між собою тим, що спричиняють гармонічні коливання. Тому сили, пропорційні зміщенню від положення рівноваги, незалеж-

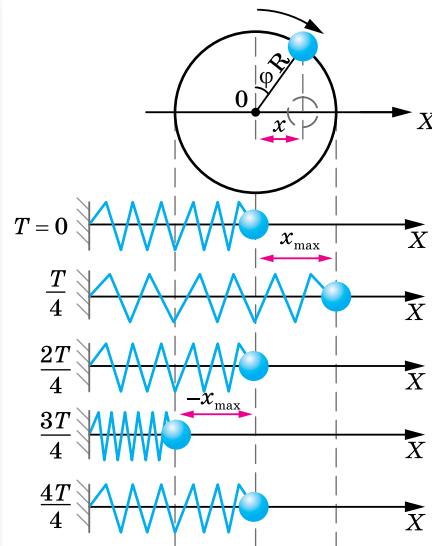
но від їхньої природи, називають квазіпружними («ніби пружними»; квазі — від лат. *quasi* — ніби, майже, немовби). Так, роль квазіпружної сили може відігравати рівнодійна сила тяжіння та сила пружності (для нитяного маятника), рівнодійна кількох сил різної природи.

Як і для будь-якого руху, для коливань необхідно отримати формулу, що дасть змогу розв'язувати основну задачу механіки — визначати координату тіла в будь-який момент часу. Скористаємося подібністю між коливаннями маятника та рівномірним рухом по колу.

Нехай по колу рівномірно рухається кулька (мал. 84). Розташуємо горизонтальний пружинний маятник паралельно осі X так, щоб положення рівноваги кульки маятника розмістилося на одній вертикалі з центром кола. Виведемо маятник з положення рівноваги, розтягнувши пружину на величину $x_{\max} = R$. Легко помітити, що під час руху кульки по колу проекція її радіуса-вектора здійснює коливання вздовж діаметра, тобто вздовж осі X , аналогічні коливанням кульки маятника. Центр кола відіграє роль положення рівноваги, радіус кола R — роль амплітуди коливань x_{\max} , період обертання кульки — відповідає періоду коливань T , проекція радіуса-вектора в довільний момент часу відповідає зміщенню $x = x_{\max} \cos \varphi$, де φ — кут повороту радіуса-вектора.

Кут φ є центральним кутом, а, як відомо, дуга l , що стягує центральний кут, дорівнює добутку кута φ (у радіанах) на радіус кола (в нашому випадку — x_{\max}), $l = \varphi x_{\max}$. За час, що дорівнює періоду, кулька робить один повний оберт і проходить відстань, що дорівнює довжині кола. Отже, швидкість кульки $v = \frac{2\pi x_{\max}}{T}$. Протягом інтервалу часу, за який радіус-вектор кульки повернувся на кут φ , кулька пройшла відстань $l = vt = \frac{2\pi x_{\max} t}{T}$. Прирівнявши обидва вирази для l , отримуємо: $\varphi = \frac{2\pi}{T} t$. Отже, проекція радіуса-вектора на вісь X змінюється за законом $x = x_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t$.

Величину $\frac{2\pi}{T}$ називають *циклічною*, або *колою*, *частотою* і позначають літерою ω . Циклічна (або колова) частота показує, яку кількість коливань здійснює тіло за 2ω секунди, $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.



Мал. 84. Аналогія між коливальним і обертальним рухами

Одинаця циклічної частоти — радіан за секунду: $1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Отже, зміщення (координата) тіла, що здійснює механічні гармонічні коливання, із часом змінюється за законом $x = x_{\max} \cos \omega t$, якщо в початковий момент ($t = 0$) коливне тіло займало крайнє положення; або $x = x_{\max} \sin \omega t$, якщо в момент початку відліку тіло перебувало в положенні рівноваги.

Гармонічними називаються прості періодичні в часі коливання фізичної величини, які здійснюються за синусоїdalним або косинусоїdalним законом.

Зверніть увагу! У задачах найчастіше ми використовуватимемо рівняння $x = x_{\max} \cos \omega t$, тобто вважатимемо, що в початковий момент ($t = 0$) коливне тіло перебуває в крайньому положенні.

Фаза коливань. Гармонічні коливання характеризуються ще однією важливою величиною — фазою коливань. У виведенні основного рівняння гармонічних коливань, ми отримали вираз: $x = x_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t$, тут величину $\phi = \frac{2\pi}{T} t$ називають *фазою коливань*.

У виразі $\phi = \frac{2\pi}{T} t$ відношення $\frac{t}{T}$ показує, яка частка періоду минула з моменту початку коливань, отже, будь-якому інтервалу часу, вираженому в частках періоду, відповідає значення фази, виражене в радіанах. Наприклад, для $t = \frac{1}{4} T$ (чверть періоду) $\phi = \frac{\pi}{2}$, для $t = \frac{1}{2} T$ (півперіоду) $\phi = \pi$.

Фаза коливань — це фізична величина, що визначає миттєві значення змінних параметрів коливальної системи в певний момент часу, тобто визначає ступінь відхилення системи від положення рівноваги в цей момент, $\phi = 2\pi \frac{t}{T} = \omega t$.

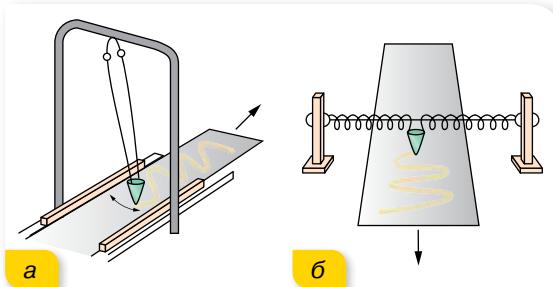
Одинаця фази коливань — радіан, 1 рад.

У наведених нами прикладах коливальний рух починався з моменту часу, коли коливне тіло перебувало в крайньому положенні. Оскільки, спостерігаючи за коливаннями, час можна відлічувати від будь-якого моменту, то початкове положення коливного тіла визначатиметься початковою фазою ϕ_0 , і рівняння коливального руху набуде вигляду $x = x_{\max} \cos(\omega t + \phi_0)$.

Загалом фаза коливань визначається формулою $\phi = \omega t + \phi_0$. Для гармонічних коливань фаза є аргументом синуса або косинуса.

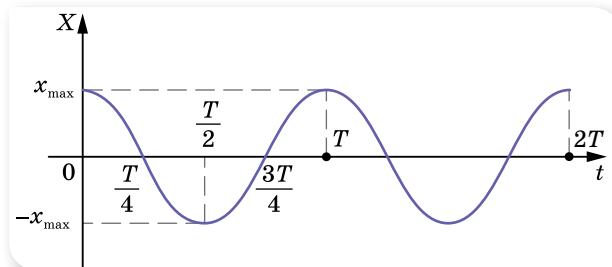
Графіки гармонічних коливань. Графіком гармонічних коливань є крива, яку в математиці називають синусоїдою або косинусоїдою. Графік гармонічного коливання можна дістати безпосередньо з досліду, якщо

за коливне тіло взяти пісочницю, з якої висипається пісок. Пісочницю підвішують на довгій нитці (мал. 85, а) або закріплюють на пружинах (мал. 85, б) і змушують здійснювати коливання. Якщо під пісочницею протягувати папір, то на ньому залишається слід, що нагадує синусоїду.



Мал. 85.
Наочний спосіб
спостереження
коливань

Форма запису закону гармонічного коливання може бути вибрана довільно (через синус або косинус). Припустимо, що маятник відвели в крайнє положення та відпустили (без поштовху), розпочавши відлік часу. Рівняння руху в цьому випадку записують у вигляді $x = x_{\max} \cos \omega t$, але можна записати й так: $x = x_{\max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Обидві форми запису еквівалентні, тобто описують одне й те саме коливання, графік якого є косинусоїдою (мал. 86).



Мал. 86. Графік
коливань

Якщо відлік часу починається в момент проходження коливним тілом положення рівноваги, то рівняння руху можна записати у вигляді $x = x_{\max} \sin \omega t$ або $x = x_{\max} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$.

У гармонічних коливаннях швидкість і прискорення коливного тіла також змінюються за гармонічним законом, оскільки швидкість дорівнює першій похідній координати за часом, а прискорення — першій похідній від швидкості (або другій похідній координати).

З курсу математики відомо, що $(\cos kx)' = -k \sin kx$, $(\sin kx)' = k \cos kx$.

З рівняння $x = x_{\max} \cos \omega t$ отримуємо:

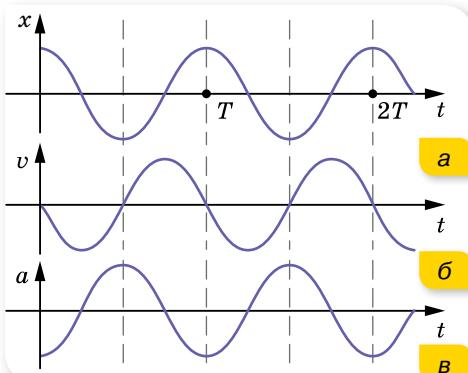
$$v = (x_{\max} \cos \omega t)' = -x_{\max} \omega \sin \omega t,$$

де $v_{\max} = -x_{\max} \omega$ — максимальна швидкість.

Для прискорення маємо:

$$a = (-x_{\max} \omega \sin \omega t)' = -x_{\max} \omega^2 \cos \omega t,$$

де $a_{\max} = -x_{\max} \omega^2$ — максимальне прискорення.



Мал. 8.7. Графіки залежностей:
а — $x(t)$; б — $v(t)$; в — $a(t)$

З попередніх рівнянь видно, що прискорення прямо пропорційне зміщенню. Отже, в будь-який момент часу сила, що зумовлює коливання тіла масою m , також пропорційна зміщенню, $F = -m\omega^2 x_{\max} \cos \omega t$, де $F_{\max} = -m\omega^2 x_{\max}$ — максимальне значення сили. Таким чином, гармонічні коливання відбуваються під дією сили, напрямленої до положення рівноваги й прямо пропорційної зміщенню від цього положення.

Графіки часових залежностей зміщення, швидкості та прискорення гармонічних коливань зображені на малюнку 87. Згідно з формулами зведення тригонометричних функцій, залежність швидкості від часу $v = -v_{\max} \sin \omega t$ набуває вигляду $v = v_{\max} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Зіставивши це рівняння з рівнянням $x = x_{\max} \cos \omega t$, бачимо, що коливання швидкості випереджають за фазою коливання зміщення на $\frac{\pi}{2}$ (мал. 87, б). Коливання прискорення $a = -a_{\max} \cos \omega t$, можна записати у вигляді $a = a_{\max} \cos (\omega t + \pi)$, тобто коливання прискорення випереджають за фазою коливання координати на π рад (перебувають у протифазі) (мал. 87, в).

ВІДВІДОВЛЕННЯ

? **ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ**

1. Які коливання називають гармонічними?
2. Як пов'язані прискорення та координата в гармонічних коливаннях?
3. Як змінюється з часом швидкість у гармонічних коливаннях?
4. Яку фізичну величину називають фазою коливання? Що вона характеризує?
5. Миттєве зміщення частинки в коливаннях описується функцією $x = x_{\max} \cos (\omega t + \varphi_0)$. Якою має бути початкова фаза φ_0 , щоб коливання були синусоїдними?



Приклади розв'язування задач

Задача. Тіло здійснює гармонічні коливання за законом $x = 0,05 \cos 10 \pi t$, де всі величини задано в СІ.

а) Визначте амплітуду коливань, частоту коливань і період коливань. Запишіть рівняння залежності швидкості та прискорення від часу, $v_x = v_x(t)$ і $a_x = a_x(t)$, та побудуйте графіки залежностей зміщення, швидкості, прискорення від часу.

б) Визначте зміщення для фази $\frac{\pi}{4}$. У який момент часу зміщення дорівнюватиме 0,025 м?

Дано:

$$x = 0,05 \cos 10\pi t$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4}$$

$$x = 0,025 \text{ м}$$

a) $x_{\max} = ?$;

$v = ?$; $T = ?$;

$v_x = v_x(t) = ?$;

$a_x = a_x(t) = ?$;

b) $x = ?$; $t = ?$

Розв'язання:

a) З рівняння коливань визначаємо $x_{\max} = 0,05 \text{ м}$,

$\omega = 10\pi$. Оскільки $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, то $\nu = 5 \text{ Гц}$, $T = 0,2 \text{ с}$.

Залежність проекції швидкості від часу визначимо, обчисливши похідну від зміщення:

$$v_x = x' = -0,05 \cdot 10\pi \sin 10\pi t = -1,57 \sin 10\pi t,$$

де $v_{\max} = -1,57 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Залежність проекції прискорення від часу визначаємо, обчисливши похідну від швидкості:

$$a_x = v' = -1,57 \cdot 10\pi \cos 10\pi t = -49,3 \cos 10\pi t, \text{ де } a_{\max} = -49,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Відповідні графіки коливань наведено на малюнку 88.

б) Для фази $\frac{\pi}{4}$ з рівняння коливань отримуємо:

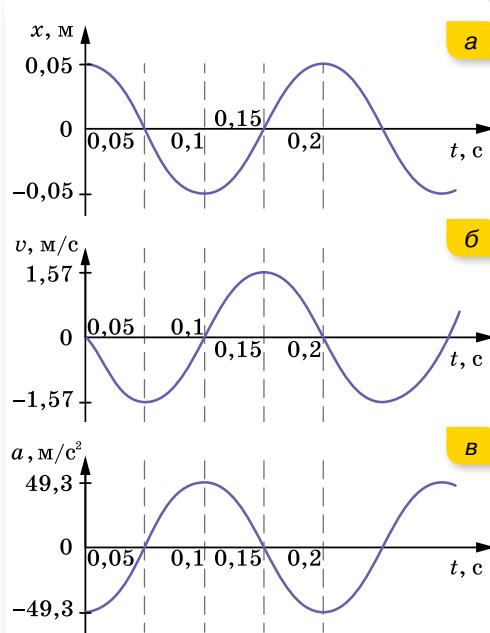
$$x = 0,05 \cos \frac{\pi}{4} = 0,05 \cdot 0,71 \approx$$

$$\approx 0,036 \text{ м.}$$

Щоб визначити момент часу, в який зміщення дорівнює $0,025 \text{ м}$, підставимо це значення в рівняння для $x = 0,025 = 0,05 \cos 10\pi t$, звідси $\cos 10\pi t = 0,5$. Оскільки косинус набуває значення $0,5$ при $\frac{\pi}{3}$, то

$$10\pi t = \frac{\pi}{3}, \text{ звідси } t \approx 0,03 \text{ с.}$$

Відповідь: а) $0,05 \text{ м}; 5 \text{ Гц}; 0,2 \text{ с}; v_x = -1,57 \sin 10\pi t; a_x = -49,3 \cos 10\pi t;$
б) $0,036 \text{ м}; 0,03 \text{ с.}$

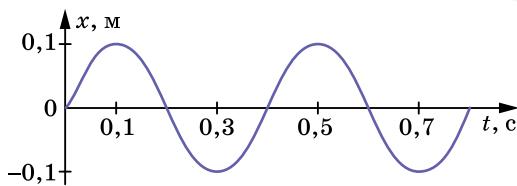


Мал. 88



Вправа 15

- Рівняння руху гармонічного коливання має вигляд $x = 0,02 \cos 100\pi t$. Побудуйте графік залежності $x(t)$. Обчисліть зміщення через $0,25 \text{ с}$; через $1,25 \text{ с}$. Відповіді поясніть за допомогою графіка.
- За графіком гармонічних коливань, зображенним на малюнку 89 (с. 96), запишіть рівняння цього коливання.



Мал. 89

3. Напишіть рівняння гармонічного коливального руху з амплітудою 0,2 м, періодом 4 с і початковою фазою, що дорівнює нулю. Накресліть графік цього руху.
4. Напишіть рівняння гармонічного коливального руху, якщо максимальне прискорення точки — $49,3 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}$, період коливань — 2 с і зміщення точки від положення рівноваги в початковий момент часу — 25 мм.
5. Коливальний рух точки описується рівнянням $x = 0,05 \cos 20\pi t$ (усі величини задано в СІ). Обчисливши першу та другу похідні, напишіть рівняння залежності швидкості й прискорення від часу, $v_x = v_x(t)$ і $a_x = a_x(t)$. Визначте зміщення, швидкість і прискорення через $\frac{1}{60}$ с від початку руху.
6. Напишіть рівняння гармонічного коливального руху за такими його характеристистиками: а) амплітуда 5,5 см, період 1 хв, початкова фаза 30° ; б) амплітуда 0,1 м, частота 10 коливань за секунду, початкова фаза дорівнює нулеві.
7. Напишіть рівняння гармонічного коливального руху з амплітудою 0,2 м, періодом 4 с і початковою фазою, що дорівнює нулеві. Накресліть графік цього руху.
8. Амплітуда гармонічних коливань — 50 мм, період — 4 с і початкова фаза — $\frac{\omega}{4}$. Визначте зміщення коливної точки від положення рівноваги в моменти часу $t = 0$ і $t = 1,5$ с.

§ 20

Перетворення енергії в гармонічних коливаннях

Зміна енергії коливальної системи. Розглядаючи коливання горизонтального пружинного маятника, ми бачили, що за початкового його відхилення, наприклад ліворуч, на відстань $-x_{\max}$, коливне тіло, повертаючись, проходить положення рівноваги та відхиляється праворуч на x_{\max} . Це можливо, якщо виконується закон збереження повної механічної енергії. У процесі гармонічних коливань повна механічна енергія коливальної системи, що дорівнює сумі потенціальної та кінетичної енергій, залишається незмінною.

За допомогою малюнка 90 можна простежити, як змінюється енергія під час гармонічних коливань. У початковий момент (коли пружина стиснена) коливальна система має максимальну потенціальну енергію $E_{\text{п. max}} = \frac{kx_{\max}^2}{2}$, де k — жорсткість пружини. Як далі буде встановлено, маса тягарця — m , що коливається на пружині жорсткістю k , і циклічна частота коливань пов'язані співвідношенням $\omega^2 = \frac{k}{m}$, тоді вираз для

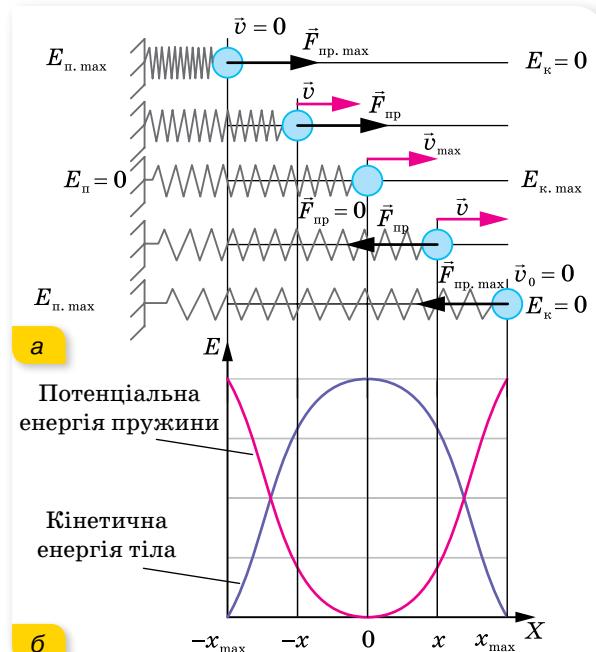
максимальної потенціальної енергії можна записати у вигляді

$$E_{\text{п. max}} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2}.$$

Рухаючись до положення рівноваги, система зменшує потенціальну енергію, але водночас збільшується її кінетична енергія, яка набуває максимального значення в положенні рівноваги, де швидкість коливного тіла максимальна, $E_{\text{k. max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$. Зваживши, що $v_{\text{max}} = -x_{\text{max}}\omega$, маємо:

$$E_{\text{k. max}} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2}.$$

Значення повної енергії в кожний момент часу дорівнює максимальній кінетичній або максимальній потенціальній енергії, $E_{\text{повна}} = E_{\text{п. max}} = E_{\text{k. max}} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2}$.



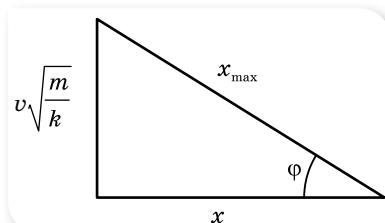
Мал. 9О.
Перетворення енергії
коливальної системи

Таким чином, кінетична енергія коливальної системи матиме максимальні значення в моменти проходження тілом положень рівноваги, а потенціальна — в моменти перебування тіла в точках найбільших відхилень від положення рівноваги. У довільний момент часу сума потенціальної $E_{\text{п.}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \cos^2 \omega t$ та кінетичної енергії $E_{\text{k.}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \sin^2 \omega t$ є сталою величиною і дорівнює повній енергії коливань:

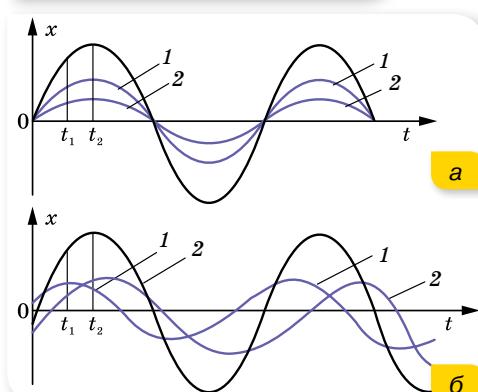
$$E = E_{\text{п.}} + E_{\text{k.}} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \cos^2 \omega t + \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \sin^2 \omega t = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2}.$$

На малюнку 90, б (с. 97) зображеного графік зміни потенціальної та кінетичної енергії коливальної системи за один період коливань.

Покажемо, як із закону збереження повної механічної енергії під час коливального руху можна вивести рівняння коливань.



Мал. 91. Графічний спосіб виведення рівняння гармонічних коливань



Мал. 92. Додавання гармонічних коливань

Повна енергія під час гармонічного коливання дорівнює $\frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{kx_{\max}^2}{2}$, або $kx^2 + mv^2 = kx_{\max}^2$. Поділивши на k , отримуємо: $x^2 + \frac{mv^2}{k} = x_{\max}^2$ або $x^2 + \left(v\sqrt{\frac{m}{k}}\right)^2 = x_{\max}^2$. Побудувавши прямокутний трикутник з катетами x і $v\sqrt{\frac{m}{k}}$ та гіпотенузою x_{\max} (мал. 91), отримуємо: $x = x_{\max} \cos \varphi$.

Додавання коливань.

На практиці часто коливання накладаються одне на одне. Щоб визначити параметри результуючого коливання, користуються графічним методом. Для цього, побудувавши в одних і тих самих координатних осіах графіки коливань, які треба додати, послідовно додають ординати цих графіків для певних моментів часу t_1, t_2, t_3, \dots , відкладених на осі абсцис.

Приклади додавання коливань з однаковим періодом наведено на малюнку 92.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Розкажіть про перетворення енергії під час гармонічних коливань.
2. За даної амплітуди коливань повна енергія коливного тіла є сталою величиною. Чи можна це саме стверджувати про кінетичну та потенціальну енергії?
3. Чи залежить енергія коливного тіла від його маси?
4. Скільки разів протягом періоду гармонічного коливання кінетична енергія системи дорівнює її потенціальній енергії в той самий момент часу?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Тягар масою 2 кг здійснює горизонтальні коливання на пружині за законом $x = 0,05 \cos 10\pi t$, де всі величини задано в СІ. Обчисліть максимальні значення сили, кінетичної та потенціальної енергії. А також їх значення в момент, коли фаза коливань дорівнює $\frac{\pi}{4}$.

Дано:

$$m = 2 \text{ кг}$$

$$x = 0,05 \cos 10\omega t$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4}$$

$$F_{\max} = ?$$

$$E_{\text{п.макс}} = ?$$

$$E_{\text{k.макс}} = ?; F = ?$$

$$E_{\text{п}} = ?; E_{\text{k}} = ?$$

Розв'язання:

Максимальне значення сили визначаємо з формули

$$F_{\max} = -m\omega^2 x_{\max}.$$

$$F_{\max} = -2 \cdot 100\omega^2 \cdot 0,05 = -100 \text{ Н.}$$

Максимальне значення кінетичної енергії дорівнює максимальному значенню потенціальної енергії і дорівнює повній енергії,

$$E_{\text{п.макс}} = E_{\text{k.макс}} = E_{\text{п.макс}} = \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2}; E_{\text{п.макс}} = 2,5 \text{ Дж.}$$

Щоб визначити силу в момент, коли фаза коливань дорівнює $\frac{\pi}{4}$, у вираз

для сили $F = -m\omega^2 x_{\max} \cos \omega t$ підставляємо значення фази, знаходимо: $F = -71 \text{ Н.}$

Аналогічно для фази коливань $\frac{\pi}{4}$ обчислюємо потенціальну енергію

за формулою: $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2} \cos^2 \omega t = 1,25 \text{ Дж.}$ Кінетичну енергію

можна визначити за однією з формул $E_{\text{k}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2} \sin^2 \omega t$ або

$$E_{\text{k}} = E_{\text{п.макс}} - E_{\text{п}}. E_{\text{k}} = 2,5 \text{ Дж} - 1,25 \text{ Дж} = 1,25 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $-100 \text{ Н}; 2,5 \text{ Дж}; 2,5 \text{ Дж}; -71 \text{ Н}; 1,25 \text{ Дж}; 1,25 \text{ Дж.}$



Вправа 16

1. Вантаж, маса якого 400 г, коливається горизонтально на пружині, що має жорсткість $250 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Амплітуда коливань — 15 см. Визначте частоту, повну механічну енергію коливань і найбільшу швидкість руху вантажу.
2. Вантаж, підвішений на пружині, жорсткість якої $1 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$, коливається горизонтально з амплітудою 2 см. Визначте кінетичну та потенціальну енергію для фази $\frac{\pi}{3}$ рад.
3. Пружинний маятник вивели з положення рівноваги та відпустили. Через який час (у частинах періоду) кінетична енергія коливного тіла дорівнюватиме потенціальній енергії пружини? Коливання відбуваються в горизонтальному напрямку.
4. Вантаж масою 1 кг, підвішений до пружини жорсткістю $100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, коливається з амплітудою 10 см. Напишіть рівняння руху вантажу $x = x(t)$. Напишіть формулу, що виражає залежність зміни сили пружності від часу, $F = F(t)$. Визначте найбільше значення сили пружності, а також значення сили пружності через $\frac{1}{6}$ періоду. Коливання відбуваються в горизонтальному напрямку.
5. Напишіть рівняння гармонічного коливання тіла, якщо його повна енергія — $3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, максимальна сила, що діє на тіло, — $1,5 \text{ мН}$, період коливань — 2 с і початкова фаза — 60° .
6. Тіло масою $m = 1 \text{ кг}$ під дією пружини жорсткістю $k = 400 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ коливається без тертя в горизонтальній площині вздовж стержня. Користуючись законом збереження енергії, визначте період коливань тіла.

§ 21

Маятники

Період коливань пружинного маятника. З попередніх рівнянь, отриманих для коливань горизонтального пружинного маятника, видно, що прискорення в довільний момент часу пропорційне зміщенню: $a = -\omega^2 x$. Водночас, у будь-якій точці траєкторії сила пружності напрямлена до положення рівноваги і прямо пропорційна зміщенню, $F_{\text{пр}} = -kx$, де k — жорсткість пружини. За другим законом Ньютона: $a = \frac{F_{\text{пр}}}{m} = -\frac{k}{m}x$. Прирівнявши обидва вирази для прискорення, отримуємо: $\omega^2 = \frac{k}{m}$ або $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Оскільки $T = \frac{2\pi}{\omega}$, то *період вільних коливань пружинного маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$* .

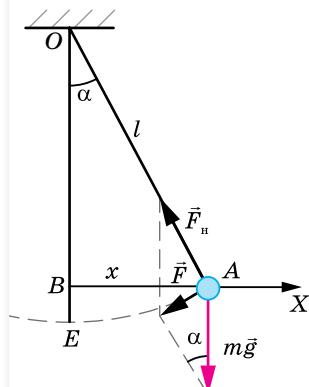
Період коливань математичного (нитяного) маятника. *Математичний маятник* — це модель ідеальної коливальної системи. Реальний нитяний маятник (мал. 93), що складається з невеликого тіла й довгої тонкої нерозтяжної нитки (наприклад, сталевого дроту), можна вважати математичним маятником.

Нитяний маятник коливається під дією сили тяжіння mg і сили натягу нитки \vec{F}_n . За малих відхилень такого маятника від положення рівноваги ($\alpha < 5^\circ$) його коливання будуть гармонічними.

Відведемо коливне тіло в крайнє праве положення. У цьому разі рівнодійна сили тяжіння та сили натягу нитки напрямлена проти зміщення — до положення рівноваги (мал. 93). З малюнка видно, що за модулем ця рівнодійна дорівнює $F = mg \sin \alpha$.

Оскільки кут відхилення малий, то дуга EA , по якій рухається кулька, мало відрізняється від півхорди BA , тому зміщення $x = BA$. Крім того, для малих кутів виконується співвідношення $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. З трикутника $OBA \tan \alpha = \frac{x}{l}$, де l — довжина нитки.

Таким чином, проекція рівнодійної, що діє на коливне тіло (оскільки вона напрямлена проти зміщення) описується формулою $F_x = -\frac{mg}{l}x$. Як бачимо, цей вираз аналогічний виразові для сили пружності $F_{\text{пр}} = -kx$, де роль коефіцієнта пружності k відіграє величина $\frac{mg}{l}$.



Мал. 93. Нитяний маятник

Однакові причини виникнення коливань ведуть до однакових результатів. Виведемо формулу періоду коливань нитяного маятника так само, як ми це робили для пружинного маятника. Оскільки коливання математичного маятника є гармонічними, то прискорення в довільний момент часу пропорційне зміщенню, $a = -\omega^2 x$. Водночас у будь-якій точці траєкторії рівнодійна F напрямлена до положення рівноваги і прямо пропорційна зміщенню,

$F = -\frac{mg}{l}x$. За другим законом Ньютона: $a = \frac{F}{m} = -\frac{g}{l}x$. Прирівнюючи

обидва вирази для прискорення, отримуємо: $\omega^2 = \frac{g}{l}$ або $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$. Оскільки

$T = \frac{2\pi}{\omega}$, то **період вільних коливань нитяного маятника** $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Період власних коливань нитяного маятника не залежить від маси й амплітуди коливань, а визначається прискоренням вільного падіння та довжиною маятника.

Оскільки будь-який маятник має фікований період коливань, їх використовують для регулювання ходу годинників. Маятники використовують і в геологічних розвідках. У місцях, де залягають породи металевих руд, значення g аномально велике. Точні вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника дають змогу виявити такі родовища.

За допомогою математичного маятника можна переконатися в існуванні добового обертання Землі. Цей дослід у 1851 р. в Парижі виконав Жан Фуко з маятником завдовжки 67 м. Тому маятники, за допомогою яких можна продемонструвати добове обертання Землі навколо своєї осі, називають маятниками Фуко.

Зміст досліду полягає в тому, що площа коливань математичного маятника залишається незмінною відносно інерціальної системи відліку. Тоді відносно неінерціальної системи відліку, пов'язаної із Землею, внаслідок дії сили Коріоліса, площа коливань маятника має повертатись.

Пізніше цей дослід повторювали в різних місцях. Очевидно, що ефект повороту площини коливань маятника залежить від широти місця проведення досліду, він найбільш виражений на земних полюсах і не спостерігається на екваторі.

Часто в задачах розглядають нитяний маятник, який коливається, рухаючись із певним прискоренням \vec{a} . У цьому разі період коливань

маятника визначають з формули: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{|\vec{a} - \vec{g}|}}$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЧІМОУ

1. Яку коливальну систему називають математичним (нитяним) маятником; пружинним маятником?
2. Для яких відхилень від положення рівноваги коливання нитяного маятника будуть гармонічними?
3. Виведіть формулу періоду коливань нитяного маятника. Чи залежить період коливань маятника від його маси?
4. Від чого залежить період коливань пружинного маятника?
5. Які перетворення енергії відбуваються під час гармонічних коливань?



Експериментуємо

- Визначте площину стола. (Обладнання: нитяний маятник, секундомір. Вказівка: визначте довжину нитки й скористайтеся нею як одиничним відрізком.)
- Якою має бути довжина нитяного маятника, щоб його період коливання дорівнював періоду власних коливань пружинного маятника? Здійсніть експериментальну перевірку. (Обладнання: штатив лабораторний, спіральна пружина, нитяний маятник, лінійка, тягарець)
- Визначте період коливань фізичного маятника. (Обладнання: фізичний маятник, нитяний маятник, штатив.)
- Визначте масу тіла за допомогою пружинного маятника. (Обладнання: лабораторний штатив, набір пружин, тягарці відомої маси, тягарець невідомої маси, секундомір.)
- Визначте радіус кульки нитяного маятника. (Обладнання: кулька з ниткою, штатив, стрілка-фіксатор на підставці, секундомір.)
- Визначте жорсткість пружини пружинного маятника. (Обладнання: спіральна пружина, тягарець невідомої маси, штатив, важіль, відерце Архімеда, мензурка з водою, секундомір.)
- Визначте відношення магнітної і гравітаційної сил, що діють на нитяний маятник, який коливається в полі цих сил. Дослідіть залежність відношення цих сил від відстані між залізною кулькою нитяного маятника й електромагнітом. (Обладнання: нитяний маятник, електромагніт, штатив, секундомір.)



Приклади розв'язування задач

Задача. Нитяний маятник завдовжки 1 м коливається з амплітудою 1 см. За який час він пройде шлях 1 см, якщо в початковий момент маятник проходить положення рівноваги? За який час маятник пройде: а) першу половину амплітуди; б) другу половину амплітуди?

Дано:

$$l = 1 \text{ м}$$

$$x_{\max} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$s = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$t - ?; t_1 - ?$$

$$t_2 - ?$$

Розв'язання:

Оскільки в початковий момент маятник проходить положення рівноваги, рівняння його руху має вигляд $x = 0,01 \sin \omega t$.

Шлях 1 см, який дорівнює амплітуді, маятник проходить за чверть періоду.

Період коливань нитяного маятника визначається формулою $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, отже, $t = \frac{T}{4} = \frac{2\pi}{4}\sqrt{\frac{l}{g}} \approx 0,5 \text{ с.}$

Час, за який маятник проходить першу половину амплітуди, визначаємо з рівняння $0,005 = 0,01 \sin \omega t$, тоді $\sin \omega t = 0,5$. Синус набуває значення 0,5 при $\frac{\pi}{6}$, отже, $\pi t = \frac{\pi}{6}$, звідси $t \approx 0,167 \text{ с}$. Тоді час, за який маятник проходить другу половину амплітуди, становить

$$t_2 = t - t_1, t_2 = 0,5 \text{ с} - 0,167 \text{ с} = 0,33 \text{ с.}$$

Відповідь: 0,5 с; 0,167 с; 0,33 с.



Вправа 17

- Маятник зробив 50 коливань за 1 хв 40 с. Визначте період, частоту та циклічну частоту коливань.
- Як відносяться довжини нитяних маятників, якщо за одинаковий час перший робить 10, а другий — 30 коливань?
- За один і той самий час перший нитяний маятник робить 50 коливань, другий — 30. Визначте довжини цих маятників, якщо один з них на 32 см коротший від іншого.
- Як зміниться хід годинника з маятником на металевому стержні: а) з підвищеннем температури; б) під час підняття на гору; в) при переміщенні від полюса до екватора?
- У скільки разів зміниться період коливань маятника в ракеті, яка стартує з поверхні Землі вертикально вгору з прискоренням $30 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$?

- Нитяний маятник на Землі має період малих коливань 1 с. Яким буде період його коливань на Місяці?
- Визначте прискорення вільного падіння в тому місці земної поверхні, де довжина секундного маятника буде 0,995 м.

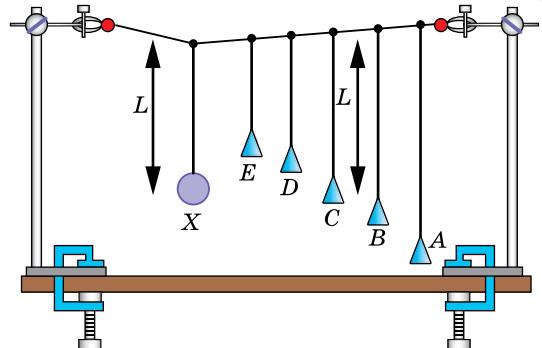
§22

Вимушені коливання. Резонанс. Автоколивання

Вимушені коливання. Як зазначалося, для того щоб коливання не загасали, енергія коливальної системи має поповнюватися. Наприклад, щоб гойдалка не зупинялась, її необхідно підштовхувати через інтервали часу, кратні періоду коливань гойдалки.

Коливання, які здійснюються під дією як внутрішніх, так і зовнішніх періодичних сил, називають **вимушеними**.

Резонанс і його практичне використання. Дослідимо деякі особливості вимушених коливань. Для цього проведемо такий дослід. Закріпимо між двох штативів трос і підвісимо до троса маятники різної довжини (мал. 94).



Мал. 94. Демонстрація резонансу

Виведемо зі стану спокою, наприклад, маятник X , надамо йому можливість вільно коливатися (площина коливань маятника перпендикулярна до площини малюнка). Ці коливання спричинять коливання троса і змусять коливатись інші маятники. При цьому маятник C , що має таку саму довжину, а отже, і такий самий період, як і маятник X , коливатиметься найсильніше; маятники B і D , періоди коливань яких близькі до періоду коливань маятника X , коливатимуться дещо слабше, а маятники A й E майже не коливатимуться.

Отже, якщо період (частота) коливань діючої сили дорівнює власному періоду (частоті) коливань коливальної системи, амплітуда вимушених коливань системи буде найбільшою. Це явище називають **резонансом**.

Резонанс — явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота зовнішньої періодичної сили збігається із частотою власних коливань.

Спробуємо це довести. Для зручності розглянемо коливальну систему — горизонтальний пружинний маятник. Уздовж осі X на коливне тіло діє сила пружності $F_{\text{пр}_x} = -kx$ і змінна зовнішня сила $F = F_{\text{max}} \cos \omega t$. Застосовуючи другий закон Ньютона до опису коливань тіла, отримаємо рівняння: $ma_x = -kx + F_{\text{max}} \cos \omega t$. Урахуємо, що $a_x = -\omega^2 x_{\text{max}} \cos \omega t$, $x = x_{\text{max}} \cos \omega t$, $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, тобто $k = \omega_0^2 m$, та отримаємо рівняння другого закону Ньютона у вигляді $-m\omega^2 x_{\text{max}} \cos \omega t = -\omega_0^2 mx_{\text{max}} \cos \omega t + F_{\text{max}} \cos \omega t$.

Скоротимо рівняння на $\cos \omega t$ і запишемо з нього вираз для амплітуди

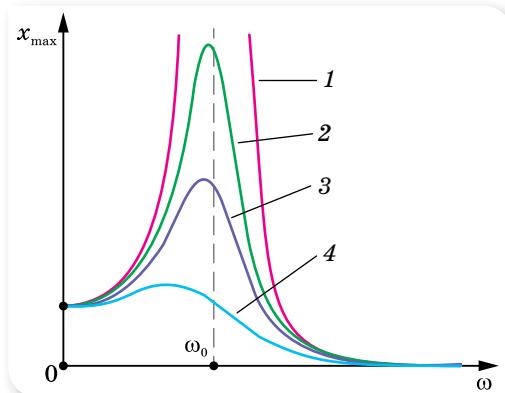
$$\text{вимушених коливань, } x_{\text{max}} = \left| \frac{F_{\text{max}}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right|.$$

Проаналізуємо отриману залежність і побудуємо її графік. Зі зміною частоти ω зовнішньої сили змінюється амплітуда вимушених коливань. Якщо ця частота наближається до частоти вільних коливань системи ω_0 , то знаменник дробу наближується до нуля. У цьому разі амплітуда різко збільшується, прямуючи до нескінченості (мал. 95; крива 1) за умови $\omega = \omega_0$.

Сили опору перешкоджають збільшенню амплітуди коливань. Зі збільшенням сил опору значення резонансної амплітуди зменшуватиметься (кривій 4 на малюнку 95 відповідає максимальне значення сил опору).

Резонанс відіграє важливу роль у природі й техніці, як позитивну, так і негативну. Позитивними виявами є резонатори — підсилювачі звуку, настроювання коливальних контурів у радіозв'язку; негативними — руйнування фундаментів і конструкцій унаслідок коливань. Відомі випадки, коли руйнувалися мости під час переходу по них колони військових, які крокували «в ногу» і до того ж частота кроків збігалася із зваженою частотою коливань моста. У 1850 р. зруйнувався Анжерський підвісний міст над Луарою, по якому крокували французькі піхотинці. Тоді загинуло 226 осіб. У 1906 р. зруйнувався ланцюговий Єгипетський міст через річку Фонтанку в Петербурзі. У 1940 р., через

кілька місяців після введення в дію, зруйнувався Такомський підвісний міст (США, штат Вашингтон), у якому виникли резонансні коливання під дією вітру (мал. 96).



Мал. 95. Резонансні криві



Мал. 96. Руйнування
Такомського моста

Конструюючи заводи, вокзали, мости, літаки та інші споруди, фахівці мають враховувати явище резонансу, не допускаючи, щоб їхній власний період коливань збігався з періодом коливань механізмів, які можуть викликати вимушені коливання цих конструкцій.

Автоколивальні системи. Отже, незагасаючі вимушені коливання можна отримати, діючи на тіло, здатне коливатись, періодичною зовнішньою силою. Проте можна зробити так, щоб коливальна система сама керувала зовнішнім впливом, забезпечуючи узгодженість дії сили зі своїм рухом. Така система називається автоколивальною, а її незагасаючі коливання — автоколиваннями.

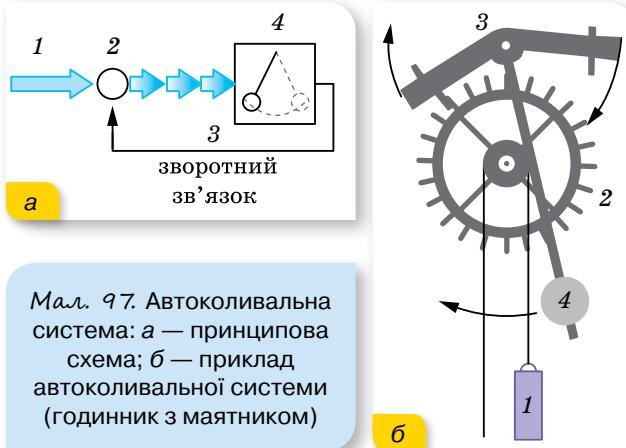


Автоколивання — незагасаючі коливання, спричинені сталим зовнішнім впливом на систему, яка сама регулює їх частоту.

На відміну від вимушених коливань, частота й амплітуда автоколивань визначаються властивостями самої коливальної системи. Від вільних коливань автоколивання відрізняються тим, що вони з часом не загасають, а також тим, що їхня амплітуда не залежить від початкового короткочасного впливу, який збуджує коливання.

У будь-якій автоколивальній системі виокремлюють три основні елементи (мал. 97, а; с. 106): 1 — джерело енергії, 2 — передавальний пристрій зі зворотним зв'язком 3, який регулює надходження енергії із джерела в коливальну систему 4.

Прикладом автоколивальної системи є годинник з маятником (мал. 97, б; с. 106). Джерелом енергії такої системи є гиря 1, передавальним пристроям — храпове колесо 2 й анкер 3, коливальною системою — маятник 4.



Мал. 9.7. Автоколивальна система: а — принципова схема; б — приклад автоколивальної системи (годинник з маятником)

Піднята над землею гиря, опускаючись, обертає храпове колесо. Оскільки гиря вільно опускається, то її рух є рівноприскореним. Для рівномірного обертання храпового колеса слугує маятник, який з'єднано із храповим колесом через анкер. За одну секунду маятник здійснює одне повне коливання. Призначення анкера полягає в тому, щоб храпове колесо, до якого кріпляться стрілки, повернулося лише на один зубець.

Маятниковий механізм нині ще використовується в годинниках на вежах або в настінних годинниках. Згодом маятниковий механізм годинників змінили на пружинний, електронний, кварцовий.

У техніці застосовують електромеханічні автоколивальні системи, в яких коливання здійснює механічна система, а надходження енергії регулюється спеціальним електричним пристроєм.

?

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які коливання називають вимушеними? Наведіть приклади вимушених коливань.
2. Від чого залежить амплітуда вимушених коливань? 3. Що називають резонансом? За яких умов він виникає? 4. Наведіть приклади позитивного та негативного резонансних проявів.
5. Які коливання називаються автоколиваннями? 6. Які елементи входять до складу автоколивальної системи? Наведіть приклади автоколивальних систем.

§ 23

Механічні хвилі

Характеристики хвильового руху. Досі ми розглядали коливання, які не виходили за межі коливальної системи. У повсякденному житті нам більше доводиться мати справу з коливаннями, які передаються від однієї системи до іншої. Наприклад, коливання поплавка передаються частинкам води, звукові коливання в повітрі — барабанній перетинці вуха.



Механічна хвиля — процес поширення коливань у пружному середовищі з плином часу.

Прикладом найпоширеніших механічних хвиль є звук, хвилі на поверхні рідин. Механізм поширення пружної хвилі полягає у збудженні коливань унаслідок деформації середовища й передавання збурення в сусідні його ділянки. Тобто коливання джерела хвиль спричиняють деформацію прилеглих до нього ділянок середовища. Унаслідок деформації в цих ділянках виникають сили пружності, які спричиняють переміщення частинок прилеглих до деформованих ділянок. Таким чином, коливання джерела хвилі зумовлює вимушені коливання сусідніх частинок, ті, свою чергою, збуджують коливання наступних частинок і т. д. Під час поширення хвиль частинки середовища лише коливаються відносно своїх положень рівноваги, тому перенесення речовини не відбувається. (Останнє іноді може відбуватися як супутнє явище в разі сильних збурень (*ударна хвиля*)).

Пружна хвиля може бути *поперечною*, якщо частинки коливаються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Напрямок поширення хвилі називають *променем*.

Поперечні хвилі виникають у середовищах, де можливі пружні деформації зсуву (у твердих тілах і в поверхневих шарах рідин).

Поздовжня хвиля утворюється, якщо коливання частинок середовища відбуваються в напрямку поширення хвилі.

Поздовжні хвилі виникають у середовищах, де можливі пружні деформації стиску та розтягу. Прикладом поздовжньої механічної хвилі є звук.

У газах і рідинах виникають лише поздовжні хвилі, які є чергуванням розріджень і згущень середовища. У твердих тілах можливі як поздовжні, так і поперечні пружні хвилі.

Для опису хвильових процесів уводять такі величини.



Фронт хвилі — геометричне місце точок, до яких на певний момент часу дійшли коливання.



Швидкістю поширення хвилі v називають швидкість поширення її фронту.

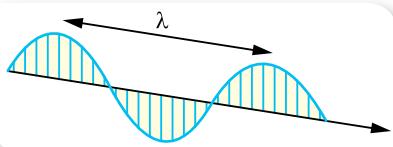
Швидкість пружної хвилі залежить від пружних властивостей і густини середовища $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, де E — модуль Юнга (характеризує пружні властивості середовища), ρ — густина середовища. В однорідному середовищі від точки, яка коливається, коливання поширюються в усіх напрямках зі сталою швидкістю.

Довжина хвилі λ — це відстань, на яку поширюється хвиля протягом одного періоду коливань (мал. 98), $\lambda = vT$, де v — швидкість поширення хвилі, T — період коливань джерела хвилі.

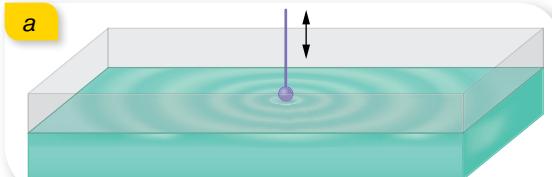
Точки середовища, віддалені одна від одної на відстань, що дорівнює довжині хвилі, коливаються в одинакових фазах. Можна сказати, що довжина хвилі — це найменша відстань між двома точками, які коливаються в однаковій фазі.

Досить наочними і знайомими є хвилі на поверхні води. Для демонстрації та дослідження таких хвиль використовують неглибоку ванночку, заповнену водою (мал. 99). Якщо до поверхні води дотикається точкове джерело, що періодично коливається, то утворюються сферичні хвилі (мал. 99, а). Фронт хвилі від точкового джерела в однорідному середовищі — сфера.

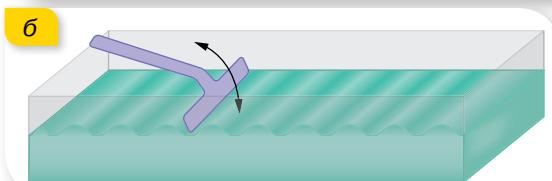
Якщо джерелом є пластина, що періодично коливається, то утворюються плоскі хвилі (мал. 99, б). Плоска хвиля — це хвилі, фронт якої — площа.



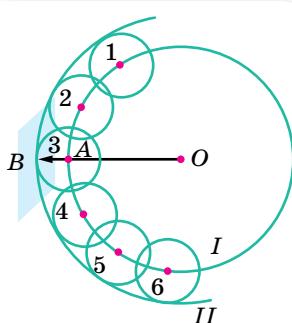
Мал. 98. Графічне зображення довжини хвилі



Мал. 99. Ванночки з водою для демонстрації: а — сферичної хвилі; б — плоскої хвилі



З'ясуємо, як хвильова теорія пояснює переміщення хвилі в просторі. Цю проблему вирішував ще в 1678 р. Християн Гюйгенс. Він припускав, що в деякий момент часу фронт сферичної хвилі, яка поширюється з точки O , займає положення I (мал. 100). Через деякий інтервал часу фронт займе положення II. Кожна точка фронту хвилі I є центром випромінювання вторинних елементарних хвиль 1, 2, 3, 4, ..., а поверхня II, яка охоплює їх через час Δt , дає нове положення фронту хвилі (мал. 100).



Мал. 100. Поширення хвилі за принципом Гюйгенса

Такий підхід називають принципом Гюйгенса: кожна точка середовища, до якої дійшли коливання, сама стає джерелом вторинних хвиль.

Принцип Гюйгенса пояснює багато хвильових явищ, серед яких — прямолінійне поширення, відбиття та заломлення хвиль, дифракція.

Рівняння плоскої гармонічної хвилі. Якщо коливання середовища спричинює періодична зовнішня сила, яка змінюється з часом за гармонічним законом, то породжені нею хвилі називають *гармонічними*. У цьому разі кожна частинка середовища, захоплена хвилею, здійснює гармонічні коливання із частотою зовнішнього впливу. Гармонічні хвилі є найпростішим і важливим видом хвильового руху. Ми обмежимось у подальшому розглядом саме таких хвиль.

Рівняння хвилі визначає положення коливної точки, яка лежить на відстані l від джерела в будь-який момент часу t . Якщо джерело коливань здійснює гармонічні коливання $x = x_{\max} \sin \omega t$, то відхилення цієї точки від положення рівноваги: $x = x_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{vT} \right)$ або $x = x_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right)$.

Відбивання механічних хвиль. Поширюючись у просторі, механічна хвилля може дійти до межі, де починається інше середовище. У такому разі механічні хвилі можуть відбиватися. На межі відбиття в момент відбивання може відбутись *відбивання із втратою півхвилі*, тобто після відбивання фаза коливань фронту хвилі змінюється на протилежну (наприклад, хвиля поширюється по шнурі опуклістю вперед, а після відбивання від поверхні — біжить уперед западиною), або *відбивання без втрати півхвилі* (хвиля, що до відбивання поширювалась опуклістю вперед, і після відбивання поширюватиметься опуклістю вперед).



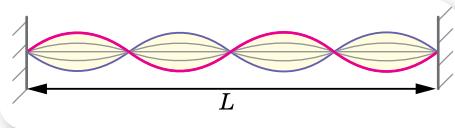
Стояча хвилля — це хвилля, що утворюється як результат накладання основної та відбитої хвиль, які поширюються назустріч одна одній, мають однакові періоди й амплітуди (мал. 101).

Стояча хвилля має точки, у яких амплітуда коливань найбільша (*пучності*) і в яких вона дорівнює нулю (*вузли*).

Оскільки пряма й відбита хвилі переносять енергію у взаємно протилежних напрямках, то стояча хвилля енергії не переносить, хоча між окремими точками обмін енергією відбувається.

Стоячі хвилі утворюються за умови, що лінійні розміри тіла L , у якому поширюється хвиля, кратні одній четвертій довжини хвилі $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$, тобто на відстані від джерела хвиль до межі, від якої хвилі відбиваються, вміщується ціле число чвертей хвилі.

Стоячі хвилі використовують для визначення довжини пружних хвиль, швидкості поширення хвиль, вивчення пружних властивостей тіл тощо. Механізм їх утворення покладено в основу конструювання струнних і духових музичних інструментів, органа.



Мал. 101. Стояча хвилля



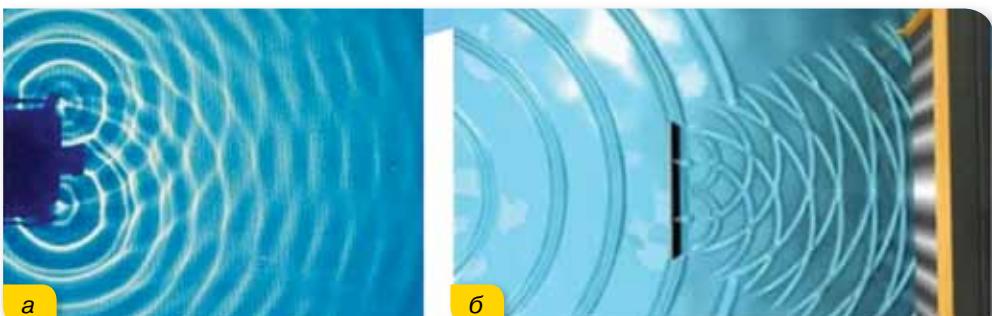
Мал. 102. Накладання хвиль

тою і зберігатимуть сталою різницю фаз (такі джерела називають *когерентними*), то утворені від таких джерел хвилі будуть накладатися по-особливому (мал. 103, а). У результаті накладання когерентних хвиль утворюється стійка картина коливань точок середовища, на якій видно, що в одних точках відбувається взаємне посилення хвиль і послаблення в інших, залежно від співвідношення між фазами цих хвиль. Описане явище називають *інтерференцією*.



Інтерференція — явище взаємного підсилення й послаблення коливань у різних точках середовища внаслідок накладання когерентних хвиль.

Відзначимо, що за інтерференції не відбувається простого додавання енергій хвиль. В інтерференційних максимумах інтенсивність результуючої хвилі більша за суму інтенсивностей хвиль, що накладаються, а в інтерференційних мінімумах — менша від їх суми. Тобто інтерференція хвиль приводить до перерозподілу енергії коливань між сусідніми областями середовища. Проте в середньому для великої області простору енергія результуючої хвилі дорівнює сумі енергій хвиль, які інтерферують, як і має бути згідно із законом збереження та перетворення енергії.

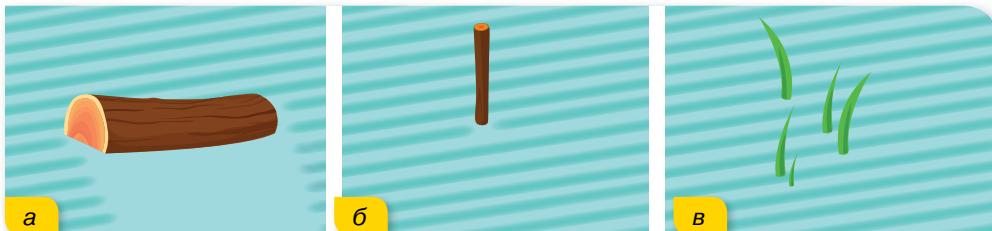


Мал. 103. Утворення інтерференційної картини: а — від двох когерентних джерел; б — від двох щілин (після проходження щілин також утворюються когерентні хвилі)

Розглянуті вище умови утворення стоячої хвилі є окремим випадком інтерференції.

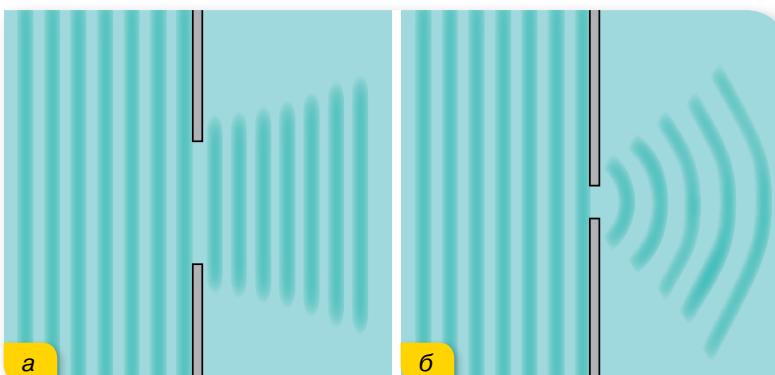
Хвилям притаманне також явище огинання перешкод (мал. 104), яке називають **дифракцією**.

Перешкоди порушують прямолінійність поширення фронту хвилі. Якщо перешкода велика (порівнюючи з довжиною хвилі), то за нею хвиль немає (мал. 104, а). Якщо розмір перешкоди приблизно дорівнює довжині хвилі, то хвилі заходять за її краї (мал. 104, б), малу перешкоду хвилі огинають так, що за нею фронт хвилі не змінюється (мал. 104, в).



Мал. 104. Огинання перешкод

Вигинання фронту хвилі можна спостерігати і в разі її проходження крізь отвір (мал. 105). Якщо отвір великий (порівняно з довжиною хвилі), то хвилі майже не заходять за його краї (мал. 105, а). Якщо отвір малий — хвилі помітно заходять за краї отвору (мал. 105, б). У цьому разі отвір є ніби самостійним джерелом хвиль, які й поширяються за перешкодою в усі боки. У результаті проходження хвилі через отвір його краї стануть джерелами вторинних когерентних хвиль, які, поширюючись, утворюють *інтерференційну картину*.



Мал. 105. Вигинання хвиль по краю отвору

Дифракція — явище відхилення хвилі від прямолінійного поширення в разі проходження повз край перешкоди.

Наведений опис явищ інтерференції та дифракції є вельми спрощеним. Вивчаючи електромагнітні хвилі, зокрема світлові, ми ще раз будемо розглядати ці явища і встановимо кількісні співвідношення для них. Головне — описані властивості хвильового процесу притаманні хвильам будь-якої природи, чи то механічним, чи електромагнітним.

Яскравим прикладом механічних хвиль є звук. Про його особливості, як фізичного й фізіологічного явища, читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

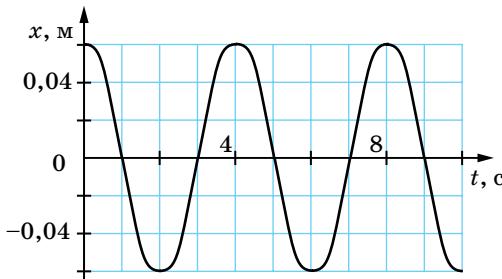
- Поясніть механізм утворення пружних механічних хвиль.
- У чому відмінність між поздовжньою та поперечною хвильами? У яких середовищах можуть поширюватися поздовжні хвилі, а в яких — поперечні?
- Від чого залежить швидкість поширення хвилі в пружному середовищі?
- Які властивості притаманні хвильовому рухові?



Перевірте себе (§ 18–23)



- Укажіть назви коливань, що відбуваються під впливом зовнішніх сил.
A гармонічні **B** вільні
B автоколивання **G** вимушені
- Дівчинка, що гойдається на гойдалці, проходить положення рівноваги 30 разів за хвилину. Укажіть частоту коливань.
A 30 Гц **B** 2 Гц **C** 0,5 Гц **D** 0,25 Гц
- Матеріальна точка здійснює гармонічні коливання. На малюнку зображено графічну залежність її координати від часу. Укажіть амплітуду коливань.

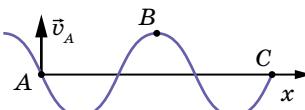


- Тягарець, підвішений на пружині, здійснює вертикальні коливання. Укажіть правильне твердження.
A що більшою є маса тягарця, то більша частота коливань
B потенціальна енергія пружини максимальна, коли тягарець проходить положення рівноваги

A 4 см **B** 6 см **C** 8 см **D** 12 см

- Тягарець, підвішений на пружині, здійснює вертикальні коливання. Укажіть правильне твердження.
A що більшою є маса тягарця, то більша частота коливань
B потенціальна енергія пружини максимальна, коли тягарець проходить положення рівноваги

- В** що більшою є жорсткість пружини, то меншим — період коливань
Г швидкість тягарця максимальна, коли тягарець перебуває в нижній точці
- 5.** На малюнку зображене поперечну хвилю в певний момент часу. Як напрямлена швидкість у точці С?



A угору
B униз

В ліворуч
Г праворуч

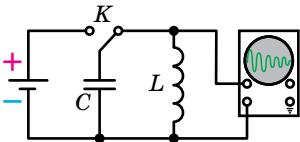
- 6.** Амплітуда коливань матеріальної точки — 2 см, період коливань — 0,2 с. Запишіть рівняння коливань, якщо вони почалися з амплітудного відхилення від положення рівноваги.
- 7.** Матеріальна точка масою 5 г здійснює гармонічне коливання із частотою 0,5 Гц. Амплітуда коливань — 3 см. Визначте: 1) швидкість точки в момент часу, коли зміщення — 1,5 см; 2) максимальну силу, що діє на точку; 3) повну енергію точки, що коливається.
- 8.** На озері з човна в безвітряну погоду скинули якір. Дослідник, який стояв на березі, полічив, що хвиля досягла берега за 1 хв, а за 10 с відбувся 21 сплеск, почавши відлік з першого. Відстань між сусідніми гребенями хвиль становила 0,7 м. Визначте відстань від човна до берега.

§ 24

Вільні електромагнітні коливання

Коливальний контур. Електромагнітні коливання були відкриті дещо випадково. Це сталося після того, як винайшли лейденську банку (перший конденсатор) і навчилися надавати їй великого заряду за допомогою електростатичної машини. Спостерігаючи електричний розряд банки, обкладки лейденської банки замикали на дротяну котушку. Виявилося, що сталальні спиці всередині котушкі намагнічуються. У цьому нічого дивного не було: електричний струм і має намагнічувати сталіне осердя котушкі. Здивувало інше: не можна було передбачити, який кінець осердя котушкі буде північним полюсом, а який — південним. Повторювавши дослід приблизно в одинакових умовах, діставали то один результат, то інший, і не відразу зрозуміли, що під час розрядження конденсатора через котушку виникають коливання.

Ми не можемо безпосередньо сприймати нашими органами чуття електромагнітні коливання так, як бачимо коливання маятника абочуємо коливання струни. Але можемо використати електронний осцилограф — пристрій, на екрані якого можна спостерігати за електромагнітними коливаннями.

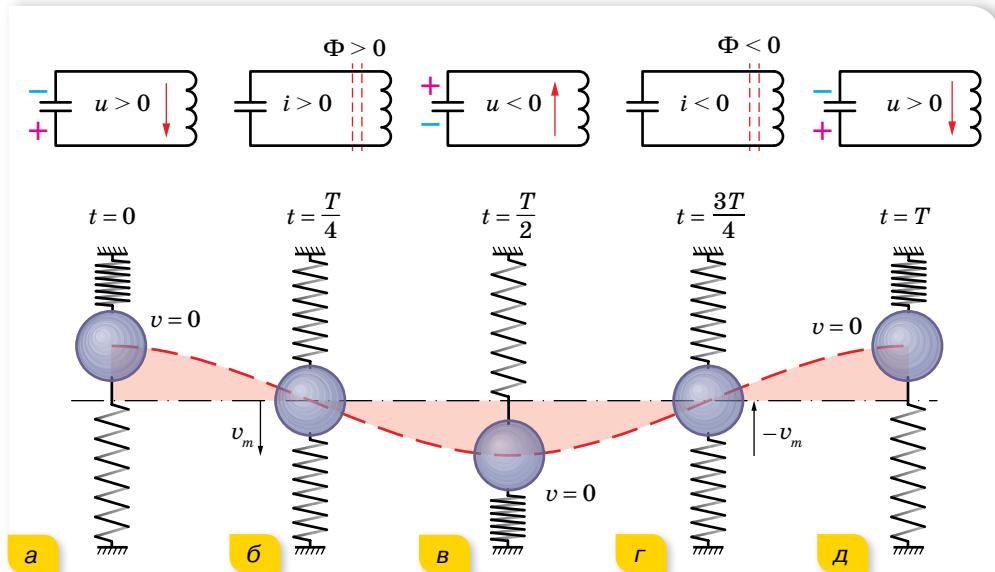


Мал. 106.
Спостереження
електромагнітних
коливань

Проведемо дослід (мал. 106). Зарядивши конденсатор від джерела постійного струму, замкнемо його котушкою, до якої паралельно підключено осцилограф. На екрані осцилографа ми будемо спостерігати осцилограму, яка свідчить про наявність електромагнітних коливань. Отже, найпростішою установкою, в якій можна спостерігати електромагнітні коливання, є електричне коло — **коливальний контур**, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C . Такий коливальний контур називають закритим, оскільки він майже не випромінює енергії в довкілля.

Коливання, які виникають у коливальному контурі після початкового виведення системи з положення стійкої рівноваги, здійснюються завдяки внутрішнім силам системи, не зазнаючи впливу з боку змінних зовнішніх сил, тобто є **вільними**.

Перетворення енергії в коливальному контурі. Розглянемо детальніше, як відбуваються електромагнітні коливання (мал. 107). (Для порівняння і наочності на малюнку з кожним станом коливального контура зіставлене певне положення тягарця, підвішеного на пружині, що здійснює механічні коливання.)



Мал. 107. Аналогія електромагнітних і механічних коливань

Перед початком конденсатор заряджають. У початковий момент ($t = 0$) після замикання обкладок зарядженого конденсатора через котушку в колі виникає струм, який збільшується поступово, оскільки його збільшенням протидіє вихрове електричне поле, що виникає внаслідок збіль-

шення магнітного потоку котушки. Упродовж часу $t = \frac{T}{4}$ струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора $W_e = \frac{CU^2}{2}$ не перетвориться на енергію магнітного поля котушки $W_m = \frac{LI^2}{2}$. (Цей процес аналогічний перетворенню енергії деформованої пружини на кінетичну енергію руху тягарця.)

З моменту $t = \frac{T}{4}$ струм у колі продовжує протікати внаслідок процесу самоіндукції, при цьому конденсатор перезаряджається, між його пластинами зростає електричне поле, яке заважає протіканню струму. Струм зменшується поступово, оскільки його підтримує вихрове електричне поле, що виникає внаслідок зменшення магнітного поля котушки. Струм припиниться, коли вся енергія магнітного поля котушки перейде в енергію електричного поля конденсатора $\left(t = \frac{T}{2}\right)$. (Подібно до того, як тягарець у положенні рівноваги з максимальною швидкістю за інерцією продовжує рухатися вниз, стискаючи пружину. Кінетична енергія руху тягарця перетворюється на потенціальну енергію пружини.)

Потім процес повторюється у зворотному напрямку. З моменту $t = \frac{T}{2}$ конденсатор знову розряджається, і в контурі виникає струм зворотного напрямку. Енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а магнітного поля — зростає. Момент часу $t = \frac{3}{4}T$, коли конденсатор повністю розрядиться, а сила струму досягне максимального значення і максимальною буде енергія магнітного поля, відповідає проходженню тягарцем положення рівноваги.

Після цього струм самоіндукції заряджатиме конденсатор, і коливальна система повернеться у вихідне положення ($t = T$).

В ідеальному випадку, якщо б у коливальному контурі не було втрат енергії, цей процес тривав би як завгодно довго. Коливання були б незатухаючими. Через інтервали часу, що дорівнюють періоду коливань, стан системи точно повторювався б. Повна енергія при цьому зберігалася б і в будь-який момент часу дорівнювала максимальній енергії електричного поля конденсатора або максимальній енергії магнітного поля котушки

$$\text{зі струмом, } W = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \text{const.}$$

Коливання, які відбуваються в ідеальній системі без тертя, тобто без втрат механічної енергії, ще називають *власними*. **Власні коливання** — це теоретично можливі вільні незатухаючі коливання.

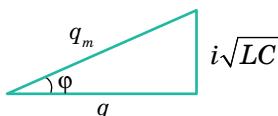
Насправді втрати енергії неминучі. Зокрема, котушка та з'єднувальні провідники мають опір R , і це спричиняє поступове перетворення енергії електромагнітного поля на внутрішню енергію провідника.

Рівняння гармонічних електромагнітних коливань. Вираз для зміни заряду й сили струму в ідеальному коливальному контурі (при $R \rightarrow 0$)

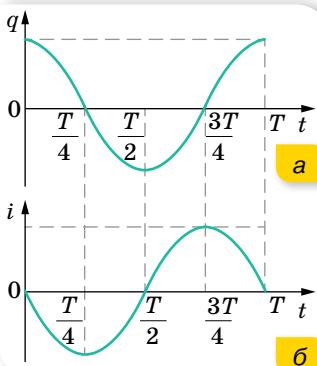
можна отримати із закону збереження енергії: $\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, де u та

i — миттєві значення напруги й сили струму. Оскільки $u = \frac{q}{C}$, $U_m = \frac{q_m}{C}$,

то $\frac{q^2}{2C} + \frac{i^2 LC}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$. Помноживши останній вираз почленно на $2C$, отримаємо $q^2 + i^2 LC = q_m^2$, або $q^2 + (i\sqrt{LC})^2 = q_m^2$.



Мал. 108. До виведення рівняння електромагнітних коливань



Мал. 109. Графіки коливань заряду (а) та сили струму (б)

Оскільки напруга на конденсаторі в будь-який момент часу визначається співвідношенням $U = \frac{q}{C}$, то рівняння зміни напруги в коливальному контурі має вигляд: $u = \frac{q_m}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t$, де $U_m = \frac{q_m}{C}$ — амплітуда напруги.

Графіки коливань заряду та сили струму наведено на малюнку 109.

Формула періоду власних електромагнітних коливань. Знайдемо формулу для визначення періоду власних коливань, використавши те, що всі закономірності гармонічних коливань у механіці зберігають свою суть і для електромагнітних коливань. Як відомо, період коливань зв'язаний

Цей вираз геометрично можна зобразити у вигляді прямокутного трикутника, гіпотенуза якого q_m , а катети q і $i\sqrt{LC}$ (мал. 108). З малюнка видно, що $q = q_m \cos \varphi$, $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$.

Отримані вирази свідчать, що заряд конденсатора й сила струму в котушці змінюються за гармонічним законом. Водночас між коливаннями заряду на обкладках конденсатора й сили струму в колі існує різниця фаз $\frac{\pi}{2}$. З малюнка

також видно, що $\cos \varphi = \frac{q}{q_m}$. Оскільки миттєве значення заряду q конденсатора — величина змінна, а амплітудне значення q_m — стала, то φ — також постійно змінюється.

Швидкість зміни фази коливань $\left(\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}\right)$ є циклічною частотою ω . Тепер формулу для зміни заряду можна записати у вигляді $q = q_m \cos \omega t$. Ураховуючи, що $i = q'$, формулу зміни сили струму отримаємо, обчисливши похідну,

$i = q' = -q_m \omega \sin \omega t$, де $q_m \omega = I_m$ — максимальне

значення сили струму. Зрештою маємо: $i = -I_m \sin \omega t$.

Оскільки напруга на конденсаторі в будь-який момент часу визначається співвідношенням $U = \frac{q}{C}$, то рівняння зміни напруги в коливальному конту-

рі має вигляд: $u = \frac{q_m}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t$, де $U_m = \frac{q_m}{C}$ — амплітуда напруги.

Графіки коливань заряду та сили струму наведено на малюнку 109.

Формула періоду власних електромагнітних коливань. Знайдемо формулу для визначення періоду власних коливань, використавши те, що всі закономірності гармонічних коливань у механіці зберігають свою суть і для електромагнітних коливань. Як відомо, період коливань зв'язаний

із циклічною частотою співвідношенням $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Зіставивши дві форми

рівняння: $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$ та $i = -q_m \omega \sin \omega t$, бачимо, що $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Тоді

$T = 2\pi\sqrt{LC}$. Цю формулу для *періоду вільних електромагнітних коливань* в ідеальному коливальному контурі теоретично вивів у 1853 р. англійський фізик Вільям Томсон, тому її називають *формулою Томсона*. З формулі видно, що період власних коливань зростає зі збільшенням ємності та індуктивності контура. Пояснюють це тим, що зі збільшенням індуктивності контура сила струму повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А що більшою є ємність контура, то більше часу потрібно для перезаряджання конденсатора.

Застосовуючи формулу зв'язку між періодом коливань T і частотою v , визначимо *власну частоту коливань* у контурі: $v = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Із цієї формулі видно, що для одержання в контурі коливань високої частоти ємність й індуктивність контура мають бути якомога меншими.

Отримання незатухаючих коливань. У реальному контурі заряджений конденсатор спричиняє виникнення лише затухаючих коливань. У кінці кожного періоду коливань заряд на пластинах конденсатора зменшується порівняно з початком періоду. Зрозуміло, заряд зберігається, але зменшується на однакову за модулем величину позитивного заряду на одній пластині й негативного на іншій. Унаслідок чого енергія коливань зменшується, оскільки вона пропорційна квадрату заряду, $W_e = \frac{q_m^2}{2C}$. Щоб коливання не затухали, потрібно компенсувати втрати енергії за кожний період.

Поповнювати енергію в контурі можна, підзаряджаючи конденсатор. Для цього потрібно періодично вмикати контур у коло джерела постійної напруги. При цьому конденсатор має вмикатися в коло джерела лише в ті проміжки часу, коли приєднана до позитивного полюса джерела пластина заряджена позитивно, а та, що приєднана до негативного полюса, — негативно. Тільки за такої умови джерело підзаряджатиме конденсатор, поповнюючи його енергію. Тобто джерело постійної напруги, яке весь час під'єднане до конденсатора контура, не може підтримувати в ньому незатухаючих коливань. Адже половину періоду енергія надходитиме в контур, а в наступну половину періоду — повернеться до джерела. Незатухаючі коливання встановляться в контурі лише за умови, що джерело вмикатиметься в контур у ті інтервали часу, коли це потрібно. Система, яка сама регулює надходження енергії в коливальний контур для компенсації її втрат, називається *автоколивальною*.

Про принцип дії генератора на транзисторі читайте в електронному додатку.





ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЧУМЮ

- 1.** У початковий момент часу конденсатор заряджений. Якою буде локалізація енергії в моменти $\frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}$ від початку коливань? **2.** Заряд q на пластинах конденсатора коливального контура змінюється із часом t за законом $q = 10^{-6} \cos 10^4 \pi t$ (усі величини в СІ). Запишіть закон залежності сили струму від часу, $i(t)$. Визначте період і частоту коливань у контурі, амплітуду коливань заряду й амплітуду коливань сили струму.



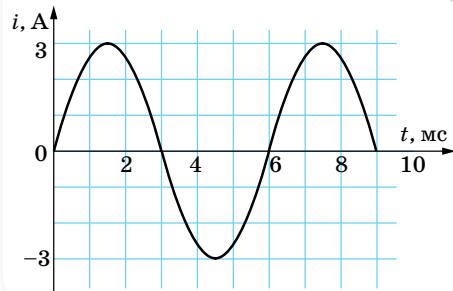
Приклади розв'язування задач

Задача¹. На малюнку 110 наведено графік залежності сили струму від часу для вільних електромагнітних коливань у контурі. Визначте ємність конденсатора, якщо індуктивність катушки дорівнює 0,1 Гн. Запишіть рівняння залежності сили струму в контурі й напруги від часу. Побудуйте графік залежності $u(t)$.

Дано:

Графік $i(t)$
 $L = 0,1$ Гн
 $C — ?$

$u(t) — ?$
 $i(t) — ?$



Мал. 110

Розв'язання:

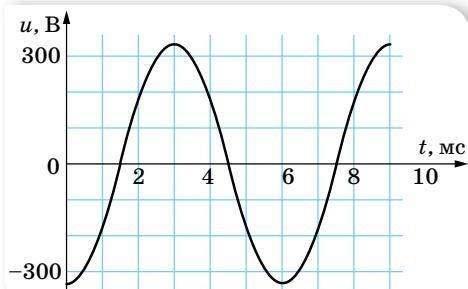
З графіка видно, що $T = 6$ мс = $6 \cdot 10^{-3}$ с. За формулою Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$ знаходимо $C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}$, $C = 9,1$ мкФ.

З графіка видно, що $I_m = 3$ А. Тоді з рівності максимальних енергій у коливальному контурі, $\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, обчислюємо $U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$, $U_m = 314$ В.

Оскільки $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{\pi}{3} \cdot 10^3$ с⁻¹ і коливання сили струму, як видно з графіка, здійснюються за законом синуса з початковою фазою, яка дорівнює нулю, а саме $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$, то рівняння зміни напруги матиме вигляд $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.

Графік залежності $u(t)$ зображеного на малюнку 111.

Відповідь: $C = 9,1$ мкФ; $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$; $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.



Мал. 111. Графік коливань напруги

¹ Якщо в умові задачі немає ніяких застережень, то вважається, що коливальний процес відбувається в ідеальному коливальному контурі.



Вправа 18

- Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1 мкФ і катушки індуктивністю 4 Гн. Амплітуда коливань заряду на конденсаторі становить 100 мкКл. Напишіть залежності $q(t)$, $i(t)$, $u(t)$. Визначте амплітуди коливань сили струму та напруги.
- Коливальний контур складається з катушки, індуктивність якої 0,2 мГн, та двох однакових конденсаторів ємністю 4 мкФ кожний, з'єднаних послідовно. Визначте період вільних коливань у контурі, максимальний заряд конденсатора та максимальну напругу на кожному конденсаторі. Максимальна сила струму в контурі — 0,1 А.
- У коливальному контурі індуктивністю L і ємністю C конденсатор заряджений до максимальної напруги U_m . Якою буде сила струму в момент, коли напруга на конденсаторі зменшиться у 2 рази? Коливання вважайте незатухаючими.
- У коливальному контурі індуктивність катушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначте енергію електричного поля конденсатора й магнітного поля катушки в той момент, коли миттєве значення сили струму буде у 2 рази меншим, ніж амплітудне значення.
- Катушку якої індуктивності треба ввімкнути в коливальний контур, щоб при ємності конденсатора 50 пФ дістати частоту вільних коливань 10 МГц?
- У скільки разів зміниться частота власних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшили у 25 разів, а індуктивність катушки зменшили в 16 разів?
- Конденсатор, який має ємність 10 мкФ, зарядили до напруги $U_{max} = 400$ В і приєднали до катушки. Після цього в контурі виникли затухаючі коливання. Яка кількість теплоти виділиться в контурі за час, протягом якого амплітуда коливань зменшиться у 2 рази?

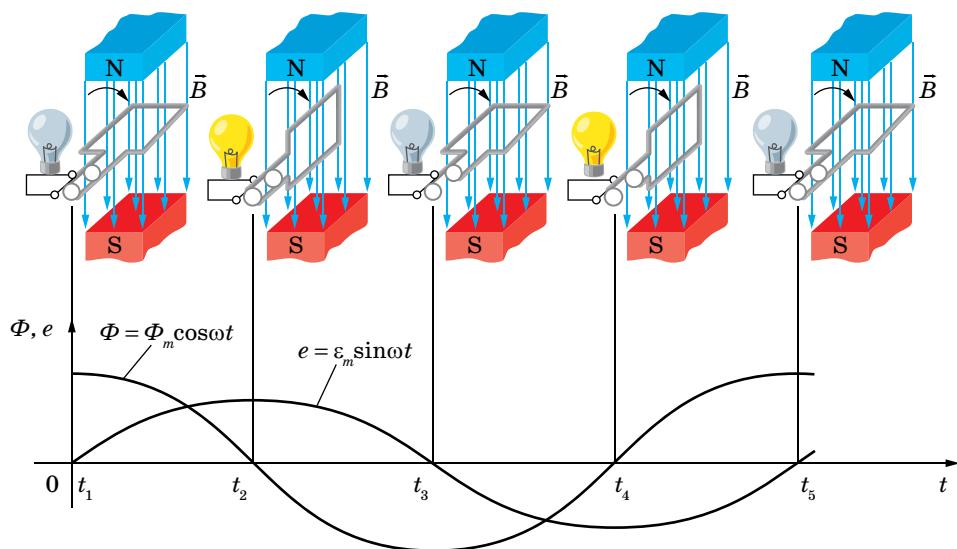
§ 25 Змінний струм

Обертання прямокутної рамки в однорідному магнітному полі.

Досліджаючи явище електромагнітної індукції, з'ясували, що у випадку обертання рамки в магнітному полі в ній виникає індукційний струм. Дослідимо це явище детальніше.

Нехай у початковий момент часу рамка розташована так, що напрямок нормалі \vec{n} до неї збігається з напрямком індукції магнітного поля \vec{B} , у якому рамка обертається (мал. 112, с. 120). Магнітний потік, який при цьому пронизує рамку, $\Phi_m = BS$, має максимальне значення. Рамка обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω за годинниковою стрілкою, отже, в будь-який момент часу t кут повороту φ рамки $\varphi = \omega t$. Відповідно значення магнітного потоку, який пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$. Ця формула визначає зміну магнітного потоку через контур рамки площею S , яка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі індукцією B з кутовою швидкістю ω .

Згідно із законом електромагнітної індукції, в разі зміни магнітного потоку, що пронизує контур, виникає електрорушійна сила індукції $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Для швидкозмінних процесів $\Delta t \rightarrow 0$, тоді за означенням похідної: $\varepsilon_i = -\dot{\Phi}'$. Формула для обчислення ЕРС індукції, що виникає в рамці, у будь-який момент часу t набуває вигляду $\varepsilon_i = -\dot{\Phi}' = BS \omega \sin \omega t$.



Мал. 112. Обертання рамки в магнітному полі

Отже, за умови рівномірного обертання рамки в однорідному магнітному полі в ній виникає ЕРС індукції, яка з часом змінюється за синусоїdalальним законом. Якщо рамка має N витків, то ЕРС індукції на її клемах буде в N разів більшою: $\varepsilon_i = BS\omega \sin \omega t$. Зрозуміло, що максимальних значень ε_i досягає в ті моменти, коли $\sin \omega t = \pm 1$. Тоді максимальне значення ЕРС індукції $\varepsilon_m = BS\omega$. За один оберт рамки електрорушійна сила змінює своє значення і знак двічі, тобто здійснює одне повне коливання.

Вимушені електромагнітні коливання — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, спричинені електрорушійною силою, що періодично змінюється.

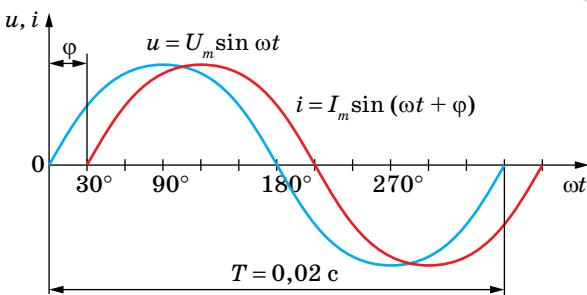
Закон зміни ЕРС можна записати так: $e = \varepsilon_m \sin \omega t$, де колова (циклічна) частота ω збігається з кутовою швидкістю обертання рамки в магнітному полі. Для кутової частоти справджаються формули: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, де ν — частота коливань, T — період коливань.

Змінний струм. Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний струм.

Змінними вважають струми, які змінюються як за значенням, так і за напрямком.

Якщо до генератора змінного струму, напруга на полюсах якого змінюється за законом $u = U_m \sin \omega t$, під'єднати будь-яке навантаження (наприклад, електричний двигун, батарею конденсаторів, нагрівальний

прилад і т. ін.), по колу проходитиме змінний струм $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, де φ — зсув фаз між коливаннями сили струму та напруги (мал. 113). Причиною виникнення зсуву фаз між струмом і напругою в загальному випадку є різний опір кола змінного струму (про це детальніше — в наступних параграфах).



Мал. 113. Графіки зміни напруги та сили змінного струму

Найпростішим способом одержання низькочастотних змінних струмів є обертання рамки з провідниками в однорідному магнітному полі (або навпаки — обертання магнітного поля, яке перетинає нерухомі провідники). Цей принцип закладено в роботу генераторів змінного струму (індукційних генераторів). Читайте про них в електронному додатку.



Діючі значення сили струму та напруги. У колі змінного струму напруга й сила струму повсякчас змінюються. Постає запитання: якими значеннями сили струму чи напруги характеризувати цей струм? Середні значення сили струму й напруги за період дорівнюють нулю і не можуть бути їхніми характеристиками. Проте середнє значення квадрата сили струму за період відмінне від нуля. Пригадаймо, що кількість виділеного в провіднику тепла при проходженні по ньому постійного струму змінюється пропорційно квадрату сили струму, $Q \sim I^2$. Якщо сконструювати вимірювальний прилад (тепловий амперметр), у якого відхилення стрілки буде пропорційним квадрату сили струму, і включити його в коло змінного струму, то він покаже певне значення. Який фізичний зміст цього показу?

Оскільки шкала приладу відградуйована для постійного струму, то можна зробити висновок, що змінний струм за своїм тепловим ефектом еквівалентний постійному струму, силу якого показує на шкалі приладу стрілка. Це дає змогу ввести характеристику змінного струму — *ефективне (або діюче) значення сили змінного струму*.

Ефективним (або діючим) значенням сили змінного струму називають силу такого постійного струму, який за один період змінного струму виділяє стільки ж тепла, скільки останній виділяє за той самий час.

Усі амперметри, призначенні для змінного струму, показують ефективне значення сили струму.

Оскільки середнє за період значення квадрата сили струму становить $\frac{I_m^2}{2}$, то корінь квадратний із цього виразу й буде визначати діюче

значення сили струму $I = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$. Так само визначається і **діюче значення напруги** та ЕРС змінного струму: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$.

У США й Канаді, наприклад, стандартна напруга мережі змінного струму дорівнює 120 В, що відповідає 170 В амплітудного значення. У Європі ефективна напруга 240 В, амплітудна відповідно — 340 В. У нашій країні ефективна напруга 220 В, амплітудна — 310 В. Усі вольтметри, призначені для змінного струму, показують ефективні значення ЕРС і напруги.

Потужність у колі змінного струму. У випадку постійного струму потужність визначається за формулою $P = UI$. Для кола змінного струму ця формула не застосовна, оскільки сила струму й напруга змінюються. Але сила струму й напруга мають постійні амплітудні значення і змінюються за однаковими законами, отже, і середнє значення потужності за будь-який період і за будь-яку кількість періодів буде однаковим. Унаслідок цього й середня потужність у колі змінного струму буде постійною. Отже, щоб знайти потужність змінного струму, достатньо визначити середньою потужність за один період: $P = \frac{A}{T}$, де A — середня робота струму за період T . Тоді середня потужність струму за період: $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Як можна отримати ЕРС, яка б змінювалася за законом синуса?
- Який струм називають змінним? Що таке діючі значення сили струму та напруги?



Приклади розв'язування задач

Задача. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл розміщено виток із провідника, площа контура якого $0,1 \text{ м}^2$, а опір 2 Ом, таким чином, що його площа перпендикулярна до ліній індукції. Виток замкнено на гальванометр. Повний заряд, що пройшов через гальванометр під час повороту витка, дорівнює $7,5 \cdot 10^{-3}$ Кл. На який кут повернули виток?

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$S = 0,1 \text{ м}^2$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$\Delta q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$$

$\alpha = ?$

Розв'язання:

Заряд $\Delta q = I \Delta t$. За законом Ома сила струму $I = \frac{\varepsilon_i}{R}$.

ЕРС індукції ε_i визначаємо за законом Фарадея:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t},$$

де $\Phi_1 = BS$ — потік магнітної індукції через площину контура, що охоплює виток на початку повороту; $\Phi_2 = BS \cos \alpha$ — кінцевий потік. Для індукційного заряду маємо вираз:

$$\Delta q = \frac{(BS - BS \cos \alpha) \Delta t}{R \Delta t} = \frac{BS(1 - \cos \alpha)}{R}; \cos \alpha = 1 - \frac{R \Delta q}{BS};$$

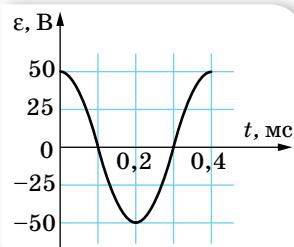
$$\cos \alpha = 1 - \frac{2 \text{ Ом} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м}^2} = -0,5; \alpha = 120^\circ.$$

Відповідь: $\alpha = 120^\circ$.



Вправа 19

- Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі потік магнітної індукції, який пронизує її, змінюється залежно від часу за законом $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$ (усі величини задано в одиницях СІ). Обчисліть похідну ($\dot{\Phi}$) і напишіть формулу залежності ЕРС від часу $e = e(t)$. У якому положенні була рамка на початку відліку часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення магнітного потоку та ЕРС?
- Рамка, що має площину 200 см^2 , обертається з кутовою швидкістю $50 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ в однорідному магнітному полі, індукція якого $0,4 \text{ Тл}$. Напишіть формули залежності магнітного потоку та ЕРС від часу, якщо за $t = 0$ нормаль до площини рамки перпендикулярна до ліній індукції поля.
- За графіком (мал. 114) визначте амплітудне значення змінної ЕРС, її період і частоту. Запишіть формулу зміни ЕРС із часом.
- Зміну сили струму залежно від часу задано рівнянням $i = 5 \cos 200\pi t$. Визначте частоту та період коливань, амплітуду сили струму, а також значення сили струму за фази $\frac{\pi}{3}$ рад.
- Яке значення напруги буде через 10 , 15 та 30 мс, якщо амплітуда напруги становить 200 В , а період — 60 мс ? Вважайте, що коливання напруги здійснюються за синусоїдальним законом, з початковою фазою, яка дорівнює нулю.



Мал. 114

§ 26

Активні та реактивні навантаження в електричному колі змінного струму

Активні та реактивні навантаження. У колах змінного струму існують два принципово різних види навантажень — активні й реактивні. Навантаження, в якому вся підведена електрична енергія перетворюється на інший вид енергії, називають *активним*, опір цього навантаження також називають *активним опором*.

Величина струму в колі змінного струму залежить не тільки від його активного опору. У будь-якому колі змінного струму діє електрорушійна сила індукції, яка, за правилом Ленца, перешкоджає будь-якій зміні електричного струму в колі, затримує наростання струму і зменшує його

діюче значення, тобто діє як опір. Цей опір називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

Крім того, в колі змінного струму після його розмикання по провідниках (особливо в кабелях) ще протягом деякого часу протікає струм, наявність якого можна виявити чутливим амперметром. Це пояснюється тим, що провідники, якими приєднані споживачі, подібні до конденсатора, що підтримує в колі зарядний і розрядний струми. Ці струми при замиканні кола збільшують діюче значення струму в споживачі. Вплив ємності кола на величину діючого значення змінного струму враховується його *емнісним опором* X_C .

Отже, коло змінного струму має три опори: активний, індуктивний та ємнісний. Індуктивний і ємнісний опори називають *реактивними опорами*.

Природа реактивних опорів польова, тобто їхнє походження пов'язане зі змінами електричного поля (наприклад, конденсатора) або магнітного (наприклад, котушки зі струмом). Реактивні опори не спричинюють необоротних перетворень енергії. У колах лише з реактивними опорами відбуваються тільки оборотні процеси: протягом першої чверті періоду енергія струму перетворюється на енергію електричного поля конденсатора (або магнітного поля котушки), а протягом другої чверті періоду енергія поля знову перетворюється на енергію струму. Тому в таких колах середня потужність за період дорівнює нулю, незважаючи на струм у колі. Це легко продемонструвати, увімкнувши в коло з конденсатором ваттметр. Стрілка цього приладу не відхиляється, хоча в колі є напруга й тече струм, які реєструють відповідно вольтметр і амперметр.

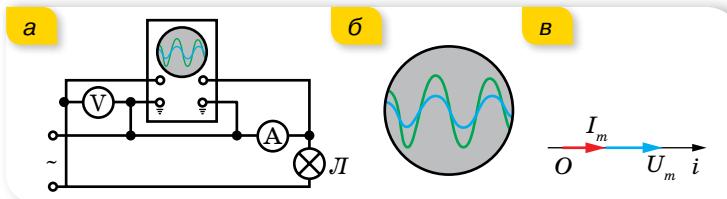
Розглянемо спочатку найпростіші ідеальні кола змінного струму, які мають лише один із трьох опорів, а потім — складніші.

Активний опір у колі змінного струму. Електричні кола, що складаються з електричних ламп, нагрівальних приладів, реостатів і з'єднувальних провідників, практично можна вважати колами тільки з активним опором. У цих колах електрична енергія майже цілком перетворюється на теплову.

Проведемо такий дослід. Підключимо до генератора змінного струму дуже низької частоти активне навантаження, наприклад, лампу розжарювання. Генератор створює в колі змінне електричне поле, напруга якого змінюється синусоїдально. Підключимо паралельно лампі вольтметр, а послідовно з лампою — амперметр. Замкнувши коло, побачимо, що стрілки приладів одночасно проходять через нульові й максимальні значення.

Якщо, крім вольтметра й амперметра, додати двоканальний осцилограф, підключений так, як показано на малюнку 115, а, то на його екрані спостерігатимемо збіг осцилограм сили струму та напруги за фазою (мал. 115, б).

У колах змінного струму з активним навантаженням коливання сили струму збігаються за фазою з коливаннями напруги, отже, якщо $u = U_{\max} \sin \omega t$, то $i = I_{\max} \sin \omega t$.



Мал. 115. а — осцилограф у колі змінного струму з активним навантаженням; б — осцилограма; в — векторна діаграма

Фазові спiввiдношення мiж струмом i напругою в колах змiнного струму стають особливо наочними у векторному зображенi. Для цього вiзьмемо довiльну вiсь Oi , що називається вiссю струму, i вiд точки O вiдкладемо вектор сили струму довжиною I_m . Оскiльки в колi з активним опором коливання сили струму i напруги збiгаються за фазою, вектор напруги буде напрямлений так само, як i вектор сили струму (мал. 115, в).

Значення активного опору R у колi змiнного струму можна визначити як вiдношення миттевих значень напруги та струму або як вiдношення амплiтуд напруги та струму, а також їх амплiтудних або дiючих значень:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin \omega t} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}.$$

Як ми з'ясували, середня потужнiсть змiнного струму за перiод вiзначається через максимальнi значення напруги та сили струму i зсув фаз мiж ними, $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$, або через дiючi значення, $P = IU \cos \varphi$.

В електричному колi, яке мiстить лише активнi опори, струм i напруга збiгаються за фазами ($\cos \varphi = 1$), тому середня потужнiсть, що споживається активним опором за перiод, дорiвнює добутковi дiючих значень струму i напруги. Уся ця потужнiсть витрачається на нагрiвання: $P = UI = I^2 R$.

Обчислена в такий спосiб потужнiсть вимiрюється у ватах i називається *активною потужнiстю*.

Конденсатор у колах постiйного та змiнного струму. Пiдключимо до джерела постiйного струму конденсатор великої ємностi та амперметр. У момент замикання кола стрiлка амперметра вiдхиляється на кiлька подiлок, а потiм повертається в нульове положення. Це вiдбувається тому, що при замиканнi кола проходить короткочасний струм зарядки конденсатора до напруги джерела. Пiсля того як конденсатор зарядиться, струм у колi припиниться. Якщо ж подiбне коло (але з амперметром змiнного струму) пiд'єднати до джерела змiнного струму, можна спостерiгати, що струм у колi не припиняється.

На перший погляд, це здається дивним: у колi, розiмкнутому дiелектриком конденсатора, проходить струм! Пояснюється це тим, що змiнний струм — це вимушенi коливання, зумовленi дiєю змiнного поля генератора. Конденсатор протягом першої чвертi перiоду заряджається: на його пластинах з'являються електричнi заряди. Протягом другої чвертi

періоду конденсатор розряджається. Відповідно протягом третьої чверті конденсатор знову заряджається, а протягом четвертої чверті — розрядається. У колі тече струм перезарядки конденсатора.

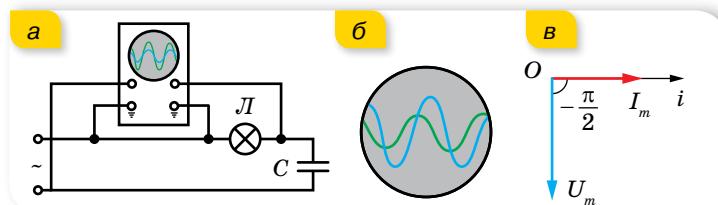
Якщо до генератора змінного струму приєднати лампу розжарювання, вона світитиме яскраво. Якщо в це коло послідовно з лампою включити конденсатор, яскравість лампи зменшиться. Це свідчить про зменшення сили струму, зумовлене збільшенням опору.

Отже, конденсатор чинить змінному струму опір, який називають **ємнісним опором**, позначають його X_C . Причиною цього опору є електричне поле зарядів на пластинах конденсатора, це поле протидіє полю джерела струму.

Формулу для визначення ємнісного опору можна вивести за допомогою математичних перетворень. Напруга на конденсаторі $u = \frac{q}{C}$ дорівнюватиме напрузі на кінцях кола $u = U_m \sin \omega t$. Звідки $q = U_m C \sin \omega t$. Ураховуючи, що $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q' = U_m C \omega \cos \omega t$, де $U_m C \omega = I_m$, останній вираз можна записати у вигляді $\frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}$, де $\frac{1}{\omega C}$ є виразом для визначення ємнісного опору — опору, який чинить конденсатор змінному струмові. Остаточно $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Ємнісний опір можна визначати й через відповідні діючі значення сили струму та напруги: $X_C = \frac{U}{I}$.

Закон Ома для ділянки кола з ємнісним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_C}$.



Мал. 116. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з конденсатором (а, б); в — векторна діаграма

Якщо на один вхід двоканального осцилографа (мал. 116, а) подати напругу з конденсатора, а на інший — напругу, миттеве значення якої пропорційне сили струму в колі (цю напругу знімають з електролампи), то на екрані можна побачити одночасно осцилограмами обох коливань — напруги та сили струму. Уважний аналіз осцилограм показує, що коливання сили струму та коливання напруги в колі з конденсатором зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання сили струму випереджають за фазою коливання напруги (мал. 116, б). На перший погляд, це здається дивним.

Проте результати досліду мають простий фізичний зміст: напруга на конденсаторі в довільний момент часу визначається наявним на пластинах електричним зарядом, який утворюється в результаті проходження струму, необхідного для зарядки конденсатора. Тому коливання напруги відстають від коливань сили струму.

У колах змінного струму, що містять ємнісне навантаження, коливання напруги $u = U_m \sin \omega t$ відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, $i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Фазові співвідношення між силою струму й напругою на ділянці кола з конденсатором зображені за допомогою векторних діаграм на малюнку 116, в. Оскільки коливання напруги відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, то вектор напруги повернуто щодо вектора сили струму на $-\frac{\pi}{2}$.

Відомо, що потужність у колі змінного струму визначається формуловою $P = IU \cos \varphi$. Оскільки зсув фаз між коливаннями струму й напруги в колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, а $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Такий результат покаже й ватметр, включений в електричне коло змінного струму з ємнісним опором.

Котушка в колах постійного та змінного струму. Якщо підключити до джерела постійного струму котушку, яка має велику кількість витків з мідного дроту великого перерізу, і виміряти значення сили струму й напруги в колі, то можна побачити, що сила струму в колі доволі значна за невеликої напруги. Тобто опір котушки постійному струмові незначний.

Якщо ж цю котушку під'єднати до джерела змінного струму з такою самою напругою й замінити амперметр і вольтметр на прилади для вимірювання змінного струму, то помітимо, що сила струму значно зменшиться. Тобто змінному струмові котушка¹ чинить більший опір, ніж постійному.

Опір, який чинить котушка індуктивності змінному струмові, називають **індуктивним опором** і позначають X_L .

За проходження змінного струму через котушку індуктивності внаслідок явища самоіндукції виникає індукційне електричне поле, яке протидіє полю, що створюється генератором. Індукційне електричне поле є причиною індуктивного опору.

Формулу для визначення індуктивного опору отримаємо математичним шляхом. Якщо сила струму в колі змінюється за гармонічним законом $i = I_m \sin \omega t$, то ЕРС самоіндукції: $e_c = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t$, ураховуючи, що $u = -e_c$, напруга на кінцях котушки становитиме: $u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$. Звідки $U_m = L\omega I_m$,

¹ Котушку в колі змінного струму інколи називають котушкою індуктивності, або індуктивною котушкою.

тоді $\frac{U_m}{I_m} = \omega L$ або $\frac{U_m}{I_m} = X_L$. Емнісний опір можна визначати й через відповідні діючі значення сили струму й напруги: $X_L = \frac{U}{I}$.

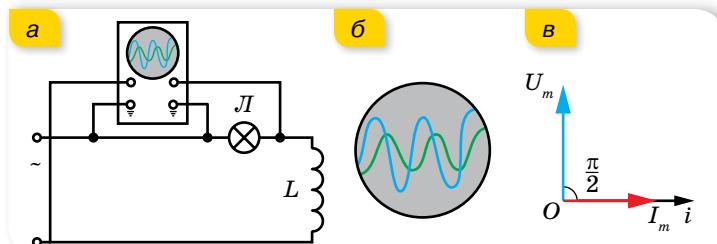
Формула для визначення емнісного опору: $X_L = \omega L$.

Закон Ома для кола з індуктивним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_L}$.

Котушка індуктивності має також і *власний активний опір R*.

Зберемо коло, що містить електролампу та котушку індуктивності, так, як показано на малюнку 117. Підключимо двоканальний осцилограф до клем генератора і паралельно активному навантаженню (електролампі). Бачимо, що осцилограмами сили струму й напруги в колі з котушкою індуктивності не збігаються за фазою.

Вивчення осцилограм (мал. 117, б) показує, що в колі з котушкою сила струму й напруга зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання напруги випереджають коливання сили струму. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$.



Мал. 117. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з котушкою індуктивності (а, б); в — векторна діаграма

У колах змінного струму, що містять індуктивне навантаження, коливання напруги $u = U_m \sin \omega t$ випереджають за фазою на чверть періоду коливання сили струму, $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$.

Фазові співвідношення між струмом і напругою в колі з котушкою зображені за допомогою векторних діаграм на малюнку 117, в. Оскільки на котушці індуктивності коливання напруги випереджають коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$, то вектор напруги повернуто на $\frac{\pi}{2}$ відносно вектора сили струму.

Як ми зазначили, котушка, крім індуктивного, має і власний активний опір. Зазвичай у багатьох задачах активним опором котушки нехують.

Якщо ж активний опір ураховують, то повний опір катушки Z буде визначатися формулою $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$.

Як і у випадку з конденсатором, коло, що містить тільки катушку індуктивності, не перетворює енергію, що надходить від джерела, на інші види енергії.

Цю властивість індуктивного опору широко використовують у техніці, наприклад, для плавного регулювання сили струму в колі.



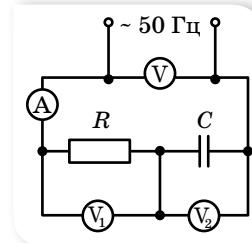
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які види опору розрізняють у колі змінного струму? Який опір називають активним, а який — реактивним? **2.** Напишіть рівняння зміни миттевого значення напруги й струму на активному опорі та побудуйте їх графіки. **3.** Запишіть рівняння зміни миттевого значення напруги й струму на конденсаторі та побудуйте їх графіки. **4.** Що називають індуктивним опором? Яка формула виражає зміст цього поняття? **5.** Маємо електричне коло з послідовно з'єднаними лампою та катушкою індуктивності. Як зміниться яскравість лампи, якщо в катушку ввести осердя; приєднати ще одну катушку послідовно; паралельно?



Вправа 20

- У колі, наведеному на малюнку 118, пристлади показують $I = 1 \text{ A}$, $U_1 = 50 \text{ В}$, $U_2 = 120 \text{ В}$. Визначте ємність C конденсатора та напругу U в мережі.
- Два конденсатори, ємності яких $0,2 \text{ мкФ}$ і $0,1 \text{ мкФ}$, включені послідовно в коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц . Визначте струм у колі та спади напруг на першому та другому конденсаторах.
- Якщо подати на катушку постійну напругу 30 В , сила струму в катушці дорівнюватиме 1 А . Якщо на цю саму катушку подати змінну напругу 30 В із частотою 50 Гц , сила струму становитиме лише $0,6 \text{ А}$. Яка індуктивність катушки? Яка потужність виділяється в катушці під час проходження постійного струму; змінного?
- Обмотка катушки має 500 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого — 1 мм^2 , довжина катушки 50 см , її діаметр 5 см . На якій частоті змінного струму повний опір катушки вдвічі більший за її активний опір?
- Катушка довжиною 25 см і радіусом 2 см має обмотку з 1000 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого 1 мм^2 . Катушка включена в коло змінного струму частотою 50 Гц . Яку частину повного опору становить її активний опір і яку — індуктивний?

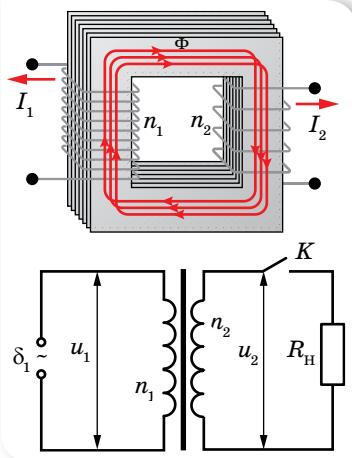


Мал. 118

§ 27

Трансформатор

Будова та принцип дії трансформатора. Перевага змінного струму у порівнянні з постійним полягає в тому, що для змінного струму напругу й силу струму можна перетворювати (трансформувати) в дуже широких межах майже без втрат енергії. Для цього електричну енергію треба передавати під високою напругою.



Мал. 119. Схема та умовне позначення трансформатора

Пристрої, які дають змогу підвищувати напругу (в разі подачі енергії від генераторів до лінії електропередачі) і знижувати її (в разі подачі від лінії електропередачі до споживачів), називають **трансформаторами**.

На малюнку 119 зображене схему трансформатора та його умовне позначення. Він складається з двох індуктивно звязаних катушок (обмоток) з різною кількістю витків з мідного дроту. Одну з обмоток, яку називають *первинною*, під'єднують до джерела змінної напруги. Прилади, які споживають електроенергію, під'єднують до *вторинної* обмотки. Для того щоб магнітне поле не розсіявалось у довкілля, катушки розміщені на замкнутому осерді, виготовленому з листів спеціальної трансформаторної сталі, ізольованих один від одного тонким шаром лаку. Це роблять, щоб зменшити втрати на нагрівання. Окрім того, у суцільних провідниках виникають значні вихрові струми (струми Фуко), які зумовлюють нагрівання провідника.

З'ясуємо принцип дії трансформатора. Трансформатор перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Якщо первинну обмотку під'єднати до джерела змінної напруги, а вторинна буде розімкнута (цей режим роботи називають *холостим ходом трансформатора*), то в первинній обмотці з'явиться слабкий струм, який створює в осерді змінний магнітний потік. Цей потік наводить у кожному витку обмоток однакову ЕРС, тому ЕРС індукції в кожній обмотці буде

прямо пропорційною кількості витків у цій обмотці, тобто $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$.

Якщо вторинну обмотку буде розімкнuto, то напруга на її затискачах U_2 дорівнюватиме ЕРС ε_2 , яка в ній наводиться. У первинній обмотці ЕРС ε_1 за числовим значенням мало відрізняється від напруги U_1 , яка підводиться до цієї обмотки. Практично їх можна вважати одинаковими, тому $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{n_1}{n_2} = k$, де k — **коєфіцієнт трансформації**. Якщо вторинних обмоток кілька, то коєфіцієнт трансформації для кожної з них визначають аналогічно.

Якщо у вторинне коло трансформатора увімкнути навантаження, то у вторинній обмотці з'явиться струм. Цей струм створює магнітний потік, який, за правилом Ленца, має зменшити зміну магнітного потоку в осерді, що, своєю чергою, приведе до зменшення ЕРС індукції в первинній обмотці. Але ця ЕРС дорівнює напрузі, прикладеній до первинної обмотки, тому струм у первинній обмотці повинен зрости, відновлюючи початкову зміну магнітного потоку. Водночас збільшується потужність, яку споживає трансформатор від мережі.

Оскільки в роботі трансформатора відбуваються втрати енергії, то потужність, яку споживає первинна обмотка, більша за потужність у вторинній обмотці. ККД трансформатора η визначається відношенням потужності P_2 вторинної обмотки до потужності P_1 первинної обмотки:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \text{ або } \eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}.$$

ККД сучасних трансформаторів часто перевищує 90 % і сягає 99 %. Невеликі втрати електричної енергії під час її передавання з первинної обмотки у вторинну зумовлені виділенням джоулевої теплоти в дротах обмоток і перемагнічуванням осердя. Для навантаженого трансформатора на первинній обмотці $\varepsilon_1 \approx U_1$, напруга на затискачах вторинної обмотки становить $U_2 = \varepsilon_2 - I_2 R_2$, де $I_2 R_2$ — спад напруги на вторинній обмотці, тоді коефіцієнт трансформації $k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_2 + U_{\text{н}}}$, де $U_{\text{н}}$ — спад напруги на навантаженні.

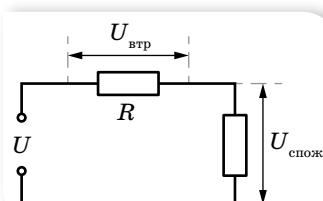
Передавання електроенергії. Споживачі електроенергії є всюди. А виробляється вона лише на електростанціях, які розташовані в певних місцях. Консервувати електроенергію у великих масштабах немає змоги. Її треба використовувати відразу після вироблення. Тому виникає потреба передавати електроенергію на великі відстані. Але таке передавання пов'язане зі значними втратами. Адже електричний струм нагріває проводи лінії електропередачі. Згідно із законом Джоуля — Ленца, енергія, яка витрачається на нагрівання проводів лінії, визначається формулою $Q = I^2 R t$, де R — опір лінії. За великої довжини лінії передавання енергії взагалі може бути економічно не вигідним. Істотно зменшити опір лінії практично дуже важко. Тому доводиться зменшувати силу струму.

Оскільки потужність струму пропорційна добутку сили струму на напругу, то щоб зберегти передавану потужність, треба підвищувати напругу в лінії передачі. Причому, що довшою є лінія передачі, то вигідніше використовувати вищу напругу. Так, у деяких високовольтних лініях передач використовують напругу 500 кВ. Але генератори змінного струму будують на напруги, що не перевищують 16–20 кВ, бо використання вищої напруги вимагало б складніших спеціальних заходів для ізоляції обмоток та інших частин генераторів. Тому на великих електростанціях ставлять підвищувальні трансформатори. Трансформатор підвищує напругу в лінії у стільки разів, у скільки зменшує силу струму.

Перед безпосереднім використанням електроенергії споживачами її напругу знижують за допомогою знижувальних трансформаторів.

Повністю уникнути втрат під час передавання електроенергії не вдається. За дуже високої напруги між проводами починається коронний розряд, що призводить до втрат енергії.

На малюнку 120 показано електричну схему лінії електропередачі, на якій U — напруга на генераторі, $U_{\text{втр}}$ — напруга на проводах лінії



Мал. 120. Електрична схема лінії електропередач

електропередачі, $U_{\text{спож}}$ — напруга на споживачі. Якщо частина втрат потужності у відносних одиницях становить k , тоді потужність втрат на лінії пов'язана з потужністю, переданою споживачу, формулою $P_{\text{втр}} = kP_{\text{спож}}$.

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача й потужності втрат: $P_{\text{ген}} = P_{\text{спож}} + P_{\text{втр}} = (k + 1)P_{\text{спож}}$, де $P_{\text{втр}} = I^2R$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Чому гуде трансформатор, увімкнений у коло змінного струму? Яка частота цього звуку?
- Вторинна обмотка трансформатора замкнена на: а) малий опір r ; б) великий опір R . Порівняйте в обох випадках напругу на вторинній обмотці та потужність, яку споживає трансформатор.
- За яким законом треба збільшувати робочу напругу лінії, щоб за збільшення її довжини коефіцієнт корисної дії лінії залишався сталим?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 5 включений у коло з напругою 220 В. Який опір вторинної обмотки, якщо напруга на виході трансформатора 40 В, а опір корисного навантаження — 4 Ом? Яка потужність витрачається на нагрівання вторинної обмотки? Яку потужність споживає трансформатор з мережі? Який ККД трансформатора?

Дано:

$$\begin{aligned} k &= 5 \\ U_1 &= 220 \text{ В} \\ U_2 &= 40 \text{ В} \\ R_h &= 4 \text{ Ом} \\ R_{ob} &— ?; P_{\text{втр}} — ? \\ P &— ?; \eta — ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

$$\text{Коефіцієнт трансформації } k = \frac{U_1}{U_2}, \text{ звідки } U_2 = \frac{U_1}{k},$$

де $U_2 = U_{ob} + U_h = IR_{ob} + U_h$. Сила струму у вторинній обмотці $I = \frac{U_h}{R_h}$, отже, $R_{ob} = \frac{\left(\frac{U_1}{k} - U_h\right)R_h}{U_h}$,

$$R_{ob} = \frac{\left(\frac{220 \text{ В}}{5} - 40 \text{ В}\right) \cdot 4 \text{ Ом}}{40 \text{ Ом}} = 0,4 \text{ Ом.}$$

$$\text{Потужність вторинної обмотки } P_{\text{втр}} = I^2R_{ob} = \frac{U_h^2}{R_{ob}^2}R_{ob}, P_{\text{втр}} = 40 \text{ Вт.}$$

$$\text{Потужність трансформатора } P = \frac{U_2^2}{R_{ob} + R_h}, P = \frac{44^2 \text{ В}^2}{4,4 \text{ Ом}} = 440 \text{ Вт.}$$

$$\text{ККД трансформатора } \eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{P - P_{\text{втр}}}{P},$$

$$\eta = \frac{440 \text{ Вт} - 44 \text{ Вт}}{440 \text{ Вт}} = 0,9 = 90 \text{ %.}$$

Відповідь: 0,4 Ом, 40 Вт, 440 Вт, 90 %.

Задача 2. Лінія електропередач має опір 100 Ом. Яку напругу повинен мати генератор електростанції, щоб під час передачі по цій лінії до споживача повної потужності 250 кВт втрати на лінії не перевищували 4 % переданої до споживача повної потужності?

Дано:

$$R = 100 \text{ Ом}$$

$$P = 250 \text{ кВт}$$

$$k = 0,04$$

$U - ?$

Розв'язання:

$$\text{Напруга генератора } U = \frac{P_{\text{ген}}}{I}.$$

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача P і потужності втрат $P_{\text{втр}}$.

Потужність втрат можна виразити як $P_{\text{втр}} = kP$, тоді

$$P_{\text{ген}} = P + kP = (k + 1)P. \text{ З іншого боку, } P_{\text{втр}} = I^2R, \text{ тоді } I = \sqrt{\frac{P_{\text{втр}}}{R}} = \sqrt{\frac{kP}{R}}.$$

$$\text{Отже, } U = (k + 1)\sqrt{\frac{RP}{k}}; U = (0,04 + 1)\sqrt{\frac{100 \text{ Ом} \cdot 250 \text{ кВт}}{0,04}} = 26 \text{ кВт.}$$

Відповідь: $U = 26 \text{ кВ.}$



Вправа 21

- Сила струму в первинній обмотці трансформатора — 0,5 А, напруга на її кінцях — 220 В. Сила струму у вторинній обмотці — 11 А, напруга на її кінцях — 9,5 В. Визначте ККД трансформатора.
- Для визначення кількості витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора поверху вторинної обмотки намотали $n_3 = 80$ витків дроту й після підключення первинної обмотки до мережі з напругою 220 В за допомогою вольтметра визнали напругу на кінцях додаткової обмотки $U_3 = 20$ В і на кінцях вторинної обмотки $U_2 = 36$ В. Визначте кількість витків у первинній і вторинній обмотках та коефіцієнт трансформації.
- Електричний двигун працює від джерела електричного струму, напруга на клемах якого дорівнює 120 В, а сила струму — 7,5 А. Визначте втрати потужності в обмотці двигуна та його ККД, якщо опір обмотки дорівнює 2,2 Ом.
- Генератор струму з напругою на клемах 220 В передає в зовнішнє коло потужність 11 кВт. Якого мінімального перерізу мають бути мідні дроти лінії передачі, щоб втрати напруги в них не перевищували 2 % від зазначененої напруги? Довжина лінії передачі дорівнює 50 м.
- У мережу з напругою 220 В одночасно включенні електродвигун потужністю 0,3 кВт і ККД 90 %, електрична піч потужністю 1 кВт і десять ламп потужністю 150 Вт кожна. Визначте силу струму в двигуні, печі та лампах, загальну силу струму та спожиту потужність.



Виконуємо навчальні проекти

- Як вирішуються питання енергозабезпечення у вашому регіоні, країні, в інших країнах?
- Енергозабезпечення сьогодні та в майбутньому.
- Як вирішуються проблеми передавання електричної енергії на великі відстані?

§ 28

Електромагнітні хвилі

Властивості електромагнітних хвиль. Як ви знаєте, можливість існування електромагнітних хвиль теоретично довів Джеймс Максвелл. У своїх теоретичних розрахунках Максвелл показав, що якби електромагнітна хвиля існувала, то вона б мала поширюватись у середовищі зі швидкістю світла. Що підтверджувало, що світло — це один з діапазонів електромагнітних хвиль. Практично отримав їх Генріх Герц у 1888 р.

Для отримання електромагнітних хвиль використовують *відкритий коливальний контур*, який складається з двох провідників, з'єднаних одним через катушку індуктивності (мал. 121).

Відкритий коливальний контур випромінює електромагнітні хвилі, оскільки в процесі коливань у контурі електрони рухаються з прискоренням. Ефективність контура залежить від розмірів антени: вона не повинна бути меншою від четвертої частини найбільшої довжини хвилі, яка має випромінюватися.

Мінімальна довжина антени: $L = \frac{\lambda}{4}$.

Оскільки електромагнітні хвилі генеруються електричним струмом, тобто зарядженими частинками, що рухаються з прискоренням, то правильним буде й загальне твердження: *електричний заряд під час прискореного руху є джерелом електромагнітних хвиль*.

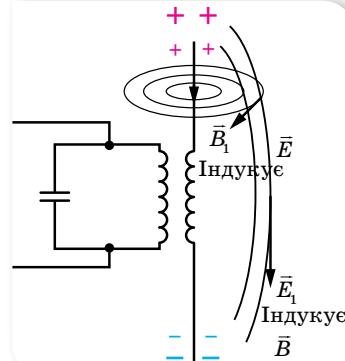
Електромагнітні хвилі — це явище поширення в просторі електромагнітних коливань, тобто взаємопов'язаних коливань електричного й магнітного полів, які являють собою єдине електромагнітне поле. *У довільній точці вектори \vec{E} і \vec{B} взаємно перпендикулярні та перпендикулярні до напрямку поширення* (мал. 122).

Вивчаючи механічні хвилі, ми ознайомились із деякими характеристиками хвильового руху: фронт хвилі, промінь, довжина хвилі. Усі ці поняття застосовні і для електромагнітних хвиль.

В усіх інерціальних системах швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі однакова й дорівнює $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У речовинах швидкість поширення електромагнітних хвиль залежить від електричних і магніт-

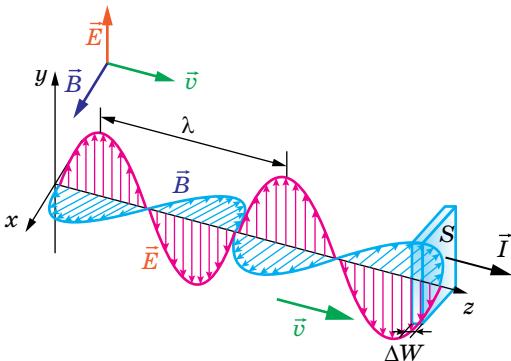
Про електромагнітні хвилі ми вже дещо знаємо з курсу фізики 9 класу.

Пригадати основні відомості можна в електронному додатку.



Мал. 121. Відкритий коливальний контур

них властивостей середовища і зменшується в n разів: $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$, де ϵ і μ — відповідно діелектрична та магнітна проникності середовища.



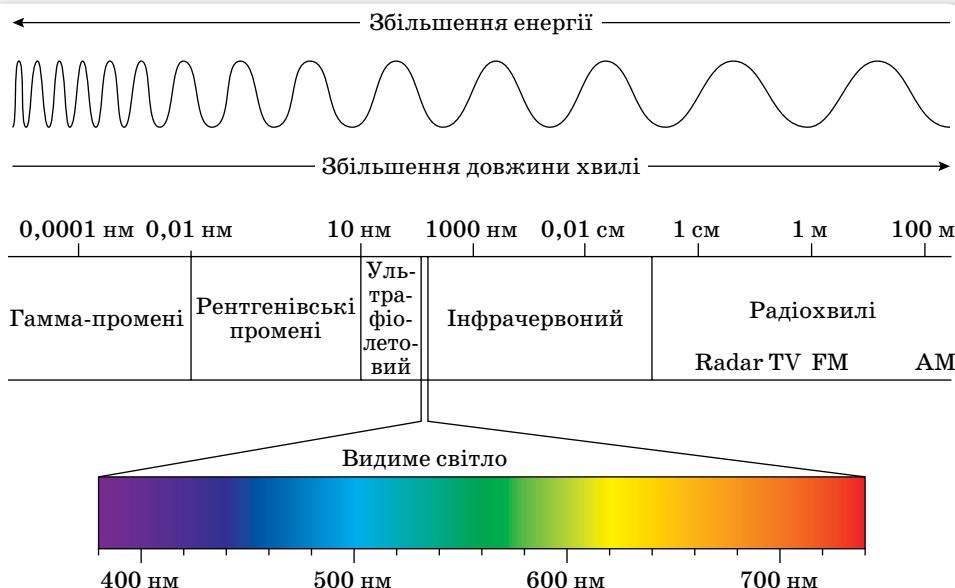
Мал. 122.
Схематичне зображення
плоскополяризованої
електромагнітної хвилі

Довжина електромагнітної хвилі: $\lambda = cT = 2\pi c\sqrt{LC}$.

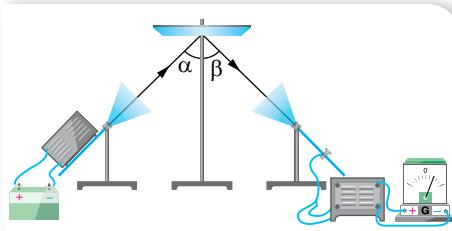
Звертаємо увагу на те, що під час переходу з одного середовища в інше частота коливань не змінюється. Змінюється швидкість поширення та довжина хвилі.

Електромагнітні хвилі є *поперечними хвильами*, але на відміну від механічних хвиль у них відбуваються коливання полів, а не речовини.

За довжиною хвилі λ або частотою коливань (v) межі діапазону електромагнітних хвиль — від 10^{11} м ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) до 10^{-11} м ($3 \cdot 10^{19}$ Гц). Цей діапазон уміщує радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та γ (гамма)-випромінювання (мал. 123).



Мал. 123. Шкала електромагнітних хвиль



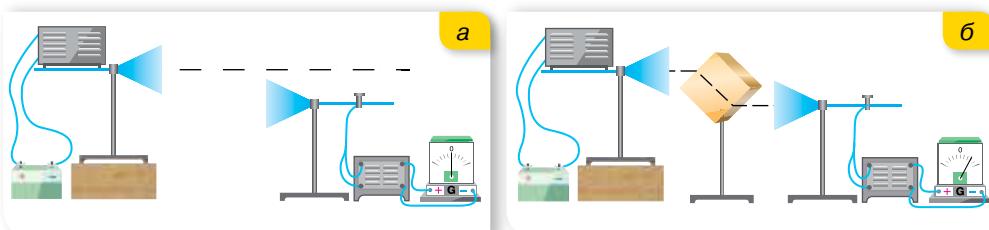
Мал. 124. Установка для дослідження відбиття електромагнітних хвиль

відбиваються провідником (мал. 124). Кут відбиття електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, дорівнює кутові падіння.

Під час падіння електромагнітної хвилі на деяку поверхню, що розмежовує середовища, частина енергії хвилі відбувається від поверхні іншого середовища, частина проникає всередину його, причому певна кількість енергії може пройти крізь середовище, якщо воно прозоре для електромагнітної хвилі, решта енергії поглинається середовищем, спричинюючи його нагрівання або інші процеси.

Отже, на межі двох середовищ електромагнітна хвилля поділяється на відбиту хвилю і хвилю, що проходить у середовище, при цьому напрямок поширення хвилі в середовищі відрізняється від початкового — хвиля зазнає **заломлення**.

Спостерігати заломлення електромагнітних хвиль можна на такому досліді. Розташуємо рупори антен так, щоб сигнал не потрапляв у приймальну антenu (мал. 125, а). Якщо ж розташувати між рупорами антен прямокутну призму з діелектрика (наприклад, парафіну), то прийом сигналу відбувається (мал. 125, б). Дослід доводить, що електромагнітні хвилі заломлюються на межі двох середовищ. Зрозуміло, що закон заломлення електромагнітних хвиль такий самий, як у випадку світлових хвиль.



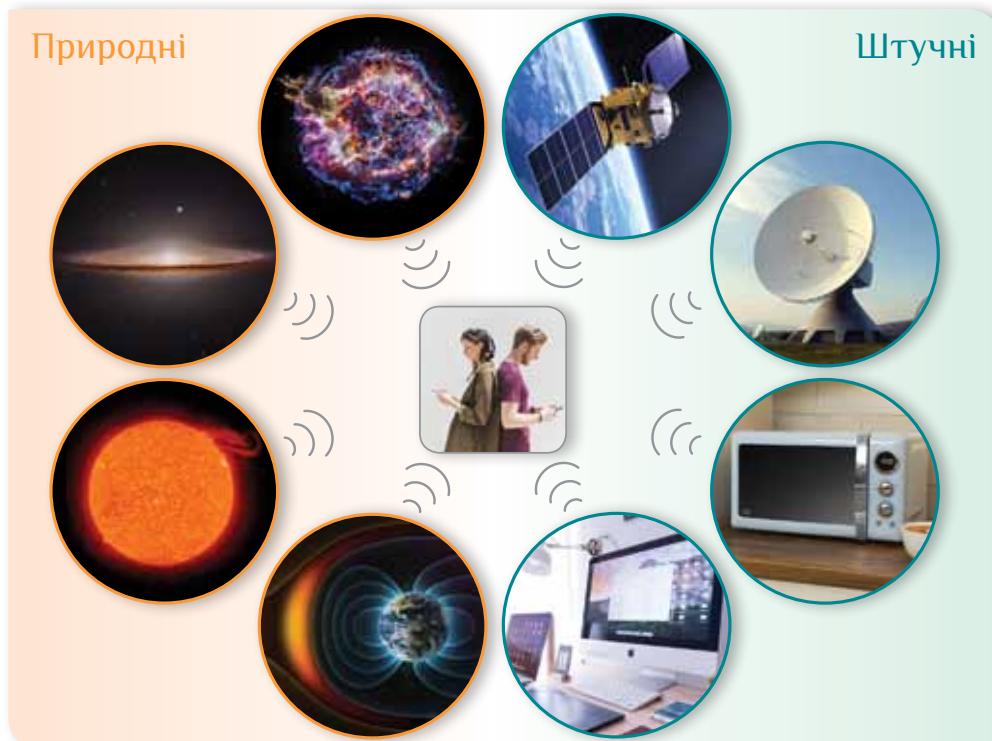
Мал. 125. Заломлення електромагнітних хвиль

На досліді можна також спостерігати **поляризацію** хвиль і переконатись у тому, що електромагнітні хвилі — *поперечні*. Для цього між генератором і приймачем розміщують решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 126). Повертаючи решітку, спостерігають підсилення прийнятого сигналу і його послаблення аж до повної відсутності. Приймання відсутнє тоді, коли вектор напруженості електричного поля \vec{E} падаючої

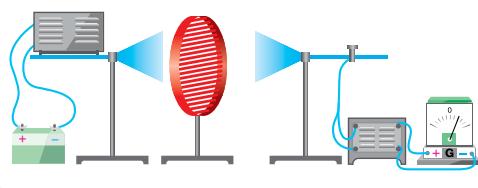
електромагнітної хвилі паралельний стержням. За цих умов у стержнях збуджуються струми й решітка відбиває падаючі хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор \vec{E} перпендикулярний до стержнів, значні струми не збуджуються, їй електромагнітна хвиля проходить крізь решітку. Отже, електромагнітна хвиля поляризована — вектор напруженості має фіксовану площину коливань. (Поясніть самостійно, чому в даному досліді розглядається положення саме вектора \vec{E} , а не \vec{B} .)

Тут описано не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості отримаємо під час вивчення світлових хвиль.

Використання електромагнітних хвиль. Людство сьогодні живе у «хвильовому просторі» (мал. 127). Із часів існування життя на Землі всі організми перебувають під впливом природного електромагнітного випромінювання, джерелами якого є космічні об'єкти: зорі, пульсари, туманності. З розвитком техніки й технологій, крім природних джерел, з'являється дуже багато штучних, які випромінюють електромагнітні хвилі різних діапазонів.



Мал. 127. Природні та штучні джерела електромагнітного випромінювання



Мал. 126. Дослід з поляризації електромагнітних хвиль

Життя сучасного суспільства неможливе без постійного обміну інформацією. Радіо, телебачення і стільниковий зв'язок відіграють у цьому неабияку роль. Створення й модернізація сучасних інформаційних засобів стали можливими завдяки тому, що можна задавати відповідні параметри електричного сигналу, кодувати його, посилювати, передавати.

Низькочастотні електромагнітні хвилі, що утворюються під час роботи різних електротехнічних пристройів, які живляться змінним струмом низької частоти, мають низьку енергію і не придатні для передачі інформації в атмосфері на великі відстані. Саме тому невдача спіткала багатьох відомих дослідників і винахідників, які намагалися передавати інформацію за допомогою електромагнітних хвиль низької частоти. Придатними для цього є радіохвилі з довжиною в діапазоні від 0,1 мм до 10 км і частотою $3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^{12}$ Гц. Уесь радіодіапазон електромагнітних хвиль поділяється на: довгі, середні, короткі, ультракороткі.

Проте сама електромагнітна хвиля зі сталими параметрами, поширюючись у просторі, може нести інформацію лише про свою наявність. Для передавання різноманітної інформації за допомогою електромагнітних хвиль застосовують різні способи кодування сигналу. Варто зазначити, що зі збільшеннями частоти кількість інформації, яку може нести хвиля, збільшується, тому збільшення несучої частоти в сучасному світі є закономірним. Але поширення довгих і коротких хвиль залежить від погодних умов. Головною їхньою перевагою є те, що вони можуть поширюватися поза прямою видимістю. Ультракороткі хвилі набули широкого використання для роботи радіостанцій, мобільних телефонів, Wi-Fi, Wi-Max, 3G і т. п. Але такі хвилі обмежені прямою видимістю, і максимальна відстань передачі залежить від відстані до горизонту та висоти антени.

Дослідження Ніколи Тесли, Гульельмо Марконі, Олександра Степановича Попова підвели до винайдення радіозв'язку. Основним принципом радіозв'язку є використання передавача та приймачів кодованого сигналу. Залежно від способу кодування розрізняють аналоговий і цифровий зв'язок. Аналоговий полягає в тому, що сигнал у передавачі модулюється — накладаються низькочастотні (звукові сигнали) на несучу радіохвиллю, а в приймачі — демодулюється — «виокремлюються» звукові хвилі з радіохвилі. Нині повсюди використовується цифровий зв'язок, зокрема й

для передачі аналогових сигналів, які спочатку оцифровуються. Сучасні системи цифрового зв'язку використовують кабельні (з-поміж них волоконно-оптичні), супутникові, радіорелейні й інші засоби та способи передачі сигналу.

Радіо-, рентгенівські та гамма-телескопи.

Джерелами електромагнітного випромінювання є космічні об'єкти. В астрономії працюють з усіма довжинами хвиль, з яких складається електромагнітний спектр. Оскільки атмосфера Землі пропускає не всі види випромінювань, науковці шукають шляхи вирішення цієї проблеми. Багато століть поспіль люди спостерігали

Детальніше про властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів, принцип радіотелефонного та стільникового зв'язку читайте в електронному додатку.





Мал. 128. Найбільші радіотелескопи: а — з одним «дзеркалом», провінція Гуйчжоу, Китай, 2016 р.; б — декаметрових хвиль, Харківська область, Україна, 1970 р.

зоряне небо лише через вузьке «оптичне вікно» атмосфери. З XIX ст. Все світ почали вивчати в інфрачервоних променях. На початку 30-х років XX ст. з розвитком радіотехніки стало можливим дослідження небесних об'єктів у радіодіапазоні. Із середини XX ст., коли з'явилася можливість відправити за межі атмосфери Землі наукові прилади, астрономи отримали змогу виконувати спостереження небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

Принципова схема будови *радіотелескопа* не відрізняється від будови телескопа-рефлектора: космічне радіовипромінювання збирає металеве дзеркало параболічної форми — іноді суцільне, іноді гратчасте, а приймач радіохвиль — не людське око, фотопластинка чи цифрова матриця, а високочутливий радіоприймач. Дзеркало фокусує радіохвилі на антенну, внаслідок чого в ній виникає швидкозмінний електричний струм, який спеціальні провідники — хвилеводи — передають до радіоприймача, з'єднаного з комп’ютером.

На малюнку 128, а зображено найбільший у світі радіотелескоп. Його антени нерухомі й завжди спрямовані в зеніт, але внаслідок добового обертання Землі та можливості зміщувати опромінювач їм доступна значна частина небесної сфери.

В Україні під Харковом працює найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону — УТР-2 (мал. 128, б). Упродовж багатьох років на УТР-2 було отримано величезний обсяг астрофізичної інформації. Доступними для досліджень виявилися практично всі об'єкти Все світу — від найближчого оточення Землі й Сонячної системи до нашої Галактики та найвіддаленіших об'єктів — радіогалактик і квазарів.

Для суттєвого підвищення роздільної здатності радіотелескопів астрономи використовують радіоінтерферометри — пристрої, що працюють в радіодіапазоні з використанням інтерференції.

Телескопи, що реєструють випромінювання небесних тіл у діапазоні високих енергій (рентгенівські та гамма), ще називають детекторами (мал. 129).



Мал. 129. Гамма-детектор



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЧУМЮ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль. **2.** Чому для передавання радіосигналів потрібно використовувати високочастотні електромагнітні хвилі?

Приклади розв'язування задач

Задача. Радіолокатор працює на довжині хвилі 20 см і дає 5000 імпульсів за секунду, причому тривалість кожного імпульсу — 0,02 мкс. Скільки коливань міститься в одному імпульсі та яка найбільша глибина розвідки локатора?

Дано:

$$\lambda = 0,2 \text{ м}$$

$$n = 5000$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\tau = 0,02 \text{ мкс}$$

$$N = ?; l = ?$$

Розв'язання:

Кількість коливань в одному імпульсі: $N = v\tau$, де $v = \frac{c}{\lambda}$.

$$N = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{0,2 \text{ м}} = 30.$$

Глибина розвідки: $l = c \frac{t_0}{2}$, де $t_0 = \frac{t}{n}$ — проміжок часу між двома послідовними імпульсами, тоді $l = \frac{ct}{2n}$, $l = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с}}{2 \cdot 5 \cdot 10^3} = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Відповідь: $N = 30$; $l = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.



Вправа 22

- Коливальний контур радіоприймача настроєно на частоту 6 МГц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора контура, щоб налаштуватися на довжину хвилі 150 м?
- Антена корабельного радіолокатора розташована на висоті 25 м над рівнем моря. На якій максимальній відстані радіолокатор може виявити рятувальний пліт? З якою частотою можуть при цьому випускатися імпульси?
- Радіолокатор працює на хвилі 5 см і випускає імпульси тривалістю 1,5 мкс. Скільки коливань міститься в кожному імпульсі? Яка мінімальна дальність виявлення цілі?



Виконуємо навчальні проекти

- Як пов'язані електромагнітні хвилі й технологічна революція? Що таке індустрія 4.0? Суспільство 5.0?
- Можливості бездротового зв'язку.
- Як далеко можна «бачити» за допомогою електромагнітних хвиль?



Перевірте себе (§ 24–28)



1. Визначте, як зміниться період коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора зменшити в 4 рази.
 А збільшиться в 4 рази
 Б збільшиться у 2 рази
 В зменшиться в 4 рази
 Г зменшиться у 2 рази
2. Напруга на клемах первинної обмотки трансформатора — 380 В, а коефіцієнт трансформації — 8. Визначте напругу на клемах вторинної обмотки та вкажіть, дріт якої обмотки товщий.
 А 3040 В; первинної
 Б 47,5 В; вторинної
 В 45,7 В; вторинної
 Г 304 В; вторинної
3. Напруга на ділянці кола змінного струму змінюється за законом: $u = 310 \cos 100\pi t$. Визначте покази вольтметра, приєднаного до ділянки.
 А 310 В
 Б 100 В
 В 219 В
 Г 437 В
4. Укажіть параметри електромагнітної хвилі, які змінюються під час переходу хвилі з повітря у скло.
 А швидкість і довжина хвилі
 Б частота і швидкість
 В довжина хвилі й частота
 Г амплітуда й частота
5. Виберіть рівняння залежності сили струму від часу в колі електроплити з опором 40 Ом, увімкненої в мережу змінного струму з напругою 220 В і частотою 50 Гц.
 А $i = 7,8 \sin 314t$
 Б $i = 5,5 \sin 314t$
 В $i = 7,8 \sin 50t$
 Г $i = 7,8 \sin 6,28t$
6. У коливальному контурі сила струму через катушку змінюється із часом за законом: $i = 0,001 \sin 3140t$. Визначте, через які інтервали часу знак заряду на обкладках конденсатора змінюється на протилежний.
7. Рамка площею 250 см² обертається із частотою 10 с⁻¹ в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Амплітудне значення ЕРС індукції дорівнює 63 В. Визначте кількість витків у рамці.
8. Коливальний контур випромінює в повітрі електромагнітні хвилі довжиною 150 м. Яка ємність включена в контур, якщо його індуктивність дорівнює 0,25 мГн? Активним опором знехтуйте.

§ 29

Інтерференція світла

Розвиток уявлень про природу світла. Століттями тривали між ученими суперечки про природу світла. У 1675 р. Ісаак Ньютон висунув корпускулярну теорію природи світла, згідно з якою світло складається з малих частинок різних форм і розмірів, які випромінюються будь-якими тілами і називаються корпускулами. Але ця теорія не могла пояснити всі оптичні явища, тому 1690 р. голландський фізик Християн Гюйгенс запропонував хвильову теорію природи світла, згідно з якою світло — це механічні поздовжні хвилі, які мають поширюватися в пружному середовищі, названому світловим ефіром. Але обидві ці теорії не відповідали дійсності. Після створення Джеймсом Максвеллом електромагнітної теорії (60–70-ті роки XIX ст.) він зробив припущення, що світло — це електромагнітні хвилі, оскільки швидкість світла і швидкість електромагнітних хвиль — однакові. Електромагнітна теорія також не могла пояснити деякі оптичні явища (наприклад, фотоефект). У 1990 р. німецький фізик Макс Планк висуває квантову теорію природи світла, яка доповнює й розширяє електромагнітну теорію. Отже, світло в певних явищах виявляє як корпускулярні, так і хвильові властивості. У фізиці такий прояв дістав назву *корпускулярно-хвильовий дуалізм*. Ми далі з'ясуємо, що такі властивості притаманні й іншим об'єктам, наприклад електронам.

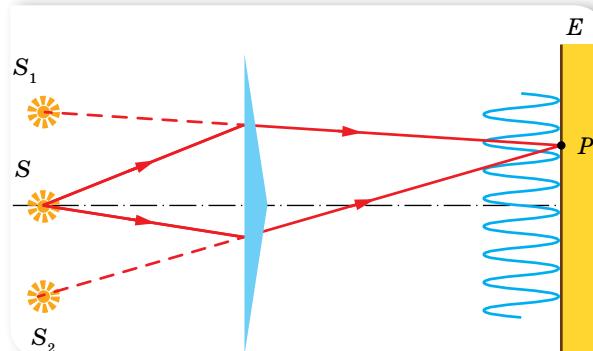
У цьому й наступних параграфах детальніше дослідимо хвильові властивості світла. Операючи поняттям «світло», ми розглядатимемо електромагнітні хвилі в діапазоні частот коливань від $4 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. У цьому інтервалі кожній частоті відповідає довжина хвилі та свій колір випромінювання: від 400 нм (фіолетовий колір) до 760 нм (червоний). Зазначимо, що до оптичного діапазону (світла) належить також інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання.

Когерентність світлових хвиль. Як ми знаємо, хвилям будь-якої природи притаманні однакові властивості. Так, явище інтерференції, яке ми розглядали на прикладі механічних хвиль, властиве й електромагнітним, зокрема світловим. Пригадаймо: *інтерференцією* називається додавання в просторі двох і більше хвиль, за якого відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результатуючих коливань. Для її отримання необхідне виконання деяких умов. З'ясуймо їх.

Щоб інтерференційна картина була стійкою, потрібні узгоджені хвилі, тобто такі, що мають однакові довжини і стала різницю фаз у будь-якій точці простору. Хвилі, які відповідають цим умовам, називають **когерентними**, відповідно когерентними називають і джерела, які їх випромінюють.

Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела розділяють на два або кілька пучків, які йдуть різними шляхами, і в подальшому зводяться й накладаються один на один. Якщо ці пучки пройдуть різну відстань, то між ними

виникне різниця фаз. У разі накладання таких пучків і виникає стійка інтерференційна картина. Уперше такий метод використав французький фізик Огюстен Френель (1788–1827). На малюнку 130 наведено схему досліду Френеля для одержання когерентних джерел світла за допомогою так званої біпризми Френеля.



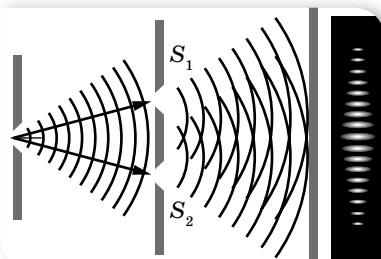
Мал. 130. Схема досліду Френеля

Існують інші способи отримання когерентних джерел світла.

Умови мінімумів і максимумів інтерференційної картини. Уперше явище інтерференції дослідив Томас Юнг (1773–1820) (йому належить і термін «інтерференція»). Юнг також першим вимірював довжину світлової хвилі. У своїх дослідах Юнг використав сонячне світло, що проходило крізь одну, а потім дві щілини S_1 та S_2 . До речі, метою проведення досліду була перевірка припущення про корпускулярну природу світла. Якщо світло є потоком частинок, то на екрані повинні спостерігатися дві яскраві лінії. Проте Юнг побачив цілу серію яскравих і темних ліній (мал. 131).

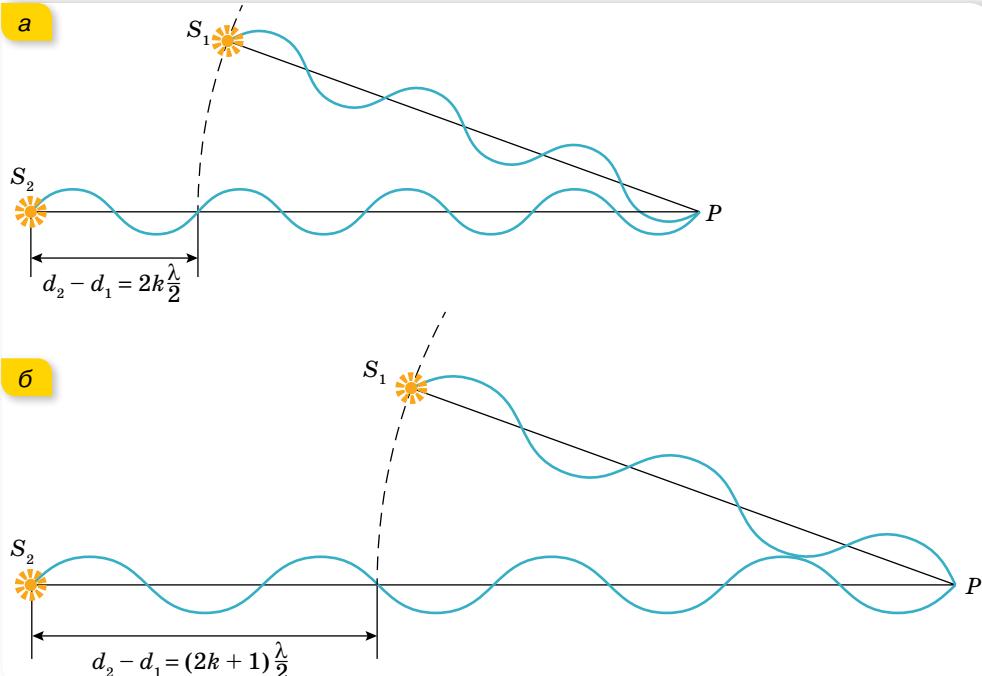
З'ясуємо умови, за яких спостерігаються світлі й темні смуги. Розглянемо дві когерентні світлові хвилі, які надходять у довільну точку P (мал. 132, a; с. 144). Кожна з хвиль проходить певну відстань. Розрізняють звичайну довжину пройденого шляху l та *оптичну* d . Для вакууму ці довжини одинакові. Для довільного середовища *оптична довжина шляху* d — це величина, що визначається добутком фактичної довжини шляху світлової хвилі в даному середовищі (геометричної довжини) та абсолютноного показника заломлення цього середовища, $d = nl$. Від того, якою буде оптична різниця ходу між двома хвилями, залежить амплітуда результаючої хвилі.

Якщо хвилі виходять із джерел S_1 і S_2 з однаковими фазами, а різниця ходу $\Delta d = d_1 - d_2 = 0$, то в точці P хвилі приходять теж з однаковими фазами. У цьому разі в точці P відбуваються електромагнітні коливання зі збільшеною амплітудою, тобто спостерігається максимум освітленості. Те саме відбувається за умови, що на відрізку Δd укладається будь-яке ціле число довжин хвиль (парне число півхвиль).



Мал. 131. Схема досліду Юнга

Якщо ж одна із хвиль проходить додаткову відстань, яка дорівнює половині хвилі, півтори хвилі й т. д., тобто різниця ходу $d_2 - d_1$ становить непарне число півхвиль, то обидві хвилі потраплять на екран у протифазі й «погасять» одну одну, оскільки результуюча амплітуда дорівнюватиме нулю (мал. 132, б).



Мал. 132. Ілюстрація умов: а — максимуму;
б — мінімуму інтерференційної картини

У загальнення розглянутих випадків носить назву **умов максимуму та мінімуму інтерференції**.

Умова максимуму: у певній точці простору відбувається посилення результуючих світлових коливань, якщо оптична різниця ходу двох світлових хвиль Δd , що надходять у цю точку, дорівнює цілому числу довжин хвиль (парному числу півхвиль):

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}, \text{ де } k = 0, 1, 2, 3 \dots .$$

Умова мінімуму: у певній точці простору відбувається ослаблення результуючих світлових коливань, якщо оптична різниця ходу двох світлових хвиль, що надходять у цю точку, дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ де } k = 0, 1, 2, 3 \dots .$$

Можливий і ще один випадок, коли різниця ходу дорівнює не цілому числу півхвиль. У цьому разі хвилі прийдуть з різними фазами й будуть

або підсилювати, або послаблювати одна одну. Амплітуда результуючої хвилі матиме проміжне значення між нулем і подвійною амплітудою.

По суті, інтерференційна картина — це незмінний у часі розподіл амплітуд інтерферуючих хвиль. Розглядаючи інтерференційну картину, ми вказали, що на щілинипадають монохроматичні хвилі довжиною λ . Вигляд інтерференційної картини залежить від довжини хвиль. Так, якщо на установку спрямувати світло іншого кольору (іншої довжини хвилі), то спостерігатиметься аналогічна картина, але відстані між світлими й темними смугами будуть іншими. Наприклад, для червоного світла відстані між смугами виявляться більшими, ніж за освітлення зеленим або синім.

А що ж ми спостерігатимемо на екрані, освітлюючи його білим світлом? У цьому разі в центрі буде видно білу смугу, а по обидва боки від неї — кольорові смуги, забарвлені всіма кольорами радуги: від фіолетового (який розташований ближче до центра екрана) до червоного. (Спробуйте самостійно пояснити, чому у випадку білого світла спостерігаються різникольорові смуги й чому на деякій відстані від центра екрана смуги зникають, а екран стає рівномірно освітленим.)

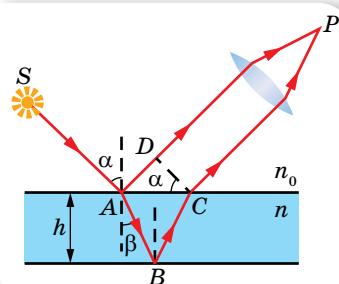
З'ясуємо ще одне питання. Як відомо, електромагнітні хвилі (зокрема й світлові) несуть енергію. Що ж відбувається із цією енергією, коли хвилі гасять одна одну? Можливо, ця енергія перетворюється на інші види й у мініумах інтерференційної картини виділяється теплота? Ні. Мініум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди зовсім не надходить. Унаслідок інтерференції енергія перерозподіляється в просторі. Вона концентрується в максимумах, не потрапляючи в мініуми.

Інтерференція в тонких плоскопаралельних пластинках. У природних умовах інтерференцію світла можна спостерігати на тонких мильних бульбашках, на плівках бензину, розлитому на мокрому асфальті.

При відбитті від двох меж плівки утворюються два відбиті когерентні промені (мал. 133). Якщо на їх шляху поставити збірну лінзу, то вони зберуться в одній з точок P фокальної площини лінзи й дадуть інтерференційну картину, яка визначається оптичною різницею ходу Δd між променями

$$\Delta d = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}, \text{де } h \text{ — товщина плівки, } n \text{ — показник заломлення речовини плівки, } \alpha \text{ — кут падіння світлового променя.}$$

Доданок $\pm \frac{\lambda_0}{2}$ зумовлений втратою півхвилі при відбиванні світла на межі поділу середовищ. Якщо світло переходить у більш оптично густе середовище, $n > n_0$, то в точці A фаза коливань змінюється на протилежну, відбувається втрата півхвилі й доданок матиме знак «-». У випадку $n < n_0$ втрата півхвилі відбудеться в точці C і $\frac{\lambda_0}{2}$ матиме знак «+».



Мал. 133. Хід променів у тонкій плівці

У точці P буде **максимум**, якщо $k\lambda = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$, і **мінімум**,

якщо $(2k+1)\frac{\lambda}{2} = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$.

Зі збільшенням кута падіння оптична різниця ходу зменшується. Це означає, що під час повертання пластинки відносно променів вона по черзі здаватиметься то темною, то світлою.

Про практичне
використання інтерференції
світла читайте
в електронному додатку.



Інтерференція спостерігається не лише у відбитому світлі, а й у світлі, що проходить через плівку. Оскільки світло не відбивається від оптично густішого середовища, то умові максимумів інтерференції у відбитому світлі відповідають мінімумами інтерференції в прохідному світлі, і навпаки.

Якщо світло падає нормально на пластинку, то кут $\alpha = 0$, її оптична різниця ходу становить $\Delta d = 2hn$.



ВІДВІДОВЛЕННЯ

1. Які хвилі називаються когерентними?
2. Назвіть способи спостереження інтерференції.
3. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
4. На якому шляху у вакуумі вкладеться стільки ж довжин хвиль монохроматичного світла, скільки їх вкладається на шляху 3 мм у воді?
5. В останній момент перед тим, як розірватися і утворити отвір, мильна бульбашка втрачає прозорість. Як це пояснити, адже в цей момент товщина плівки є найменшою?
6. Як зміниться вигляд багатоколірної мильної бульбашки, якщо освітити її монохроматичним світлом?
7. Кольорові смуги утворюються від краплі бензину лише тоді, коли вона падає на вологу, а не на суху поверхню асфальту. Поясніть чому.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. У досліді Юнга (мал. 134) відстань між щілинами $a = 0,07$ мм, а відстань від подвійної щілини до екрана $L = 2$ м. Коли прилад освітили зеленим світлом, то відстань до першого максимуму становила $x = 16$ мм. Визначте за цими даними довжину хвилі.

Дано:

$$a = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$L = 2 \text{ м}$$

$$x = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

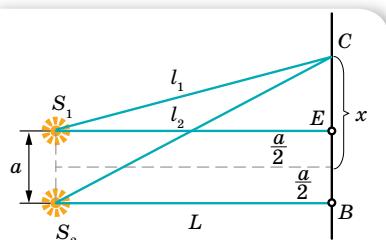
$$\lambda = ?$$

Розв'язання:

У певній точці C екрана буде максимум освітленості за умови $\Delta d = l_2 - l_1 = k\lambda$.

Визначимо оптичну різницю ходу Δd , для цього застосуємо до трикутників S_1CE і S_2CB теорему Піфагора:

$$l_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{a}{2} \right)^2, \quad l_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{a}{2} \right)^2.$$



Мал. 134

Віднімаючи від першого рівняння друге, дістаємо $l_2^2 - l_1^2 = 2xa$,
 $(l_2 - l_1)(l_2 + l_1) = 2xa$.

Оскільки $a \ll L$, то $l_1 + l_2 \approx 2L$. Отже, $l_2 - l_1 = \frac{xa}{L}$.

Ураховуючи, що $l_2 - l_1 = k\lambda$, можемо записати: $k\lambda = \frac{xa}{L}$.

Звідси $\lambda = \frac{a \cdot x}{L}$, оскільки за умовою $k = 1$.

Після підстановки даних $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Відповідь: $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Задача 2. Мильна бульбашка в точці, найближчій до спостерігача, здається зеленою ($\lambda = 540$ нм). Визначте мінімальну товщину плівки. Показник заломлення мильного розчину $n = 1,35$.

Дано:

$$\lambda = 540 \text{ нм}$$

$$n = 1,35$$

$$d_{\min} - ?$$

Розв'язання:

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати.

Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу задовольняє умову $2d_{\min}n = \frac{\lambda}{2}$. Звідки $d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}$.

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати. Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу задовольняє умову $2d_{\min}n = \frac{\lambda}{2}$. Звідки $d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}$.

$$d_{\min} = \frac{540 \text{ нм}}{4 \cdot 1,35} = 100 \text{ нм.}$$

Відповідь: $d_{\min} = 100$ нм.



Вправа 23

- Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 освітлюють екран AB , площа на якого паралельна напрямку S_1S_2 (мал. 135). Доведіть, що на екрані в точці O , яка лежить на перпендикулярі, опущеному із середини відрізка S_1S_2 , буде максимум освітленості.
- Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 (мал. 135) випускають монохроматичне світло з довжиною хвилі 600 нм. Визначте, на якій відстані від точки O буде перший максимум освітленості, якщо $|OC| = 4$ м і $|S_1S_2| = 1$ мм.



Мал. 135

3. Відстань на екрані (мал. 135, с. 147) між двома сусідніми максимумами освітленості дорівнює 1,2 мм. Визначте довжину хвилі світла, що його випускають когерентні джерела S_1 і S_2 , якщо $|OC| = 2$ м і $|S_1 S_2| = 1$ мм.
4. Як зміниться інтерференційна картина на екрані AB (мал. 135, с. 147), якщо:
 - а) не змінюючи відстані між джерелами світла, віддалити їх від екрана;
 - б) не змінюючи відстані до екрана, зблизити джерела світла;
 - в) джерела випускатимуть світло з меншою довжиною хвилі?
5. Біле світло, що нормально падає на мильну плівку й відбите від неї, дає у видимому спектрі інтерференційний максимум для хвилі довжиною 630 нм та більший до нього мінімум для хвилі 450 нм. Визначте товщину плівки.
6. Тонка плівка товщиною 0,5 мкм освітлюється світлом довжиною хвилі 590 нм. Який колір матиме ця плівка у прохідному світлі, якщо показник заломлення речовини плівки 1,48, а промені направлені перпендикулярно до поверхні плівки? Що буде відбуватися з кольором плівки, якщо її нахиляти відносно променів?

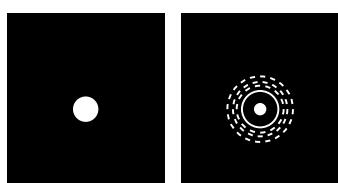
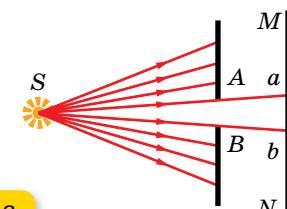
§ 30 Дифракція світла

Явище дифракції. Ознайомимося ще з одним хвильовим явищем — дифракцією. **Дифракція** — явище огинання хвильами перешкод.

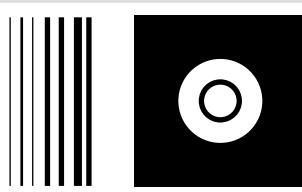
Спостерігати дифракцію світла не так легко. Річ у тім, що хвилі відхиляються від прямолінійного поширення на помітні кути лише на перешкодах, розміри яких порівняні з довжиною світлової хвилі. Тому для перешкод великих, порівняно з довжиною хвилі, дифракцію можна спостерігати на значній відстані від перешкоди.

Якщо від джерела S пропустити пучок світла крізь отвір AB (мал. 136), то на екрані дістанемо світлу пляму.

Діаметр цієї плями відповідає ширині світлового пучка, що падає на екран (мал. 136, *б*). Зменшуючи отвір AB , ми спостерігатимемо, що зменшується і пляма, тобто звужується пучок світла. Проте, починаючи з деякого розміру отвору, подальше його зменшення спричинює збільшення плями! Водночас пляма втрачає чіткість, вона розширина й нерівномірно освітлена (мал. 136, *в*). На екрані з'являються світлі й темні кільця, що чергуються та займають ділянку, значно більшу, ніж це виходить з геометричних побудов, які ґрунтуються на законі прямолінійного поширення світла.



Мал. 136. Дослід з виявленням залежності вигляду світлої плями від розмірів отвору



Мал. 137. Дифракційні картини від тонкої дротини (а) та круглого диска (б)

Змінюючи діаметр отвору, можна отримати в центрі дифракційної картини або темну, або світлу пляму.

На малюнку 137 показано дифракційні картини від тонкої дротини та круглого диска.

Повернемось знову до досліду Юнга (мал. 131, с. 143). Саме внаслідок дифракції з двох щілин виходили світлові конуси, які частково перекривалися і утворювали інтерференційну картину.

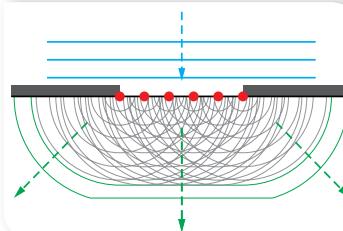
Досліджував явище дифракції Огюстен Френель. Він побудував кількісну теорію дифракції, яка дає можливість у принципі розрахувати дифракційну картину, що виникає внаслідок огинання світлом будь-яких перешкод. Цих успіхів Френель досяг, об'єднавши принцип Гюйгенса (див. с. 108) із припущенням про інтерференцію вторинних хвиль. Згідно з ідеями Френеля, *хвильова поверхня в будь-який момент часу є не просто обвідною вторинних хвиль (як за принципом Гюйгенса), а результатом їх інтерференції* (мал. 138).

Дифракція на щілинах. Щоб дифракційна картина була більш вираженою, світло пропускають не крізь одну чи дві щілини, а крізь кілька паралельних щілин. У цьому разі, крім явища дифракції, відбувається ще й явище інтерференції, оскільки промені, які йдуть від усіх щілин, будуть когерентними. Відповідний пристрій називають *дифракційною граткою* (мал. 139). Це тонка пластинка, на яку нанесено паралельні штрихи з проміжками (щілинами) між ними.

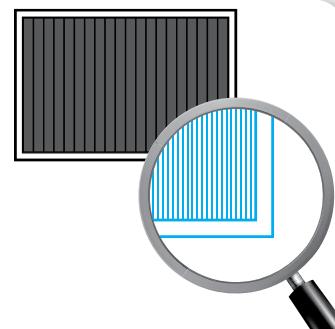
Ширина щілини зі штрихом позначається d і називається *сталою гратки*, або *періодом гратки* (мал. 140).

Паралельний монохроматичний пучок хвиль, перпендикулярних до площини гратки, пройшовши крізь щілини, завдяки дифракції буде розбіжним пучком променів, що поширюватимуться в усіх напрямках. При цьому підсилення цих хвиль унаслідок інтерференції можливе тільки в певних напрямках. З'ясуймо, в яких саме.

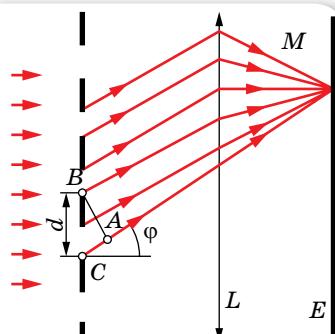
Нехай на гратку падає плоска монохроматична хвиля довжиною λ . Оптична різниця



Мал. 138. Пояснення дифракції світла за принципом Гюйгенса — Френеля



Мал. 139. Дифракційна гратка



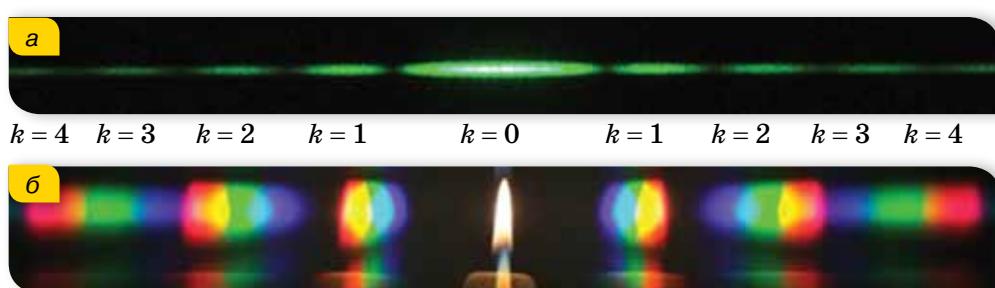
Мал. 140. Проходження хвиль крізь дифракційну гратку

ходу між хвилями від країв сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка AC (мал. 140, с. 149), який можна визначити з трикутника ABC : $AC = dn \sin \varphi$. Як відомо, якщо на цьому відрізку вміщується парне число півхвиль (або ціле число довжин хвиль), то хвилі від усіх щілин, додаючись, підсилюють одна одну, і в точці M спостерігається максимум інтерференції. Отже, умовою максимуму є рівність $dn \sin \varphi = k\lambda$.

Оскільки для повітря $n = 1$, то отримане співвідношення записують так: $d \sin \varphi = k\lambda$.

Зазначимо, що на малюнку 140 (с. 149) показано інтерферуючі промені, які йдуть від краю кожної щілини. Зрозуміло, що промені, які йдуть від будь-якої іншої точки щілини (наприклад, із центра) інтерферують з аналогічними променями від інших щілин. Що більше щілин має гратка і більше вони розміщені одна до одної, то яскравіші максимуми й ширшимі мінімумами вони розділені.

Дифракційний спектр. Утворену на екрані картину називають **дифракційним спектром** (мал. 141). Кожному значенню коефіцієнта k відповідає своя лінія (максимум освітленості), тому його ще називають **порядком**. Між максимумами розміщені мінімуми освітленості.



Мал. 141. Дифракційні спектри: а — монохроматичний; б — білого світла

Якщо $k = 0$, то по центральному променю $\varphi = 0$ спостерігається світла смуга — максимум нульового порядку — для будь-якої довжини хвилі. З обох боків від нього на однакових відстанях видно менш яскраві максимуми першого порядку, потім ще менш яскраві максимуми другого порядку і т. д. Усі ці максимуми розміщені на однакових відстанях один від одного. Якщо на цю саму гратку направити монохроматичне світло більшої довжини хвилі, то максимуми розмістяться рідше, тобто для того самого значення k максимум буде лежати далі від центрального.

Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає $k = 0$) залежить від довжини хвилі, то гратка розкладає *біле* світло в коліоровий спектр (мал. 141, б). З обох боків від центральної білої лінії максимуми розміщені в порядку зростання довжин хвиль (від фіолетового до червоного).

З формулі $d \sin \varphi = k\lambda$ видно, що для вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки треба виміряти тільки кут φ для даного значення k , оскільки d завжди відоме. Кут можна виміряти з великою точністю, отже, велику точність буде забезпечено і для визначення довжини хвилі. Зазначимо: що меншим є період ґратки, то точнішим буде результат вимірювання λ .

Дифракційну ґратку використовують для визначення складу світлового випромінювання будь-якої природи. Зі збільшенням загальної кількості щілин у ґратці зменшується ширина максимумів на екрані, що дає змогу бачити на ньому як окремі смуги максимуми променів з меншою різницею їхніх довжин хвиль. Говорять, що збільшення загальної кількості щілин у ґратці підвищує її *роздільну здатність*. Нині виготовляють ґратки, в яких на одному міліметрі нанесено понад тисячу штрихів, а загальна їх кількість у ґратці досягає ста тисяч.

Цікаву картину можна побачити на екрані, якщо на шляху світлових променів помістити дві однакові схрещені ґратки, тобто повернуті так, що їхні щілини взаємно перпендикулярні. Ми побачимо окремі світні плями. Коли періоди решіток різні й розміщені вони не впритул, то утворюється складніша система плям. Виявляється, що, аналізуючи розміщення плям на екрані в таких випадках, можна визначити відстань між ґратками та їх період. Це дало змогу дізнатися про розміщення атомів у кристалічних ґратках багатьох твердих тіл.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає явище дифракції світлових хвиль і як його можна спостерігати?
2. Чи можливе явище інтерференції та дифракції з ультрафіолетовими, інфрачервоними й рентгенівськими променями? **3.** Якими уявленнями Френель доповнив принцип Гюйгенса? **4.** Як зміниться: а) положення максимумів; б) інтенсивність центрального максимуму; в) ширина максимумів, — якщо половину дифракційної ґратки закрити непрозорою площину так, щоб кількість штрихів зменшилась удвоє? Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?



Експериментуємо

1. За допомогою лазерної указки визначте густину доріжок (кількість доріжок, що припадає на 1 мм уздовж радіуса диска) на компакт-дискові. Обладнання: лазерна указка з відомою довжиною хвиль випромінювання, компакт-диск, лінійка, мірна стрічка.
2. Порівнайте два способи визначення періоду дифракційної решітки. (Зазначений на решітці період попередньо заклейте непрозорим скотчем або лейкопластиром.) Вважайте, що довжина хвиль зеленого світла дорівнює 0,55 мкм. Обладнання для первого способу: прилад для спостереження дифракції світла, дифракційна решітка з невідомим періодом. Обладнання для другого способу: дифракційна решітка з невідомим періодом, дифракційна решітка з відомим періодом, екран зі щілиною завширшки 0,5–1 мм, лінійка.



Приклади розв'язування задач

Задача. На дифракційну ґратку з періодом 0,01 мм падає біле світло. Яка ширина спектра першого порядку, якщо екран розміщено на відстані 3 м від ґратки? Довжина хвилі фіолетового кольору $\lambda_1 = 380$ нм, а червоно-го — $\lambda_2 = 760$ нм.

Дано:

$$\lambda_1 = 380 \text{ нм} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 760 \text{ нм} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$d = 0,01 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$AO = L = 3 \text{ м}$$

$$k = 1$$

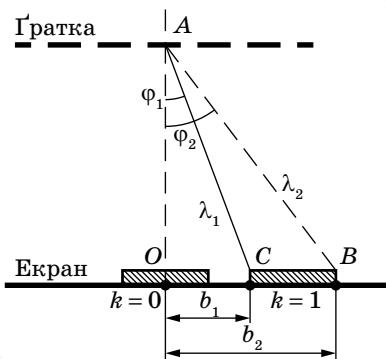
$$\Delta b = ?$$

Розв'язання:

Умова дифракційних максимумів для червоних хвиль $d \sin \varphi_1 = k\lambda_1$, а для фіолетових — $d \sin \varphi_2 = k\lambda_2$.

Для малих кутів φ_1 і φ_2 можна вважати, що $\sin \varphi_1 \approx \tg \varphi_1 = \frac{k\lambda_1}{d}$ і $\sin \varphi_2 \approx \tg \varphi_2 = \frac{k\lambda_2}{d}$.

З малюнка 142 видно, що $\Delta b = L(\tg \varphi_2 - \tg \varphi_1)$ або $\Delta b = \frac{Lk}{d}(\lambda_2 - \lambda_1)$.



Мал. 142

Після підстановки даних отримуємо $\Delta b = 0,114$ м.

Відповідь: ширина спектра першого порядку — 0,114 м.



Вправа 24

- Визначте кут відхилення променів зеленого світла ($\lambda = 550$ нм) у спектрі першого порядку, отриманого за допомогою дифракційної ґратки, період якої 0,02 мм.
- На дифракційну ґратку, що має період 4 мкм, нормально падає монохроматична хвилі. Оцініть довжину хвилі, якщо кут між спектрами другого і третього порядків — $2^{\circ}30'$. Кути відхилення вважайте малими.
- Світло нормально падає на дифракційну ґратку. Найменший кут відхилення, за якого суміщаються лінії довжинами хвиль 656 нм і 410 нм, дорівнює 41° . Визначте період дифракційної ґратки.
- На плоску дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Під кутом 20° видно червону (669 нм) лінію спектра. Визначте період ґратки, якщо під цим самим кутом видно і синю (446 нм) лінію в спектрі вищого порядку. Найбільший порядок спектра, за якого видно червону лінію, дорівнює 5.

§ 31

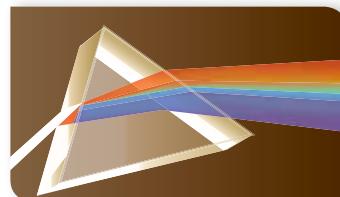
Дисперсія світла

Явище дисперсії світла. Якщо в темній кімнаті скляну призму освітити пучком світла від лампи розжарювання, то, придивившись, можна побачити, що у склі на межі з повітрям пучок білого світла розщепився на декілька кольорових пучків (мал. 143).

Це явище вперше досліджував Ісаак Ньютон у 1666 р. й назвав його *дисперсією* (від лат. *dispergo* — розкидаю), а кольорову гаму — *дисперсійним спектром* (від лат. *spectrum* — марево).

Замість скла можна використовувати лід, органічне скло та інші прозорі для світла матеріали. Що більший показник заломлення матеріалу, то яскравіше виражене явище дисперсії. Середовища, у яких спостерігається явище дисперсії, називають *диспергуючими*.

З'ясуємо, у чому суть явища дисперсії. У вакуумі всі світлові хвилі, так само як і електромагнітні хвилі інших діапазонів довжин хвиль (частот), поширяються з однаковою швидкістю $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Під час перетину межі поділу середовищ швидкість електромагнітної хвилі змінюється, унаслідок чого відбувається її заломлення. Причому *кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі*. Пояснення цього дає теорія дисперсії Гендріка Лоренца на основі електромагнітної теорії світла й електронної будови речовини. Під час проходження електромагнітної хвилі крізь діелектрик на кожний електрон діє електрична сила, під дією якої вони здійснюють коливання. Коливання електронів є джерелом вторинних хвиль, які накладаються на первинні хвилі. Вторинні хвилі внаслідок інерції електронів дещо запізнюються в часі і, накладаючись на первинні хвилі, дають результатуючі хвилі з відставанням за фазою порівняно з первинними. Зсув фаз між первинною та результатуючою хвильами залежить від частоти коливань напруженості електромагнітного поля E , тобто світло різних довжин хвиль (частот) матиме різні швидкості поширення в речовині, а отже, й різні значення показника заломлення, оскільки показник заломлення визначається як $n = \frac{c}{v}$.



Мал. 143. Розкладання білого світла призмою

Із закону заломлення світла $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v}$ випливає, що $\sin \gamma = \frac{v \sin \alpha}{c}$.

Оскільки швидкість поширення світла v в середовищі дляожної монохроматичної хвилі має своє певне значення, то дляожної монохроматичної хвилі $\sin \gamma$ і відповідно кут заломлення γ також набуватимуть певного значення.

Нині термін «дисперсія», який спочатку було введено для пояснення розкладання білого світла в спектр, має ширший зміст. У теорії хвиль

термін «дисперсія хвиль» означає залежність фазової швидкості гармонічної хвилі від частоти (довжини) хвилі та, як наслідок, зміну форми довільних (негармонічних) збурень у процесі їх поширення.

Під дисперсією світла розуміють сукупність оптичних явищ, зумовлених залежністю діелектричної проникності речовини (а відповідно, і показника заломлення) від частоти (довжини) світлової хвилі.

Оскільки колір світла визначається частотою світлової хвилі, то вживають і таке визначення: дисперсія світла — це залежність показника заломлення світла (а отже, і швидкості) від його кольору.

Як правило, показник заломлення світла зростає зі збільшенням частоти світла (*нормальна дисперсія*). Проте поблизу смуг поглинання світла речовиною спостерігається обернене явище, так звана *аномальна дисперсія*, коли зі збільшенням частоти світла (зменшеннем довжини хвилі) показник заломлення світла зменшується.

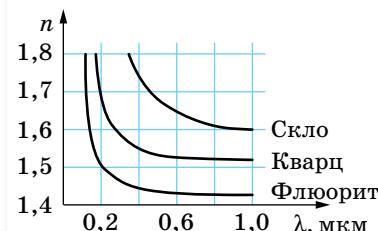
Нормальна дисперсія видимих променів спостерігається в усіх прозорих безбарвних діелектриках: кварці, склі, воді тощо. Мірою дисперсії, тобто величиною, що показує, на скільки розходяться за заломлення промені в спектрі, служить так звана середня дисперсія, яка є різницею показників заломлення для двох довжин хвиль: блакитної та червоної ($n_{\text{бл}} - n_{\text{чер}}$).

Графічну залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин наведено на малюнку 144.

З графіків видно, що залежність $n = f(\lambda)$ має нелінійний характер і зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується. Короткі хвилі заломлюються сильніше, ніж довгі. Іншими словами, червоний колір у речовині поширюється з найбільшою швидкістю, тому менше заломлюється, а промінь фіолетового кольору поширюється з найменшою швидкістю і найбільше заломлюється.

Неперервний спектр світла. Світло Сонця, лампи розжарювання, свічки розкладається призмою в *суцільний (неперервний) спектр*. Це свідчить про те, що ці тіла випромінюють хвилі всіх можливих частот (довжин) хвиль.

З кривої дисперсії для скла (мал. 144) видно, що в області коротких хвиль показник заломлення скла зі зміною довжини хвилі змінюється швидко, а в області довгих хвиль — повільно. Тому дисперсійний спектр білого світла стиснутий у червоній частині й розтягнутий у фіолетовій. Як відомо, дифракційна ґратка також розкладає біле світло у спектр, але утворений нею спектр, окрім кольорових смужок, має ще й чорні. До того ж дифракційний спектр (мал. 141, с. 150) відрізняється від дисперсійного ще й тим, що в ньому кольори розміщаються в порядку зростання довжин хвиль, і він рівномірно розтягнутий на всіх своїх ділянках.



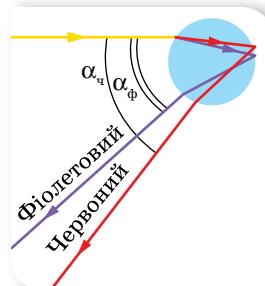
Мал. 144. Графічна залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин

Розкладанням білого світла на кольори внаслідок заломлення пояснюється виникнення веселки. Веселку видно тоді, коли спостерігач дивиться в напрямку від Сонця і в повітрі є краплі води (мал. 145).

Для певного кута падіння променів на краплю на межі вода—повітря всередині краплі відбувається повне відбивання. Оскільки фіолетові промені заломлюються більше, ніж червоні, після виходу з краплі вони розбігаються: червоні промені утворюють з падаючим променем кут близько 43° , а фіолетові — близько 41° .

Колір. Знаючи, що біле світло має складну структуру, можна пояснити велику різноманітність кольорів у природі. Якщо предмет, наприклад, аркуш паперу, відбиває всі промені різних кольорів, то він здаватиметься білим. Трава й листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх падаючих на них сонячних променів вони відбивають лише зелені, поглинаючи решту. Якщо подивитись на траву крізь червоне скло, яке «пропускає» тільки червоні промені, то трава здаватиметься майже чорною.

Відчуття того чи того кольору, яке виникає в очах спостерігача, залежить від частоти світлової хвилі, а не від її довжини. Унаслідок того, що під час переходу електромагнітної хвилі з одного середовища в інше її частота лишається незмінною, колір, який сприймається людиною в повітрі та, наприклад, у воді, буде однаковим.



Мал. 145.
Заломлення світла
в краплині води



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр?
- Яке світло буде поширюватися в речовині призми (склі) з більшою швидкістю — червоне чи фіолетове? **3.** Подивітесь крізь призму на білий аркуш паперу, коли її заломне ребро паралельне одному з боків аркуша. Як розташовані кольорові смуги відносно аркуша? Чому?

§ 32

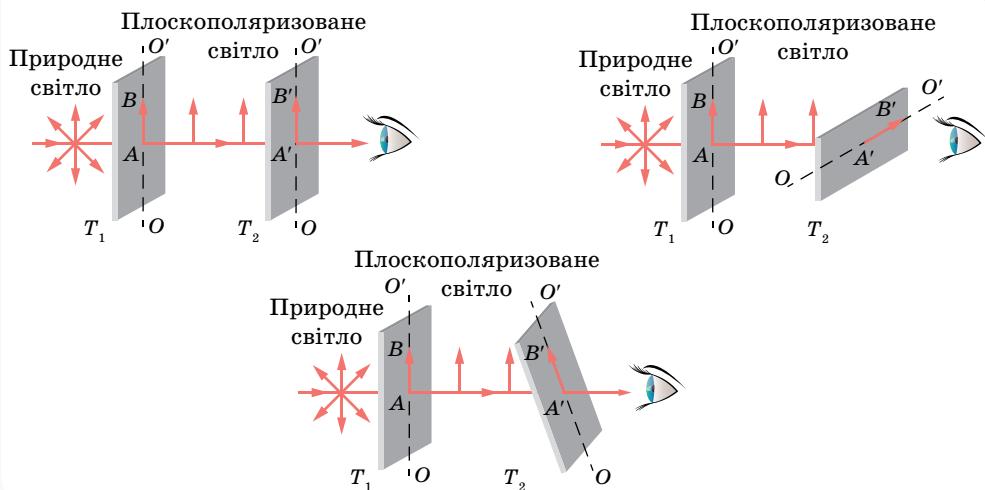
Поляризація світла

Природне і поляризоване світло. Дослідимо ще одну властивість світлових хвиль — їх поляризацію. Ураховуючи те, що у взаємодії світлової хвилі з речовиною вирішальну роль відіграє вектор напруженості електричного поля, а також для спрощення зображення світлової хвилі на малюнках надалі ми будемо говорити про коливання лише вектора напруженості.

Оскільки світло випромінюють атоми, кількість яких у речовині величезна, то зрозуміло, що таке світло не буде поляризованим (коливання вектора \vec{E} здійснюються в усіх можливих напрямках у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі). Проте бувають випадки, коли світлова хвиля буде поляризованою (чи частково поляризованою).

Поляризація світла — стан світлової хвилі, за якого певні напрямки коливань електричного вектора \vec{E} переважають над іншими.

Методи отримання поляризованого світла. Візьмемо дві однакові прямокутні пластинки з турмаліну, вирізані так, що одна зі сторін прямокутника збігається з певним напрямком усередині кристала, який називають оптичною віссю. Розмістимо другу пластинку так, щоб їхні осі збігалися за напрямком, і пропустимо крізь складену пару пластинок вузький пучок світла від якогось джерела або від Сонця. Під час обертання першої пластинки навколо пучка (друга пластинка нерухома), виявимо, що світловий пучок слабшатиме, а після повороту пластинки на 90° він зовсім зникне (мал. 146).



Мал. 146. Схема поляризації хвилі

Цей результат можна пояснити так. У природному світлі вектор напруженості електричного поля має довільні напрямки. Проходження природного світла крізь першу пластинку турмаліну приводить до того, що з усіх напрямків поперечних коливань відбираються лише ті, які пропускає турмалін. Тому світло, що пройшло крізь турмалін, є сукупністю поперечних коливань одного напрямку, який визначено орієнтацією осі пластинки турмаліну. Таке світло називають плоскополяризованим, а кристал турмаліну — поляризатором світла. Другий кристал турмаліну є аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло,

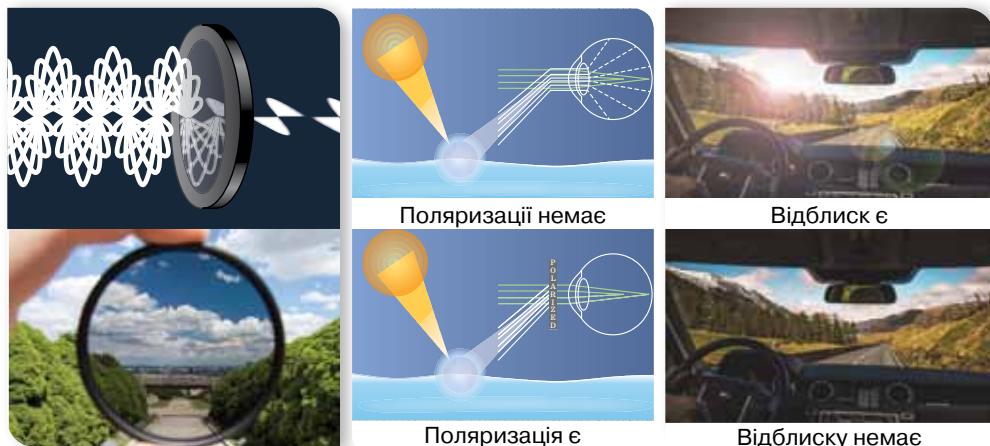
що збігається з площею поляризації. Якщо ж аналізатор повернути на 90° , то вже поляризоване світло він практично не пропускатиме.

Поляризація властива тільки поперечним хвилям. Якщо хвилі поляризуються, то вони є поперечними. Поздовжні хвилі не поляризуються. Окрім турмаліну, такі властивості має кварцова пластина, вирізана в певний спосіб із кристала. Прозорі плівки, що можуть бути поляризаторами й аналізаторами світла, називають поляроїдами відтоді, як засновник компанії «Polaroid» Едвін Ленд (1909–1991, США) у 1929 р. винайшов та випустив перші зразки поляризаційних лінз.

Отримати поляризоване світло з неполяризованого можна ще одним способом — відбиванням і заломленням.

Коли світло падає на поверхню прозорої речовини (наприклад, води) під довільним кутом, крім прямого, відбитий промінь виявляється плоскополяризованим переважно паралельно відбивній поверхні. Це добре знають рибалки, які використовують поляроїдні окуляри, щоб уникнути відблисків води.

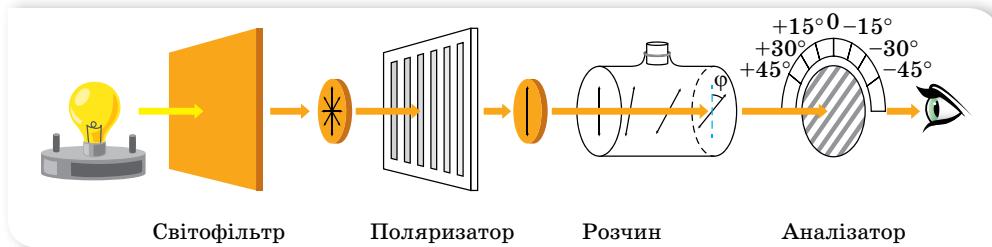
Використання поляризованого світла. У багатьох випадках потрібно плавно регулювати освітлення того або іншого об'єкта. Поставивши перед джерелом світла поляризатор й аналізатор, можна повільним повертанням аналізатора плавно змінювати освітлення об'єкта від максимального до повної темряви. Поляроїди використовують для гасіння дзеркально відбитих відблисків, наприклад, під час фотографування картин, скляних і фарфорових виробів тощо. Світло відблисків частково поляризоване. Якщо помістити поляроїд між джерелом світла та віддзеркалюальною поверхнею, то відблиски можна зовсім погасити (мал. 147).



Мал. 147. Схема поляризації хвилі

Установлено також, що під час проходження плоскополяризованого світла крізь деякі розчини площа поляризації його повертається. Наприклад, на малюнку 148 (с. 158) світло проходить крізь поляризатор, а потім — крізь розчин цукру в кюветі. Поляроїд-аналізатор за кюветою, розташований під кутом 90° до поляризатора, мав повністю загасити

світло, але цього не відбулося. Проте якщо аналізатор повернути ще на деякий кут φ , — світло гаситься. Це означає, що розчин у кюветі повертає на кут φ площину поляризації. Такі речовини називають оптично активними.

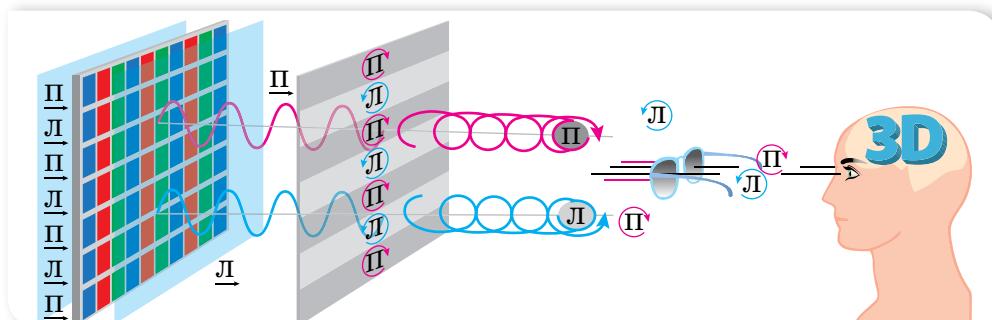


Мал. 148. Принцип дії цукрометра

Оптична активність речовин зумовлена асиметрією молекул, які мають форму спіралі, як, наприклад, молекули деяких білків. Деякі речовини (цукор, декстроза, *D*-глюкоза) повертають площину поляризації праворуч, а деякі речовини (амінокислоти, білки) — ліворуч. Кут повороту φ пропорційний концентрації розчину. Тому цю властивість використовують для виготовлення спеціальних пристройів — цукрометрів, за допомогою яких визначають вміст цукру.

Спеціальні поляризаційні окуляри використовують під час перегляду стереофільмів у кінотеатрах. Отримати зображення у 3D-форматі можна й на домашньому комп’ютері за допомогою відповідних екранів. Вивчаючи властивості рідкохристалічних екранів, ми зазначали, що їм притаманна певна властивість, зумовлена самою технологією отримання зображення, — вони дають поляризоване світло.

Завдяки цьому, використовуючи тонкі смужки плівочок-поляризаторів, можна створювати парні та непарні ряди пікселів, що мають різний напрямок поляризації. Лінзи окулярів є поляризаторами, у яких площини поляризації повернуті так, що крізь одну лінзу видно парні ряди, а крізь іншу — непарні. Таким чином створюють зображення, які видно окремо лівим оком і правим оком. Мозок людини зіставляє два зображення й «бачить» його об’ємним (мал. 149).



Мал. 149. Механізм утворення зображення у 3D-форматі за допомогою поляризованого світла



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим відрізняється поляризоване світло від природного? Як отримують поляризоване світло? 2. Де на практиці застосовують явище поляризації світла?

§33

Відбиття й заломлення світла

Закони геометричної оптики. Пригадуєте, у 9 класі, окрім терміну «світло», ми використовували терміни «світловий промінь» і «світловий пучок»? Світловий промінь — уявна лінія, уздовж якої відбувається перенесення світлової енергії. Світловий промінь — сухо геометричне поняття, його застосовують для схематичного зображення світлових пучків. У реальному житті маємо справу з пучками світла, а от для схематичного зображення світлових пучків використовують світлові промені.

Світловий промінь є головним поняттям геометричної оптики, яка ґрунтується на низці простих законів, установленіх експериментально:

- **закон прямолінійного поширення світла** — в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно;
- **закон незалежного поширення світла** — окремі пучки світла не впливають один на одного й поширюються незалежно;
- **закони відбиття і заломлення світла.**

У загальненням усіх законів геометричної оптики є принцип Ферма, або принцип найменшого часу: поширення світла з однієї точки до іншої відбувається шляхом, що потребує найменшого часу порівняно з іншими шляхами між цими точками.

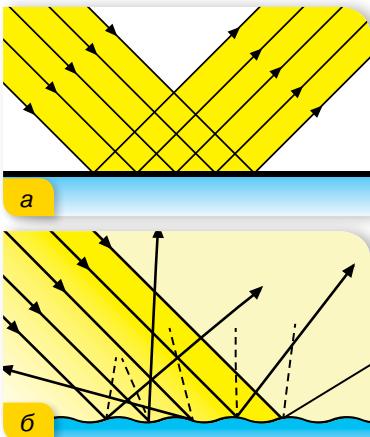
Геометрична оптика є граничним випадком хвильової оптики. Тобто це розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла. Але те, що хвильові властивості світла не враховуються, не означає, що закони геометричної оптики не можна пояснити згідно із хвильовою теорією.

Уявлення та закони геометричної оптики є правильними лише до тієї міри, до якої можна нехтувати явищами дифракції та інтерференції хвиль.

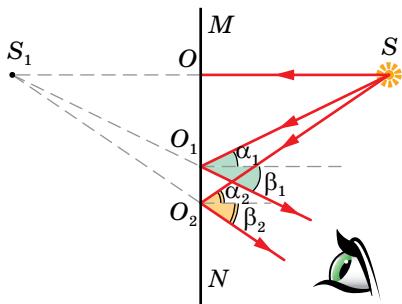
Закон відбиття світла. Закон відбиття справджується для хвиль будь-якої природи. Нагадаємо його:

падаючий промінь, відбитий промінь та перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений у точці падіння, лежать в одній площині; кут відбиття дорівнює куту падіння.

Дзеркальне та дифузне відбиття. Залежно від властивостей і якості поверхні відбиття розрізняють дзеркальне та розсіяне відбиття.



Мал. 150. Дзеркальне та дифузне відбиття



Мал. 151. Утворення зображення в плоскому дзеркалі

Одержане зображення є прямим, уявним (оскільки одержане в результаті перетину не самих променів, а їх продовженень), таким, що дорівнює за розмірами предмету, і симетричним ѹму відносно площини дзеркала.

Закон заломлення світла. Повне відбиття. Пригадаймо закон заломлення світла:

падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр до межі підлілу середовищ, проведений у точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ світла є величиною сталою, яка дорівнює відносному показнику заломлення двох середовищ, $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_1 і n_2 — абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ, n_{21} — відносний показник заломлення.

Закон заломлення світла дає змогу пояснити цікаве й практично важливе явище — *повне відбиття світла*.

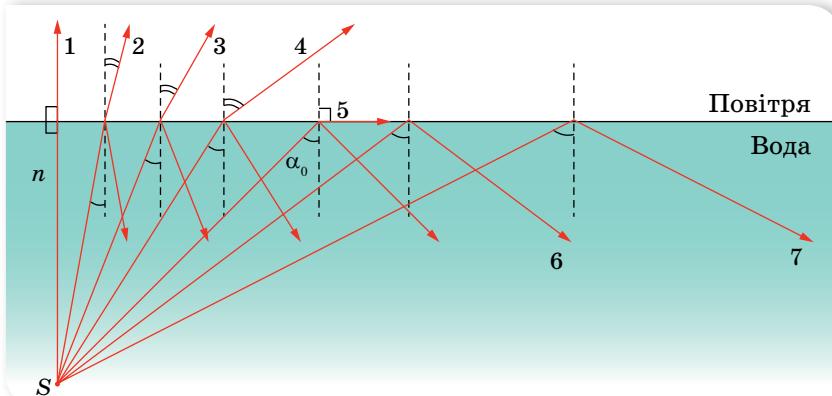
Дзеркальною вважають поверхню, що має нерівності, розміри яких менші від довжини світлової хвилі. Наприклад, поверхні краплинки ртуті, полірованого скла чи металу тощо. Паралельні промені після відбиття від дзеркальної поверхні будуть також паралельними. Якщо ж нерівності поверхні сумірні з довжиною світлової хвилі, то світло, відбите від поверхні, буде розсіяним (дифузним) (мал. 150). Саме завдяки такому відбиванню світла ми бачимо предмети, які не випромінюють світло.

Одержання зображень за допомогою дзеркал. На практиці використовують переважно *плоскі та сферичні* дзеркала.

Зображення предмета в плоскому дзеркалі можна побудувати, скориставшись законами відбиття світла. Для цього з точки, зображення якої хочемо побудувати, проводимо довільні промені (на малюнку 151 з точки S проведено три промені, хоча зрозуміло, що для побудови точки на площині достатньо перетину двох променів). Після цього за законом відбиття світла будуємо промені, відбиті від поверхні дзеркала, та їх продовження. Саме перетин продовжень відбитих променів є зображенням точки в плоскому дзеркалі.

Якщо промінь світла поширюється від точкового джерела з оптично більш густого в оптично менш густе середовище, то кут заломлення більший за кут падіння. Зі збільшенням кута падіння світлового променя збільшується і кут заломлення, водночас, інтенсивність заломленого променя зменшується (мал. 152). Досягши певного значення кута падіння α_0 , промінь взагалі не перетинає межу поділу середовищ — кут заломлення становить 90° . Коли кут падіння $\alpha > \alpha_0$, світло не переходить у друге середовище, а лише відбивається від його межі, тобто відбувається явище повного внутрішнього відбиття.

Явище, за якого світло, поширюючись у більш густому середовищі, відбивається від межі поділу з менш густим середовищем, не заломлюючись, називається явищем повного відбиття.



Мал. 152. Визначення умови повного відбиття

Кутом повного внутрішнього відбиття називається найменший кут падіння α_0 , починаючи з якого світло повністю відбивається від межі поділу середовищ. Із закону заломлення світла випливає, що ним є кут, синус якого дорівнює $\frac{1}{n}$, тобто $\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$.

Саме повне відбиття спричиняє яскравий бліск краплинок роси, уламків скла тощо. Це явище використовують, огранюючи та шліфуючи дорогоцінне каміння. Оброблювальному камінцеві надають такої форми, щоб більшість падаючих на нього променів після заломлення відбивались від внутрішніх граней.

Волоконна оптика. Явище повного відбиття використовують у *волоконній оптиці*. Термін *волоконна оптика* з'явився у 50-х роках ХХ ст. Основним елементом волоконної оптики



Мал. 153. Оптичні волокна

є оптичне волокно (мал. 153, с. 161) (найчастіше тонка прозора скляна нитка). Зазнаючи повного внутрішнього відбиття, світло поширюється всередині світловоду і здатне передавати оптичні сигнали без зменшення інтенсивності на великі відстані.

Явище повного відбиття використовують у біноклях, перископах, катафотах засобів дорожнього руху тощо.

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Сформулюйте закони геометричної оптики.
- Поясніть суть явища повного внутрішнього відбиття світла. Що називають граничним кутом повного внутрішнього відбиття світла? Чому він дорівнює?
- Яке практичне застосування повного внутрішнього відбиття світла? Що таке волоконна оптика?
- На який кут повернеться промінь, відбитий від плоского дзеркала, коли дзеркало повернути на кут α ?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Використовуючи масштабну лінійку й затемнене скло, визначте приблизний діаметр Сонця D , вважаючи відстань до нього такою, що дорівнює $R = 150 \cdot 10^6$ км.

Дано:

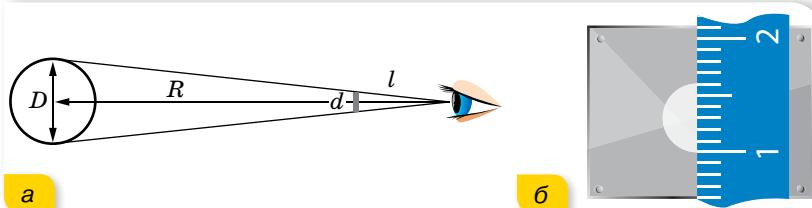
$$R = 150 \cdot 10^6 \text{ км}$$

$$D - ?$$

Розв'язання:

До затемненого скла прикладають лінійку і, тримаючи її в руці, дивляться через скло на Сонце, як показано на малюнку 154, а.

Лінійкою вимірюють видимий діаметр Сонця в міліметрах (мал. 154, б).



Мал. 154

$$\text{Діаметр Сонця } D = \frac{Rd}{l}, \text{ де } l \text{ — відстань від ока до затемненого скла.}$$

В одному з дослідів були одержані такі результати: $d = 6$ мм; $l = 60$ см. Ураховуючи всі дані, маємо: $D = 150 \cdot 10^6$ км. Діаметр Сонця приблизно в 100 разів менший від радіуса земної орбіти.

Аналогічно можна визначити діаметр Місяця. Також, знаючи розмір далекого предмета, можна визначити відстань до нього.

Відповідь: $D = 150 \cdot 10^6$ км.

Задача 2. Промінь падає на плоскопаралельну скляну пластинку під кутом $\alpha = 30^\circ$ (мал. 155). Показник заломлення скла $n = 1,5$. Визначте товщину пластинки, якщо зміщення променя (відрізок CD) дорівнює 3,88 см.

Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$n = 1,5$$

$$CD = 3,88 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

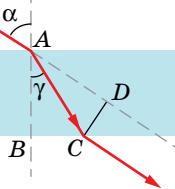
$$d = ?$$

Розв'язання:З малюнка видно, що $\angle BAD = \alpha$;

$$\angle CAD = \alpha - \gamma; AC = \frac{CD}{\sin(\alpha - \gamma)};$$

$$AB = AC \cos \gamma.$$

$$\text{Звідси } AB = \frac{CD \cos \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)}.$$



Мал. 155

$$\text{Кут заломлення } \gamma \text{ визначаємо із закону заломлення: } \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

$$\text{Звідси } \sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0,333, \gamma \approx 19^\circ 30', \alpha - \gamma = 10^\circ 30'.$$

Після підстановки даних отримуємо $AB = 0,2 \text{ м}$.**Відповідь:** 0,2 м.

Задача 3. Промінь світла падає на бічну грань скляної призми, як показано на малюнку 156. Чи зазнає промінь повного внутрішнього відбиття? Якщо ні, то на який кут відхиливиться промінь від початкового напрямку?

Дано:

$$\delta = 30^\circ$$

$$n = 1,5$$

$$\alpha_{rp} = ?$$

$$\gamma = ?$$

Розв'язання:

Перевіримо, чи вийде промінь у повітря. Визначимо граничний кут повного відбиття: $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}, \sin \alpha_0 = \frac{1}{1,5}, \alpha_0 = 42^\circ, \alpha_0 = 35^\circ < \alpha_0$, отже, промінь вийде в середовище.

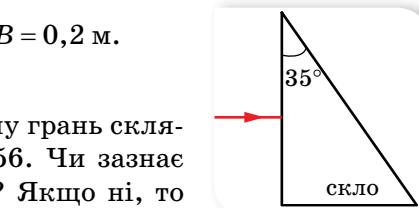
Накреслимо хід променів у призмі, застосовуючи закони заломлення світла й геометричні властивості кутів (мал. 157).

Визначимо кут заломлення γ :

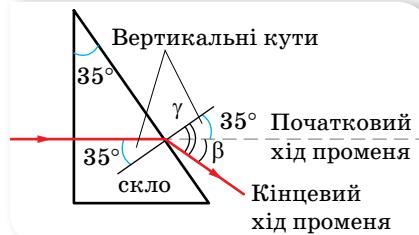
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n}, \sin \gamma = n \sin \alpha =$$

$$= 1,5 \sin 35^\circ \approx 0,8604; \gamma \approx 59^\circ.$$

$$\beta = \gamma - 35^\circ \approx 24^\circ.$$

Відповідь: 24° .

Мал. 156



Мал. 157

**Вправа 25**

- На якій висоті висить вуличний ліхтар, якщо тінь від вертикально поставленої палиці заввишки 0,9 м має довжину 1,2 м, а коли палицю перемістити на 1 м від ліхтаря вздовж напрямку тіні, її довжина становитиме 1,5 м? Визначте таким способом, на якій висоті висить ліхтар, вважаючи, що безпосередньо виміряти відстань до джерела світла (по горизонталі) неможливо.

2. На горизонтальному дні водойми, глибина якої 1,2 м, лежить плоске дзеркало. Промінь світла падає на поверхню води під кутом 30° . На якій відстані від місця падіння цей промінь вийде з води після відбиття від дзеркала? Показник заломлення води — 1,33.
3. Висота Сонця над горизонтом 38° . Під яким кутом до горизонту треба поставити дзеркало, щоб сонячні промені потрапили на дно колодязя?
4. Плоске дзеркало утворює зі столом двогранний кут α . На столі на відстані l від ребра двогранного кута лежить монета. Визначте відстань d , на яку зміщується зображення монети у дзеркалі, коли дзеркало повернути на кут ϕ відносно ребра двогранного кута.
5. На нижню грань плоскопаралельної скляної пластинки нанесено риску. Спостерігач, що дивиться згори, бачить риску на відстані 4 см від верхньої грани пластинки. Яка товщина пластинки?
6. Промінь падає під кутом 60° на скляну пластинку завтовшки 2 см з паралельними гранями. Визначте зміщення променя, який вийшов із пластини. Визначте зміщення за умови, що промінь під таким самим кутом падає на цю саму скляну пластинку, розташовану у воді.
7. Промінь падає під кутом 50° на пряму трикутну скляну призму із заломленням кутом 60° . Визначте кут заломлення променя в точці виходу з призми.

§ 34

Лінзи. Оптичні прилади та системи

Лінзи. У 8 класі ми вже ознайомилися з лінзами та правилами побудови зображень, які отримують за їх допомогою. Пригадаймо основні поняття.

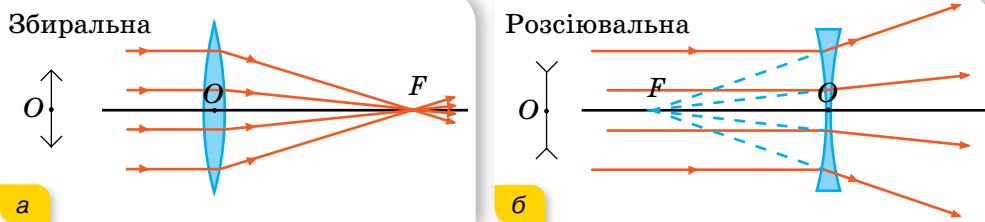
 **Лінзою** називають прозоре тіло, обмежене з обох боків сферичними поверхнями (одна з поверхонь може бути плоскою).

Унаслідок кривизни поверхонь промені, які проходять крізь лінзу, два рази заломлюються (як і в призмі), змінюючи свій напрямок поширення. Якщо товщина лінзи значно менша від радіуса її кривизни, то таку лінзу називають *тонкою*.

Якщо паралельний пучок променів, пройшовши крізь лінзу, сходить в одній точці (фокусі), то таку лінзу називають *збиральною*, якщо ж паралельний пучок променів після проходження крізь лінзу стає розхідним, то таку лінзу називають *розсіюальною*.

На малюнку 158, а зображене збиральну лінзу, хід променів у ній та її умовне зображення, а на малюнку 158, б — розсіюальну лінзу, хід променів у ній та її умовне зображення. (Зауважимо, що збиральна лінза є опуклою, а розсіюальна вгнутою, лише коли показник заломлення речовини лінзи більший за показник заломлення навколошнього середовища.)

Лінза як оптична система має низку характеристик: фокус, фокальну площину, головну оптичну вісь тощо. Зміст деяких термінів зрозумілій з малюнка 159.



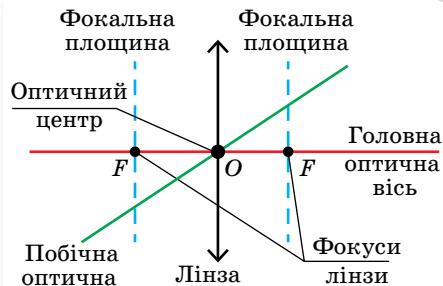
Мал. 158. Збиральна та розсіювальна лінзи

Відстань від фокуса до оптичного центра називають *фокусною відстанню лінзи* F . Фокусна відстань збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною. Величину, обернену до фокусної відстані, називають **оптичною силою лінзи** D , $D = \frac{1}{F}$.

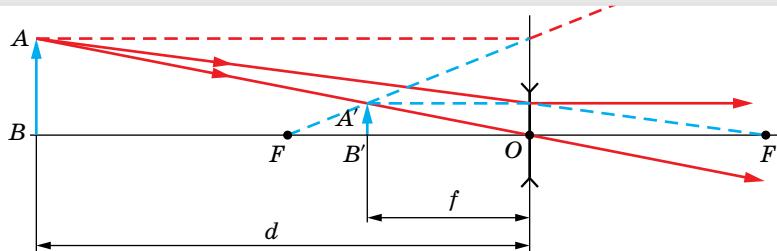
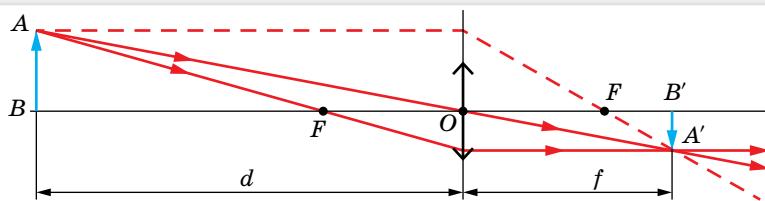
У СІ оптичну силу лінзи вимірюють у діоптріях, 1 дптр $= \frac{1}{\text{м}}$.

Побудова зображень, одержаних за допомогою лінз. Лінзи як оптичні пристрії цінні тим, що за допомогою них отримують зображення предметів, які можуть випромінювати або відбивати світло.

На практиці для побудови зображень, отриманих за допомогою лінз, використовують чотири так звані зручні промені, хід яких відомий без використання закону заломлення.



Мал. 159. Характеристики лінз, які використовуються для побудови зображень



Мал. 160. Побудова зображень у збиральній і розсіювальній лінзах

Хід зручних променів (мал. 160, с. 165):

- Якщо падаючий промінь паралельний головній оптичній осі, то заломлений пройде через фокус.
- Якщо падаючий промінь пройшов через фокус, то заломлений піде паралельно головній оптичній осі.
- Промінь, який пройшов через оптичний центр, не заломлюється.
- Якщо падаючий промінь паралельний побічній осі, то заломлений перетнеться із цією віссю у фокальній площині.

Зображення в лінзі може бути прямим або перевернутим, збільшеним або зменшеним, дійсним або уявним.

Якщо d — відстань від предмета до лінзи, f — відстань від лінзи до зображення на екрані, F — фокусна відстань, то розміщення предмета та його зображення можна визначити за *формулою тонкої лінзи*:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D .$$

Користуючись формулою тонкої лінзи, варто зважати на правило знаків:

- якщо лінза розсіювальна, то величину F беруть зі знаком «-»;
- якщо лінза дає уявне зображення, то і f також беруть з «-»;
- якщо предмет уявний, то і d беруть зі знаком «-».

Якщо h — висота предмета, а H — висота зображення, то можна визначити збільшення лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} .$$

Тип і положення зображення предмета в збиральній лінзі залежать від його відстані d до лінзи. Характер співвідношення між предметом і його зображенням у збиральній лінзі наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Відстань від предмета до лінзи, d	Відстань до зображення, f	Тип зображення
$d \rightarrow \infty$	$f \approx F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d > 2F$	$2F > f > F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d = 2F$	$f = 2F$	Дійсне, обернене, рівне, $\Gamma = 1$
$2F > d > F$	$f > 2F$	Дійсне, обернене, збільшене, $\Gamma > 1$
$d \approx F$	$f \rightarrow \infty$	Не існує $\Gamma \rightarrow \infty$
$d < F$	$f < 0$	Уявне, пряме, збільшене, $\Gamma > 1$

Зображення предмета в розсіювальній лінзі за будь-якої відстані d від предмета до лінзи завжди уявне, пряме, зменшене та розміщене між переднім фокусом і лінзою, причому $f < d$.

Якщо оптична система складається з кількох лінз (іхні оптичні сили D_1, D_2, \dots, D_n), розміщених близько одна до одної, то виконується така формула:

$$D_{\text{системи}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n .$$

Із прикладами оптичних приладів ознайомтесь в електронному додатку.



Якщо ж лінзи розміщені в різних точках простору, то спочатку будують зображення, отримане від першої лінзи. Це зображення слугує предметом для другої лінзи і так далі. Повторюючи цей процес необхідну кількість разів, знаходять потрібне зображення для всієї оптичної системи.

Якщо лінза щільно прилягає до сферичного дзеркала, то $D = 2D_1 + D_2$, де D_1 — оптична сила лінзи, D_2 — оптична сила дзеркала.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Поясніть усі випадки побудови зображень, отриманих за допомогою збиральної лінзи; розсіюальної лінзи.
- Що називають оптичною силою лінзи? У якому випадку оптична сила лінзи є додатною, а в якому — від'ємною? У яких одиницях вимірюють оптичну силу лінзи?
- У яких умовах двоопукла скляна лінза з показником заломлення $n = 1,6$ стане розсіюальною?

Оскільки видиме світло сприймається оком людини, то окрім суто енергетичних величин, що характеризують будь-яке випромінювання, існують фотометричні величини, які враховують зорові відчуття людини.

Ознайомитися з основами фотометрії можна в електронному додатку.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. За допомогою лінзи з фокусною відстанню 20 см на екрані одержали зображення предмета. Відстань від лінзи до зображення — 1 м. Визначте відстань від лінзи до предмета.

Дано:

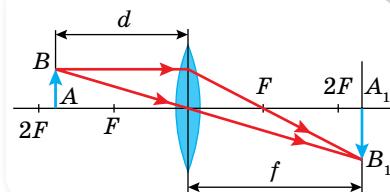
$$F = 0,2 \text{ м}$$

$$f = 1 \text{ м}$$

$d = ?$

Розв'язання:

Оскільки зображення одержано на екрані, то лінза збиральна. У нашому випадку $f > 2F$, тоді $F < f < 2F$, тобто предмет розміщений між фокусною і подвійною фокусною відстанню.



Мал. 161

Побудуємо хід променів через лінзу, використовуючи для побудови точки A два будь-які зручні промені (мал. 161).

Значення d визначимо з формули лінзи:

$$d = \frac{Fh}{f - F}; \quad d = \frac{0,2 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м} - 0,2 \text{ м}} = 0,25 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,25 м.

Задача 2. Границний кут зору для ока людини приблизно дорівнює $1'$. Якою має бути відстань між точками, що лежать на відстані найкращого зору (25 см), щоб людина могла бачити їх роздільно?

Дано:

$$d = 0,25 \text{ м}$$

$$l = ?$$

$$l = 25 \text{ см} \cdot \frac{1}{60 \cdot 57,3} = 0,073 \text{ мм} \approx 0,1 \text{ мм.}$$

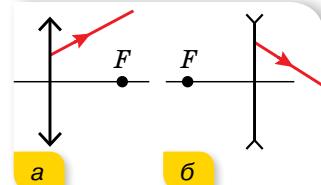
Відповідь: 0,1 мм.**Розв'язання:**

Зважаючи на величину кута зору, відстань між точками

$l = 25 \text{ см} \cdot \tan \alpha \approx 25 \text{ см} \cdot \alpha$, де α — кут, виражений у радіанах;

**Вправа 26**

- Визначте фокусну відстань двоопуклої скляної лінзи, зануреної у воду, якщо відомо, що її фокусна відстань у повітрі — 20 см. Абсолютний показник заломлення скла — 1,5; води — 1,33.
- Предмет міститься на відстані 90 см від екрана. Між предметом та екраном переміщують лінзу. З першої позиції лінза дає на екрані збільшене зображення предмета, а з другої — зменшене. Яка фокусна відстань лінзи, якщо лінійні розміри першого зображення в чотири рази більші за розміри другого?
- На якій найменшій відстані одна від одної мають бути поділки вимірювального приставка, щоб учень, який сидить на останній парті за 8 м від столу, чітко розрізняв їх? Вважайте, що граничний кут зору — $2'$.
- Мікроскоп складається з об'єктива й окуляра, відстань між головними фокусами яких 18 см. Визначте збільшення, що дає мікроскоп, якщо фокусні відстані об'єктива й окуляра відповідно 2 і 40 мм. Побудуйте зображення предмета.
- На малюнку 162 зображено хід променя після виходу зі збиральної (а) та розсіювальної (б) лінз. Знайдіть побудовою хід цих променів до лінзи.



Мал. 162

**Перевірте себе (§ 29–34)**

- Для роботи за письмовим столом освітленість його поверхні повинна бути не меншею ніж 50 лк. Сила світла лампи дорівнює 100 кд. Визначте висоту, на якій треба розмістити лампу над поверхнею стола.
A 0,7 м **B** 1,4 м **C** 1,0 м **D** 0,5 м
- Предмет заввишки 4 м розташований на відстані 20 м від спостерігача. Фокусна відстань оптичної системи ока дорівнює 1,5 см. Визначте розмір зображення на сітківці ока.
A 3 см **B** 3 мм **C** 2 см **D** 4 мм
- Вода освітлюється жовтим світлом довжиною хвилі 600 нм. Визначте довжину хвилі у воді та колір світла, який бачитиме плаваєць, що пірнув.
A 610 нм; жовтий **B** 460 нм; жовтий
C 810 нм; червоний **D** 460 нм; синій
- Дифракційна ґратка, період якої 0,01 мм, освітлюється світлом довжиною хвилі 500 нм. Визначте відстань між максимумами нульового й першого порядку на екрані, що віддалений від ґратки на 3 м.
A 10 см **B** 12 см **C** 15 см **D** 8 см

5. Визначте кут падіння світлового променя на скло ($n = 1,6$), щоб кут заломлення був удвічі меншим від кута падіння.
A 53° **B** 74° **C** 30° **D** 38°
6. Сонце перебуває на кутовій висоті 10° над горизонтом. Порівняти освітленості вертикальної та горизонтальної площин однакових розмірів, розміщених поряд.
7. На мильну плівку ($n = 1,33$) падає біле світло під кутом 45° . За якої найменшої товщини плівки відбиті промені будуть забарвлені в жовтий колір ($\lambda = 0,6 \text{ мкм}$)?
8. Промінь падає нормальню на бічу грань рівнобедреної трикутної скляної призми ($n = 1,5$). Визначте кут відхилення променя від початкового напрямку, якщо заломлюючий кут призми становить 40° .



ПРАКТИКУМ

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ НИТЯНОГО МАЯТНИКА

Обладнання: нитяний маятник зі змінною довжиною нитки, масштаб-на лінійка, годинник.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Виміряйте l — довжину маятника.
2. Відхиліть маятник на малий кут (5° – 10°) і визначте час 10 повних коливань t . Визначте період коливань T . Вимірювання повторіть тричі за різних значень l .
3. За формулою періоду коливань нитяного маятника визначте значення g .

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНІ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ

Обладнання: електрична лампа з прямою ниткою розжарювання, вимірювальна установка з лінійкою 1 мм/под. та екраном з поділками, дифракційна ґратка (1/100).

Вказівки щодо виконання роботи

1. Визначте період дифракційної ґратки d за формулою $d = \frac{1}{N} \text{ (мм)}$, де $N = 100$.
2. Помістіть дифракційну ґратку в рамку приладу й зафіксуйте його в підставці.
3. Дивлячись крізь дифракційну ґратку, спрямуйте прилад так, щоб джерело світла було видно крізь вузьку прицільну щілину. При цьому по обидва боки екрана на лінійці видно дифракційні спектри кількох порядків. (У випадку похилого розташування спектрів поверніть ґратку на певний кут до усунення перекосу.)
4. За шкалою визначте положення середин кольорових смуг l у спектрах першого порядку. Вимірювання l проведіть для смуг одного кольору ліворуч і праворуч та визначте середні значення відстаней. Результати запишіть у таблицю.
5. Визначте за допомогою лінійки відстань L від дифракційної ґратки до шкали рухомого екрана.
6. Обчисліть довжину світлових хвиль $\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}$ для семи кольорів і запишіть їх у таблицю.
7. Повторіть вимірювання з іншою відстанню екрана від ґратки та для інших дифракційних порядків. Порівняйте отримані результати.
8. Направте на дифракційну ґратку промінь монохроматичного світла від лазерної указки. Отримайте дифракційну картину. Запишіть у зошиті, чим відрізняється ця картина від попередньої. Проведіть вимірювання аналогічно до попередніх завдань і визначте довжину хвилі лазерного випромінювання.

Розділ 3

КВАНТОВА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

Якщо розглядати успішну наукову теорію як засіб вирішення актуальних проблем, то квантова фізика — це чудодійні ліки ХХ століття. Саме вона успішно пояснила такі феномени, як радіоактивність і антиматерія. Будь-яка інша теорія не здатна описати поширення світла й частинок матерії в мікросвіті. Але квантова фізика містить багато невизначеностей і парадоксів, тому вдосконалення цієї теорії — виклик для сучасних науковців.

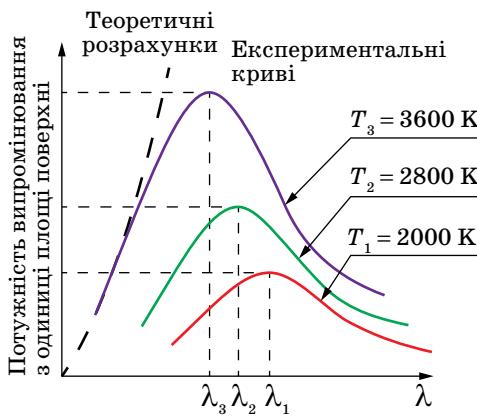
§ 35

Гіпотеза квантів Планка. Фотон

Зародження квантової теорії. Сьогодні ми знаємо, що світлу притаманні корпускулярні та хвильові властивості. Проте науковий доказ цьому було отримано шляхом тривалих досліджень і революційних рішень. Вивчення явищ дифракції, інтерференції та поляризації світла привело до утвордення в кінці XIX ст. електромагнітної хвильової теорії світла. Проте ця теорія не пояснювала розподілу енергії у спектрі випромінювання *абсолютно чорного тіла*. Абсолютно чорне тіло — це уявна модель. Абсолютно чорним вважають тіло, яке за будь-якої температури поглинає повністю всю енергію світла, що падає на нього. Незважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випромінювати тепло. Відповідно випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла найкраща, у порівнянні з усіма іншими тілами за тієї ж температури. Наближеним до випромінювання абсолютно чорного тіла є випромінювання багаття, Сонця тощо.

У чому ж суть проблеми? На малюнку 163 зображено експериментально отримані криві розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. По осі абсцис відкладено довжину хвиль, по осі ординат — потужність випромінювання з одиниці поверхні абсолютно чорного тіла.

Звернімо увагу на форму кривих розподілу за різних температур. Для всіх кривих характерним є наявність максимуму, тобто існує довжина хвилі λ_{\max} , на якій випромінювання найбільше. З підвищенням температури λ_{\max} стає дедалі коротшою. Саме тому розжарене тіло з підвищенням температури стає спочатку червоним, потім оранжевим і, нарешті, жовто-блілим. І саме наявність максимуму не вдавалося пояснити, ґрунтуючись на хвильовій теорії випромінювання.



Мал. 163. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла

Необхідне пояснення запропонував в 1900 р. німецький фізик Макс Планк. На відміну від зрозумілого уявлення про те, що поглинання й випромінювання світлових хвиль відбувається неперервно, Планк припустив, що тіло випромінює світло окремими порціями, які він назвав **квантами¹ енергії**. Енергія кванта пропорційна частоті випромінювання, $E = h\nu$. Коєфіцієнт пропорційності h дістав назву *сталої Планка*.

Спираючись на цю ідею, Планк сформулював закон розподілу енергії у спектрі нагрітого тіла, який добре узгоджувався з експериментальними даними. На сьогодні значення сталої Планка визначено з високою точністю: $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Для більшості розрахунків використовують наближене значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Інколи використовують так звану зведену сталу Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Для виходу із ситуації, коли одні експерименти доводять, що світло поводить себе як хвиля, а інші — як потік частинок, данський фізик Нільс Бор (1885–1962) запропонував *принцип доповнюваності*, згідно з яким для пояснення природи світла потрібно використовувати й корпускулярні, й хвильові властивості світла — як два складники його природи, що доповнюють один одного. Хвильові й квантові властивості світла не можна протиставляти. Властивості неперервності, характерні для електромагнітного поля світлової хвилі, не виключають властивостей дискретності, характерних для квантів світла — фотонів.

Ідея Планка про переривчастий (дискретний) характер випромінювання й поглинання світла значно вплинула на весь подальший розвиток фізики. Проте сам Планк сприймав свою ідею як деякий математичний прийом, який давав змогу отримати правильний результат, пояснюючи теплове випромінювання, настільки неймовірно було уявити неперервний

¹ Від лат. *quantum* — порція.

хвильовий процес дискретним, адже, за класичними уявленнями, неперервність принципово відрізняє хвилю від частинки.

Таким чином, світло має електромагнітну природу і йому притаманні двоїсті квантово-хвильові властивості, саме цю двоїстість мають на увазі, коли говорять про **корпускулярно-хвильовий дуалізм** світла. У видимого світла квантові та хвильові властивості виявляються однаковою мірою. Хвильові властивості світла виявляються у процесах його поширення, інтерференції, дифракції, поляризації, а корпускулярні — у процесах взаємодії світла з речовиною.

Для інших видів випромінювання спостерігається важлива закономірність: на малих частотах більшою мірою виявляються хвильові властивості (наприклад, для радіовипромінювання), а на великих частотах — квантові (наприклад, рентгенівське випромінювання).

Властивості фотона. Мінімальну порцію (квант) світлової енергії, яка локалізована в частинці, Альберт Ейнштейн називав **фотоном**.

У сучасній фізиці фотон розглядають як одну з елементарних частинок, проте на відміну від частинок речовини він має специфічні властивості:

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою, тобто його заряд дорівнює нулю.
2. Зупинити чи загальмувати фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку й завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
3. На відміну від частинок речовини (електронів, атомів), фотони можуть порівняно легко випромінюватись або поглинатись. Тому не варто плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від частинки до частинки, поглинаються ними й знову виникають.
4. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантам якого він є: $E = h\nu$. Повну енергію фотона можна визначити і за законом взаємозв'язку маси-енергії: $E = mc^2$.
5. Імпульс фотона пов'язаний з його енергією співвідношенням $p = \frac{E}{c}$.
Після перетворень: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
6. Маса спокою фотона дорівнює нулю. Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає суть гіпотези Планка? 2. Чому довелося звернутися до уявлення про дискретність світлового потоку? 3. Яке значення сталої Планка? 4. Назвіть основні властивості фотона. 5. Як визначити масу та імпульс фотона?



Вправа 27

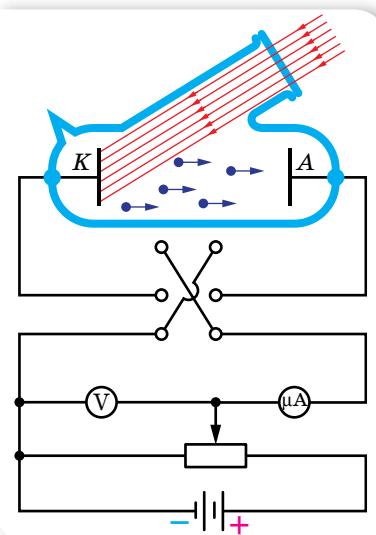
- Визначте довжину хвилі фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу електрона, що має швидкість $10^4 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
- Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим $\lambda = 0,75 \text{ мкм}$ і найкоротшим $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ хвильам видимої частини спектра.
- До якого виду належать промені, енергія фотонів яких дорівнює $2 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$, $4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, $3 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$?
- Визначте довжину хвилі променів, кванти яких мають таку саму енергію, що й електрон, який пролетів різницю потенціалів $4,1 \text{ В}$.
- Визначте довжину хвилі й частоту випромінювання, маса фотонів якого дорівнює масі спокою електрона. Якого типу це випромінювання?
- Джерело світла, потужність якого 100 Вт , випускає $5 \cdot 10^{20}$ фотонів за 1 с . Обчисліть середню довжину хвилі випромінювання.
- Натреноване око, тривалий час перебуваючи в темряві, може сприймати світло з довжиною хвилі $0,5 \text{ мкм}$, якщо воно має потужність не менше $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. Скільки фотонів потрапляє в такому разі на сітківку за 1 с ?

§ 36 Фотоефект

Явище фотоефекту. **Фотоефект** — це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходят у новий енергетичний стан.

Це явище може виявлятись по-різному: як фотойонізація окремих атомів і молекул газу під дією опромінення світлом; як фотоелектронна емісія під дією електромагнітного випромінювання (зовнішній фотоефект); у зміні електропровідності під дією світла (внутрішній фотоефект); в ініціюванні фотоядерних реакцій тощо.

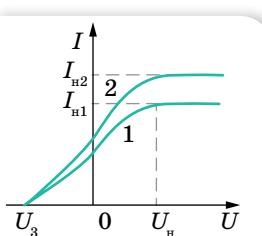
Уперше закономірності фотоефекту дослідив російський учений Олександр Григорович Столетов (1839–1896). У 1888 р. він створив установку, яка дала змогу добути електричний струм за допомогою зовнішнього фотоефекту (фотострум) і дослідити його залежність від інтенсивності та довжини хвилі випромінювання. На малюнку 164 зображене більш сучасну схему установки для дослідження явища фотоефекту. У скляній балон, з якого викачали



Мал. 164. Схема установки для дослідження фотоефекту

повітря, уміщено два електроди. У балон на один з електродів крізь кварцове скло (прозоре не лише для видимого світла, а й для ультрафіолетового) надходить світло. На електроди подається напруга, яку можна змінювати за допомогою потенціометра й вимірювати вольтметром. Якщо освітлювати електрод, приєднаний до негативного полюса батареї, то з нього вириватимуться електрони, які, рухаючись в електричному полі, утворюватимуть струм. Фотострум, що виникає, вимірюють міліамперметром.

За малих напруг не всі електрони, що їх вириває світло, досягають другого електрода. Якщо, не змінюючи світлового потоку, збільшувати різницю потенціалів між електродами, то сила струму зростатиме. За певної напруги вона досягає максимального значення і вже не збільшується. Найбільший фотострум, який дістають за незмінного світлового потоку, називають *фотострумом насищення*. Очевидно, що фотострум насищення створюється за таких напруг, коли всі електрони, вирвані світловим потоком з катода, досягають анода. Отже, фотострум насищення може бути кількісною характеристикою фотоefекту.



Мал. 165.
Вольт-амперні
характеристики
фотоefекту
(графіку 1 відповідає
менший світловий
потік, ніж графіку 2)

Змінюючи характеристики падаючого світла (збільшуючи чи зменшуючи світловий потік або змінюючи частоту випромінювання), можна встановити залежність величини фотоструму від характеристик світлового випромінювання. Якщо, не змінюючи світлового потоку, зменшувати напругу, то фотострум починає зменшуватись, однак навіть коли напруга спадає до нуля, фотострум не зникає. Це означає, що випромінювання, яке падає на катод, вириваючи з нього електрони, ще й надає їм кінетичну енергію. Величину цієї енергії визначають так. Якщо поміняти місцями полюси батареї, то електричне поле між електродами гальмуватиме рух електронів. Поступово підсилюючи затримуюче поле, можна зовсім припинити фотострум (мал. 165). У цьому разі навіть електрони, що вилетіли з максимальною швидкістю, вже не можуть подолати гальмівну дію електричного поля й долетіти до анода. Вимірювши затримуючу напругу U_3 , за якої припиняється фотострум, можна виміряти максимальну кінетичну енергію вибитих електронів: $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$.

Продовжуючи досліди, можна встановити залежність величини максимальної кінетичної енергії fotoелектронів від характеристик світлового випромінювання.

І ще одну закономірність fotoefекту можна виявити, якщо замінювати матеріал, з якого виготовлено катод.

Закони зовнішнього fotoefекту. У результаті дослідів було встановлено три закони fotoefекту.

Кількість електронів, що вилітають з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання, (а отже, і фотострум насичення) пропорційна його інтенсивності.

Перший закон фотоефекту легко пояснити з погляду хвильової природи світла: що більшою є енергія хвилі, то ефективніша її дія. Наступні два закони фотоефекту пояснити з позицій хвильової теорії світла не вдавалось. Виявилося, що:

максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти опромінення й не залежить від його інтенсивності.

Для кожної речовини залежно від її температури й стану поверхні існує мінімальна частота v_0 , за якої ще можливий зовнішній фотоефект. Мінімальну частоту v_0 (або максимальну довжину λ_0) електромагнітного випромінювання, за якої відбувається фотоефект, називають *червоною межею фотоефекту*. Термін «червона межа» підкреслює, що фотоефект обмежений з боку довгохвильової частини спектра. Отже, не кожне випромінювання здатне спричинювати фотоефект. Світло, довжина хвилі якого більша за червону межу λ_0 , не спричинює фотоефект, якою б не була його інтенсивність.

Досліди з освітлення катодів з різних матеріалів показали, що червона межа фотоефекту різна для різних речовин і залежить від хімічної природи речовини й стану поверхні тіла.

Червона межа фотоефекту визначається лише матеріалом освітлюваного катода й не залежить від його освітленості.

Другий і третій закони фотоефекту не можна пояснити на основі електромагнітної теорії світла. Справді, за хвильовою теорією фотоефект має спостерігатися за будь-якої частоти (довжини) світлової хвилі, оскільки енергія, яку одержує електрон під час розгойдування його електромагнітною хвилею, залежить від енергії хвилі, а остання визначається амплітудою коливань, а не довжиною хвилі. Крім того, кінетична енергія вибитих електронів мала б залежати від освітленості поверхні, оскільки зі збільшенням освітленості електрону передавалась би більша енергія.

Рівняння фотоефекту. У 1905 р. Альберт Ейнштейн показав, що закони фотоефекту можна пояснити тільки з квантових уявлень про природу світла.

Пригадаймо, що електрон може вийти за межі якого-небудь тіла (наприклад, металу) тільки тоді, коли його кінетична енергія дорівнює або більша *за роботу виходу* $A_{\text{вих}}$ із цієї речовини. Нехай монохроматичне випромінювання, що падає на метал, складається з фотонів, енергія яких $h\nu$. Електрони, розміщені недалеко від поверхні металу, поглинають фотони, які проникають у метал, набуваючи їхню енергію. Взаємодія випромінювання з речовиною в цьому разі складається з безлічі елементарних процесів,

у кожному з яких один електрон поглинає повністю один квант енергії (один фотон). Якщо значення енергії фотона більше за роботу виходу, то електрон може вилетіти з металу. (Поясніть самостійно, чи може відбуватися зовнішній фотоефект за взаємодії світла з будь-якою речовиною.)

Таким чином, енергія фотона, що поглинається в процесі зовнішнього фотоефекту, витрачається на виконання роботи виходу електрона з металу і надання йому кінетичної енергії. Математично це записують *рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту*: $h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{k}}$.

Квантова теорія дає таке пояснення законам фотоефекту:

1. Зі збільшенням інтенсивності монохроматичного випромінювання зростає кількість поглинутих металом фотонів, а отже, і кількість електронів, які вилітають з нього, прямо пропорційна інтенсивності випромінювання (*перший закон*).
2. З рівняння фотоефекту видно, що кінетична енергія електронів, які вилітають, залежить тільки від роду металу (який характеризується відповідною роботою виходу $A_{\text{вих}}$) та від частоти (довжини) падаючого випромінювання ($h\nu$), а від інтенсивності не залежить, $E_{\text{k}} = h\nu - A_{\text{вих}}$ (*другий закон*).
3. Якщо енергія фотона менша від роботи виходу $A_{\text{вих}}$, то за будь-якої інтенсивності випромінювання електрони з металу не вилітатимуть (*третій закон*). Мінімальну частоту падаючого випромінювання (червону межу ν_0) можна визначити з рівняння фотоефекту, припустивши, що вся енергія падаючого фотона йде на виконання роботи виходу ($E_{\text{k}} = 0$): $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ або $h \frac{c}{\lambda_0} = A_{\text{вих}}$.

З рівняння Ейнштейна можна визначити сталу Планка. Розрахунки підтверджують теоретично запропоноване Максом Планком значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, яке він отримав, пояснюючи теплове випромінювання тіл. Збіг значень сталої Планка, здобутих різними методами, підтверджує правильність квантової теорії світла.

Застосування фотоефекту. Відкриття явища фотоефекту мало велике значення для кращого розуміння природи світла. Але цінність науки полягає не лише в тому, що вона з'ясовує складну й багатогранну будову довкілля, а й у тому, що наука дає нам засоби, за допомогою яких можна удосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального та культурного життя. Практичне застосування фотоефекту пов'язане насамперед з перетворенням світлової енергії на електричну. Це реалізовано в сонячних батареях (мал. 166). Сонячна енергетика — відносно нова галузь електроенергетики, яка стрімко розвивається. Уся територія України придатна для розвитку систем теплопостачання з використанням сонячної енергії.

Про інші сфери застосування фотоелектричного ефекту читайте в електронному додатку.





Мал. 166. а — сонячні батареї на космічних апаратів; б — фотоелектрична сонячна електростанція поблизу с. Старокозаче в Одеській області



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Які закономірності виявляються у процесі зовнішнього фотоефекту?
- Які суперечності виявились між закономірностями фотоефекту і хвильовою теорією світла?
- Як з позицій квантової фізики пояснюються закони фотоефекту?



Приклади розв'язування задач

Задача. Металева пластинка освітлюється світлом з довжиною хвилі 420 нм. Робота виходу електронів з поверхні пластинки дорівнює 2 еВ. Визначте затримуючу різницю потенціалів, за якої припиниться фотострум.

Дано:

$$\begin{aligned} \lambda &= 420 \text{ нм} \\ A_{\text{вих}} &= 2 \text{ еВ} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ U_3 &— ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}.$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

Підставивши цей вираз у рівняння Ейнштейна, отримуємо

$$eU_3 = h\nu - A_{\text{вих}}.$$

$$\text{Оскільки } v = \frac{c}{\lambda}, \text{ зрештою маємо } U_3 = \frac{h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вих}}}{e}.$$

Після підстановки даних і враховуючи, що $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, визна- чаємо $U_3 = 0,95 \text{ В}$.

Відповідь: $U_3 = 0,95 \text{ В}$.



Вправа 28

- Якої довжини промені світла треба спрямувати на поверхню цезію, щоб максимальна швидкість виривання фотоелектронів дорівнювала $2000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$? Червона межа фотоефекту для цезію — 690 нм.
- Найбільша довжина хвилі світла, за якої відбувається фотоефект для вольфраму, дорівнює 0,275 мкм. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму; найбільшу швидкість руху електронів, що вириваються з вольфраму світлом довжиною хвилі 0,18 мкм; найбільшу енергію цих електронів.
- Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що має початкову швидкість $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і прискорюється різницею потенціалів 4 В. Визначте довжину хвилі фотона.
- У явищі фотоефекту електрони, що вириваються з поверхні металу випромінюванням частотою $2 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються гальмівним полем з різницею потенціалів 7 В, а частотою $4 \cdot 10^{15}$ Гц — з різницею потенціалів 15 В. За цими даними обчисліть сталу Планка.
- На поверхню деякого металу падає фіолетове світло довжиною хвилі 0,4 мкм. При цьому затримуюча напруга для вибитих світлом електронів — 2 В. Визначте затримуючу напругу в разі освітлення того самого металу червоним світлом довжиною хвилі 0,77 мкм.



Виконуємо навчальні проекти

- Сонце — основне джерело енергії. Використання сонячної енергії.
- Тиск світла в космічних масштабах.
- Фотоелементи, їх використання.

§ 37

Квантові властивості атома

Постулати Бора. Відкриття складної будови атома — найважливіший етап становлення сучасної фізики, який позначився на її наступному розвитку.

З історією становлення наукових пояснень будови атома можете ознайомитися за допомогою електронного додатку.



Багато часу та зусиль знадобилося ученим різних країн світу, щоб сформувалися сучасні уявлення про будову атома. Як ви знаєте, згідно з моделлю Резерфорда, атом складається з масивного важкого ядра й електронів, що обертаються навколо нього. Будучи прогресивним кроком у розумінні будови мікросвіту, модель атома Резерфорда має лише історичну цінність. Проблема цієї моделі полягала в її нестабільноті. Відповідно до теорії Максвела, заряджена частинка, що рухається з приско-

ренням, має випромінювати. Відповідно, електрон, обертаючись навколо ядра, рухається з доцентровим прискоренням, а отже, має випромінювати й, втрачаючи кінетичну енергію, падати на ядро. Такий атом має існувати протягом неймовірно малих інтервалів часу (блізько 10 мільярдних частки секунди).

Вихід із ситуації запропонував данський фізик Нільс Бор у 1913 р. Він дійшов висновку, що планетарну модель атома Резерфорда варто доповнити ідеями квантової теорії, яка починала утверджуватись. Бор припустив, що електрони в атомах також не випромінюють енергію безперервно, випромінювати вони можуть лише під час переходу з одного енергетичного стану в інший.

Нільс Бор доповнив планетарну модель атома такими *постулатами*:

1. Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових, станах, кожному з яких відповідає певна енергія E_n . У стаціональному стані електрон рухається по коловій орбіті радіусом r і атом енергію не випромінює (у Нільса Бора йшлося про радіус орбіти електрона, зараз ми говоримо про орбіталі електронів).
2. Переход атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu = E_k - E_n$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів), якщо $E_k > E_n$, фотон із частотою ν випромінюється, якщо $E_k < E_n$ — поглинається.

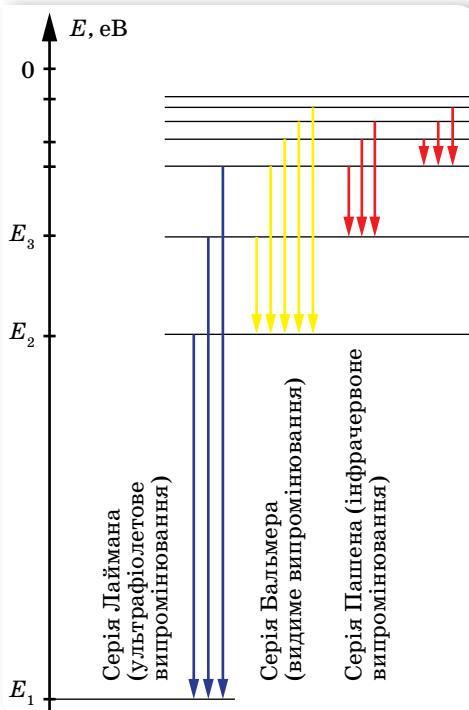
Використовуючи закони механіки Ньютона та правила квантування, Бор зумів з високою точністю обчислити енергетичні стани атома Гідрогену. Проте застосування її до складніших атомів не давало таких близьких результатів. За своєю природою вона була спрямована на вирішення конкретної проблеми: обґрунтування стабільності атома та пояснення лінійчатих спектрів. Незважаючи на це, теорія Бора в розвитку фізики відіграла значну роль.

Енергетичні рівні атома Гідрогену. Згідно з постулатами Бора, переход атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою: $h\nu = E_k - E_n$, або $\nu = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів).

Для наочності прийнято зображені значення енергій атомів у вигляді горизонтальних прямих, розташованих одна над одною на відстані, пропорційній різниці їх енергій. Найнижча пряма відповідає нормальному стану атома.

На малюнку 167 (с. 180) зображено схему рівнів енергії атома Гідрогену.

Енергію електрона, що покинув атом (міститься на нескінченній відстані від ядра), приймають за нуль. Зрозуміло, що в цьому разі енергія будь-якого електрона, який перебуває близче до ядра, буде меншою, а отже, від'ємною. У нормальному (не збудженному) стані енергія атома буде мінімальною, її у випадку атома Гідрогену значення $E_1 = -13,55$ еВ.



Мал. 16.7. Енергетичні рівні в атомі Гідрогену

час переходів на третій рівень — інфрачервоне випромінювання (серія Пашена). Серії названо на честь учених, які їх відкрили.

У 1885 р. вчителеві фізики однієї зі швейцарських шкіл Йогану Бальмеру вдалося встановити для Гідрогену, що його частоти випромінювання у видимій частині спектра можна визначити за формулою: $v = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де R — постійна величина, $R = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, яку називають сталою Рідберга, k — ціле число, що набуває значень $3,4,5, \dots$.

Із часом, після відкриття спектральних ліній не лише у видимій частині спектра, а й в інфрачервоній та ультрафіолетовій, формула набула вигляду: $v = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де $n \neq k$ — цілі числа, $k > n$. Ця формула дісталася назву формули Бальмера¹.

¹ У деяких навчальних посібниках можна зустріти й такий запис формулі Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Річ у тім, що такий вигляд формулі використовують у спектроскопії, коли спектральні лінії характеризують не частотою, а величиною, оберненою до довжини хвилі. Звертаємо вашу увагу на те, що стала величина в обох випадках позначається однаково, але вона має різне значення. У даному разі $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

У першому збудженному стані (другий енергетичний рівень) атом Гідрогену матиме енергію $E_2 = -3,38 \text{ eV}$, у другому — $E_3 = -1,5 \text{ eV}$.

З основного стану в збуджений атом може перейти, отримавши ззовні в будь-який спосіб (наприклад, поглинувши фотон або зіткнувшись з іншим атомом) порцію енергії, яка дорівнює різниці енергії стаціонарних рівнів. Так, у випадку Гідрогену атом може перейти у збуджений стан, поглинувши енергію: $E_2 - E_1 = 10,17 \text{ eV}$ або $E_3 - E_1 = 12,05 \text{ eV}$ і т.д.

У збудженному стані електрон не може перебувати тривалий час. Під час переходів на перший рівень ($n = 1$) із другого, третього й т. д. випромінюються ультрафіолетові промені (серія Лаймана), під час переходів на другий рівень з вищих рівнів — випромінювання оптичного діапазону (серія Бальмера) й під



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Електрон і протон рухаються з одинаковими швидкостями. Який із цих частинок відповідає менша довжина хвилі? 2. Про що свідчить дифракція електронів? Яке практичне застосування вона має? 3. У чому планетарна модель атома Резерфорда не узгоджується із законами класичної фізики? 4. Сформулюйте постулати Бора.



Вправа 29

- Які спектральні лінії з'являються під час збудження атомарного водню електронами з енергією 12,5 еВ?
- Під час переходу електронів в атомах водню із четвертої стаціонарної орбіти на другу випромінюються фотони, які мають енергію $4,04 \cdot 10^{-19}$ Дж (зелена лінія водневого спектра). Визначте довжину хвилі цієї лінії спектра.
- Унаслідок опромінення пари ртуті електронами енергія атома ртуті збільшилася на 4,9 еВ. Яка довжина хвилі випромінювання, що його випускають атоми під час переходу в незбуджений стан?
- Для іонізації атома кисню необхідна енергія близько 14 еВ. Визначте частоту випромінювання, яка може спричинити іонізацію.
- У скільки разів змінюється енергія атома водню під час переходу електрона з першої стаціонарної орбіти на третю; під час переходу електрона з четвертої орбіти на другу?
- У скільки разів довжина хвилі випромінювання атома водню під час переходу електрона з третьої орбіти на другу більша за довжину хвилі, зумовленої переходом електрона з другої орбіти на першу?
- Визначте, на яку найменшу відстань α -частинка, що має швидкість $1,9 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, може наблизитися до ядра атома золота, рухаючись по прямій, яка проходить через центр ядра. Маса α -частинки $6,6 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд α -частинки $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, а заряд ядра золота — $1,3 \cdot 10^{-17}$ Кл.

§ 38

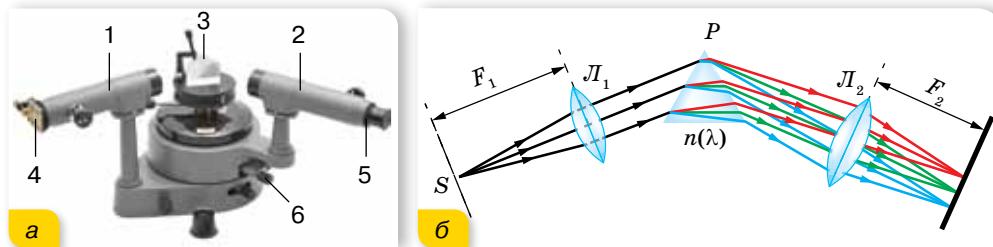
Спектри. Спектральний аналіз

Спектральні прилади. Спостерігають і досліджують випромінювання за допомогою спеціального приладу — спектроскопа (мал. 168, с. 182).

Основними елементами спектроскопа є коліматор 1, зорова труба 2, трикутна призма 3. У коліматорі є щілина 4, через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла S. Проходячи крізь призму, світло заломлюється й дає спектр, який спостерігається крізь окуляр 5 зорової труби. Для захисту призми від стороннього світла її прикривають кришкою. За допомогою мікрометричного гвинта 6 можна зміщувати зорову трубу в горизонтальній площині та визначати довжину світлової хвилі, яка відповідає певній лінії спектра.

Потрапляючи через об'єктив у зорову трубу, усі паралельні промені дають зображення щілини у фокальній площині об'єктива, а оскільки

промені різних частот (кольорів) паралельні різним побічним осям, кожне зображення щілини (лінія певної частоти) буде на певному місці. Якщо спектроскоп призначено для вимірювань, то на зображення ліній за допомогою спеціального пристрою накладається зображення шкали з поділками, що дає змогу точно визначити положення ліній у спектрі.



Мал. 168. Будова та принцип дії спектроскопа

Якщо замість зорової труби поставити лінзу та фотопластинку (або інший світлочутливий матеріал), то можна зафіксувати зображення спектра для подальшого дослідження. Такий прилад називається *спектрографом*, фотографію спектра — *спектрограмою*.

Для астрономічних досліджень спектральні прилади розміщують за фокусом об'єктива телескопа. Хоча нині в астрофізиці використовують і складніші прилади для спектрального аналізу різних видів випромінювання.

Види спектрів. Отримані в такий спосіб випромінювання притаманні одноатомним газам. Спостерігають їх за допомогою спеціальних приладів — *спектроскопів*. А найвужчі лінії різних кольорів, які дістають під час світіння газів (або пари), називають *лінійчатим спектром випромінювання*.

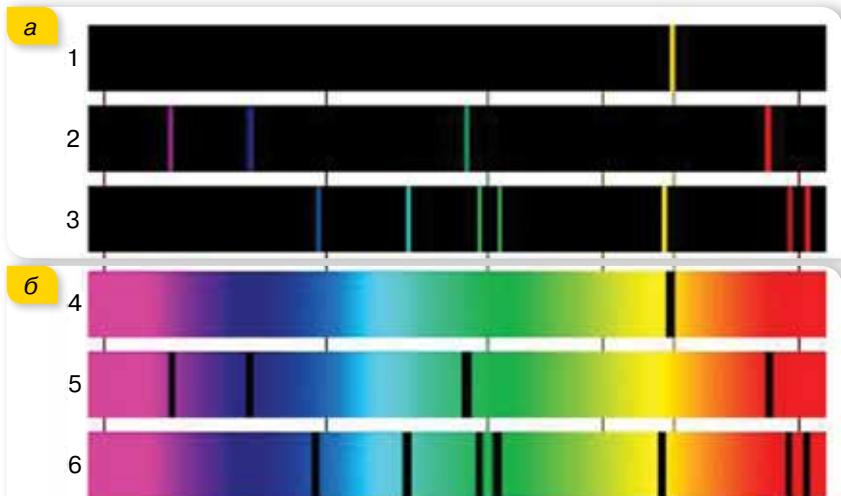
Спектральний склад випромінювання різних речовин досить різноманітний. Проте всі спектри можна поділити на три групи: *лінійчаті*, *смугасті* та *неперервні*.

Лінійчатий спектр — це оптичне випромінювання поодиноких збуджених атомів, яке виникає завдяки квантовим переходам між електронними рівнями енергії (*атомні спектри*).

Лінійчаті спектри випромінюють усі речовини в газоподібному атомарному (але не молекулярному) стані, причому кожний хімічний елемент дає свій лінійчатий спектр, який не збігається зі спектрами інших елементів (мал. 169, а).

Головна властивість лінійчатих спектрів полягає в тому, що довжини хвиль (або частоти) лінійчаторого спектра якої-небудь речовини залежать лише від властивостей атомів цієї речовини й зовсім не залежать від способу збудження світіння атомів.

Виняткову сталість частот випромінювання атомів було використано для визначення еталону основної одиниці часу — секунди. Для цього було взято одну із частот випромінювання атомів Цезію-133 і секунду означили як інтервал часу, протягом якого здійснюється певна кількість коливань (9 192 631 770), що відповідає цій частоті.



Спектри випромінювання: 1 — натрію; 2 — водню; 3 — гелію.

Спектри поглинання: 4 — натрію; 5 — водню; 6 — гелію.

Мал. 169. Лінійчаті спектри випромінювання та поглинання

Поглинання світла речовинами також залежить від його довжини хвилі. Уперше такі дослідження провів у 1854 р. Густав Кірхгоф, який установив, що будь-яка речовина поглинає переважно промені такої довжини хвилі, які сама може випромінювати. Пояснення спектрів поглинання випливає з постулатів Бора. *Лінійчаті спектри поглинання* мають вигляд темних ліній на фоні неперервної райдуги, розташування яких збігається з розташуванням кольорових ліній у спектрі випромінювання даного газу (мал. 169, б).

Смугастий спектр має вигляд кольорових смуг, розділених темними проміжками (*молекулярні спектри*).

Утворення молекули з атомів змінює енергетичні рівні зовнішніх електронів, оскільки в молекулі вони взаємодіють один з одним. До того ж, виникають додаткові рівні, що відповідають коливанням атомів й обертанню молекули як цілого. Енергетичні рівні коливального та оберタルного рухів також квантовані. Таким чином, кожний атомний рівень розчіплюється на низку близьких рівнів. У результаті переходів між цими рівнями й виникає сукупність ліній, що утворює смугу.

У *неперервному спектрі* немає темних проміжків, і на екрані спектрального апарату можна побачити суцільну різномальорову смугу. Це означає, що в спектрі наявні всі довжини хвиль.

Неперервний спектр випромінюють розжарені тверді тіла й розігріті рідини, які перебувають

Про рентгенівське, теплове та люмінесцентне, а також спонтанне й вимушене випромінювання читайте в електронному додатку.



за даної температури у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням. Гази під високим тиском теж можуть випромінювати неперервний спектр. Ця обставина свідчить про те, що існування неперервного спектра зумовлено не тільки властивостями окремих випромінюючих атомів, а й значно залежить від взаємодії атомів між собою.

Спектральний аналіз і його застосування. Спектральний аналіз широко використовують у науці й техніці. Це один з найшвидших і найпростіших способів визначення складу різних хімічних сполук, оскільки кожний хімічний елемент має свій характерний лінійчатий спектр випромінювання (поглинання). За спектрами поглинання Сонця та зір досліджено їхній хімічний склад. Випромінювання поверхні Сонця (фотосфери), дає неперервний спектр. Це випромінювання має температуру близько 6000°C і, проходячи крізь атмосферу Сонця (температура якої $2000\text{--}3000^{\circ}\text{C}$), частково поглинається. Атмосфера Сонця поглинає світло певних частот фотосфери, і на тлі неперервного спектра фотосфери з'являється майже 20 000 ліній поглинання. За цими лініями було встановлено, що на Сонці є Гідроген, Кальцій, Натрій, Ферум та інші хімічні елементи. Уперше дослідження ліній поглинання у спектрі сонячного випромінювання провів у 1817 р. Йозеф фон Фраунгофер, тому ці лінії називають *фраунгоферовими*.

Під час проведення спектрального аналізу користуються спеціальними таблицями або атласами спектральних ліній, у яких наведено точне розміщення ліній спектра кожного хімічного елемента чи довжини хвиль, що їм відповідають. За допомогою спектрального аналізу було відкрито нові хімічні елементи — Рубідій і Цезій. Цікава історія відкриття Гелію. Спочатку його було виявлено під час аналізу спектра сонячного випромінювання в 1868 р., звідки й походить його назва (від грец. «геліос» — Сонце).

Основні переваги спектрального аналізу — дуже висока чутливість, простота й швидкість проведення — зумовлюють його широке використання в металургії й машинобудуванні, хімії й геології, медицині й біології та багатьох інших галузях науки й техніки.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Зобразіть за допомогою схеми енергетичних рівнів атома Гідрогену перехід, який відповідає випромінюванню ультрафіолетових променів.
2. За яким принципом спектральні лінії Гідрогену об'єднано в серії?
3. Які речовини дають суцільний спектр? Які — лінійчатий?
4. Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пари?
5. Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр?
6. Схарактеризуйте роль спектрального аналізу в астрономії.

§ 39

Атомне ядро

Протонно-нейtronна модель атомного ядра. Історію ядерної фізики прийнято відліковувати з 1896 р. У цьому році Анрі Беккерель відкрив явище радіоактивності, яке не можна було пояснити на основі тогочасних уявлень про будову атома.

На початку 30-х років ХХ ст. було досліджено структуру атомного ядра й розроблено його модель, яку й донині використовують для пояснення процесів мікросвіту. Згідно з цією моделлю, до складу ядра атома входять частинки двох видів — протони та нейтрони.

Протон (позначається p) — стабільна елементарна частинка. З одного протона складається ядро атома Гідрогену. Протон має елементарний позитивний заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Нейтрон (позначається n) — електрично нейтральна частинка. Нейтрон — стабільна частинка лише у складі стабільних атомних ядер. Вільний нейтрон — нестабільна частинка, яка розпадається на інші частинки.

Нейтрони та протони як складові частини атомного ядра мають спільну назву — *нуклони*.

Оскільки атом в цілому електронейтральний, а заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона, то кількість протонів Z у ядрі дорівнює кількості електронів в атомній оболонці. Число Z в атомному ядрі визначає атомний номер і його місце в таблиці Менделеєва. Кожне атомне ядро характеризується зарядом Ze , масою m_p і масовим числом A , що дорівнює кількості нуклонів у ядрі, $A = N + Z$, де N — кількість нейтронів, Z — кількість протонів.

Позначаючи ядра хімічного елемента, вказують кількість протонів Z знизу й масове число A — зверху. Наприклад, ядро Гелію позначають так: ${}^4_2\text{He}$.

Енергія зв'язку. У ядрі зосереджена майже вся (понад 99,95 %) маса атома. Маси ядер прийнято вимірювати в атомних одиницях маси (а. о. м.). Маса протона $m_p = 1,672617 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 а. о. м. Маса нейтрона $m_n = 1,674920 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00866 а. о. м. (Згідно з формулою взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$ маси ядер також вимірюють одиницями енергії — електрон-вольтами.)

Дослідженнями доведено, що загальна маса ядра завжди менша від суми мас частинок, з яких воно складається, тобто $M_a < Zm_p + Nm_n$. Різницю між сумою мас нуклонів (нейтронів і протонів), які входять до складу ядра, і масою ядра називають *дефектом маси* Δm . Дефект маси визначає енергію зв'язку: що більший дефект маси, то більша енергія зв'язку й стійкіше ядро.

Енергія зв'язку ядра $E_{\text{зв}}$ визначається роботою, яку потрібно виконати, щоб розділити ядро на окремі частинки й віддалити їх одну від одної на таку відстань, на якій їхньою взаємодією можна нехтувати.

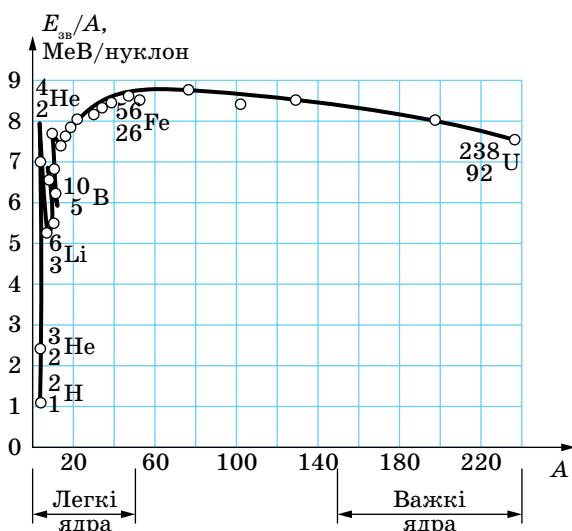
Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії: $E_{\text{зв}} = \Delta m c^2$. Оскільки енергію зв'язку зазвичай виражают у МeВ, а дефект мас — в а.о.м. і враховуючи, що $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1\text{eB} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Дж}$, для обчислень можна користуватись формуловою $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МeВ}}{\text{а.о.м.}}$.

Якби не було дефекту маси, то ядро розпалося б на нуклони самостійно, без виконання роботи. Для забезпечення стабільності ядра його маса має бути меншою від суми мас його нуклонів.

Питомою енергією зв'язку називають енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон.

На малюнку 170 наведено криву залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер. Як видно з малюнка, питома енергія зв'язку спочатку зростає зі збільшенням масового числа, досягає насичення (блізько 8 МeВ/нуклон для $A \approx 15$) і для $A > 60$ крива повільно спадає. Питома енергія зв'язку має максимум (приблизно 8,8 МeВ) для $A \approx 56$. Максимум кривої відповідає найстабільнішим ядрам.

Сильна взаємодія. Ядра атомів можна аналізувати не лише з погляду енергії, а й з позиції тих сил, які утримують нуклони в ядрі. Сили, які діють між ядерними частинками й зумовлюють утворення атомних ядер, мають особливий характер. Оскільки ці сили перевищують електромагнітну кулонівську силу відштовхування, яка, своєю чергою, перевищує гравітаційну силу притягання, то ці сили дістали назву *сильних (ядерних) сил*. Ядерні сили належать до нового типу взаємодії — *сильної взаємодії*.



Мал. 170. Крива залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер

Дослідження показали, що ядерні сили притягання діють між будь-якими двома нуклонами на відстанях між центрами частинок близько $2 \cdot 10^{-15}$ м і різко зменшуються зі збільшенням відстані; на відстанях, більших за $3 \cdot 10^{-15}$ м, вони вже практично дорівнюють нулю. Коли ж нуклони, зіткнувшись, зближаються до відстані $0,5 \cdot 10^{-15}$ м, ядерні сили перетворюються на сили відштовхування. Пригадайте, подібний характер має взаємодія між молекулами, але сили й енергія взаємодії нуклонів у мільйони разів більші, а відстані між частинками — в мільйони разів менші.

Дуже малий радіус дії ядерних сил свідчить про те, що нуклони всередині ядра взаємодіють лише із сусідніми, а не з усіма нуклонами ядра. Відповідно можна помітити деяку схожість між атомним ядром та краплиною рідини. Нуклони в ядрі, як і молекули в рідині, взаємодіють тільки зі своїми найближчими сусідами. Густота ядра, як і краплини, не залежить від розміру. Поверхневі нуклони односторонньо пов'язанні з внутрішніми, і під дією сил поверхневого натягу ядро, як і краплина, має набувати сферичної форми. У збудженному ядрі нуклони коливаються, подібно до молекул у нагрітій краплині. Численні зіткнення можуть привести до того, що який-небудь з нуклонів дістане енергію, достатню для подолання ядерних сил, і вилетить з ядра. Коли заряджена частинка, наприклад, протон або α -частинка, перебуває на відстані, що перевищує радіус дії ядерних сил, то ядро діє на неї просто як позитивно заряджена краплина. Наведений опис називають *краплинною моделлю ядра*. Краплинна модель ядра дає змогу обчислити радіуси ядер і наочно пояснити деякі їхні властивості.

Але чи завжди процес зіткнення ядра з іншим ядром або частинкою буде супроводжуватись вильотом нуклона? Чи не може атомне ядро поглинути енергію, одержану під час зіткнення, і перерозподілити її між нуклонами, що входять до його складу, змінивши тим самим свою внутрішню енергію? Що відбуватиметься з таким ядром далі?

Відповіді на ці запитання дали досліди з вивчення взаємодії протонів з атомними ядрами. Виявляється, з поступовим збільшенням енергії протонів спочатку спостерігаються тільки пружні зіткнення з атомними ядрами, кінетична енергія не перетворюється на інші види енергії, а лише перерозподіляється між протоном і атомним ядром як однією цілою частинкою. Однак, починаючи з деякого значення енергії протона, можуть відбуватись і непружні зіткнення, в яких протон поглинається ядром і повністю віддає йому свою енергію. Ядро кожного ізотопу характеризується певним набором «порцій» енергії, які воно може сприйняти. Пояснення властивостей ядра в цьому разі здійснюють за допомогою *оболонкової моделі*. Згідно із цією моделлю, нуклони в ядрі не перемішані як завгодно, а, подібно до електронів у атомі, розміщуються зв'язаними групами, заповнюючи дозволені ядерні оболонки.

Таким чином, квантування енергії та низки інших параметрів є властивістю не лише атомів, а й атомних ядер.

Самодовільний перехід атомного ядра зі збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням *гамма-квантів*. Гамма-кванти є найбільш короткохвильовим видом електромагнітного випромінювання.

Незважаючи на те, що оболонкова модель атома дає змогу пояснити спектри енергетичних станів, вона, як і краплинна модель, не спроможна пояснити всіх властивостей сильної взаємодії, зокрема *обмінний характер ядерних сил*. Як ми з'ясуємо згодом, нуклони взаємодіють між собою через третю частинку, якою вони постійно обмінюються.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Які характерні властивості ядерних сил відрізняють їх від інших типів сил — електричних, магнітних, гравітаційних?
- Не користуючись відповідними таблицями, порівняйте енергії зв'язку таких двох ядер: ${}^3\text{Li}$ та ${}^4\text{Be}$.
- Нуклони в ядрі мають кінетичну потенціальну енергії. Яка за модулем сумарна енергія нуклонів більша? Чому?



Приклади розв'язування задач

Задача. Розрахуйте енергію зв'язку ядра атома Дейтерію. Відповідь наведіть в електрон-вольтах. Використайте необхідні довідкові дані з таблиць мас ізотопів.

Дано:

$$\begin{aligned}m_p &= 1,00728 \text{ а. о. м.} \\m_n &= 1,00866 \text{ а. о. м.} \\M_{^2\text{H}} &= 2,01410 \text{ а. о. м.} \\m_e &= 0,00055 \text{ а. о. м.} \\E_{\text{зв}} &=?\end{aligned}$$

Розв'язання:

Енергія зв'язку ядра визначається як $E_{\text{зв}} = \Delta m c^2$, де Δm — різниця суми мас вільних частинок, що входять до складу ядра, і маси ядра (дефект маси ядра); c — швидкість світла у вакуумі.

Для знаходження різниці мас використовуємо з таблиць відомості про маси протона m_p , нейтрона m_n та атома Дейтерію $M_{^2\text{H}}$. Для знаходження дефекту маси ядра Дейтерію Δm необхідно вирахувати з маси атома Дейтерію масу електрона, що утворює його оболонку,

$$\Delta m = m_p + m_n - m_e = m_p + m_n - (M_{^2\text{H}} - m_e).$$

Виконавши розрахунки, отримуємо $\Delta m = 0,00239$ а. о. м.

Оскільки $1 \text{ а. о. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1 \text{ eB} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, то для обчислень можна користуватись формулою: $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МeB}}{\text{а. о. м.}}$.

$$E_{\text{зв}} = 0,00239 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МeB}}{\text{а. о. м.}} = 2,23 \text{ МeB.}$$

Відповідь: $E_{\text{зв}} = 2,23 \text{ МeB.}$



Вправа 30

- Обчисліть енергію зв'язку ядра Дейтерію ${}^2\text{H}$ в МeB.
- Визначте енергію зв'язку ядра Алюмінію ${}^{27}\text{Al}$.
- Визначте енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон у ядрах ${}^7\text{Li}$, ${}^{16}\text{O}$.

4. Йони двох ізотопів Урану, що мають однакову валентність, рухаються в магнітному полі мас-спектрографа по дугах кіл з радіусами $R_1 = 1,224$ м і $R_2 = 1,232$ м. Визначте відношення мас ізотопів. Яка маса m_1 іонів легкого ізотопу (в атомних одиницях маси), якщо маса іонів важкого ізотопу $m_2 = 238$ а. о. м.?

§ 40

Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Ізотопи. Природна і штучна радіоактивність. Одним з найбільш переконливих доказів складної будови атомів стало відкрите в 1896 р. французьким фізиком Антуаном Беккерелем явище природної радіоактивності. Унаслідок спостереження за великою кількістю радіоактивних перетворень поступово з'ясувалося, що є речовини, які мають різні радіоактивні властивості (тобто розпадаються по-різному), але цілком однакові за хімічними властивостями. На цій підставі Фредерік Содді в 1911 р. висловив припущення про можливість існування елементів з однаковими хімічними властивостями, які, однак, відрізняються за іншими властивостями (зокрема щодо радіоактивності). Ці елементи треба ставити в одну й ту саму чарунку періодичної системи Менделеєва. Фредерік Содді назвав такі елементи *ізотопами* (тобто такими, що займають однакові місця).

Атомні ядра з однимаковим Z , але різними кількостями нейтронів N називаються *ізотопами*.

Наразі відомі ізотопи всіх хімічних елементів. Наприклад, Гідроген має три ізотопи:

${}_1^1\text{H}$ — Гідроген звичайний — основний ізотоп (стабільний).

${}_1^2\text{H} = {}_1^3\text{D}$ — Дейтерій (важкий водень); входить як домішка до природного водню $\left(\text{його вміст становить } \frac{1}{4500} \text{ частину} \right)$.

${}_1^3\text{H} = {}_1^3\text{T}$ — надважкий водень — Тритій; отримують штучно, він радіоактивний.

Існування ізотопів доводить, що заряд атомного ядра й, отже, будова електронної оболонки визначають не всі властивості атома, а лише його хімічні властивості й ті фізичні, які залежать від периферії електронної оболонки, наприклад, розміри. Маса ж атома та його радіоактивні властивості не залежать від порядкового номера в таблиці Менделеєва.

З явищем радіоактивності ви вже частково ознайомилися в курсі фізики 9 класу. Пригадаймо ці відомості.

Радіоактивність — це спонтанне перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента в ізотопи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.

Радіоактивний розпад ядер (радіоактивність) є властивістю самого атомного ядра; на швидкість протікання цього процесу не впливають зовнішні фактори (температура, тиск, електричне або магнітне поля тощо).

Радіоактивність нестабільних ізотопів, що трапляються в природі, називають *природною*. *Штучна* радіоактивність — це радіоактивність нестабільних ізотопів, отриманих у лабораторних умовах як продукти штучних перетворень атомних ядер.

Види радіоактивного випромінювання. Дослідження Антуана Беккереля, Ернеста Резерфорда, П'єра Кюрі, Марії Склодовської-Кюрі та інших учених показали, що радіоактивне випромінювання є трьох видів. Вони були названі умовно першими трьома літерами грецького алфавіту: α -, β -, γ -випромінювання.

Дослідження методом відхилення в магнітному полі, проведені Марією Склодовською-Кюрі, а згодом й Ернестом Резерфордом, показали, що радіоактивне випромінювання має різний електричний заряд: α -частинки — позитивний, β -частинки — негативний і γ -промені — електрично нейтральні. Детальні дослідження радіоактивного випромінювання підвели до з'ясування його природи.

α -частинки — це ядра атома Гелію (2 протони та 2 нейтрони). Характерною величиною α -частинок є їхня енергія (від 4 до 9 МeВ). Різні радіоактивні речовини випромінюють α -частинки різної енергії, однак усі α -частинки, випущені даною радіоактивною речовиною, мають цілком конкретну енергію. Найчастіше радіоактивна речовина випромінює не одну, а кілька груп α -частинок із цілком певним значенням початкової енергії. Пролітаючи крізь речовину, α -частинки поступово втрачають енергію, іонізуючи молекули речовини й, урешті, зупиняються. У повітрі за нормальних умов α -частинки утворюють у середньому приблизно 50 000 пар іонів на 1 см шляху. Довжина їхнього вільного пробігу в повітрі — від 2 до 12 см, у твердих речовинах і рідинах — кілька мікрометрів. Тому вони легко затримуються аркушем паперу.

β -частинки — це потік швидких електронів. Швидкості β -частинок можуть наблизитись до швидкості світла й сягати $0,999 \cdot c$. На відміну від α -частинок, β -частинки даної радіоактивної речовини мають не однакові значення енергії. Енергія β -частинок може набувати значення від 0 до деякого максимального значення (характерного для даного хімічного елемента). Унаслідок відносно малої маси β -частинки розсіюються в речовині, їхні траекторії мають покручений вигляд, для них не існує певної довжини вільного пробігу. Щоб затримати β -частинки, потрібен шар металу завтовшки близько 3 мм.

γ -промені — це короткохвильовий вид електромагнітного випромінювання, який виникає внаслідок переходу ядра зі збудженого стану в основний. Довжина хвилі γ -променів — порядку 10^{-10} м, що зумовлює їхню високу проникну здатність. Енергія γ -променів — від 0,02 до 2,6 МeВ. Для поглинання γ -променів потрібен шар свинцю завтовшки понад 20 см.

Альфа- й бета-роздяди. Радіоактивне випромінювання є продуктом самодовільного розпаду атомних ядер радіоактивних елементів. При цьому деякі з ядер випускають лише α -частинки, інші — β -частинки. Є радіоактивні ядра, які випускають обидва види випромінювання. Зауважимо, що

γ -промені, як правило, не є самостійним типом радіоактивності, воно супроводжує α - і β -роздяди. Розглянемо детальніше види радіоактивного розпаду.

Радіоактивний розпад супроводжується перетворенням одного хімічного елементу на інший. Ядро, що утворюється внаслідок α -роздяду, буде відрізнятись від вихідного тим, що воно втрачає 2 протони та 2 нейтрони. Наприклад, при α -роздяді радію $^{226}_{88}\text{Ra}$ утворюється елемент, порядковий номер якого $Z = 88 - 2 = 86$ і масове число $A = 226 - 4 = 222$. Отже, у результаті утворюється радон: $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$.

Загальне *рівняння α -роздяду* записують у вигляді $^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He}$.

Якщо механізм α -роздяду дістав просте й природне пояснення, то механізм β -роздяду довгий час залишався нерозгаданим. Дійсно, звідки при β -роздяді з'являються електрони, адже їх немає у складі ядра?

Зрозуміло, що β -частинка не є електроном оболонки атома, тому що видалення електрона з оболонки є іонізацією атома, у результаті якої не відбувається зміни хімічної природи атома. Таким чином, оскільки β -частинка не є складовою частиною ядра і не є електроном, вирваним з оболонки атома, можна припустити, що β -частинка «народжується» в результаті процесів, які відбуваються всередині ядра. Перевіримо цю гіпотезу.

У процесі β -роздяду масове число залишається незмінним, отже, залишається незмінним загальна кількість нуклонів у ядрі. При цьому змінюється (підвищується) на одиницю заряд ядра, тобто кількість протонів збільшується на одиницю. Відповідно кількість нейтронів має зменшитись на одиницю (оскільки масове число A залишається незмінним). Отже, β -роздяд можна пояснити як перетворення одного з нейтронів на протон з випусканням β -частинки. Дійсно, самодовільний процес перетворення протона в нейtron має супроводжуватись виділенням енергії (якби цього не було, то такий процес не міг би відбутися самодовільно, ядру потрібне було б надходження енергії ззовні).

Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії, виділена енергія має відповідати масі електрона. Проте було встановлено, що енергії, які виділялись під час β -роздяду, мають значення від 0 до деякого максимального значення E_m . Неперервний характер спектрів β -випромінювання виявився несподіваним, адже це начебто означало невиконання закону збереження енергії. Як показали детальніші дослідження, закон збереження імпульсу та моменту імпульсу також не виконувалися при β -роздяді. Для подолання цих труднощів швейцарський фізик Вольфганг Паулі в 1931 р. запропонував гіпотезу, згідно з якою при β -роздяді з ядра вилітає ще одна частинка, яка не має електричного заряду й маса якої надзвичайно мала. Гіпотетична частинка могла б мати відповідну енергію, імпульс, що й забезпечило б виконання законів збереження. Експериментально виявiti цю частинку вдалось лише в 50-х роках ХХ ст.

Згодом були відкриті й інші процеси перетворення частинок і виявлені нові частинки (та їх античастинки), що зумовило появу нового напрямку у фізиці — *фізики елементарних частинок*. Більш детально про це — в наступних параграфах.

Щодо процесів β -роздаду, то встановлено їх два види: β^+ - та β^- -роздади. При β^- -роздаді один з нейтронів усередині ядра перетворюється на протон, електрон і *антинейтрин*: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$. Електрон і *антинейтрин* вилітають з ядра, а нуклони, які залишилися, утворюють нове ядро.

Таким чином, загальне *рівняння β -роздаду* (природного) записується у вигляді: ${}_z^A X \rightarrow {}_{z+1}^A Y + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$.

При β^+ -роздаді протон перетворюється на нейtron і одночасно випускаються *позитрон* і *нейтрин*: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + \nu$. Це перетворення відбувається з поглинанням енергії, оскільки маса протона менша від маси нейтрона, і самодовільно відбуватись не може.

Що ж до γ -випромінювання, то воно зазвичай виникає услід за α - і β -роздадами, оскільки атомне ядро в результаті розпадів перебуває у збудженному стані, і, переходячи на нижчий енергетичний рівень (у нормальній стан), випромінює γ -квант.

Закон радіоактивного розпаду. Макроскопічний зразок радіоактивного ізотопу містить величезну кількість радіоактивних ядер. Ці ядра розпадаються не одночасно, а протягом деякого часу. Процес розпаду має випадковий характер: ми не можемо точно передбачити, коли розпадеться певне ядро. Проте, використовуючи теорію ймовірності, ми можемо визначити, скільки ядер розпадеться протягом деякого часу.

Якщо в початковий момент часу ($t = 0$) було N_0 радіоактивних ядер, то за деякий час їхня кількість стане вдвічі меншою — $\frac{N_0}{2}$. Ще через такий

самий інтервал часу їх уже буде $\frac{N_0}{4}$ і т.д. Час, за який кількість радіонуклідів зменшується удвічі, називають *періодом піврозпаду радіоактивної речовини* й позначають літерою T .

Розпад великої кількості ядер будь-якого радіоактивного ізотопу описує **закон радіоактивного розпаду**: $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$, де N — кількість атомних ядер, що не розпались на даний момент часу t , N_0 — початкова кількість ядер, T — період піврозпаду.

Закон радіоактивного розпаду записують також у вигляді $N = N_0 e^{-\lambda t}$, де λ — стала радіоактивного розпаду — характеризує частку радіоактивних ядер, які розпадуться за час t . Зв'язок сталої розпаду з періодом піврозпаду: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$.

Закон радіоактивного розпаду є ще одним прикладом статистичного закону, оскільки він установлює, яка в середньому кількість атомів розпадеться за даний інтервал часу. Але завжди бувають неминучі відхилення від середнього значення, і що менше атомів у досліджуваному зразку, то більші ці відхилення.

Швидкість розпаду (або загальна кількість розпадів за одиницю часу) називають *активністю ізотопу*:

$$A = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Одиниця активності — бекерель, 1 Бк.

1 Бк дорівнює активності джерела, з якою за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця — кюрі, $1 \text{ Ki} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

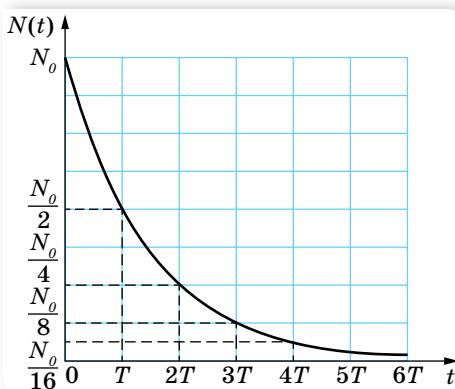
Як видно, активність A ізотопу зменшується з часом за експонентою з такою ж швидкістю, як і кількість ядер, що не розпалась, N (мал. 171).

Отримання й застосування радіонуклідів. Радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів (як природні, так і отримані у процесі штучної радіоактивності) мають свої галузі застосування. Основою їх практичного використання є такі їхні властивості:

- будь-який радіоактивний ізотоп є «міченим» атомом відповідного елемента, тобто атомом, який за фізичними й хімічними властивостями не відрізняється від звичайного атома, однак поведінку якого можна спостерігати за його радіоактивним випромінюванням;
- будь-яке радіоактивне випромінювання має певну проникну здатність, тобто властивість поширюватись і поглинатись у даному середовищі певним чином;
- радіоактивні випромінювання йонізують речовину;
- під дією нейtronів та інших випромінювань великої енергії в речовині утворюється наведена радіоактивність.

Відповідно до цих властивостей виділяють і основні методи їх використання. Наприклад, використовуючи «міченій» атом, можна дізнатися про швидкість обміну речовин у тканинах живого організму, про швидкість руху крові в судинах або нафтопродуктів трубопроводами тощо. У медицині за допомогою мічених атомів проводять діагностику деяких захворювань, вивчають вміст тих чи інших речовин у різних тканинах і органах людини, обмін речовин в організмі тощо. Йонізуюча здатність радіоактивних випромінювань використовується для руйнування злокісних пухлин, стерилізації фармацевтичних препаратів та харчових продуктів.

Наведена радіоактивність (зокрема, опромінення нейtronами) використовується для дослідження вмісту речовини. Деякі з атомів стабільних ізотопів досліджуваної речовини, захопивши нейtronи, перетворюються на радіоактивні ізотопи. За характером наведеної радіоактивного випромінювання можна зробити висновки про наявність у речовині тих чи інших домішок. Особливістю методу є те, що він дає змогу виявити домішки в дуже малих концентраціях. Цей метод використовують для встановлення віку археологічних об'єктів (за вмістом у них радіоактивного ізотопу Карбону-14).



Мал. 171. Графічне відображення закону радіоактивного розпаду



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Що є причиною радіоактивного випромінювання? Яка природа α -, β -, γ -випромінювання?
- Альфа-частинку поглинула речовина. Куди поділась α -частинка?
- Чому під час радіоактивного розпаду з ядра атома вилітає саме α -частинка, а не окремо один або два протони чи нейтрони?
- Чому виникає γ -квант у ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду?
- Чим характеризується швидкість розпаду радіоактивного ізотопу?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Деяка маса радіоактивного Радію містить $25 \cdot 10^6$ атомів. Скільки атомів розпадеться за добу, якщо період піврозпаду Радію — 1602 роки?

Дано:

$$N_0 = 25 \cdot 10^6$$

$t = 1$ доба

$T = 1602$ роки

$\Delta N = ?$

Розв'язання:

Оскільки час t малий порівняно з періодом піврозпаду, то можна скористатись наближеною формулою для визначення кількості ядер, що розпались:

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t.$$

$$\Delta N = \frac{0,693 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1 \text{ доба}}{1602 \cdot 365 \text{ діб}} \approx 30.$$

Відповідь: $\Delta N = 30$.

Задача 2. Період піврозпаду радіоактивного радону — 3,8 доби. За який час маса радону зменшиться у 8 разів?

Дано:

$$\frac{m_0}{m} = 8$$

$T = 3,8$ доби

$t = ?$

Розв'язання:

Оскільки маса речовини прямо пропорційна кількості атомів, то $\frac{m}{m_0} = \frac{N}{N_0} = 2^{\frac{t}{T}}$. За умовою задачі: $\frac{m_0}{m} = 8$, отже $\frac{1}{8} = 2^{\frac{t}{T}}$.

Перепишемо даний вираз у вигляді $\frac{1}{2^3} = \frac{1}{2^{\frac{t}{T}}}$, звідки $3 = \frac{t}{T}$, тоді

$t = 3T = 3 \cdot 3,8 = 11,4$ доби.

Відповідь: 11,4 доби.



Вправа 31

- Яка частка радіоактивних ядер деякого елемента розпадається за час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?
- За який час розпадеться 80 % атомів радіоактивного ізотопу Хрому $^{51}_{24}\text{Cr}$, якщо період його піврозпаду — 27,8 доби?
- Було встановлено, що в радіоактивному препараті відбувається $6,4 \cdot 10^8$ розпадів ядер за хвилину. Визначте активність цього препарату в бекерелях ($1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{розп}}{\text{хв}}$).

4. За який час у препараті з постійною активністю 8,2 МБк розпадеться $25 \cdot 10^8$ ядер?
5. Визначте період піврозпаду Радону, якщо за 1 добу з мільйона атомів розпадається 175 000 атомів.

§ 41

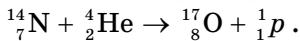
Ядерні реакції

Ядерні реакції. Вивчення природної радіоактивності показало, що перетворення одного хімічного елемента на інший зумовлене внутрішньоядерними процесами, тобто змінами, які відбуваються всередині атомних ядер. У зв'язку з цим було здійснено спроби штучного перетворення одних хімічних елементів на інші завдяки впливу на атомні ядра. Виняткова стабільність ядер нерадіоактивних елементів свідчить про те, що їх зміна може статись лише під час надзвичайно великого енергетичного зовнішнього впливу. Ефективним засобом такого впливу виявилось бомбардування атомних ядер частинками високої енергії. Спочатку для бомбардування використовували α -частинки радіоактивного випромінювання. Пізніше почали використовувати й інші заряджені частинки, попередньо надавши їм великої швидкості (кінетичної енергії) у спеціальних прискорювачах. Процес перетворення атомних ядер називають ядерною реакцією.

Ядерні реакції — процес перетворення атомних ядер унаслідок їх взаємодії з елементарними частинками або з іншими ядрами.

Як видно з визначення, ядерні реакції зумовлюються зовнішніми чинниками. Частинки високої енергії (α , β , n , p), зіткнувшись із ядром, можуть спричинити різноманітні перетворення.

У 1919 р. Ернест Резерфорд здійснив першу ядерну реакцію, бомбардуючи азотну мішень α -частинками, і відкрив протон (p):



Відкриття Резерфорда привело до створення нової галузі наукових досліджень — штучного перетворення хімічних елементів, яка й сьогодні має важливе наукове та практичне значення. У 1932 р. вперше було застосовано штучно отримані прискорені протони для розщеплення ядра Літію: ${}_{3}^{7}\text{Li} + {}_{1}^{1}p \rightarrow {}_{2}^{4}\text{He} + {}_{2}^{4}\text{He}$. Цього ж року Джеймс Чедвік відкрив нейтрон (n): ${}_{4}^{9}\text{Be} + {}_{2}^{4}\text{He} \rightarrow {}_{6}^{12}\text{C} + {}_{0}^{1}n$, а Фредерік Жоліо-Кюрі, здійснивши реакцію ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_{2}^{4}\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_{0}^{1}n$, уперше отримав штучний радіоактивний ізотоп фосфору ${}_{15}^{30}\text{P}$, який є джерелом позитронів. Так було відкрито позитрон ${}^{+}e$.

Енріко Фермі показав, що нейтрони є більш придатними для ініціювання ядерних реакцій, оскільки вони не мають електричного заряду й не відштовхуються ядром, як протони чи α -частинки (котрі мають долати «кулонівський бар’єр»). У 1938 р. Отто Ган, Фрідріх Штрассман і Ліза Майтнер

здійснили поділ ядра Урану-235 нейtronами: $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0n \rightarrow ^{145}_{56}\text{Ba} + ^{88}_{36}\text{Kr} + 3^1_0n$ (один із можливих варіантів поділу). Це відкриття було не лише значним науковим досягненням — воно стало доленосним для всього світу. Саме реакція поділу $^{235}_{92}\text{U}$ лежить в основі дії й атомної електростанції, й атомної бомби.

Залежно від виду частинок, якими бомбардується ядро хімічного елемента, від енергії цих частинок, а також від виду бомбардованих ядер, можуть відбуватись різні ядерні реакції. Розрізняють такі типи ядерних реакцій:

- Реакція захоплення.** Ядро поглинає бомбардууючу частинку й перетворюється на нове, масивніше ядро. Прикладом може бути реакція $^{11}_5\text{B} + ^1_1p \rightarrow ^{12}_6\text{C}$, у якій протон поглинається ядром Бору, і виникає ядро Карбону. Зазвичай у реакціях такого типу нове ядро утворюється в збудженному стані та, випромінивши один або кілька γ -квантів, переходить у нормальній (основний) стан.
- Поглинання** ядром бомбардууючої частинки та **випускання** новоутвореним ядром однієї або кількох частинок. Прикладом такої реакції може бути реакція $^9_4\text{Be} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0n$. Тут Дейтрон поглинається ядром Берилію, а проміжне ядро, що утворилося, випромінює нейtron і перетворюється на ядро атома Бору.
- Поділ ядра.** Під дією бомбардування ядер частинками великих енергій можливе розщеплення ядра на кілька частин. Так, наприклад, ядро атома Бору внаслідок бомбардування протонами достатньо великої енергії може розпастись на три α -частинки. Ця реакція відбувається у два етапи. Спочатку вилітає одна α -частинка $^{11}_5\text{B} + ^1_1p \rightarrow ^8_4\text{Be} + ^4_2\text{He}$, але ядро Берилію виявляється сильнозбудженим і розпадається ще на дві α -частинки: $^8_4\text{Be} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$.
- Реакція синтезу.** Це реакція злиття (синтезу) легких атомних ядер у більш важке. Синтез можливий лише за дуже високих температур — порядку 10^8 К і вищих (тому їх ще називають *термоядерними реакціями*). Наприклад, синтез Гелію з Дейтерію і Тритію, $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0n$.

Термоядерні реакції відіграють вирішальну роль в еволюції Всесвіту, зокрема шляхом термоядерних реакцій сформувались хімічні елементи. Енергія випромінювання зір — це енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в їхніх надрах. Для Сонця основною реакцією є перетворення чотирьох протонів на ядро атома Гелію, що супроводжується виділенням енергії понад 26 МeВ за один цикл.

У земних умовах отримати температуру, за якої можлива термоядерна реакція, можна, лише застосувавши ядерний вибух (на цьому ґрунтуються принцип дії водневої бомби) або потужний імпульс лазерного випромінювання (керована термоядерна реакція синтезу).

Енергетичний вихід ядерної реакції. Під час ядерних реакцій обов'язково виконуються закони збереження. На основі закону збереження і перетворення енергії можна розрахувати енергетичний вихід ядерної реакції.

Енергетичний вихід ядерної реакції $E_{\text{вих}}$ — це енергія, яка виділяється як продукт реакції (або затрачається для здійснення реакції). Вона дорівнює різниці енергій спокою всіх ядер і частинок до та після реакції.

$E_{\text{вих}} = \Delta m c^2$, де Δm — *дефект маси*, який можна розрахувати як різницю між сумою мас спокою ядер і частинок до та після ядерної реакції. Якщо сумарна маса продуктів реакції менша від суми мас вихідних ядер, то реакція супроводжується виділенням енергії — у вигляді кінетичної енергії утворених частинок. Якщо ж сумарна маса продуктів реакції більша за сумарну масу вихідних ядер, то така реакція для свого перебігу потребує енергетичної підтримки.

Ядерна енергетика. Пошук способів перетворення й використання енергії є не просто проблемою дослідження науковців. Енергонезалежність, енергетична безпека є однією з найважливіших проблем внутрішньої та зовнішньої політики держав. Розвиток людського суспільства нерозривно пов'язаний з використанням природних ресурсів нашої планети, зі споживанням різних видів енергії у дедалі більших масштабах. Усі здобутки сучасної цивілізації можливі завдяки тій величезній кількості штучної енергії, яку виробляє людство. Виробництво теплової та електричної енергії ґрунтуються на процесі спалювання копалин-енергоресурсів — вугілля, нафти, газу. Завдяки науковим дослідженням людина дістала у своє розпорядження величезну силу, нове могутнє джерело енергії, закладене в ядрах атомів, — ядерну енергію. В історії людства не було наукової події, більш визначної за своїми наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану.

Детальніше про принцип дії ядерних реакторів, проблеми та перспективи використання ядерної енергетики читайте в електронному додатку.



Для України атомна (ядерна) енергетика є стратегічно важливим елементом енергозабезпечення. Сьогоднішній і прогнозований внесок її становить близько 55 % електроенергії, що виробляється в країні. За кількістю ядерних реакторів Україна посідає дев'яте місце у світі й третє в Європі. В Україні діють 4 атомні електростанції з 15 енергоблоками, одна з яких — Запорізька АЕС, яка із 6 енергоблоками загальною потужністю в 6000 МВт, є найпотужнішою в Європі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Чим ядерна реакція відрізняється від хімічної? Які бувають типи ядерних реакцій? У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах?
- Як обчислюється енергетичний вихід ядерної реакції?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Обчисліть енергетичний вихід ядерної реакції ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^{4}\text{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^{1}\text{H}$. Для наближених обчислень можна використати відносні атомні маси елементів (див. табл. на с. 270).

Дано:

$$\begin{aligned}m_{\text{oN}} &= 14,00307 \text{ а. о. м} \\m_{\text{oHe}} &= 4,00260 \text{ а. о. м} \\m_{\text{oO}} &= 16,99991 \text{ а. о. м} \\m_{\text{oH}} &= 1,00783 \text{ а. о. м}\end{aligned}$$

$$E_{\text{вих}} = ?$$

Розв'язання:

Енергетичний вихід ядерної реакції:

$$E_{\text{вих}} = \Delta m c^2 \text{ (у Дж) або } \Delta E = \Delta m_{\text{а.о.м.}} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}}$$

(у МeВ).

$$\Delta m = m_{\text{oN}} + m_{\text{oHe}} - m_{\text{oO}} - m_{\text{oH}}.$$

Після підстановки даних отримуємо: $\Delta m = -0,0014 \text{ а.о.м.}$

$$\Delta E = -0,0014 \text{ а.о.м.} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}} = -1,303 \text{ МeВ.}$$

Знак мінус вказує на те, що енергія в даній реакції поглинається.

Відповідь: $-1,303 \text{ МeВ.}$

Задача 2. Потужність атомної установки підводного човна дорівнює 14,7 МВт. Ядерним пальником є збагачений уран ${}_{92}^{235}\text{U}$. Визначте запас пального, необхідний для плавання човна протягом 30 діб, якщо за поділу одного ядра урану виділяється 200 МeВ енергії.

Дано:

$$\begin{aligned}P &= 14,7 \text{ МВт} = 1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт} \\t &= 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб} \\E_0 &= 200 \text{ МeВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \\\mu &= 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}\end{aligned}$$

$$m = ?$$

Розв'язання:

Спожита потужність за місяць становить: $P = \frac{E}{t}$, де E — енергія, що виділяється за поділу усіх N ядер урану, що містяться в пальниковому масою m .

$$N = \frac{m}{\mu} N_a, \text{ де } \mu \text{ — молярна маса урану.}$$

Оскільки за поділу одного ядра виділяється енергія E_0 , то за поділу всіх ядер: $E = NE_0$.

Таким чином, $P = \frac{E_0 m N_a}{\mu t}$. Звідси $m = \frac{P \mu t}{E_0 N_a}$.

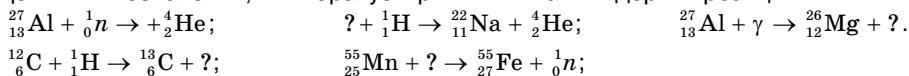
$$m = \frac{1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 0,495 \text{ кг.}$$

Відповідь: 0,495 кг.

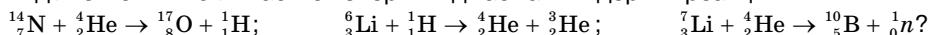


Вправа 32

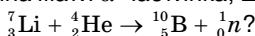
1. Допишіть позначення, яких бракує в рівняннях таких ядерних реакцій:



2. Виділяється чи поглинається енергія під час таких ядерних реакцій:



3. Яку мінімальну енергію повинна мати α -частинка, щоб відбулась ядерна реакція:



§ 42

Елементарні частинки

Поняття елементарної частинки. Ще 1949 р. Луї де Бройль (1892–1987, Франція) запропонував створити міжнародну організацію для здійснення наукових досліджень мікросвіту. У 1954 р. офіційно відкрито європейську організацію з ядерних досліджень (ЦЕРН) — найбільшу в світі лабораторію фізики високих енергій. Сьогодні фізика елементарних частинок стала новою, великою і самостійною галуззю науки. Дослідження елементарних частинок у земних умовах здійснюються за допомогою прискорювачів частинок різних конструкцій: лінійних прискорювачів, циклотронів, синхрофазотронів, колайдерів (мал. 172) тощо. Проводять дослідження і природних потоків частинок — *космічного проміння*.

На початок 60-х років ХХ ст. кількість відкритих елементарних частинок стала настільки великою, що виникли сумніви, чи всі частинки, які називають елементарними, повністю відповідають цій назві.

Поняття елементарних частинок ґрунтуються на факті дискретної будови речовини. Ряд елементарних частинок має складну внутрішню структуру, проте розділити їх на частини неможливо. Інші елементарні частинки є безструктурними й можуть вважатися первинними *фундаментальними частинками*.

Елементарна частина — збірний термін, що належить до мікрооб'єктів у суб'ядерному масштабі.



Мал. 172. Прискорювачі елементарних частинок

Найхарактернішою особливістю елементарних частинок є їхня здатність до перетворень і взаємодії. Водночас дочірні частинки не є структурними складовими материнських, а народжуються в актах перетворення.

Отже, за сучасними уявленнями, елементарні частинки не просто «цеглинки» світобудови, це специфічні об'єкти мікросвіту. До того ж їм властивий особливий вид фундаментальної взаємодії — *слабка взаємодія*. За інтенсивністю слабка взаємодія в багато (приблизно в 10^{14}) разів менша від сильної і навіть електромагнітної взаємодії. Проте вона значно більша за гравітаційну взаємодію, оскільки маси елементарних частинок надто малі, а радіус їхньої взаємодії становить лише 10^{-18} м.

Типи фундаментальних взаємодій. Щоб зрозуміти механізм слабкої взаємодії, пригадаймо інші відомі нам типи взаємодій і їхній характер.

Вивчаючи механіку, ми ознайомились із гравітаційною взаємодією (силами всесвітнього тяжіння) і деякими виявами електромагнітної взаємодії (силами пружності, тертя). В електродинаміці ми вивчили електромагнітну взаємодію, а в ядерній фізиці — сильну (ядерну).

Щоб зрозуміти характер слабкої взаємодії, звернімося ще раз до електромагнітної. На самому початку вивчення електродинаміки ми з'ясували, що електричні сили діють на відстані. Посередником, що передає взаємодію, є поле. Можна стверджувати, що сила, з якою одна заряджена частинка діє на іншу, зумовлена електричним полем, що його створює перша частинка. Analogічним способом магнітне поле є посередником магнітних сил.

Згодом ми з'ясували, що електромагнітні поля можуть поширюватись у вигляді хвиль у просторі, а також, що світлу властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм. Унаслідок чого можна пояснити електромагнітну взаємодію між зарядженими частинками: 1) як *взаємодію через поле* і 2) як *обмін фотонами між частинками*.

На малюнку 173 зображено наочний приклад того, як у результаті обміну частинками відбувається взаємодія. На малюнку 173, а діти кидають одне в одного подушки. Спіймавши подушку, кожна дитина відкочується назад. Це ілюстрація сили відштовхування. Якщо діти намагаються вирвати подушки з рук одне одного (мал. 173, б), то кожний тягне партнера до себе. Це ілюстрація сили притягання.

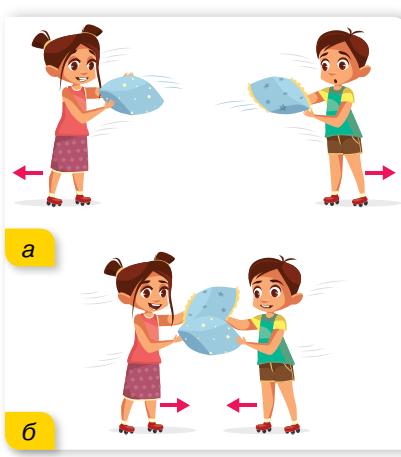
Подібним чином може відбуватись електромагнітна взаємодія між зарядженими частинками: одна із заряджених частинок випромінює фотон і зазнає внаслідок цього віддачу. Інша частинка поглинає фотон. За такої взаємодії відбувається передача енергії та імпульсу від однієї частинки до іншої, і посередником при цьому є фотон.

У 1935 р. японський фізик Хідекі Юкава (1907–1981) висловив припущення, що подібним чином відбувається і сильна взаємодія між нуклонами в ядрі. Подальші дослідження показали, що посередником сильної взаємодії є глюони.

Таким чином, природно припустити, що мають існувати посередники слабкої та гравітаційної взаємодій. Пошук таких частинок тривав десятиліття. У 1983 р. Карло Руббія заявив про довгоочікуване відкриття *проміжних бозонів* — частинок, через які відбуваються слабкі взаємодії.

Пошук квантів гравітаційного поля — гравітонів — поки що не дав результатів.

Властивості відомих на цей час основних типів взаємодій зведені в таблиці 8.



Мал. 173. Ілюстрація обмінного характеру взаємодії

Таблиця 8

Тип взаємодії	Характер взаємодії	Радіус дії	Квант взаємодії
Сильна	Забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі	$r = 10^{-15}$ м	Мезон/глюон
Електромагнітна	Взаємодія між електрично зарядженими частинками	$r = \infty$	Фотон
Слабка	Взаємодія, яка виявляється в розпадах частинок, а також у дії нейтрino на речовину	$r = 10^{-15}$ м	Бозон
Гравітаційна	Універсальна взаємодія, властива всім без винятку частинкам, які мають масу (у мікросвіті суттєвої ролі не відіграє)	$r = \infty$	Гравітон (?)

Перед фізиками поставлено задачу створити теорію, яка б об'єднала всі типи взаємодій, пояснивши їх з єдиної точки зору. Ця ідея випливає зі сприйняття навколошнього світу як единого цілого. Задача ця надзвичайно складна. Ейнштейн у свій час витратив багато років (40 останніх років свого життя), щоб об'єднати гравітаційну та електромагнітну взаємодії, проте це йому не вдалося.

На початку 60-х років американські фізики Стівен Вайнберг і Шелдон Глешоу та пакистанський фізик Абдус Салам запропонували так звану калібрувальну теорію, яка об'єднує слабку й електромагнітну взаємодії. У цій теорії слабка й електромагнітна взаємодії розглядаються як два різні вияви єдиної, більш фундаментальної взаємодії. У ній фотони — посередники електромагнітної взаємодії — розглядаються як векторні бозони. А проміжні бозони: W^+ -бозон, W^- -бозон та Z^0 -бозон (нестабільні частинки, час життя яких $3 \cdot 10^{-25}$ с) — є посередниками слабкої взаємодії.

Створення теорії електрослабкої взаємодії було відзначено присудженням Вайнбергу, Глешоу, й Саламу Нобелівської премії з фізики 1979 р.

Класифікація частинок. За властивостями елементарні частинки поділяють на такі групи:

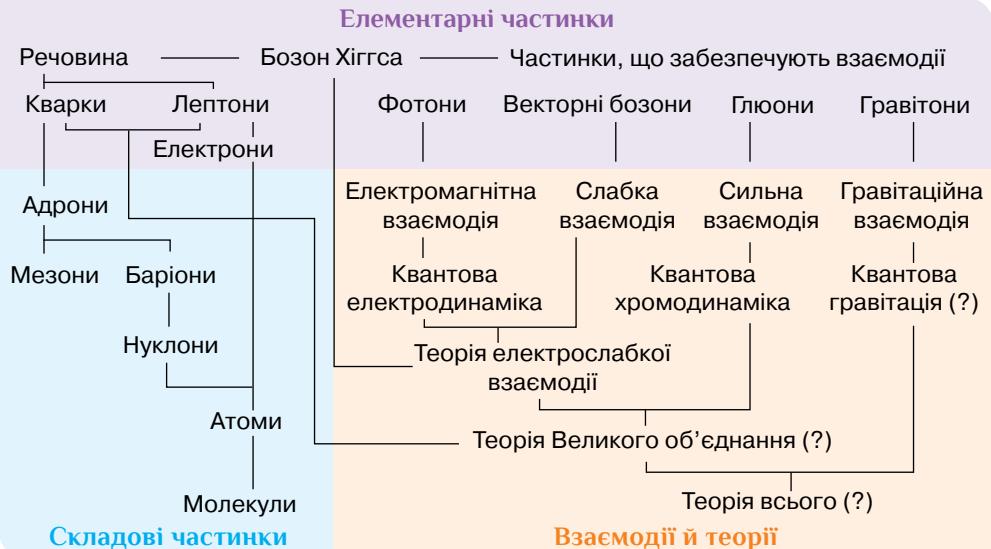
- за масою. Легкі частинки — *лептоны* (до них належить електрон), найважчі — *адрони* (до них належать протони та нейтрони), й особлива частинка — *фотон* — частинка без маси, яка здатна існувати лише в русі зі швидкістю світла;
- за видом взаємодії. Для гравітаційної — *гравітони*¹, для електромагнітної взаємодії — *фотони*, сильну взаємодію зумовлено *глюонами*, слабку — *векторними бозонами*.

Більше про елементарні частинки ви дізнаєтесь, проаналізувавши малюнок 174 (с. 202).

Детальніше про способи реєстрації елементарних частинок читайте в електронного додатку.



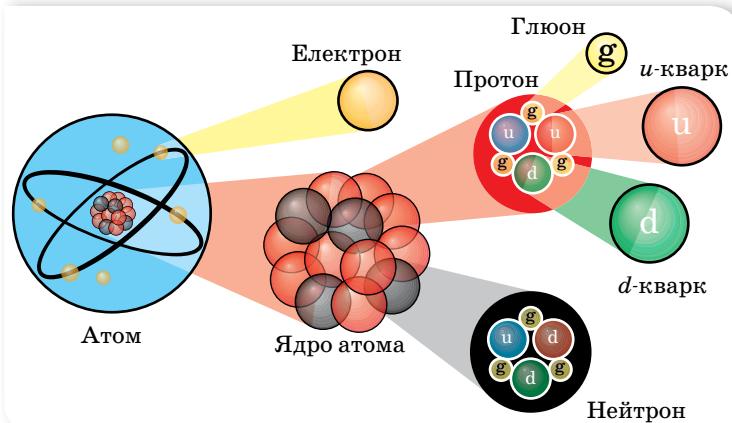
¹ Існування гравітонів поки не доведено експериментально через слабкість гравітаційної взаємодії, проте його вважають цілком імовірним.



Мал. 174. Класифікація елементарних частинок

Майже всі частинки, які можна безпосередньо спостерігати, належать до лептонів або адронів. Головна відмінність між ними в тому, що адрони беруть участь у сильній взаємодії, а лептони — ні. До того ж лептонів є лише 6, а адронів — понад сотню.

Саме кварки та лептони є «будівельним матеріалом» для речовин. Завдяки взаємодії **кварків** існують ядра атомів. Формування електронних оболонок навколо ядра веде до утворення атомів (мал. 175).



Мал. 175. «Будівельний матеріал» речовин

Кожна частинка має **античастинку** (позначається тильдою над позначенням частинки). Маси, час існування і спіни частинки й античастинки — однакові. Інші параметри, зокрема електричний заряд і магнітний момент, — однакові за модулем, але протилежні за знаком. Прикладами

частинок і античастинок є електрон і позитрон, протон і антiproton, нейtron і антинейtron, нейтрino і антинейтрino. Зіткнення частинки й античастинки приводить до їх взаємної анігіляції, унаслідок якої вони перетворюються на інші форми матерії.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Яку частинку називають елементарною? Назвіть стабільні елементарні частинки.
- Який тип фундаментальної взаємодії характерний для елементарних частинок?
- Що загального можна сказати про механізм усіх фундаментальних взаємодій?



Виконуємо навчальні проекти

- Які питання ядерної енергетики вирішуються у нашій країні та світі?
- Альтернативні джерела енергії.
- Проблеми реєстрації нейтрino.
- Біологічна дія радіаційного випромінювання.



Перевірте себе (§ 35–42)



- Укажіть, від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів і як саме.

A від заряду електронів; обернено пропорційно
B від частоти світла; лінійно
C від маси електронів; прямо пропорційно
D від швидкості фотонів; прямо пропорційно
- Червона межа фотоefекту для срібла дорівнює 0,26 мкм. Визначте роботу виходу електронів зі срібла.

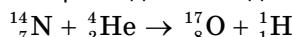
A $4,65 \cdot 10^{-9}$ Дж **B** $7,37 \cdot 10^{-19}$ Дж
C $6,37 \cdot 10^{-19}$ Дж **D** $7,65 \cdot 10^{-19}$ Дж
- Укажіть правильне продовження твердження «Лінійчатий спектр випромінює речовина в...».

A газоподібному молекулярному стані
B газоподібному атомарному стані
C твердому стані
D будь-якому агрегатному стані
- У результаті серії послідовних радіоактивних розпадів атом Урану $^{238}_{92}\text{U}$ перетворився на стабільний атом Плюмбуму $^{206}_{82}\text{Pb}$. Визначте кількість α -розпадів і β -розпадів.

A 6 і 4 **B** 8 і 4 **C** 8 і 6 **D** 6 і 2
- Період піврозпаду ізотопу Цезію ($^{137}_{55}\text{Cs}$) дорівнює 30 рокам. Визначте, скільки відсотків атомів цього ізотопу розпадеться за 150 років.

A 82,2 % **B** 87,5 % **C** 96,9 % **D** 98,1 %

6. Поверхню літію опромінюють світлом частотою 10^{15} Гц. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, якщо робота виходу електронів з літію — 2,4 еВ.
7. Атоми Гідрогену в основному стані поглинають фотони з довжиною хвилі 102,8 нм. Скільки різних спектральних ліній можна спостерігати за переходу атомів у незбуджений стан?
8. Виділяється чи поглинається енергія під час наведеної ядерної реакції?



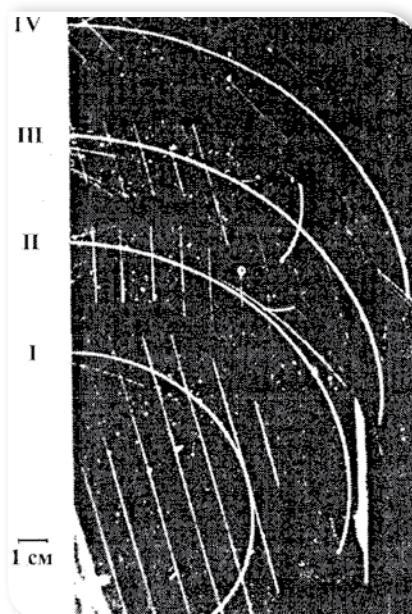
ПРАКТИКУМ

ВИВЧЕННЯ ТРЕКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗА ГОТОВИМИ ФОТОГРАФІЯМИ

Обладнання: фотографії треків заряджених частинок, трикутник або лінійка із ціною поділки 1 мм, циркуль, аркуш прозорого паперу, олівець.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Розгляньте фотографії треків (мал. 176). Трек I належить протону, треки II, III і IV — частинкам, які потрібно ідентифікувати. Вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини фотографії й дорівнює 2,17 Тл. Початкові швидкості всіх частинок однакові й перпендикулярні до напрямку магнітного поля.
2. Накладіть на фотографію аркуш прозорого паперу й перенесіть на нього треки.
3. Для кожного треку проведіть дві хорди й у їх серединах поставте перпендикуляри. На перетині перпендикулярів лежать центри кіл.
4. Виміряйте радіуси кривизни треків частинок, перенесених на папір, на їх початкових ділянках. Поясніть, чому траєкторії частинок є дугами кіл. Яка причина відмінностей у кривизні траєкторій різних ядер? Пояснення запишіть у зошит.
5. Виміряйте радіуси кривизни на початку і в кінці одного з треків. Поясніть, чому кривизна траєкторії кожної частинки змінюється від початку до кінця пробігу частинки.
6. Поясніть причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товстіший у кінці пробігу, ніж на початку? Пояснення запишіть у зошит.
7. Порівняйте питомі заряди $\frac{q}{m}$ частинки III і протона I, знаючи, що початкові швидкості частинки і протона — однакові. Відношення питомих зарядів частинок обернене до відношення радіусів їх траєкторій, оскільки
$$\frac{q}{m} = \frac{v}{B \cdot R}.$$
8. Ідентифікуйте частинку III за наслідками дослідження.
9. Інші треки належать ядрам Дейтерію та Трітію. З'ясуйте, якому саме ядру належить трек II, а якому — трек IV.



Мал. 176

Розділ 4

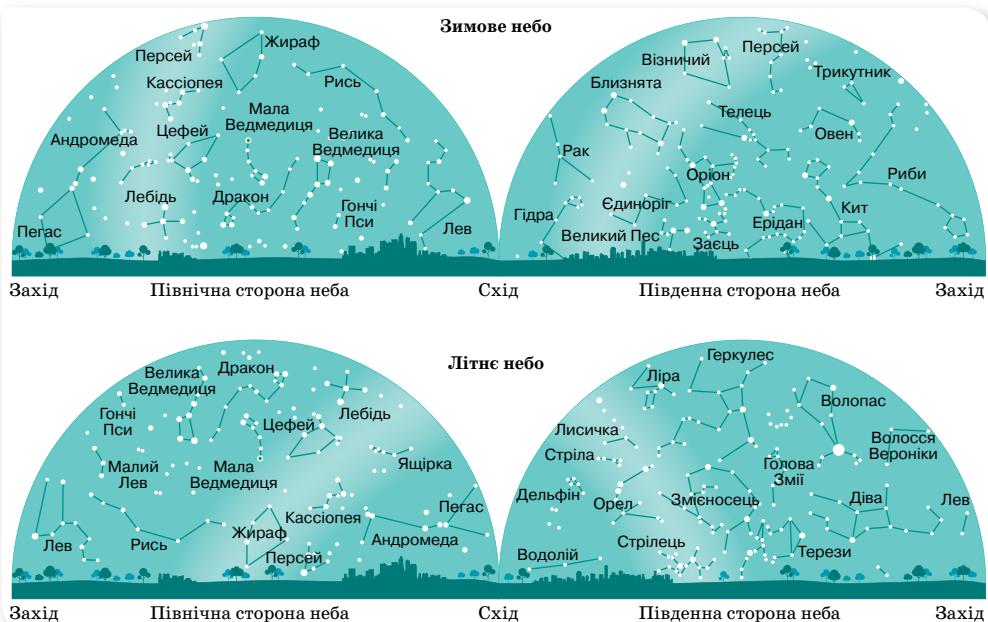
АСТРОНОМІЯ

Астрономія — одна з найдавніших природничих наук. На Землі й у космосі діють одні й ті самі закони природи. Фізики, хіміки, біологи й астрономи досліджують зміни та процеси, що відбуваються з об'єктами природи. Вічним залишається питання: «Чому існує Всесвіт, і чому в цьому дивному світі живемо ми?».

§ 43

Небесна сфера

Сузір'я. Якби ми з вами проводили урок вечірньої пори на подвір'ї школи, та ще в безхмарну й безмісячну ніч і з телескопом, то нашому зору відкрилася б велична картина зоряного неба. Спостереження зоряного неба — це маса позитивних вражень, неповторні переживання, глибоке естетичне задоволення. І в той же час — спостереження зоряного неба завжди викликає безліч запитань. Як все це утворилося? Як воно існує? Що там далі в безмежному просторі?



Мал. 177. Характерні сузір'я зоряного неба для території України

Спостереження за зоряним небом, які здійснювалися систематично, аналізувалися й фіксувалися, показали, що у Всесвіті є не лише зорі, а й інші об'єкти, які люди назвали планетами, кометами, метеоритами, галактиками та ін. Найяскравіші світила для спостерігача із Землі — Сонце, Місяць, п'ять планет (Меркурій, Венера, Марс, Юпітер і Сатурн).

Для того щоб орієнтуватися у великій кількості нічних світил, люди віддавна намагалися розділити їх на окремі групи — сузір'я, давши їм назви залежно від того, яку картину вони собі уявляли, у думках сполучаючи лініями зорі в групі. Міжнародним астрономічним союзом у 1922 р. все небо розділено на 88 сузір'їв. Надалі ці межі й назви сузір'їв вирішено вважати незмінними, так само, як і назви яскравих зір.

Кожній освіченій і культурній людині бажано вміти знаходити на небі характерні для свого місця проживання сузір'я. До тих, що спостерігаються з території України, належать: сузір'я *Малої й Великої Ведмедиць, Андромеди, Візничого, Волопаса, Кассіопеї, Лебедя, Ліри, Пегаса, Оріона, Орла, Тельця* (мал. 177, с. 205).

Небесна сфера. Неозброєним оком можна побачити близько 6000 зір. Нам здається, що всі небесні світила розташовані на однаковій відстані, ніби світять з поверхні велетенської сфери (хоча насправді це не так, зорі розташовані на різних відстанях, одні більше до нас, інші — далі). Природно, що, вивчаючи зоряне небо, використовують його модель — *небесну сферу* — уявну сферу довільного радіуса із центром у точці спостереження, на яку спроектовано небесні світила. Точкою спостереження може бути центр Землі, центр Сонця, місце спостереження.

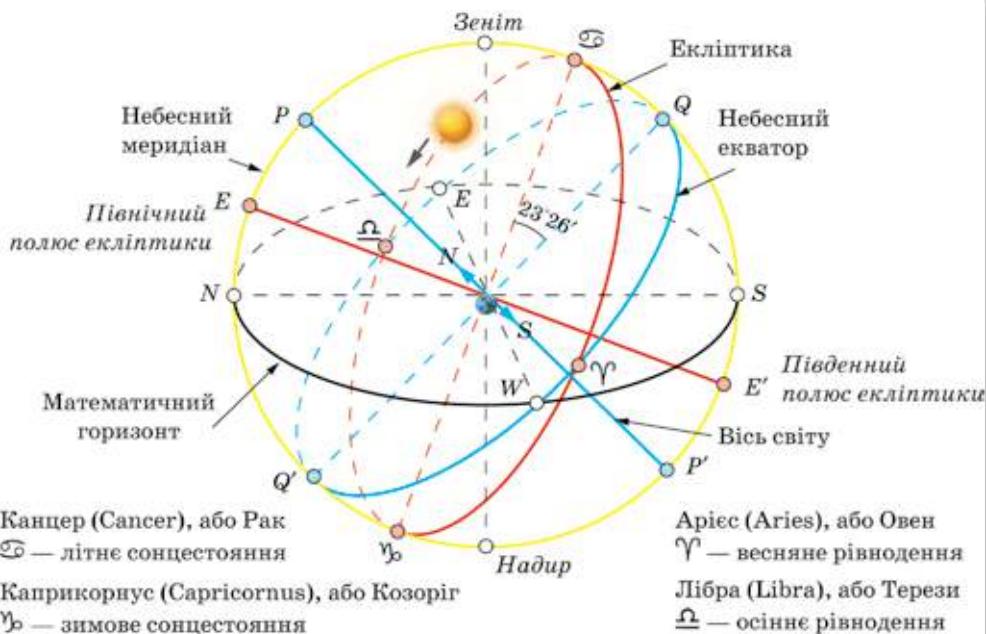
Системи небесних координат. Провівши на небесній і земній сferах деякі кола, отримують точки та лінії, за допомогою яких визначаються небесні координати світил (мал. 178).

Уявімо себе спостерігачами. Проведемо умовно прямовисну лінію, що проходить через центр Землі, яка збігається з напрямком сили тяжіння в місці спостереження й перетинає небесну сферу в двох точках, які називають *зеніт* і *надир*. Великий круг небесної сфери, площаина якого перпендикулярна до прямовисної лінії, називають *математичним горизонтом*. Велике коло, яке проходить через світило, точку зеніту й точку надиру, називають *вертикальним колом*, або *вертикалом*.

Якщо продовжити вісь обертання Землі в космос, то на небесній сфері ми отримаємо дві точки перетину, які називають полюсами світу: *Північний полюс світу P* (у сучасну епоху біля Полярної зорі) і *Південний полюс світу P'* (у сузір'ї Октант). У той час як Земля обертається навколо своєї осі, полюси світу залишаються нерухомими на небесній сфері, а всі інші точки на ній обертаються навколо цих полюсів, роблячи один оберт за добу (зоряна доба). За один добовий оберт кожне світило двічі на добу перетинає небесний меридіан. Момент перетину небесним світилом меридіана називають *кульміацією* (від лат. *culmen* — вершина).

Великий круг небесної сфери, площаина якого перпендикулярна до осі світу, називається *небесним екватором*. Іншими словами, небесний еква-

тор — це проекція земного екватора на небесну сферу. Небесний екватор перетинається з математичним горизонтом у двох точках: *точці сходу* та *точці заходу*. Точкою сходу називається та, з якої точки небесної сфери внаслідок її обертання перетинають математичний горизонт, переходячи з невидимої півсфери у видиму.



Мал. 178. Точки та лінії небесної сфери

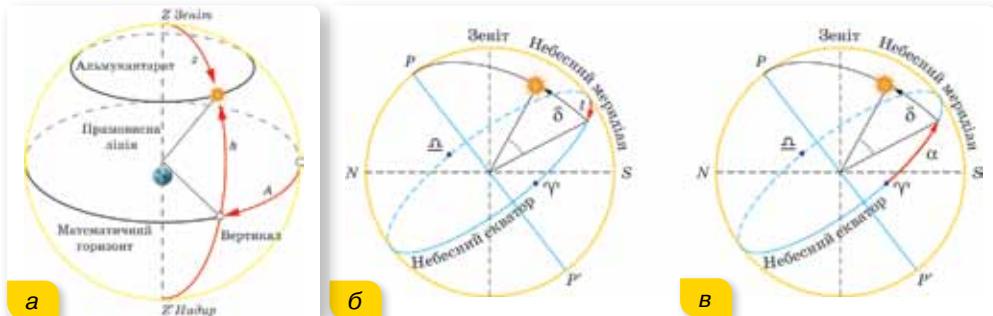
Лінія перетину площини небесного меридіана та площини математичного горизонту має назву *південна лінія*.

Великий круг небесної сфери, площаина якого проходить через прямовисну лінію і вісь світу, називають *небесним меридіаном*. Небесний меридіан перетинається з математичним горизонтом у двох точках: *точці півночі* та *точці півдня*. Точкою півночі називається та, що більше до Північного полюса світу.

Позначимо на небесній сфері *екліптику*. **Екліптика** — це великий круг небесної сфери, перетин небесної сфери та площини орбіти Землі, якою здійснюється її рух навколо Сонця. (Проте спостерігачу із Землі видається, що Сонце рухається екліптикою.) Площаина екліптики перетинається з площеиною небесного екватора під кутом $\varepsilon = 23^{\circ}26'$. З небесним екватором екліптика перетинається у двох точках — *точці весняного рівнодення* Υ та *точці осіннього рівнодення* Ω .

Від вибору головної площини та точки відліку на ній розрізняють такі системи: горизонтальну (мал. 179, а; с. 208), першу екваторіальну (мал. 179, б; с. 208), другу екваторіальну (мал. 179, в; с. 208), екліптичну та ін.

Горизонтальна система координат пов'язана із Землею. У цій системі однією координатою є або висота світила над горизонтом h , або його зенітна відстань z (очевидно, $z = 90^\circ - h$), що відліковується вздовж вертикалу, іншою — азимут A , що відліковують від точки півдня S уздовж горизонту в бік заходу до вертикала світила.



Мал. 179. Системи небесних координат: а — горизонтальна;
б — перша екваторіальна; в — друга екваторіальна

В екваторіальній системі небесних координат координатою, аналогічною географічній широті на Землі, у цьому разі є **схилення світила**, δ — кут між площею небесного екватора й напрямком на об'єкт. Іншою координатою може бути: або годинний кут t — у першій екваторіальній системі координат (мал. 179, б), або пряме сходження (піднесення) α — у другій екваторіальній системі координат (мал. 179, в).

Годинний кут t — координата світила, що безперервно зростає, бо її відлік ведуть від моменту верхньої кульмінації світила в конкретному пункті Землі. Точкою відліку прямого сходження α світила є точка весняного рівнодення γ .

Висота h , зенітна відстань z , азимут A і часовий кут t світил постійно змінюються внаслідок обертання небесної сфери, бо відлічуються від точок, не пов'язаних із цим обертанням.

Схилення δ , полярна відстань p і пряме сходження α світил при обертанні небесної сфери не змінюються, але вони можуть змінюватися внаслідок рухів світил, не пов'язаних з добовим обертанням. Ці координати використовують для складання каталогів небесних об'єктів, наприклад зір. А другу екваторіальну систему координат наносять на мапи зоряного неба.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Назвіть характерні сузір'я зоряного неба.
2. Назвіть 5–7 найвідоміших небесних світил.
3. Чому під час спостереження зоряного неба здається, що всі світила лежать на внутрішній поверхні сфери?
4. Сформулюйте визначення небесної сфери.
5. Чому в астрономії існують різні системи небесних координат?
6. Покажіть точки, лінії та кола небесної сфери, що утворюють горизонтальну систему небесних координат.



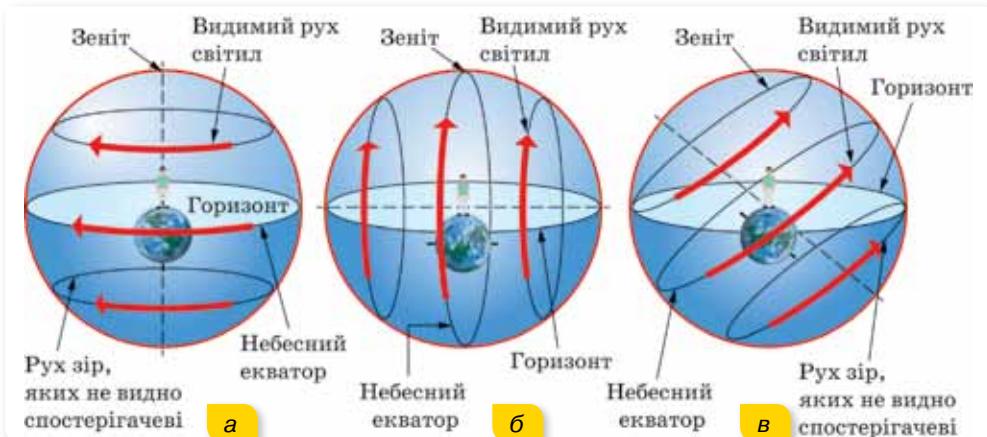
Вправа 33

- Визначте схилення δ світила, якщо в нижній кульмінації воно проходить через надир.
- Схилення світила дорівнює 60° , а географічна широта спостереження — 55° . Визначте висоту світила в момент верхньої кульмінації.
- Визначте географічну широту ϕ місця спостереження, якщо світило, перетинаючи меридіан, перебуває на висоті 35° над горизонтом, а схилення його в цей день дорівнює 15° . Спостерігач перебуває в Північній півкулі.
- Визначте висоту h_2 Сонця опівдні в місці з географічною широтою ϕ_2 , якщо відома висота h_1 Сонця опівдні в місці з широтою ϕ_1 .
- Азимут зорі становить 315° і висота — 10° . У якій частині неба вона перебуває?

§ 44

Видимі рухи світил на небесній сфері

Вигляд зоряного неба на різних широтах. Вигляд зоряного неба залежить від географічної широти пункту спостережень на земній поверхні. Для спостерігача на Північному полюсі Землі полюс світу збігається із зенітом і всі зорі Північної небесної півкулі не заходять, а зорі Південної небесної півкулі не сходять (мал. 180, а). Для спостерігача на екваторі (широта $\phi = 0^\circ$) полюс світу збігається з точкою півночі, а вісь світу лежить у площині горизонту. Небесні світила, рухаючись навколо осі світу, будуть сходити й заходити під прямим кутом до горизонту (мал. 180, б). Усі світила тут будуть такими, що сходять і заходять.



Мал. 180. Вигляд зоряного неба на різних широтах

У середніх широтах є зорі, що не заходять, і такі, що сходять і заходять (мал. 180, в).

Видимі рухи зір. Найпомітніші для людини зміни зоряного неба і спостережуваний рух Сонця спричинені обертанням Землі навколо осі та її рухом довкола Сонця. Перше зумовлює зміни вигляду неба впродовж доби, а друге — упродовж року. Пояснюючи й описуючи видимий рух

світил, ми маємо справу з відносністю руху в космічних масштабах. Нам видається, що зорі описують на небі кола (тим менші, що ближче зоря до полюса світу), центри яких розташовані на осі світу (мал. 181, а). Описуючи коло, кожна зоря двічі перетинає небесний меридіан — *кульмінус*.



а

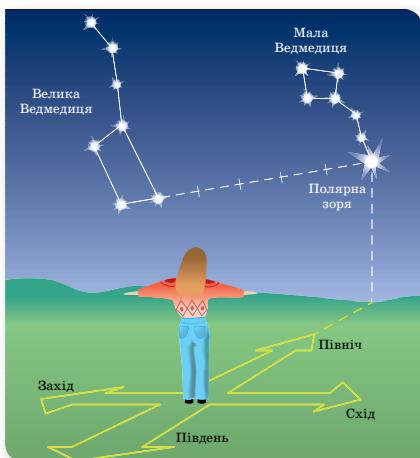


б

Мал. 181. Видиме обертання небесних світил: а — добове; б — річне (для сузір'я Великої Ведмедиці)

Обертом Землі навколо Сонця пояснюється зміна вигляду зоряного неба впродовж року. Є зорі, які навесні безпосередньо після заходу Сонця підіймаються над горизонтом на сході, через три місяці на цю ж пору доби

височіють у його південній частині. Ще через три місяці вони зникають у вечірній заграві на заході. Є сузір'я, які можна спостерігати над територією України весь рік, а є такі, що можна спостерігати тільки певної пори року. Так, сузір'я Оріон можна побачити в Україні лише взимку, а сузір'я Стрілець і Скорпіон — тільки влітку. Уесь рік на небі красуються 7 сузір'їв: Велика й Мала Ведмедиці, Кассіопея, Цефей, Дракон, Жираф і Рись. На малюнку 181, б зображене, як змінюється положення сузір'я Великої Ведмедиці впродовж року.



Мал. 182. Визначення сторін світу за Полярною зорею

Лише Полярна зоря практично нерухома й розташована над Північним полюсом. Тож за нею досить легко визначити сторони світу (мал. 182).

Видимий рух Сонця. Спостережуваний рух Сонця спричинений обертанням Землі навколо осі та її рухом довкола Сонця. Перше зумовлює «рух» Сонця впродовж доби, а друге — упродовж року, що разом створює картину видимого руху Сонця.

У своєму видимому річному русі небесною сфeroю Сонце проходить поміж різних зір, розташованих уздовж екліптики (мал. 183). Смуга неба уздовж екліптики, утворена 12 сузір'ями, і була названа у свій час Зодіаком (коло тварин), а сузір'я — зодіакальними.



Мал. 183. Екліптика — слід видимого руху Сонця

Видимий рух Сонця здійснюється із заходу на схід (назустріч добовому обертанню неба). За рік Сонце здійснює по небесній сфері один оберт (360°). Реально це Земля за рік обертається навколо Сонця й одночасно навколо своєї осі. При цьому вісь обертання Землі накиlena до площини орбіти Землі під кутом $23^{\circ} 26'$ і під час руху Землі навколо Сонця зберігається паралельною сама собі. Як наслідок, промені Сонця впродовж року падають на земну поверхню в одних і тих самих широтах під різними кутами. Це є причиною зміни пір року (мал. 184).

Про визначення часу з астрономічних спостережень, календарі та особливості річного руху Сонця на різних географічних широтах читайте в електронному додатку.



Мал. 184. Річний рух Землі



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦМІЮ

- Що є причиною добового руху небесних світил?
- Що є причиною зміни вигляду зоряного неба протягом календарного року?
- Поясніть, який вигляд має зоряне небо для спостерігача, що перебуває на екваторі Землі.
- Поясніть, як на практиці можна визначити географічну широту зі спостережень Полярної зорі.
- Де пізніше заходить Сонце — у Львові чи Харкові?
- Чому влітку набагато тепліше, ніж у зимку, хоча світить нам одне та ж Сонце?



Вправа 34

- Між якими географічними паралелями вертикально поставлений стовп двічі на рік не створює тіні?
- Як змінились би пори року, якби вісь добового обертання Землі була прямовисно напрямлена до площини екліптики?
- З'ясуйте, які сузір'я видно в овалі накладного круга рухомої карти зоряного неба о 21 год 20 вересня; 20 жовтня; 20 листопада. Простежте, куди зміщаються по небесній сфері ці сузір'я. Перевірте себе безпосередніми спостереженнями.
- Зоря зійшла в точці горизонту, що розташована між точками сходу й південного сходу. У якій частині горизонту вона зайде?
- Визначте висоту h_{\odot} Сонця в день літнього сонцестояння в момент верхньої кульмінації в м. Рівному ($\varphi = 50^{\circ}38'$).

§ 45

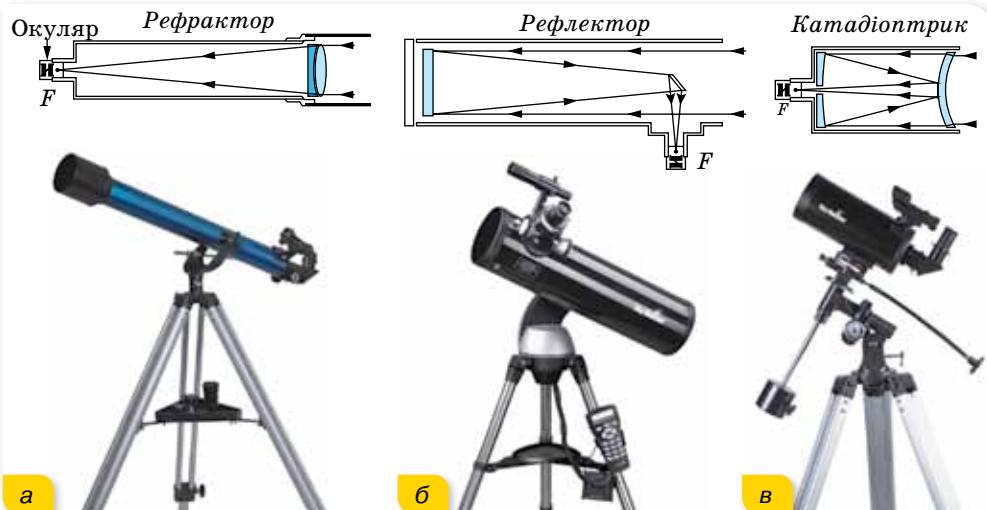
Методи та засоби фізичних й астрономічних досліджень

Як досліджують астрономи. Основними методами досліджень в астрономії є *спостереження та теорія*. Основою спостережень є вивчення випромінювання від небесних світил, за якими можна встановити основні характеристики світила (внутрішню будову, вік, температуру, хімічний склад, відстань до світила тощо). Теоретичні дослідження в астрономії ґрунтуються на законах теоретичної фізики, з використанням математичного апарату, комп’ютерного моделювання та обчислень.

Оптичні телескопи. За конструкцією телескопи можна поділити на три групи: рефрактори, або лінзові телескопи (лат. *refractus* — заломлення), рефлектори, або дзеркальні телескопи, (лат. *reflectio* — відбиваю) та дзеркально-лінзові телескопи, схеми яких представлено на малюнку 185.

Нові технології та досягнення науки відкривали «нове дихання» для наземних оптических телескопів (мал. 186).

До найбільших у світі оптических телескопів належать телескопи КЕСК I і КЕСК II в обсерваторії на Гаваях, США (побудовані в 1994 і 1996 рр., діаметр їх дзеркал — 10 м); великий канарський телескоп в обсерваторії Ла-Пальма, на висоті 2400 м над рівнем моря, на вершині вулкана Мучачос (діаметр дзеркала — 10,4 м).

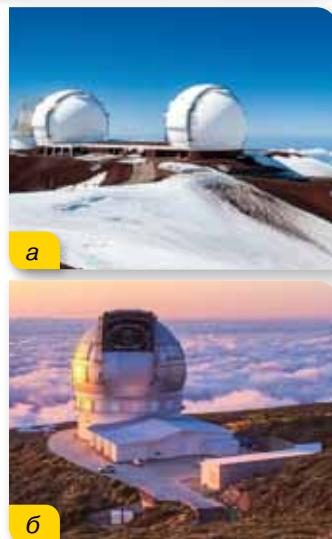


Мал. 185. Схеми та зовнішній вигляд телескопів:
а — рефрактора; б — рефлектора, в — катадіоптрика

Як виявилося, небесні об'єкти випромінюють електромагнітні хвилі різних діапазонів. На початку ХХ ст. в астрономії почали використовуватися фотопластинки, чутливі до різних хвиль. Потім були винайдені фотоелектронні помножувачі (ФЕП), електронно-оптичні перетворювачі (ЕОП). У сучасних телескопах як приймачі випромінювання використовують ПЗЗ-матриці (абревіатура від слів: прилад із зарядовим зв'язком, англ. *Charge-coupled device, CCD*) — це пристрій, у якому під дією випромінювання генерується електричний сигнал, з яким можна проводити певні маніпуляції, наприклад, оцифрувати його.

Радіотелескопи. Радіовипромінювання від космічних об'єктів фіксують за допомогою радіотелескопів та інших пристройів (мал. 128, с. 139). В Україні на основі радіотелескопа УТР-2 побудовано декаметрову систему радіоінтерферометра з наддовою базою (РЗНБ) УРАН.

Нині працює глобальна мережа РЗНБ, яка об'єднує великі телескопи Європи, США, Австралії та інших країн. Об'єктами дослідження в радіоастрономії є практично всі космічні тіла: від тіл Сонячної системи до Всесвіту в цілому, а також речовина й поля, що заповнюють космічний простір, — міжпланетне середовище, міжзоряні газ і пил, магнітні поля, космічні промені, реліктове випромінювання тощо.



Мал. 186. Сучасні оптичні телескопи:
а — КЕСК I і КЕСК II;
б — великий канарський телескоп



а



б

Мал. 187.
а — рентгенівський телескоп;
б — гамма-телескоп



Мал. 188.
Зовнішній вигляд уловлювача нейтрино «Супер-Каміоканде»

Прилади (детектори), що реєструють випромінювання небесних тіл у діапазоні високих енергій (гамма- та рентгенівського випромінювання), зовні не схожі на оптичні телескопи (мал. 187). Принцип дії гамма-детектора коротко можна описати так. Гамма-випромінювання, що надходить з космосу, потрапляє у приймач, наприклад, у пластину зі свинцю. Взаємодіючи з матеріалом пластини, гамма-кванти породжують електрони й позитрони, які далі на великій швидкості потрапляють у лічильник, де змушують світитися речовину. Це світіння дуже слабке, тому його посилюють і, зрештою, реєструють. Сучасні гамма-телескопи дозволяють реєструвати гамма-випромінювання Молочного Шляху, а також окремих дискретних джерел (наприклад, залишків спалахів наднових) або активних ділянок на Сонці під час сонячних спалахів тощо.

На малюнку 188 наведено фотографію нейтринного детектора. З огляду на те, що нейтрино — це частинка, яка дуже слабко реагує з речовиною, немає потреби виносити нейтринні телескопи в космос або будувати їх на поверхні Землі. Детектори нейтрино треба розміщувати якомога глибше під землею, водою чи льодом (на Південному полюсі). Товстий шар речовини зменшує кількість сторонніх випромінювань, що можуть зменшувати чутливість детектора.

У резервуар заливають тонни мінерально-го масла з домішками сцинтилятору (або надчистої води). При взаємодії нейтрино з атомами речовини утворюються електрони високої енергії, швидкість руху яких більша за швидкість світла в цьому середовищі. При русі таких електронів виникає свічення у вигляді конусу, яке фіксується фотопомножувачами, розташованими на стінках резервуару.

Ще один носій астрономічної інформації — *гравітаційні хвилі*, що виникають під час катастрофічних подій у Всесвіті — злиття масивних компактних об'єктів (нейтронних зір чи чорних дір у подвійних системах), зіткнення галактик тощо. Про їх реєстрацію прочитаєте у § 53.

Астрономічні обсерваторії — наукові установи. Наукову установу, у якій проводять астрономічні спостереження та наукові досліджен-

ня, зазвичай називають *астрономічною обсерваторією*. Більшість обсерваторій обладнано телескопами різних типів, призначеними для реєстрації електромагнітного випромінювання, причому кожна з них переважно спеціалізується на вивчені певного спектрального діапазону.

На сьогодні у світі функціонує кілька потужних астрономічних обсерваторій. Усі астрономічні обсерваторії, розміщені в містечках з хорошим астрокліматом, мають так звані штаб-квартири — адміністративні та наукові центри, що містяться в інших населених пунктах. Тобто на високогірних майданчиках з телескопами виконують лише астрономічні спостереження, а опрацювання отриманих даних — у таких центрах чи астрономічних установах (інститути, кафедри тощо), які діють у складі університетів.

В Україні класичні університети (Київський, Львівський, Харківський, Одеський) майже від дня свого заснування мають астрономічні обсерваторії та кафедри астрономії. Найбільшими в нашій країні є Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України (ГАО НАН України) (мал. 189) та Кримська астрофізична обсерваторія (КрАО).

Космічні телескопи та обсерваторії.

Після першого запуску космічного апарату, дослідження космосу із Землі дислокувалися і в космос. Важливою для астрономів подією був запуск 25 квітня 1990 р. на орбіту висотою 612 км космічного телескопа ім. Габбла. Нині в космосі працює ціла низка інфрачервоних, ультрафіолетових, рентгенівських, гамма-обсерваторій, які досліджують небо в усіх діапазонах електромагнітних хвиль (мал. 190).



Мал. 189. Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України



Мал. 190. Космічні телескопи та обсерваторії



ЗНАЮ, ВІДОМУ, РОЗЧУМО

1. Назвіть основні методи астрономічних досліджень.
2. Назвіть основні засоби та установки, за допомогою яких досліджують небесні об'єкти. Які фізичні принципи закладено в основу їх дії?
3. Поясніть, що таке астрономічна обсерваторія. Назвіть 1–2 найвідоміші астрономічні обсерваторії світу. Назвіть 1–2 астрономічні обсерваторії України.
4. Чому є потреба виносити телескопи за межі атмосфери Землі?

§ 46

Сонячна система

Об'єкти Сонячної системи. На сьогодні в Сонячній системі виділяють вісім великих планет (Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун), п'ять карликових планет, понад 100 їх супутників, пояс астероїдів і пояс Койпера, комети, метеороїди та космічний пил (див. задній форзац).

До 2006 р. астероїди ще називали «малими планетами». Після введення поняття карликової планети термін «малі планети» практично не вживається. Що взято за ознаки поділу на ці категорії? Це розміри, форма, домінуюча роль на орбіті.

Планета — будь-яке тіло на орбіті навколо Сонця, яке є достатньо масивним, щоб набути сферичної форми, але недостатньо масивне для початку термоядерного синтезу, і яке змогло очистити околиці своєї орбіти від планетозималей (допланетних тіл).

Планети поділяють на дві групи, що відрізняються масою, хімічним складом (це виявляється значною різницею їхньої густини), швидкістю обертання та кількістю супутників (табл. 9).

Таблиця 9

Основні параметри	Планети земної групи	Планети-гіганти
Середня густота	$\approx 5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\approx 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
Хімічний склад	Fe, Si, Al	H ₂ , He
Температура під хмарами	200–700 К	≈ 2000 К
Кількість супутників	3	163

Планети земної групи — це чотири найближчі до Сонця планети (Меркурій, Венера, Земля, Марс). Вони порівняно невеликі, складаються здебільшого із кам'янистої речовини великої густини та металів. Надра планет і деяких великих супутників (наприклад, Місяця) перебувають у розплавленому стані. Венера, Земля й Марс мають атмосфери, що складаються з газів, які виділилися з їхніх надр.

Планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун), на відміну від планет земної групи, не мають твердої поверхні, бо за хімічним складом (99 % Гідрогену та Гелію) і густиною ($\sim 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$) вони нагадують зорі (температура в їхніх надрах сягає 10 000 °C). Конвекція в їхніх надрах спричинює помітний потік тепла з надр, що може навіть перевищувати потік, одержуваний ними від Сонця.

Планети-гіганти обертаються навколо осі набагато швидше, ніж планети земної групи. При цьому кожна з них має помітно менший період

обертання екваторіальних зон у порівнянні з приполюсними. Такий закон обертання, типовий для всіх газоподібних тіл, спостерігається і в Сонця.

Юпітер і Сатурн та Уран і Нептун також досить чітко поділяються між собою на дві пари. Юпітер і Сатурн мають більші розміри, менші густини та менші періоди обертання, ніж Уран і Нептун. Чіткий поділ планет-гіантів на дві групи — це дуже важливий експериментальний факт, який вимагає обов'язкового пояснення сучасною теорією походження й еволюції Сонячної системи.

Карликова планета — небесне тіло, що обертається по орбіті навколо Сонця; яке є достатньо масивним, щоб під дією власних сил гравітації підтримувати близьку до кулястої форму; але яке не очистило простір своєї орбіти від планетозималей і не є супутником планети.

За цим визначенням у Сонячній системі є п'ять визнаних карликових планет: Церера, Плутон, Гаумеа, Макемаке та Ерида.

Шість із восьми планет і три карликові планети мають природні супутники. Усі чотири планети-гіганти, окрім великих супутників, мають безліч дрібних й оточені кільцями пилу та інших частинок.

Малі тіла Сонячної системи — інші об'єкти, що обертаються навколо Сонця.

У Сонячній системі є дві ділянки, заповнені малими тілами. Пояс астероїдів, що розташований між Марсом і Юпітером, за складом подібний до планет земної групи, оскільки складається переважно із силікатів і металів. Найбільшими об'єктами поясу астероїдів є: карликова планета Церера та астероїди Паллада і Веста.

За орбітою Нептуна розташований пояс Койпера, який перебуває на відстані близько 50 а. о.¹ від Сонця. Хоча пояс Койпера схожий на пояс астероїдів, він приблизно у 20 разів ширший і в 20–200 разів масивніший за нього. Як і пояс астероїдів, він складається в основному з малих тіл, тобто матеріалу, що залишився після формування Сонячної системи. На відміну від об'єктів поясу астероїдів, об'єкти поясу Койпера складаються головним чином із замерзлої води, аміаку та метану. Найбільшими об'єктами поясу Койпера є карликові планети: Плутон, Гаумеа та Макемаке.

Існує припущення, що джерелом комет з довгим періодом обертання є гіпотетична область Сонячної системи — хмара Оорта. Очікувана відстань від Сонця до зовнішньої межі хмари Оорта становить 50 000–100 000 а. о. Проте безпосередніми спостереженнями існування хмари Оорта поки що не підтверджено.

Об'єктами Сонячної системи є метеороїди та космічний пил, що обертаються навколо Сонця. А від самого Сонця поширюється потік плазми (сонячний вітер), який утворює геліосферу.

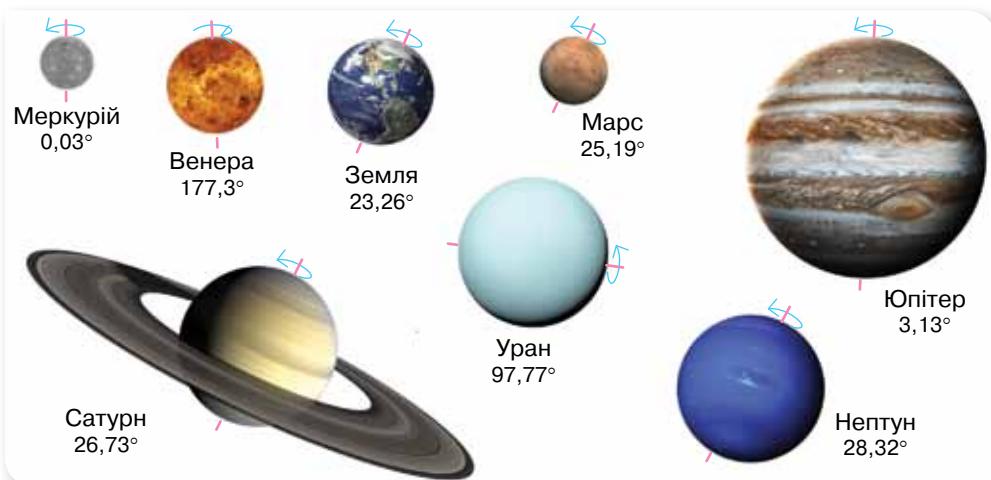
¹ 1 а. о. (астрономічна одиниця) — це відстань між центрами Землі та Сонця.

Характерні особливості будови Сонячної системи. Головна роль у Сонячній системі належить Сонцю. Його маса приблизно в 750 разів перевищує масу всіх інших тіл, що входять до системи. Гравітаційне тяжіння Сонця є визначальною силою для руху всіх тіл Сонячної системи.

Усі планети обертаються навколо Сонця в одному напрямку (у напрямку осьового обертання самого Сонця), майже круговими орбітами, площини яких мають невеликий нахил одна до одної. Площину земної орбіти (екліптику) вважають основною площиною для відліку нахилу орбіт планет та інших тіл, що обертаються навколо Сонця.

Завдяки майже круговій формі планетних орбіт і великим відстаням між ними виключена можливість зближень між планетами, під час яких вони могли б істотно змінювати свій рух унаслідок взаємного тяжіння. Це забезпечує тривале та стійке існування Сонячної системи.

Планети обертаються також навколо своїх осей, причому усіх планет, окрім Венери та Урана, обертання відбувається в прямому напрямку, тобто в тому самому напрямку, що і їх обертання навколо Сонця. Надзвичайно повільне обертання Венери відбувається у зворотному напрямку, а Уран обертається, ніби лежачи на боці (мал. 191).



Мал. 191. Напрямки обертання планет навколо своїх осей

Ці закономірності руху планет у поєднанні з поділом їх на дві групи за фізичними властивостями вказують на те, що Сонячна система не є випадковим скупченням космічних тіл, а утворилася в єдиному процесі. Тому вивчення кожного з тіл Сонячної системи робить внесок у висвітлення походження всієї Сонячної системи, а разом з тим — і в дослідження походження, еволюції та сучасної будови нашої Землі.

Гіпотези утворення Сонячної системи. Починаючи з XVIII ст., було сформульовано кілька різних гіпотез щодо походження нашої планетної системи (табл. 10).

Таблиця 10

Гіпотези утворення Сонячної системи

Автор, час	Суть гіпотези
Жорж Бюффон, XVIII ст.	Унаслідок удару комети об Сонце з нього було викинуто масу речовини, з якої утворилися всі інші тіла Сонячної системи.
Іммануїл Кант, XVIII ст.	Сонячна система (і Сонце також) утворилася з газопилової хмари, що оберталася. Тіла планетної системи сформувалися завдяки конденсації речовини хмари.
П'єр Лаплас, XVIII ст.	Сонце і планети утворилися зі сплющеної розжареної газопилової туманності шляхом її охолодження, стискання і фрагментації на окремі кільця. У її центральній частині виникло Сонце.
Джеймс Джинс, XX ст.	Масивна зоря, проходячи повз Сонце, вирвала з нього довгий сигароподібний струмінь розжареної речовини. Він розділився на три частини: перша, найближча до Сонця, повернулася на його поверхню; з другої утворилися планети й супутники, а третя — розсіялася в просторі.
Томас Чемберлін і Форест Мультон, XX ст.	Повз Сонце на відносно близькій відстані пройшла зоря, спричинивши викид сонячної речовини, яка швидко охолодається і затверділа, утворивши окремі згустки — планетезималі. З них завдяки акреції речовини утворилися планети та їхні супутники.
Отто Шмідт, XX ст.	Сонце захопило в Галактиці холодну газопилову хмару. Далі в процесі швидкого обертання відбулася її фрагментація на окремі частини та конденсація речовини в тіла Сонячної системи.
А. Гофмайстер і Р. Крісс, XXI ст.	Утворення Сонця і планет з об'ємної (а не дископодібної) газопилової хмари завдяки акреції речовини. Формування Сонця і планет відбувається практично одночасно. Гіпотеза пояснює кілька особливостей будови Сонячної системи, які не пояснюють інші гіпотези.



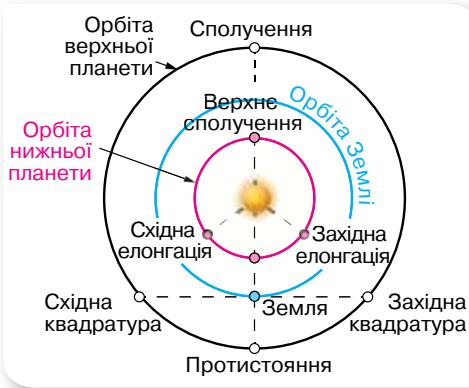
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Назвіть об'єкти, що входять до складу Сонячної системи. 2. За якою ознакою поділяють космічні об'єкти на планети, карликові планети? 3. Що належить до малих тіл Сонячної системи? 4. На які групи поділено планети Сонячної системи? 5. Назвіть 2–3 характерні особливості будови Сонячної системи.

§ 47

Видимі рухи планет. Закони Кеплера

Видимі рухи планет. Земля і планети обертаються навколо Сонця по майже коловим орбітам. Проте з погляду земного спостерігача видимий рух планет видається інакшим. І вирізняється для планет, які розташовані між Сонцем і Землею, їх називають *нижніми* (Меркурій, Венера),

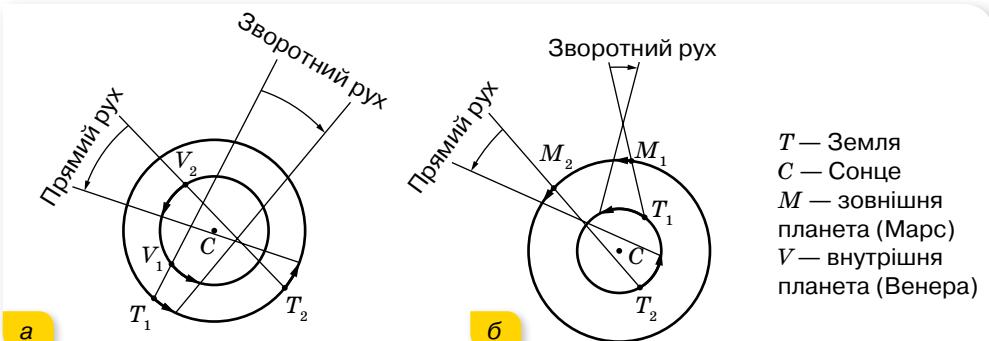


Мал. 192. Конфігурації планет

планети від Сонця. Найбільше віддалення Меркурія становить 28° , Венери — 48° . Тому нижні планети завжди видно поблизу Сонця або ранком у східній стороні неба, або ввечері — у західній. Через близькість Меркурія до Сонця побачити цю планету неозброєним оком вдається не завжди.

Венера відходить від Сонця на небі на більший кут і буває найяскравішою з усіх зір і планет. Після заходу Сонця вона довше залишається на небі в промінні вечірньої заграви, і навіть на цьому фоні її чітко видно. Так само добре видно Венеру і в промінні ранкової заграви. Легко зrozуміти, що в південній стороні неба серед ночі ані Меркурій, ані Венеру побачити не можна.

Петлеподібний рух планет. Ще в давнину астрономи спостерігали петлеподібний рух планет. Пояснюється така траекторія тим, що видимий рух планети є результатом накладання двох обертальних рухів: Землі й самої планети з різними швидкостями. Унаслідок цього у планет чергуються ділянки прямого і зворотного рухів (мал. 193).



Мал. 193. Ділянки прямого і зворотного рухів для:
а — внутрішніх планет; б — зовнішніх планет

Описуючи дійсний і видимий рухи планет, розрізняють *сидеричний* (T) і *синодичний* (S) періоди обертання (табл. 11).

та планет, що розташовані від Сонця за Землею, так званих *верхніх* планет (Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун).

Характерні взаємні положення планет відносно Землі й Сонця називають *конфігураціями* планет (мал. 192).

Легко бачити, що кут між напрямками від Землі на Сонце й на нижню планету ніколи не перевищує певну величину, залишаючись гострим. Цей граничний кут називають найбільшим віддаленням

Таблиця 11

Сидеричний період — час повного обертання планети навколо Сонця відносно зір	Синодичний період — інтервал часу між двома послідовними однайменними конфігураціями планети
Меркурій — 87,97 доби	Меркурій — 115,88 доби
Венера — 224,7 доби	Венера — 583,92 доби
Земля — 365,25 доби	
Марс — 1,88 року	Марс — 2,135 року
Юпітер — 11,86 року	Юпітер — 1,092 року
Сатурн — 29,46 року	Сатурн — 1,035 року
Уран — 84,02 року	Уран — 1,012 року
Нептун — 164,78 року	Нептун — 1,006 року

Між синодичним S і сидеричним T періодами обертання планети існує таке співвідношення: $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\oplus}} \pm \frac{1}{S}$, де $T_{\oplus} = 1$ рік = 365,25 доби — сидеричний період Землі. Знак «+» застосовують для Венери та Меркурія, які обертаються навколо Сонця швидше, ніж Земля. Для інших планет застосовують знак «-».

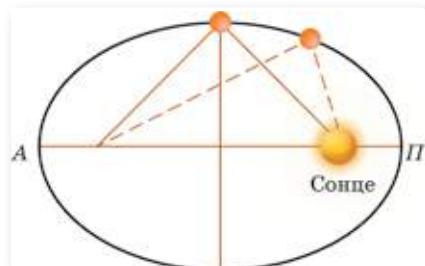
Закони Кеплера. Закономірності руху планет завжди привертали увагу людей. Саме вивчення їх руху й заклало основи створення теорії гравітації Ньютона, що згодом привело і до створення спеціальної та загальної теорій відносності Ейнштейна.

Заслуга відкриття законів руху планет належить видатному німецькому вченому Йоганну Кеплеру (1571–1630). Проте шлях до їх встановлення був не легким. Ще у II ст. н. е. Александрійський астроном Птоломей запропонував геоцентричну (*geo* — Земля) «систему світу», згідно з якою навколо Землі рухаються Місяць, Меркурій, Венера, Сонце, Марс, Юпітер, Сатурн, зорі. Хоча вже і в той час видимі спостереження за рухом Місяця, Сонця, зір, планет вказували на те, що цей рух набагато складніший, геоцентрична система проіснувала 14 століть. Сміливим ученим, який «зрушив Землю, зупинивши Сонце», був поляк Миколай Коперник (1473–1543). Він визначив відносні відстані (у радіусах орбіти Землі) кожної з планет від Сонця, а також їхні сидеричні (відносно зір) періоди обертання навколо Сонця. Це дало змогу Йогану Кеплеру встановити три закони руху планет.



Перший закон Кеплера. Усі планети обертаються навколо Сонця по еліпсах, а Сонце розташоване в одному з фокусів цих еліпсів.

Найближча до Сонця точка планетної орбіти називається перигелієм (P), найдальша — афелієм (A) (мал. 194).



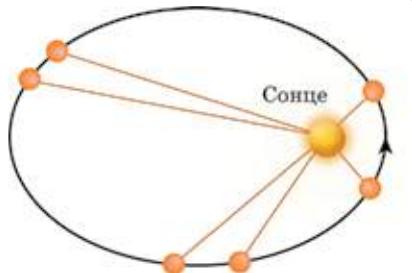
Мал. 194. Орбіта планети

Головний наслідок першого закону Кеплера: відстань між планетою та Сонцем не залишається сталою.

Другий закон Кеплера. Радіус-вектор планети за однакові проміжки часу описує однакові площин (мал. 195).

Головний наслідок другого закону Кеплера полягає в тому, що під час руху планети по орбіті з часом змінюється не тільки відстань планети від Сонця, а й її лінійна та кутова швидкості. Найбільшу швидкість планета має в перигелії, коли відстань до Сонця є найменшою, а найменшу швидкість — в афелії, коли відстань до Сонця є найбільшою. Другий закон Кеплера фактично визначає відомий фізичний закон збереження енергії: сума кінетичної та потенціальної енергії в замкненій системі є величиною сталою. Кінетична енергія визначається швидкістю планети, а потенціальна — відстанню між планетою та Сонцем, тому при наближенні до Сонця швидкість планети зростає.

На відміну від двох перших законів Кеплера, що стосуються властивостей орбітиожної окремо взятої планети, третій закон пов'язує властивості орбіт різних планет між собою.

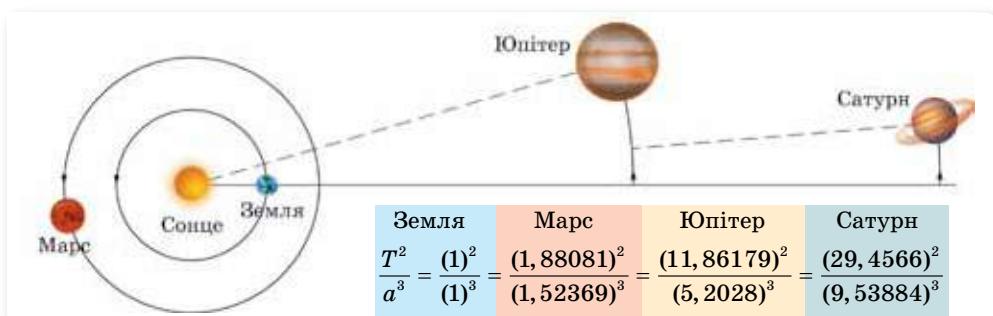


Мал. 195. До другого закону Кеплера

Третій закон Кеплера. Квадрати сидеричних періодів обертання планет навколо Сонця відносяться, як куби великих півосей їхніх орбіт:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \text{ де } T_1 \text{ і } T_2 — \text{ сидеричні періоди обертання будь-яких планет};$$

a_1 і a_2 — великі півосі орбіт цих планет (мал. 196).



Мал. 196. До третього закону Кеплера

Закони Кеплера справедливі не лише для планет, а й для їхніх супутників, як природних, так і штучних.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- За якими особливостями видимого руху планети поділяються на верхні та нижні?
- Що таке синодичний і сидеричний періоди обертання планети? **3.** Сформулюйте закони Кеплера. **4.** Поясніть, із чого випливає, що швидкість планети найбільша в перигелії й найменша в афелії.



Вправа 35

- Кутова відстань планети від Сонця виявилася такою, що дорівнює 60° . Яка це планета — нижня чи верхня?
- У якій конфігурації верхні планети можна спостерігати всю ніч? Коли вони сходять і кульмінують?
- Відстань Сатурна від Сонця в $9,54$ раза більша, ніж відстань від Землі до Сонця. Яка тривалість року на Сатурні?
- Знаючи, що $M_{\odot} = 332946 m_{\oplus}$, $T_{\oplus} = 13,379 T_{\odot}$ і $a_{\oplus} = 389,117 a_{\odot}$, де M , m — маси, T — сидеричні періоди, a — великий півосі відповідних тіл, визначте масу Місяця в одиницях маси Землі.
- З наближенням до перигелію орбітальна швидкість v планети зростає. Поясніть це явище, не звертаючись до законів Кеплера.

§ 48

Планети та їх супутники

Меркурій — найближча до Сонця планета.

Меркурій (мал. 197) є їй найменшою та найшвидшою планетою в Сонячній Системі. Меркурій рухається орбітою навколо Сонця із середньою швидкістю $47,36 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, що в

1,6 разу більше за швидкість Землі. Така швидкість і той факт, що Меркурій розміщений близче до Сонця, ніж Земля, приводять до того, що один рік на Меркурії (час його повного обертання навколо Сонця) становить усього 87,97 земних днів.

Наявність магнітного поля дає змогу пропустити, що Меркурій має досить велике металеве ядро, розміри якого можуть досягати $\frac{2}{3}$ діаметра планети. Вважається, що в ядрі зосереджено до 80 % усієї маси Меркурія, і цим визначається його найбільша середня густина серед усіх планет Сонячної системи.

Про супутника нашої планети читайте в електронному додатку.



Мал. 197. Меркурій

Поверхня планети вся поцяткована кратерами, утворення яких можна пояснити метеоритним бомбардуванням Меркурія, що відбувалося на перших етапах еволюції планети мільярди років тому.



Мал. 198. Венера

атмосферу, що складається на 96 % з молекул вуглекислого газу CO_2 . Атмосферний тиск біля поверхні Венери становить близько 9 МПа, а густота у 35 разів перевищує густину земної атмосфери. Кількість вуглекислого газу в атмосфері Венери в 400 тис. разів більша, ніж у земній атмосфері. Наявність в атмосфері Венери великої кількості вуглекислого газу спричиняє явище парникового ефекту, яке проявляється значно сильніше, ніж на Землі.



Мал. 199. Марс

У центрі Марса міститься ядро, діаметром близько 2968 км, яке складається здебільшого із заліза з вмістом сірки та перебуває в рідкому стані. Ядро оточене мантією із силікатів.

Марс має розріджену атмосферу. Це дас змогу вивчати його поверхню безпосередньо із Землі. Дві третини поверхні Марса займають світлі ділянки, які отримали назву материків, близько третини — темні ділянки, названі морями. Вони зберігають свою форму в часі, що дало змогу скласти точні карти поверхні.

Наразі немає наукових доказів існування життя на Марсі. Хоча припускають, що воно там може бути.

Венера. Венера (мал. 198) належить до планет, відомих людству з найдавніших часів. Оскільки Венеру можна спостерігати ввечері після заходу сонця чи вранці перед світанком, її ще називають «зоря вечірня» або «вранішня зоря». Венера — друга в Сонячній системі й найближча до Землі планета. Це третій за яскравістю об'єкт на небі; її бліск поступається лише бліску Сонця та Місяця. Венера обертається навколо своєї осі у зворотному напрямку до обертання навколо Сонця, на відміну від Землі та інших планет.

Дослідження цієї планети надзвичайно ускладнено через її дуже густу й могутню ат-

мосферу, що складається на 96 % з молекул вуглекислого газу CO_2 . Атмосферний тиск біля поверхні Венери становить близько 9 МПа, а густота у 35 разів перевищує густину земної атмосфери. Кількість вуглекислого газу в атмосфері Венери в 400 тис. разів більша, ніж у земній атмосфері. Наявність в атмосфері Венери великої кількості вуглекислого газу спричиняє явище парникового ефекту, яке проявляється значно сильніше, ніж на Землі.

Марс. Марс (мал. 199) за розташуванням — четверта від Сонця планета Сонячної системи й сьома за розміром і масою. Іноді Марс називають «червоною планетою» через червонуватий колір поверхні, спричинений наявністю оксиду заліза. На зоряному небі вона виглядає як цятка червоного кольору, що час від часу значно перевершує за блиском деякі зорі.

За тривалістю доби (24,6 год) і зміною пір року (вісь обертання нахиlena під кутом 65° до площини орбіти) Марс нагадує нашу планету.

У центрі Марса міститься ядро, діаметром близько 2968 км, яке складається здебіль-

шого із заліза з вмістом сірки та перебуває в рідкому стані. Ядро оточене мантією із силікатів.

Марс має розріджену атмосферу. Це дас змогу вивчати його поверхню безпосередньо із Землі. Дві третини поверхні Марса займають світлі ділянки, які отримали назву материків, близько третини — темні ділянки, названі морями. Вони зберігають свою форму в часі, що дало змогу скласти точні карти поверхні.

Наразі немає наукових доказів існування життя на Марсі. Хоча припускають, що воно там може бути.

Марс має два невеликі супутники — Фобос (27 км) і Деймос (15 км). Супутники обертаються у площині екватора планети по кругових орбітах радіусом 6 і 20 тис. км відповідно. За допомогою космічних апаратів установлено, що супутники мають неправильну форму й у своєму орбітальному положенні залишаються поверненими до планети завжди одним і тим самим боком.

Юпітер. Юпітер (мал. 200) — п'ята й найбільша планета Сонячної системи (більш ніж удвічі масивніша за всі інші планети разом узяті). Юпітер швидше за всі інші планети обертається навколо своєї осі.

За своїми характеристиками Юпітер займає проміжне положення між планетними й зоряними утвореннями, і його остаточне формування ще й досі не завершилося. Надра планети дають свій власний потік енергії, у середньому вдвічі більший, ніж Юпітер отримує від Сонця. На глибині 20 000 км водень переходить у металічний стан, і його фізичні властивості нагадують розплавлений метал, який добре проводить електричний струм. Такого агрегатного стану водню

(густота 4 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$) за тиску 106 атм) на Землі не існує. Завдяки електричному струмові, що генерується в цій металевій оболонці, виникає потужне магнітне поле, напруженість якого у 50 разів більша, ніж у земного. Це поле формує навколо планети протяжну магнітосферу з кількома радіаційними поясами.

Навіть у невеликий телескоп на Юпітері добре помітні свіtlі та темні смуги, що простягаються паралельно екватору. Існує ряд гіпотез, які пояснюють їхнє походження. Так, за однією з версій, смуги виникали в результаті явища конвекції в атмосфері планети-гіганта — за рахунок підігрівання з надр і, як наслідок, підняття одних шарів й охолодження та опускання донизу інших. Конвекційні потоки, що виносять внутрішнє тепло до поверхні, зовні проявляються у вигляді свіtlих зон і темних поясів. Верхній шар свіtlих хмар складається з кристалів аміаку, має температуру -107°C і тиск (порядку 1 атм), що відповідає висхідним потокам. Розташовані нижче темні хмари поясів складаються, ймовірно, із червоно-коричневих кристалів гідросульфіду амонію та мають вищу температуру. Ці структури є областями низхідних потоків. Зони та пояси мають різну швидкість руху в напрямку обертання Юпітера. На границях поясів і зон спостерігається сильна турбулентність, яка спричинює утворення численних вихрових структур. Найвідомішою є Велика червона пляма, що спостерігається на поверхні Юпітера останні 300 років.



Мал. 200. Юпітер



Мал. 201. Супутники Юпітера

вулканів, з жерл яких викидаються розжарені гази та магма.

Три інші Галілееві супутники — Європа, Ганімед і Каллісто — дуже схожі між собою: на їхній поверхні видно багато снігу та льоду. Ганімед є найбільшим супутником у Сонячній системі, який за розмірами навіть перевершує Меркурій.



Мал. 202. Сатурн

Є гіпотези щодо можливості існування життя у хмарах Юпітера, адже його атмосфера має всі компоненти, які були необхідні для появи життя на Землі. Деякі шари хмар є теплими й відносно комфортними для існування навіть земних мікроорганізмів.

У Юпітера до 2011 р. зареєстровано 63 супутники й тім'яні кільця. Чотири найбільші супутники: Io, Європа, Ганімед, Каллісто (мал. 201) відкрив ще Галілей за допомогою свого першого телескопа, тому їх називають Галілееві супутники. Io має найбільшу геологічну активність із усіх тіл Сонячної системи. На Io зареєстровано 8 постійно діючих

Сатурн. Сатурн (мал. 202) — друга за величиною й шоста від Сонця планета Сонячної системи. Ця планета-гігант дуже схожа на Юпітер. Це єдина планета Сонячної системи, чия середня густинна менша від густини води. Візитівкою Сатурна є відомі кільця, які видно в телескоп. Вони оперізують планету навколо екватора і складаються з безлічі крижаних часток розмірами від міліметра до декількох метрів.

Атмосфери Сатурна властиві такі самі ділянки смуг, як і атмосфери Юпітера, однак на Сатурні ці смуги виражені менш яскраво і є значно ширшими поблизу екватора. Жовтуватого кольору верхнім шарам атмосфери Сатурна надають снігові хмари з аміаку. На глибині 300 км від верхніх шарів розташовуються хмари, у яких при підвищенні температури сніг перетворюється на дощ.

Сатурн теж випромінює в космос більше енергії, ніж отримує від Сонця. Як і Юпітер, має магнітне поле, радіаційні пояси та є джерелом радіовипромінювання.

Сатурн має помітну систему кілець, що складаються з добільшого з частинок криги, меншої кількості важких елементів і пилу. Навколо планети обертається 62 відомі на 2013 р. супутники. Титан — найбільший серед них, це другий за розмірами супутник у Сонячній системі,

який перевершує за своїми розмірами Меркурій і має єдину серед супутників Сонячної системи густу атмосферу.

Уран. На відміну від інших газових гігантів — Сатурна та Юпітера, що складаються переважно з водню і гелію, у надрах Урана та схожого з ним Нептуна відсутній металевий водень. Проте в них є багато високотемпературних модифікацій льоду — тому фахівці виділили ці дві планети в окрему категорію «крижаних гігантів».

Уран рухається навколо Сонця майже коловою орбітою, середня відстань від Сонця — у 19 разів більша, ніж у Землі. Вісь планети лежить майже в площині орбіти, до того ж Уран, як і Венера, обертається у зворотному напрямку (зі сходу на захід). Вважають, що таке аномальне для Сонячної системи обертання спричинене зіткненням цих планет з великими космічними тілами на ранніх стадіях еволюції.

Так само як інші планети-гіганти, Уран (мал. 203) має кільця. За допомогою телескопів відкрито тільки 5 великих супутників: Аріель, Умбріель, Титанію, Оберон і Міранду, а всі інші вперше сфотографовано в 1986 р. за допомогою космічних апаратів.

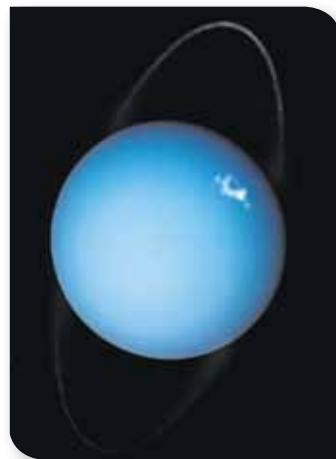
Нептун. Нептун — четверта за розміром і третя за масою планета (мал. 204). Її орбіта перетинається з орбітою Плутона та з орбітою комети Галлея.

За фізичними властивостями Нептун дуже схожий на Уран. Він теж належить до «крижаних планет». Планета має внутрішнє джерело енергії, бо випромінює в космос тепла майже втричі більше, ніж одержує його від Сонця.

Атмосфера Нептуна, подібно до атмосфери Юпітера й Сатурна, складається в основному з водню та гелію. Сліди метану в зовнішніх шарах атмосфери є причиною синього забарвлення планети.

У Нептуна виявлено 14 супутників та тонкі тьмяні кільця. За допомогою наземних телескопів було відкрито 2 супутники — Тритон і Нереїду, а інші сфотографували за допомогою космічних апаратів.

Тритон — єдиний великий супутник серед тіл Сонячної системи, який рухається навколо планети у зворотному напрямку в порівнянні з обертанням Нептуна навколо осі. Це свідчить, що Тритон, можливо, був колись захоплений гравітаційним полем Нептуна, і він по спіралі наближається до планети. Коли відстань між Нептуном і Тритоном зменшиться до 65 000 км (межа Роша), припливні сили зруйнують супутник, і навколо Нептуна утвориться величезне кільце, подібне до кілець Сатурна.



Мал. 203. Уран



Мал. 204. Нептун



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чому Меркурій не може утримувати стискувати атмосферу?
2. Які планети обертаються навколо осі у протилежному в порівнянні з Землею напрямку?
3. На яких планетах відбувається зміна пір року?
4. Венера розміщується далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
5. Які особливості в планет-гігантах?
6. Чим пояснюються виділення додаткової енергії з надр планет-гіганта?
7. Чому Юпітер можна вважати дуже схожим на зорю?

§ 49

Малі тіла Сонячної системи

Астероїди. До малих тіл належать астероїди, комети й метеороїди. Астероїди — тверді кам'янисті тіла, що рухаються, як і планети, по еліптичних орбітах навколо Сонця з періодом 3–6 років. Як і планети, астероїди у видимому діапазоні спектра світять відбитим сонячним світлом. Астероїдами вважають залишки протопланетного диска, з якого формувалася Сонячна система. Загальна їх кількість — більше 575 тис., а їх загальну масу оцінюють у $4,2 \cdot 10^{21}$ кг, що становить менше одного відсотка маси Землі. Орбіти більшості відомих астероїдів розташовані між орбітами Марса та Юпітера на відстані 2,2–3,6 а. о. від Сонця. Оскільки в цій частині Сонячної системи міститься кілька сотень тисяч таких об'єктів, їх назвали поясом астероїдів. Інколи цей пояс називають внутрішнім, або головним, маючи на увазі те, що за орбітою Нептуна простягається пояс Койпера, до якого належать об'єкти, що здебільшого також є малими тілами Сонячної системи. Проте тіла поясу Койпера в основному складаються з льоду.

Перший астероїд Цереру відкрито в 1801 р. (мал. 205). Інші найвідоміші астероїди: Паллада, Юнона, Веста, Ерос, Амур, Гіdalго, Ікар.



Мал. 205. Астероїди Церера та Веста в порівнянні з іншими об'єктами Сонячної системи

Найбільші астероїди

Номер і назва	Діаметр, км
1 Церера	960
2 Паллада	608
3 Веста	555
10 Гігія	450
31 Єфросинія	370
52 Європа	289
65 Кибела	309
451 Панієнція	276
511 Давида	323
704 Інтерамнія	350

З 1992 р. почалось відкриття нових об'єктів — астероїдів з поясу Койпера, або планетоїдів («планетоподібних»). На початок 2000 р. було відомо близько 120 планетоїдів з розмірами до 400 км. А найбільший серед них, відкритий 1996 р., має розмір близько 800 км, що становить третину діаметра Плутона. За попередніми оцінками, окрім великих планетоїдів, у поясі Койпера перебуває близько 200 млн невеликих тіл з розмірами 5–10 км і менше.

Комети. Певно, найефектнішими малими тілами Сонячної системи є *комети*. Найвідоміша поміж комет — комета Галлея — повертається до Сонця кожні 75,5 року. Її наближення до Сонця зареєстровано вже 30 разів, з них двічі — у ХХ ст. (у 1910 і 1986 рр.).

У комет розрізняють голову й хвіст, що виникає, коли комета наближається до Сонця. Голова комети складається з невеликого льодяного ядра з домішками твердих речовин і газової оболонки навколо нього, яке світить відбитим сонячним світлом. Ядра комет зазвичай мають діаметр у кілька кілометрів або в кілька десятків кілометрів, тоді як діаметр світних оболонок (іх називають *комою*) навколо них може сягати діаметра Сонця. Ці світні оболонки виникають під час наближення комети до Сонця. Ядро нагрівається, і його речовина сублімує — переходить із твердого в газоподібний стан. Це відбувається між орбітами Сатурна та Юпітера, але частіше — у ділянці поясу астероїдів між Юпітером і Марсом. Кометний хвіст формується під тиском світла й сонячного віtru — речовину коми відкидає у протилежний бік від Сонця. Іноді довжина хвоста комети сягає сотень мільйонів кілометрів. Водночас речовина, з якої складаються голова (за винятком ядра) і хвіст комети, надзвичайно розріджена.

Багато нового про комети астрономи дізналися завдяки космічним зондам, які досліджували ці тіла з близькою відстані.

Найдокладніші результати вдалося отримати завдяки місії «Розетта» до комети Чурюмова — Герасименко. У листопаді 2014 р. космічний апарат доставив на поверхню ядра комети спусковий модуль з обладнанням для хімічного аналізу, а сам до кінця вересня 2016 р. був її супутником (мал. 206).

Походження ядер комет поки що лишається таємницею. Але є гіпотеза, згідно з якою вони походять із хмарі Оорта, що перебуває на дальній околиці Сонячної системи.

Метеори та метеорити. Окрім астероїдів і комет у Сонячній системі є велика кількість тіл порівняно



а



б

Мал. 206. Місія «Розетта» до комети Чурюмова — Герасименко (а); Світлана Іванівна Герасименко та Клім Іванович Чурюмов (б)



Мал. 207. «Зоряний» дощ

невеликого розміру (до 50 м), які називають *метеороїдами*. Вони рухаються в міжпланетному просторі й час від часу проникають в атмосферу Землі. Частки космічного пилу ніколи не долітають до поверхні Землі, бо вони згорають і випаровуються в атмосфері на висоті кількох десятків кілометрів. Світлове явище, яке спостерігається під час згорання метеороїда в ат-

мосфері Землі, називають *метеором*. Інколи спостерігається незвичайне небесне явище **«зоряний» дощ** (мал. 207). Це явище пояснюється тим, що від комети залишаються тверді силікатні пилинки, які продовжують рух по орбіті та перетворюються в метеороїдні потоки. Коли Земля перетинає орбіту такого метеороїдного потоку, на небі можна побачити тисячі метеорів.

Якщо в атмосферу Землі вривається метеороїд, маса якого становить десятки чи сотні грамів, то він спричиняє явище **боліда**.

Метеороїд, що не «згорів» в атмосфері й досяг поверхні Землі, називають *метеоритом*. Щорічно на Землю випадає до 500 000 тонн космічної речовини. Але порівняно з масою Землі це мізерна величина, яка не відіграє істотної ролі у збільшенні її маси.

Залежно від маси метеороїдного тіла та швидкості, з якою воно входить в атмосферу, внаслідок його падіння може утворитися кратер. Хоча термін «кратер» зазвичай використовують для позначення структури вулканічного походження, в астрономії його застосовують для позначення западин, утворених унаслідок падіння космічних тіл.

На Землі є метеоритні кратери різних розмірів — від кількох метрів до сотень кілометрів у діаметрі. Їх називають *астроблемами*.

До найвідоміших земних метеоритних кратерів належить Аризонський кратер діаметром 1200 м. Його відкрили в 1891 р., а утворився він приблизно 50 000 років тому.

Є такі кратери й на території України. Наприклад, Бовтиський кратер у Кіровоградській області — 26 км у діаметрі й 600 м завглибшки віком 65 млн років; Оболонський кратер у Полтавській області — 20 км у діаметрі й віком у майже 170 млн років; Іллінецька западина у Вінницькій області — 7 км у діаметрі й віком близько 400 млн років.

Проблема астероїдної небезпеки. Ймовірність того, що астероїд великих розмірів (або комета) зіткнеться із Землею, мала, проте вона є. Щоб мінімізувати загрозу катастрофи, яку несе падіння крупного небесного тіла на поверхню планети, нині активно діють системи спостереження за потенційно небезпечними космічними об'єктами. Найвідоміші з них — LINEAR, Space Watch і LONEOS. Розташовані вони на базі великих університетів в Аризоні, на Гавайських островах, у штаті Нью-Мексико та в інших місцях. Кілька обсерваторій з телескопами діаметром від одного до чотирьох метрів повсякчас сканують небесну сферу. Причому

діють вони в автоматичному режимі, що не вимагає присутності людини. Знімки за допомогою комп'ютера відразу порівнюють з уже наявними, і якщо в тій чи іншій ділянці з'являється нова світна цятка, що зміщується відносно зір, то, швидше за все, це і є астероїд. За низкою знімків комп'ютер обчислює його траекторію та розміри.

Значний внесок у дослідження астероїдної небезпеки зробили українські астрономи Києва (Віталій Григорович Кручиненко, Клім Іванович Чурюмов), Криму (Микола Степанович Черних) і Харкова (Дмитро Федорович Лупішко).



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Що світиться далі від Землі — комети чи метеори?
2. Чим відрізняється форма більшості кометних орбіт від орбіт планетних?
3. Як направлений хвіст комети щодо Сонця? Поясніть.
4. Чому метеороїдні потоки пов'язують з певними кометами?

§ 50

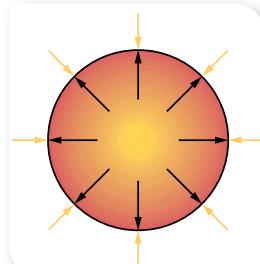
Найближча зоря — Сонце

Зоря як небесне тіло. Залежно від об'єму, маси, температури, віку та інших параметрів розрізняють різні типи зір. Попри велике їхнє розмаїття, загальні властивості в більшості з них однакові.

Зоря — це багатошарова розжарена плазмо-газова куля, утримувана в стані рівноваги силами власної гравітації і внутрішнім тиском, у надрах якої відбуваються (або колись відбувались) реакції термоядерного синтезу.

У надрах зір за температури в десятки мільйонів кельвінів ($10\text{--}40$ млн K) і величезній густині панує тиск у мільярди атмосфер. За таких умов зоря може перебувати у стаціонарному стані лише завдяки тому, що в кожному її прошарку внутрішній тиск газу врівноважений дією сил гравітації. Такий стан називають *гідростатичною рівновагою* (мал. 208).

Для стаціонарного стану зорі властива не лише гідростатична (механічна) рівновага, а й теплова. Теплова рівновага означає, що всю енергію, яка утворюється в надрах зорі, вона випромінює своєю поверхнею в навколоїшній простір. Якщо тепловідведення перевищить виробіток енергії, зоря почне стискатися, а отже, й розігріватися (поясніть, чому саме нагріватися, а не охолоджуватися). Це прискорить термоядерні реакції в надрах, виробіток енергії збільшиться й тепловий баланс відновиться знову. У цьому сенсі зорі є стійкими системами, що саморегулюються.



Мал. 208.
Гідростатична
рівновага зорі

Фізичні параметри Сонця. Вивчаючи Сонце — найближчу до нас, і тому найдоступнішу для дослідження, зорю, можна дізнатися багато чого про зорі загалом. Розглянемо фізичні параметри Сонця (табл. 13), порівнюючи їх із земними.

Таблиця 13

Маса M_{\odot}	$\approx 2 \cdot 10^{30}$ кг	$\approx 330\,000$ земних мас і в 750 разів перевищує масу всіх інших планет, разом узятих
Радіус (екваторіальний), R_{\odot}	700 000 км	≈ 109 земних радіусів
Середня густина, ρ_{\odot}	$1409 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	0,255 густини Землі
Площа поверхні	$6,1 \cdot 10^{18} \text{ м}^2$	12 000 земних площ
Температура поверхні	$\approx 6000 \text{ К}$	
Температура ядра	$\approx 15 \cdot 10^6 \text{ К}$	
Світність, L_{\odot}	$3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$	

Зверніть увагу на середню густину Сонця — $1409 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Таке середнє значення обумовлено тим, що в зовнішніх шарах Сонця густина в мільйони разів менша, а в центрі — у 100 раз більша, ніж середня густина. Речовина Сонця дуже йонізована, тобто атоми втратили свої зовнішні електрони й разом з ними стали вільними частинками йонізованого газу — плазми.

Хімічний склад Сонця визначено з аналізу його спектра. Перші ґрунтовні дослідження спектра Сонця здійснивав у 1815 р. Йозеф фон Фраунгофер, який описав у спектрі Сонця понад 570 окремих темних ліній.



а



б

Мал. 209.
а — Й. Фраунгофер;
б — Г. Кірхгоф
і Р. Бунзен

У 1857 р. німецькі фізики Густав Кірхгоф і Роберт Бунзен (мал. 209) порівняли довжини хвиль фраунгоферових ліній з досліджуваними в земних лабораторіях довжинами хвиль, що їх випромінюють (і поглинають) відомі хімічні елементи. Так було ототожнено близько десяти елементів. А справжнім триумфом астрофізики стало відкриття нового хімічного елемента — Гелію.

Найбільшу частку зоряної речовини становлять два елементи: Гідроген ($\sim 78\%$ від маси і $\sim 92\%$ від об'єму) і Гелій ($\sim 25\%$ від маси і $\sim 7\%$ від об'єму). Серед інших елементів, що виявлені на Сонці, — це Ферум, Нікель, Оксиген, Нітроген, Сіліциум, сірка, Магній, Карбон, неон, кальцій та хром. Загалом у спектрі Сонця виявлено лінії 72 хімічних елементів, визначено їхню відносну кількість.

Світність Сонця визначає потужність його випромінювання, тобто кількість енергії, що випромінює поверхня Сонця в усіх напрямках за одиницю часу:

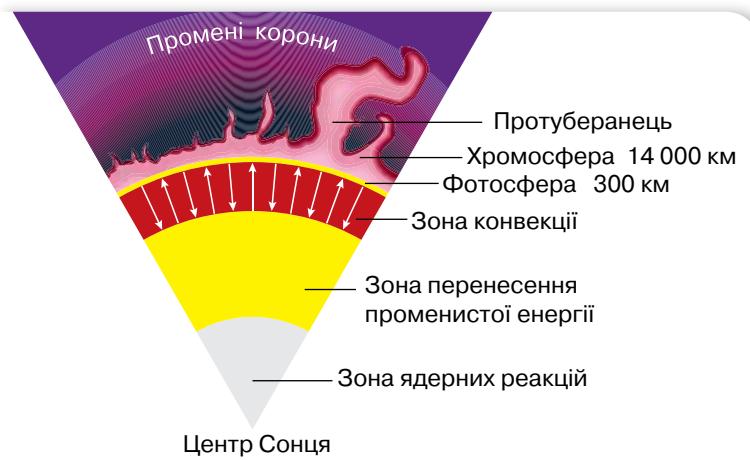
$L_{\odot} = 4\pi R^2 \cdot q$, де $q = 1,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ — *сонячна стала*, що показує, яку енергію отримує 1 м² поверхні Землі за 1 с за умови, що Сонце розташоване в зеніті, R — відстань від Землі до Сонця. За підрахунками, світність Сонця — близько $3,85 \cdot 10^{26}$ Вт.

Сонце випромінює ультрафіолетові, видимі, інфрачервоні, рентгенівські та гамма-хвилі, які вже через 8 хв досягають орбіти Землі, віддаленої від Сонця на $1,5 \cdot 10^8$ км. Хоча верхніх шарів атмосфери Землі дістается лише мала частка сонячної енергії, але її достатньо, щоб десятки тисяч разів забезпечити наявну енергетичну потребу всієї земної кулі. Із Сонця весь час витікає плазма зі швидкістю 300–400 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$ — сонячний вітер, який теж досягає Землі.

Як бачимо, наше світило випромінює просто колосальну кількість світлової і теплової енергії. І питання про те, наскільки вистачить «пального» турбувало вчених. За підрахунками вчених, кожну секунду Сонце випромінює стільки енергії, що це в 100 000 разів більше енергії, яку людство виробило за всю свою історію. Водночас маса Сонця щосекунди зменшується на 4,26 млн тонн! Цифри приголомшливи. Але якщо порівняти це значення із загальною масою Сонця, то все не так страшно, оскільки загальна маса Сонця — $2 \cdot 10^{30}$ кг, і цього вистачить на мільярди років.

Як кожне тіло, що складається з газів, наша зоря обертається нерівномірно: швидше у близьких до екватора зонах (період обертання становить 25 діб), ніж у полярних (майже 34 доби). Швидкість обертання на екваторі — приблизно 7000 $\frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Будова Сонця. Залежно від температури та характеру процесів, що визначаються цією температурою, у будові Сонця умовно виділяють області з різним фізичним станом речовини та розподілом енергії (мал. 210).



Мал. 210. Будова Сонця

У центрі світила міститься *ядро*, розмір якого становить 0,3 від радіуса Сонця, і в якому відбуваються ланцюгові термоядерні реакції. На відстані до 0,7–0,8 радіуса Сонця ядро оточене зоною променістого переносу енергії і далі — конвективною зоною. Над ними лежить зовнішня оболонка Сонця — *атмосфера*. Атмосфера, своєю чергою, поділяється на фотосферу, хромосферу й корону.

Хоча ядро Сонця прямо побачити не можна, фізичні умови в ньому відомі досить точно. У центрі Сонця густина газу становить близько

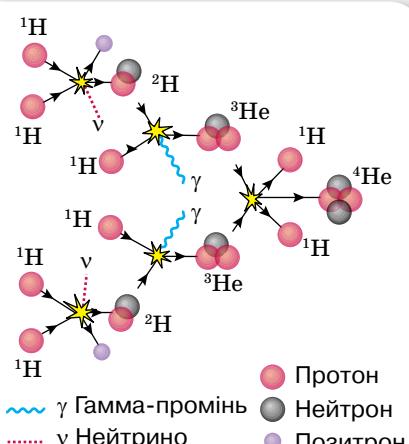
$1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ (у 13 разів більша, ніж у свинцю!), тиск — близько $2 \cdot 10^{18}$ Па, а температура — близько 15 000 000 К. За такої температури й тиску ядра атомів водню (протони) мають дуже великі швидкості (сотні кілометрів за секунду) і можуть стикатися одне з одним, незважаючи на дію електростатичної сили відштовхування (мал. 211). Та не кожна зустріч двох протонів стає початком ядерної реакції. Протягом мільярдів років протон може раз у раз зіштовхуватися з іншими протонами, але так і не вступить у ядерні перетворення. Але якщо в момент тісного зближення двох протонів відбудеться ще одна, дуже малоямовірна подія — розпад протона на нейtron, позитрон і нейтрин, то протон з нейтроном об'єднається в ядро атома важкого водню — дейтерію: ${}_1^1p + {}_1^1p = {}_1^2H + {}_0^1e + \nu$.

Дейтерій у надрах Сонця довго існувати не може. Уже через кілька секунд, зіштовхнувшись з іще одним протоном, дейтерій приєднує його до себе, випромінює гамма-квант і стає ядром ізотопу гелію, у якого два протони зв'язані не з двома нейtronами, як у звичайного гелію, а тільки з одним: ${}_1^1p + {}_1^2H = {}_2^3He + \gamma$.

Раз у кілька мільйонів років ядра легкого гелію наближаються одне до одного так близько, що можуть об'єднатися в ядро звичайного гелію, «відпустивши на волю» два протони: ${}_2^3He + {}_2^3He = {}_2^4He + 2{}_1^1p$.

Незважаючи на тривалість цих процесів, завдяки величезній кількості протонів, щосекунди на випромінювання перетворюється 4,26 млн тонн речовини ($3,6 \cdot 10^{38}$ протонів). (На Землі ланцюгові термоядерні реакції з виділенням великої енергії здійснювались протягом дуже короткого часу (10^{-7} – 10^{-6} секунди) під час вибухів водневих бомб.)

Ядро — єдине місце на Сонці, де енергія й тепло утворюються від термоядерної реакції, інша частина зорі нагріта цією енергією. Уся енергія ядра послідовно проходить крізь шари, аж до фотосфери, з якої випромінюється у вигляді сонячного світла. Без перешкод покидають Сонце нейтрини, бо



Мал. 211. Схеми ядерних реакцій у ядрі Сонця

мають дивовижну здатність: проникнути крізь величезну товщу речовини й не вступити у взаємодію з жодним атомом.

У зоні *променистої рівноваги*, або зоні *радіації*, що оточує ядро на відстані від $\frac{1}{3}$ до $\frac{2}{3}$ радіуса Сонця, енергія поширюється шляхом послідовного поглинання і наступного перевипромінювання речовиною квантів електромагнітної енергії. При цьому замість одного поглинутого гамма-кванта великої енергії атоми, як правило, послідовно випромінюють кілька квантів з меншою енергією. Як наслідок, жорсткі γ -кванти дробляться на менш енергійні, і врешті-решт до фотосфери дістаються кванти видимого і теплового випромінювання, які зрештою вивільняються назовні. У цілому процес передачі енергії від центральних областей до фотосфери дуже повільний і триває мільйони років.

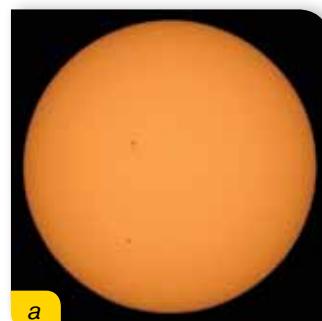
У *конвективній* зоні енергія передається вже не випромінюванням, а за допомогою конвекції, тобто завдяки перемішуванню гіантських бурхливих областей газу, які трохи відрізняються одна від одної температурою та густиноро.

Відразу за конвективною зоною починається *сонячна атмосфера*, що простягається далеко за межі видимого диска Сонця. Нижній шар атмосфери (фотосфера) містить тонкий шар газів, який ми сприймаємо як поверхню Сонця (мал. 212, а).

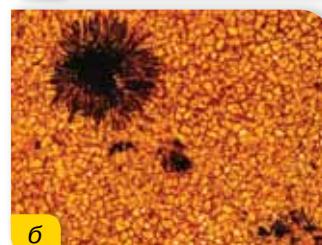
Температура фотосфери зменшується з висотою, і той її шар, випромінювання якого сприймає людське око як поверхню Сонця, має температуру близько 6000 К.

Розглядаючи фотографії Сонця, можна побачити гранули й плями на його поверхні (мал. 212, б). Дослідження показали, що гранули — це потоки гарячого газу, які підіймаються догори, тоді як у темних, дещо прохолодніших місцях, газ опускається донизу. Гранули свідчать про те, що під фотосферою в глибших шарах Сонця перенесення енергії до поверхні здійснюється завдяки конвекції. Сонячні *плями* — це темні утворення на Сонці, вони є областями виходу у фотосферу сильних магнітних полів. Супутниками плям є *факели* — це місця, де на поверхню Сонця піdnімається гарячіша речовина, ніж в інших ділянках фотосфери.

Над фотосферою лежить *хромосфера* (у перекладі з грец. — «забарвлена сфера»), шар розрідженої газу, який можна побачити під час повного сонячного затемнення у вигляді вузького жовто-червоного кільця. Товщина хромосфери становить 12–15 тис. км, а температура зростає від 4500 К на межі з фотосферою до 100 000 К у її верхніх шарах. Сонячна хромосфера дуже



а



б

Мал. 212.
Фотосфера (а),
гранули та сонячні
плями (б)

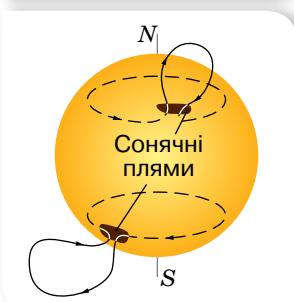


а



б

Мал. 213.
Хромосфера
(а) і корона (б) Сонця



Мал. 214. Активні
утворення на Сонці

неоднорідна: у ній є довгасті, схожі на язики полум'я утворення — так звані *спікули*. Тому хромосфера нагадує траву, що горить (мал. 213, а). Через спікули відбувається обмін речовини хромосфери з *короною*, яка лежить вище.

Корона має сріблясто-блій колір і простягається на висоту в кілька сонячних радіусів, поступово переходячи в міжпланетний простір (мал. 213, б). Температура її на межі з хромосферою становить 100 000 К, а далі зростає до 2 000 000 К. Яскравість корони в мільйон разів менша, ніж яскравість фотосфери, і не перевищує яскравості Місяця уповні, а тому спостерігається лише під час повної фази сонячного затемнення або за допомогою спеціальних телескопів. Корона не має чітких обрисів, її неправильна форма змінюється з часом.

Будова корони неоднорідна: у ній можна спостерігати промені, дуги, окрім згущення речовини. Сонячна корона є джерелом безупинного потоку плазми, що рухається аж до околиць нашої планетної системи. Цей потік, який складається з великої кількості протонів, електронів, ядер гелію та інших хімічних елементів, називають *сонячним вітром*. Поблизу Землі швидкість сонячного вітру становить близько $400 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, а густина — 10 частинок на 1 см^3 , тобто в мільярд мільярдів разів менша від густини земної атмосфери. Поширюючись далеко за орбіти планет-гігантів, сонячний вітер утворює велетенську *геліосферу*. Зона, де частинки через взаємодію з розрідженим міжзоряним газом втрачають свою кінетичну енергію і сонячний вітер припиняється, називається *геліопаузою*, і саме нею зазвичай позначають межу сфері впливу Сонця.

В атмосфері Сонця, крім плям і грануляцій, часто можна спостерігати *факели* (ділянки з підвищеною температурою), *протуберанці* (пасма сонячної речовини), а також *спалахи* — доволі швидкі й енергетично дуже потужні явища. Усі ці утворення належать до проявів активності Сонця, що змінюється циклічно.

Поняття сонячної активності та її прояви в атмосфері Сонця. Плями, факели, протуберанці, сонячні спалахи називають *активними*

утвореннями на Сонці (мал. 214), а їх появу й розвиток — проявами сонячної активності. Багаторічні спостереження Сонця показали, що в середньому впродовж кожних майже 11-ти років кількість проявів сонячної активності поступово збільшується, а потім поступово спадає. Цей період назвали *11-річним циклом сонячної активності*.

Поява цих утворень має спільну причину — різку зміну в деяких ділянках на поверхні Сонці напруженості магнітного поля.

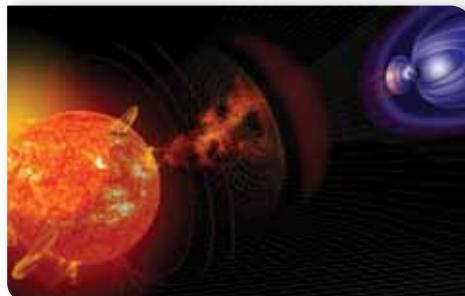
На краю сонячного диска у спеціальний телескоп можна побачити протуберанці (від лат. «здуваюся») — гігантські вогняні струмені, що виникають у сонячній короні або проникають у неї із хромосфери.

Одним з найцікавіших і найпотужніших проявів сонячної активності є спалахи — нестационарні процеси, що охоплюють усі шари атмосфери Сонця. Найслабкіші спалахи тривають 5–10 хв, а найпотужніші бушують упродовж кількох годин. Під час хромосферного спалаху на Сонці відбувається викид у міжпланетний простір підсиленого потоку заряджених частинок, які вже через 10–12 год досягають орбіти Землі. Під тиском магнітного поля, створеного таким потоком, на денному боці Землі магнітосфера стискається ще більше, унаслідок чого напруженість геомагнітного поля збільшується. Потім магнітосфера розширяється, і напруженість геомагнітного поля зменшується. Так виникає одноразовий сплеск геомагнітного збурення, який триває близько години.

Якщо спалах на Сонці потужний і тривалий, то й підсиленій потік частинок у сонячному вітрі довго не вичерпується. У магнітосферу один за одним надходять імпульси, напруженість геомагнітного поля багато разів різко й неправильно змінюється, і, замість одного короткого сплеску, відбувається їх серія. Таку швидку й неправильну зміну напруженості магнітного поля Землі називають *магнітною бурею* (мал. 215). Магнітні бурі можуть тривати від кількох годин до кількох діб. Найчастіше вони трапляються поблизу максимуму 11-річного циклу сонячної активності.

Уплів сонячної активності відчуває техносфера й біосфера планети, і часом вона спричиняє дуже негативні наслідки. Зазнають аварій космічні апарати; виходить з ладу електроніка авіалайнерів, що здійснюють польоти поблизу полюсів; перегорають електротрансформатори, що приводить до аварій у лініях електропередач; посилюється корозія металевих труб магістральних нафтогазоводів тощо.

Потужні сонячні спалахи та спричинені ними магнітні бурі можуть змінювати циркуляцію земної тропосфери, а також впливати на поведінку живих організмів, зокрема людини. Медична статистика показує, що в дні, коли відбуваються сильні спалахи, у півтора-два рази збільшується



Мал. 215. Утворення магнітної бурі

кількість загострень захворювань серцево-судинної системи (інфаркт міокарда, інсульт тощо) і кількість смертей із цієї причини.

Щоб завчасно передбачити вплив сонячної активності на біосферу та соціально-економічну систему, необхідно проводити моделювання «космічної погоди», яке неможливе без моніторингу глобальних змін Сонця на тривалих відрізках часу. Феномен «космічної погоди» нині визнано одним з важливих завдань, що вимагає докладного вивчення.

ВІДВІДОВУЮЧІСТЬ ? ВІДВІДОВУЮЧІСТЬ

1. «Боротьба» яких сил забезпечує тривале існування зорі? Що б відбулося, якби на Сонці раптово зникла сила тяжіння?
2. Про що свідчить наявність гранул у фотосфері Сонця?
3. Що зумовлює термоядерні реакції, які відбуваються в ядрі Сонця?
4. Назвіть відмінності в перенесенні енергії від ядра до поверхні Сонця в різних його шарах.
5. Що є причиною сонячної активності?
6. Як сонячна активність впливає на біосферу? Наведіть приклади.



Експериментуємо

Спостереження за Сонцем онлайн

<http://spacegid.com/izobrazheniya-solntsa-so-sputnika-soho.html>



Вправа 36

1. Перед вами спектр, подібний до сонячного, тільки всі лінії поглинання замінено лініями випромінювання й відсутній неперервний спектр. Якій частині атмосфери Сонця належить цей спектр?
2. З яких шарів атмосфери Сонця в основному надходять до Землі радіовипромінювання та переважна кількість рентгенівського випромінювання? Чому саме звідти?
3. Визначте прискорення вільного падіння тіл на поверхні Сонця. Обертання Сонця навколо осі до уваги не беріть.
4. На скільки тонн щосекундно зменшується маса Сонця, якщо у світовий простір випромінюється $E = 3,88 \cdot 10^{26}$ Дж світлової енергії?
5. Яка маса водню в ядрі Сонця повинна перетворюватись на гелій, щоб забезпечити сталу світність $L_{\odot} = 3,88 \cdot 10^{26}$ Вт? Вважайте, що під час утворення одного ядра гелію виділяється $4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж.

§ 51

Зорі. Еволюція зір

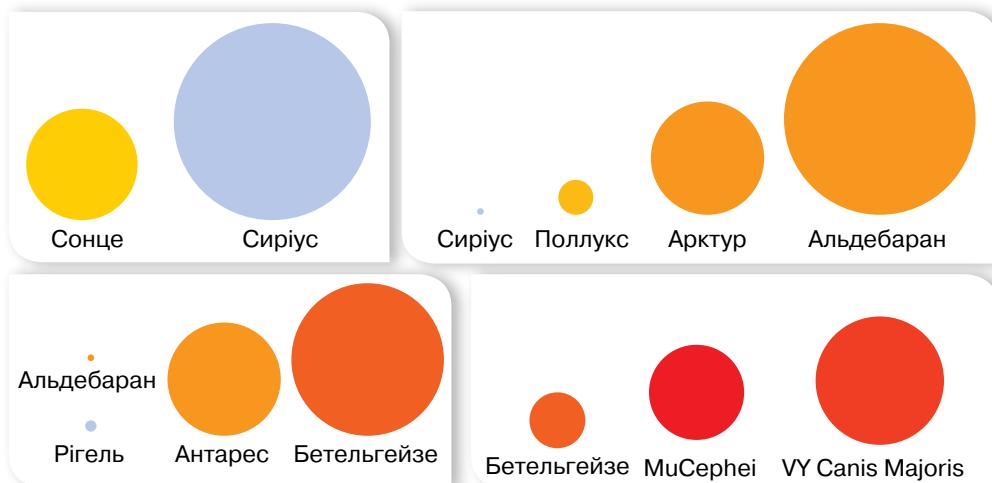
Фізичні параметри зір. Різноманітність світу зір тривалий час залишалася прихованою від людського ока. Розвиток фізики й конструювання заснованих на фізичних основах астрономічних пристрій допомогли усвідомити, наскільки зорі різні.

Основними фізичними параметрами зорі, які можуть бути тим чи тим способом визначені зі спостережень, є потужність її випромінювання (в астрономії світність), маса, радіус, температура і хімічний склад. Перелічені параметри змінюються в дуже широких межах. Для зручності параметри зір порівнюють з відповідними параметрами Сонця. Так, маси відомих зір лежать у межах від 0,01–0,03 до 60–70 сонячних мас. У своїх розмірах зорі демонструють ще більше розмаїття. За розмірами розрізняють: зорі-надгіганти (мають найбільший розмір), зорі-гіганти, зорі-карлики (Сонце — це зоря-карлик), нейтронні зорі (зовсім малі). На малюнку 216 відображені розміри деяких зір у порівнянні.

Якби зоря Бетельгейзе опинилася на місці Сонця, то зайняла б собою частину Сонячної системи аж до орбіти Марса.

Ще ширший діапазон значень світності зір. У порівнянні із Сонцем світність деяких яскравих зір має такі значення:

Сонце	1
Альтаір	10
Сіріус	23
Вега	54
Арктур	102
Капелла	150
Полярна	17 600
Бетельгейзе	25 000
Рігель	70 000



Мал. 216. Розміри деяких зір у порівнянні

За кольором і температурою зорі поділяють на:

- блакитні (найбільш рожарені з температурою більше 30 000 К);
- білі (з температурою 10 000 К);
- жовті (з температурою 6000 К, Сонце — жовта зоря);
- червоні (найхолодніші з температурою близько 3000 К).

За розташуванням: поодинокі та кратні — зв'язані силами тяжіння (подвійні, потрійні тощо).

За часом свого розвитку: давні та молоді.

За фізичними властивостями речовини в надрах: нормальні зорі, білі карлики й нейтронні зорі.

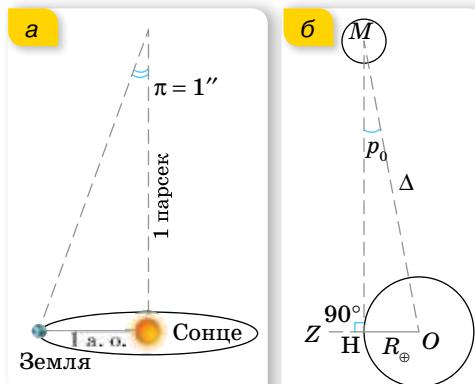
Усі параметри зорі між собою пов'язані. Упродовж свого існування зоря змінює масу, розміри, світність, температуру. Простежити життя зорі від початку до кінця неможливо, проте можна спостерігати багато зір, що перебувають на певних стадіях розвитку, і за цими даними відновити еволюційний шлях кожної зорі.

На початку XVII ст. німецький астроном Йоганн Байєр (1572–1625) позначив у своєму зоряному атласі зорі в сузір'ях літерами грецької абетки α (альфа), β (бета), γ (гамма) і т. д. в міру зменшення їхньої яскравості.

Неозброєним оком помітно, що видима яскравість зір різна: одні зорі дуже яскраві й чітко виділяються поміж інших, інші — менш яскраві, а є й дуже слабкі, ледве помітні неозброєним оком. Більшість зір доступна для спостережень лише в телескоп. Як окомірну оцінку світової енергії, яка надходить від світил, взято спеціальну зоряну шкалу величин, започатковану давньогрецьким астрономом Гіппархом (II ст. до н. е.). Гіппарх поділив усі видимі зорі за яскравістю на 6 своєрідних класів — 6 зоряних величин. Найяскравіші зорі Гіппарх назвав зорями 1-ї величини, менш яскраві — зорями 2-ї величини і т.д., а ледве помітні — 6-ї величини. Тобто, що яскравіший об'єкт, то менша його *видима зоряна величина*. Дуже яскраві небесні світила мають від'ємну зоряну величину.

Слово «видима» в назві означає лише те, що зоряна величина спостерігається із Землі, і не дає інформації про справжню потужність джерела світла (наприклад, близька свічка краще освітлює текст, ніж далека електрична лампа). Тому для характеристики зір введено *абсолютну зоряну величину*.

Абсолютна зоряна величина — це така зоряна величина, яку б мала зоря, якби перебувала від нас на відстані 10 парсек (32,6 світового року).



Мал. 217. Паралакси: а — річний;
б — горизонтальний

У визначенні цього поняття застосовують термін парсек (пк) та світловий рік (св. р.). З'ясуємо, що це таке і як визначають відстані до небесних світил в астрономії. Розглянемо малюнок 217, а. Кут π , під яким із зорі було б видно середній радіус земної орбіти, за умови, що напрямок на зорю перпендикулярний до радіуса, називається *річним паралаксом зорі*. Термін парсек (пк) утворено від слів «паралакс» і «секунда». Це така відстань, з якої середній радіус земної орбіти видно під кутом $1''$ (секунда дуги).

1 пк $\approx 3,26$ св. роки $\approx 206\,265$ а.о. $\approx 3,08 \cdot 10^{16}$ м;
 1 а. о. (астрономічна одиниця) = 149 597 870,7 км —
 це середня відстань від Землі до Сонця;
 1 св. р. (світловий рік) $\approx 9,46 \cdot 10^{15}$ м —
 це відстань, яку проходить світло за один рік,
 поширюючись зі швидкістю 300 000 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Відстань найближчої до Землі зорі Проксима (що так і перекладається з грецької як «найближча») становить 1,3 пк $\approx 4,2$ св. р. Проте українці зможуть її побачити, подорожуючи до Південної півкулі Землі. З яскравих зір, які можна бачити з території України, найближче до нас перебуває зоря Сіріус (α Великого Пса), відстань до якої 2,6 пк $\approx 8,8$ св. р.

Послідовність зір за видимою зоряною величиною має такий вигляд:
 Сонце, Сіріус, Арктур, Вега, Капелла, Альтаїр.

А якби всі ці зорі розташувалися на відстані 10 пк, то послідовність найяскравіших уже була б іншою:

Капелла, Арктур, Вега, Сіріус, Альтаїр, Сонце.

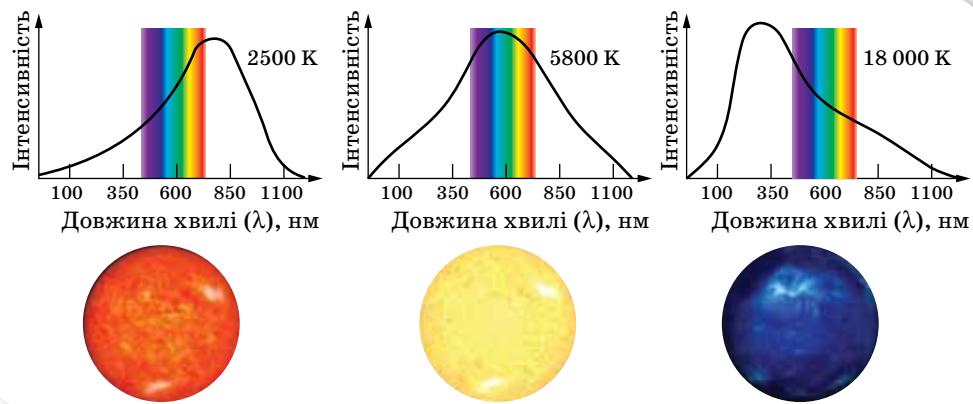
Відстані до планет Сонячної системи були визначені в XVII ст. завдяки вимірюванню *горизонтального паралаксу* (мал. 217, б). *Горизонтальний паралакс* — це кут між напрямком на світило (що лежить на горизонті) з якої-небудь точки земної поверхні й напрямком із центра Землі.

Спектральна класифікація зір. Головним джерелом інформації про зорю є її випромінювання. За допомогою спектрального аналізу можна встановити якісний і кількісний хімічний склад світила, його температуру, наявність магнітного поля, швидкість руху та багато іншого. Сонце та інші зорі оточені газовими атмосферами. Неперервний спектр їхньої видимої поверхні перетинається темними лініями поглинання, які виникають, коли проміння проходить через атмосферу зір та атмосферу Землі. Виявилося, що за хімічним складом зорі практично однакові: 73 % — Гідроген, 25 % — Гелій, 2 % — інші елементи.

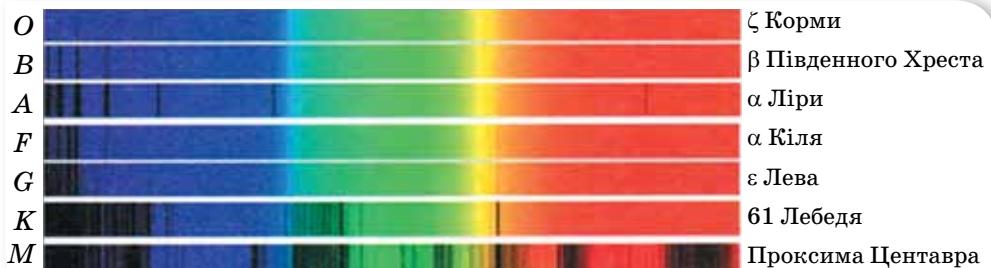
Отже, зорі мають різну *ефективну температуру*¹ й різний візуальний колір (мал. 218, с. 242: від яскраво-блакитного (гарячі зорі з $T_{\text{eff}} = 60\,000\text{--}50\,000$ К) до темно-червоного (холодні зорі з $T_{\text{eff}} = 3000\text{--}1000$ К)). Є окремий клас зір — коричневі карлики, які випромінюють енергію тільки в інфрачервоній частині спектра.

Застосовуючи спектрограф, потік випромінювання від зорі розкладають у спектр і вимірюють за допомогою ПЗЗ матриці. Коли спектри було розміщено в ряд, то два сусідні спектри були мало відмінні між собою, але на кінцях ряду вони були разюче несхожими (мал. 219, с. 242). Потім цей ряд було поділено на сім окремих класів і кожний з них позначено літерою в такій послідовності: O—B—A—F—G—K—M (англійське прислів'я: «Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me» — «О, будь гарною дівчиною, поцілуй мене»).

¹ Ефективна температура, T_{eff} — це температура абсолютно чорного тіла, яке створює потік випромінювання на різних довжинах хвиль такої само потужності, що й реальне тіло.



Мал. 218. Інтенсивність випромінювання зір з різною температурою



Мал. 219. Поділ спектрів на класи

Такий поділ спектрів на класи з невеликими змінами й доповненнями використовують дотепер і називають гарвардською класифікацією зоряних спектрів (табл. 14).

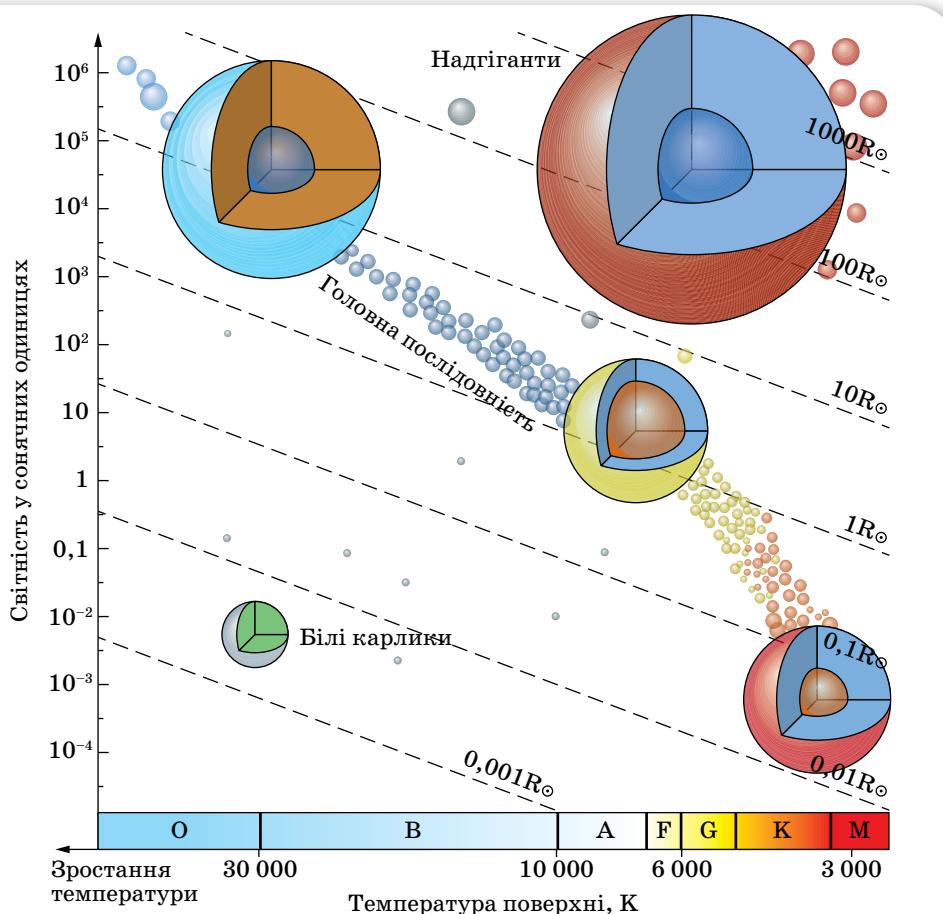
Таблиця 14

Клас	Температура, К	Дійсний колір	Видимий колір
O	30 000–60 000	блакитний	блакитний
B	10 000–30 000	біло-блакитний	біло-блакитний і білий
A	7500–10 000	білий	білий
F	6000–7500	жовто-білий	білий
G	5000–6000	жовтий	жовтий
K	3500–5000	помаранчевий	жовто-помаранчевий
M	2000–3500	червоний	помаранчево-червоний

Кожний спектральний клас поділяється на 10 підкласів: A0, A1... A9.

Після того, як астрономи змогли фіксувати випромінювання зір в інфрачервоній частині спектра й виявили нові типи зір, для їх класифікації після класу M були введені клас L для коричневих і клас T для холодних червоних карликів. А також клас Y — для субкоричневих карликів.

Діаграма спектр-світність. На початку ХХ ст. данський астроном Ейнар Герцшprung і дещо пізніше — американський астрофізик Генрі Рассел виявили залежність між виглядом спектра і світністю зір. Цю залежність вони ілюстрували графіком, на якому вздовж вертикальної осі відкладають світність зорі (абсолютну зоряну величину), а вздовж горизонтальної — спектральний клас (температуру). Так з'явилася діаграма (мал. 220), що показує зв'язок двох зоряних параметрів — спектрального класу (температури) і світності (абсолютної зоряні величини). Її називають *діаграмою спектр-світність* або (на честь обох учених) діаграмою Герцшprungа — Рассела (Γ — P).



Мал. 220. Діаграма спектр-світність

Значна частина зір на діаграмі Г — Р розміщена вздовж діагональної смуги, що простягається з верхнього лівого кута в нижній правий. Її названо *головною послідовністю*, а зорі, що лежать на цій смузі, — зорями головної послідовності. Зазначимо, наше Сонце також є зорею головної послідовності та перебуває в тій її частині, що відповідає жовтим зорям.

Поза головною послідовністю праворуч угорі на діаграмі Г — Р розміщена зона червоних гігантів і надгігантів. Це холодні зорі (приблизно 3000°K), що мають набагато більші світноті, ніж зорі з такою ж температурою на головній послідовності. Пояснення цієї розбіжності просте: ці зорі мають більші світноті через більші розміри. Analogічно, відмінністю в розмірах можна пояснити значно меншу, ніж у зір головної послідовності, світність групи гарячих білих зір, що є в лівому нижньому куті на тій же діаграмі. Це — білі карлики, дуже компактні зорі з великою густиною й розмірами в десятки чи то й сотні разів меншими від розмірів Сонця. Речовина *білих карликів* і ядер деяких червоних гігантів і надгігантів має таку велику густину, що газ, з якого вона складається, перебуває у «виродженому» стані. За такого стану ядра атомів в одиниці об'єму запаковані набагато щільніше, ніж у звичайному газі, а тиск газу не залежить від його температури. Тобто тиск залишається високим, навіть якщо температура газу спадає до нуля. Середня густина білих карликів набагато вища за густину нормальних зір — у середньому $10^6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

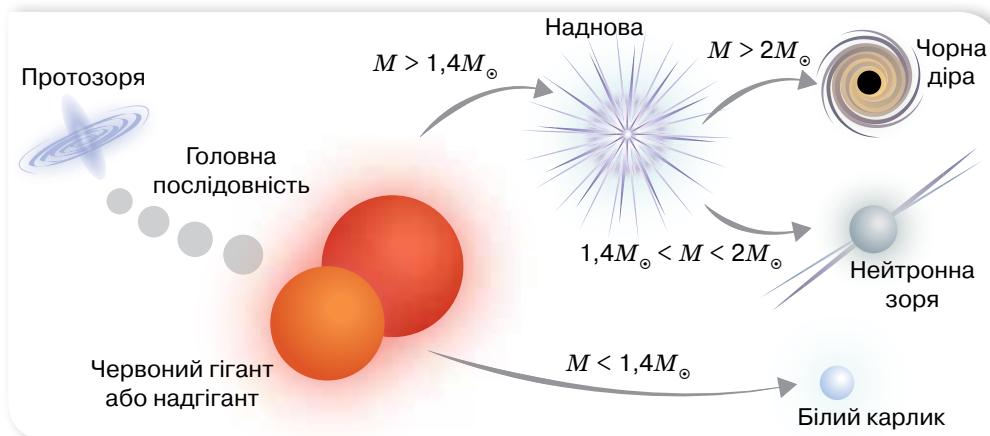
Діаграма спектр-світність, демонструючи залежність зоряних параметрів (температура на поверхні та в ядрі, світність, тривалість життя) від початкової маси зорі, дає можливість простежити весь її життєвий шлях від «народження» до «смерті».

Зоря починає своє існування як холодна, розріджена *туманність міжзоряного газу*. Потім ця туманність стискається унаслідок тяжіння і поступово набуває форму кулі. Коли температура в центрі досягає близько 10 млн К, починаються термоядерні реакції, і стиснення припиняється, бо від цих реакцій утворюється тиск, який перешкоджає подальшому стисненню зорі. Протозоря стає повноцінною зорею. Якщо маса протозорі була в кілька разів більша, ніж маса Сонця, то під час гравітаційного стиснення утворюються гарячі зорі спектральних класів O і B. Протозорі з такою початковою масою, як маса Сонця, під час гравітаційного стиснення нагріваються до температури 6000 К — зорі класів F і G. Протозорі з масою в кілька разів меншою, ніж сонячна, можуть перетворитися тільки на червоних карликів. Найменша маса, яка необхідна для початку термоядерних реакцій у надрах зорі, дорівнює майже 0,08 маси Сонця. Об'єкти меншої маси ніколи на зорі не перетворяться — вони будуть випромінювати енергію тільки в інфрачервоній частині спектра.

Утворенні зорі «посідають» свої місця на головній послідовності. Настає найстабільніша фаза їх життя, коли в ядрах зір відбувається синтез атомів гелію з атомів водню. Ця фаза становить майже 90 % тривалості життя будь-якої зорі.

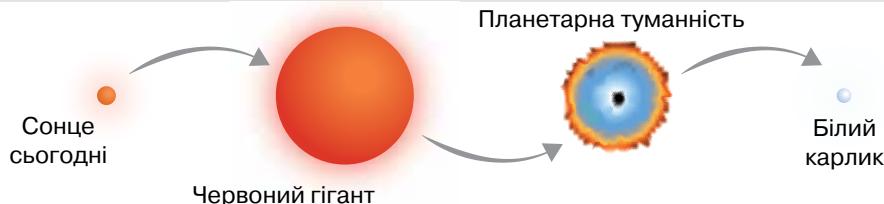
За цих умов зоря не змінює своїх параметрів, бо інтенсивне випромінювання енергії з поверхні компенсується джерелом енергії в надрах — термоядерними реакціями. Такий процес триває доти, поки половина Гідрогену в ядрі не перетвориться на Гелій, і тоді інтенсивність термоядерних реакцій може зменшитися. Тривалість стаціонарної фази в житті зорі залежить знову-таки від її маси. Розрахунки показують, що такі зорі, як Сонце, у стані рівноваги світять не менш ніж 10 млрд років. Більш масивні зорі, у надрах яких термоядерні реакції протікають інтенсивніше, в рівновазі світять 100 млн років, а найдовше «мерехтять» маленькі червоні карлики — їхній вік може перевершувати 10^{11} років.

Кінцеві стадії еволюції зір. Кінцевий етап еволюції зорі також залежить від її маси. Якщо маса зорі у стані гравітаційної рівноваги більша половини, але менша двох мас Сонця, то після того як Гідроген у ядрі здебільшого «вигорить», термоядерні реакції перестають виробляти достатню кількість енергії, зоря знову починає стискатися, поки ядро знову не розігріється до температури, за якої починається вже інша термоядерна реакція — Гелій перетворюється на Карбон з виділенням більшої кількості енергії. Світність зорі зростає в десятки разів, вона розширяється («розпухає») — стає червоним гігантом. Коли ж закінчиться і Гелій, зорі просто «скидають» частину своєї маси (так формуються планетарні туманності), і на цьому етапі все залежить від маси зорі (мал. 221).



Мал. 221. Кінцеві стадії еволюції зір

Якщо маса зорі незначна (не перевищує 1,4 маси Сонця), то її ядро не спроможне втримати роздуту оболонку, яка поступово віддаляється, утворюючи *планетарну туманність*. Після остаточного розсіювання оболонки залишається лише гаряче ядро зорі — *білий карлик*. Ядерних джерел енергії в зорі немає, і вона ще дуже довго світить, повільно охолоджуючись. Такий шлях розвитку буде в Сонця: орієнтовно через 8 млрд років, пройшовши стадію червоного гіганта, воно стане білим карликом (мал. 222).



Мал. 222. Еволюція Сонця

Про інші об'єкти Всесвіту читайте в електронному додатку.



Еволюція масивних зір проходить бурхливіше. Наприкінці свого існування така зоря може вибухнути **надновою**, а її ядро, різко стиснувшись, стане **нейтронною** зорею або **чорною дірою**.

Після спалаху зорі всі планети, які оберталися навколо неї, випаровуються і перетворюються на газопилову туманність, з якої в майбутньому може утворитися нове покоління зір.

Тобто у Всесвіті спостерігається своєрідний кругообіг речовини: зорі — спалах зір — туманність — і знову народження молодих зір.

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які зорі мають найвищу температуру на поверхні й до якого спектрального класу вони належать?
2. Зв'язок яких параметрів зорі показує діаграма Герцшпрunga — Рассела?
3. Коли параметри зорі залишаються сталими?
4. Скільки часу може світити Сонце у стані рівноваги?
5. Як гинуть зорі великої маси?

§ 52

Галактики

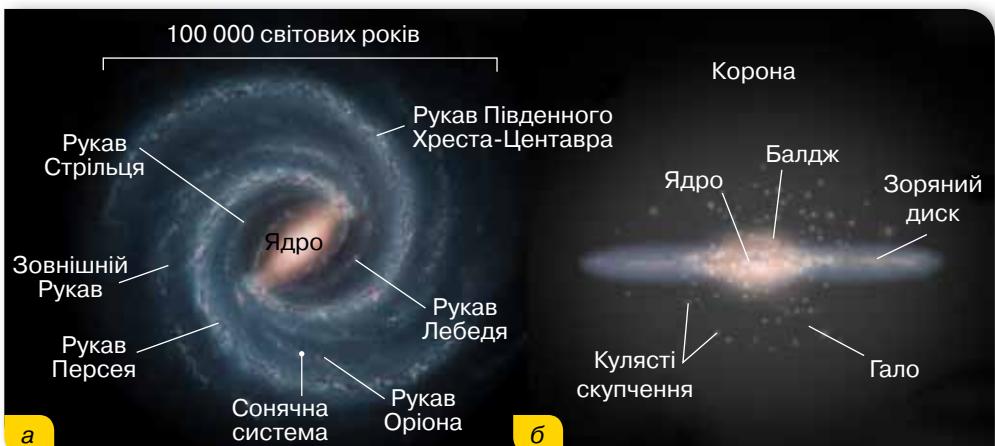
Будова й структура Галактики. У Всесвіті є мільярди галактик, серед яких і наша Галактика (пишеться з великої літери, щоб уникнути плутанини з іншими). Наша Галактика — це величезна система, у якій обертаються навколо центра 400 млрд зір. Неозброєним оком на всій небесній сфері ми бачимо приблизно 6000 зір і проекцію частини Галактики — Молочний Шлях. В Україні її ще називали Чумацький Шлях, Стан, Божа Дорога (мал. 223). Назву Молочний Шлях використовують і як власну назву нашої галактики.

Вивчати будову Галактики не просто, адже ми перебуваємо всередині цієї зоряної системи. Однак, незважаючи на такі ускладнення, астрономи, починаючи від перших робіт Вільяма Гершеля у XVIII ст., знайшли методи, скориставшись якими, змогли розкрити багато її таємниць.



Мал. 223. Наша Галактика: а — жовтим колом обведено зорі Галактики, які ми бачимо; б — Чумацький Шлях; в — В. Гершель

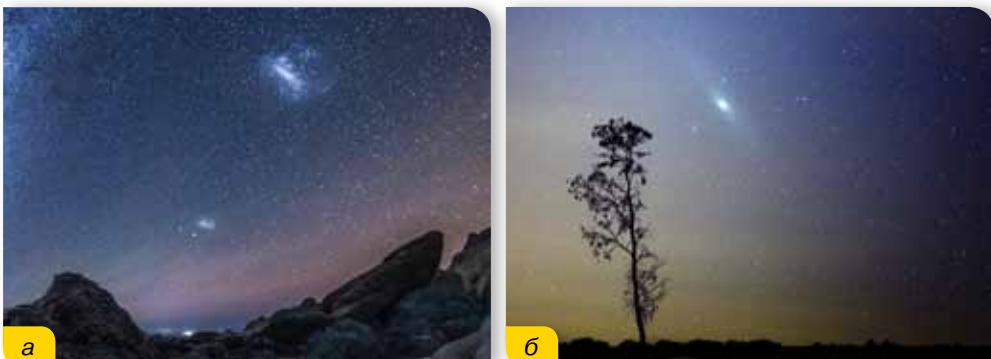
Якби ми могли подивитися на Галактику ззовні, наприклад, «згори», то побачили б, що вона нагадує плоский диск, у якому чітко простежуються спіральні рукави (мал. 224, а).



Мал. 224. Будова Галактики: а — «вигляд згори»; б — «вигляд збоку»

За сучасними уявленнями, Галактика має дві складові — плоску та сферичну (мал. 224, б). *Сферична підсистема* — *гало* (чи *корона*) — складається з газу та дуже старих неяскравих зір. Радіус гало, згідно з даними космічного телескопа ім. Габбл, дорівнює 300 000 св. р. Об'єкти гало концентруються до центра Галактики, утворюючи балдж (з англійської *bulge* — *опуклість*). *Плоска підсистема* — *диск* — складається переважно з газу, молодих зір та їхніх скупчень. Вік більшості об'єктів диска — до 1 млрд років. Діаметр диска — 100 000 св. р., а товщина центральної зони — 10 000 св. р. У центрі Галактики розташоване *ядро* діаметром 4000 св. р., концентрація зір у ядрі дуже висока, ймовірно, у його центрі є дуже масивна чорна діра.

Дослідження зір, а всі зорі, які ми бачимо над головою в ясну ніч, належать нашій Галактиці, показало — вони істотно відмінні між собою за фізичними параметрами. Тому зорянє населення Галактики поділяють



Мал. 225. Найближчі галактики:
а — Велика й Мала Магелланові Хмари; б — Туманність Андромеди

на дві групи — два типи населення. До населення I типу належать зорі, що заповнюють спіральні гілки Галактики, зорі розсіяних скучень, довгоперіодичні цефеїди. Важливими представниками населення I типу є гарячі зорі — білі гіганти, зорі ранніх спектральних класів. Населення II типу — це зорі кулястих скучень, зорі ядра Галактики. Серед цього типу населення виділяються яскраві червоні надгіганти.

Не лише зорі населяють нашу Галактику. Окрім зір, у ній є зоряні скучення й асоціації, а також туманності. Значна частина речовини нашої Галактики сконцентрована в міжзоряному просторі — у газопилових хмарах. Довкола Галактики (у полі її сили тяжіння) є кілька десятків невеликих зоряних систем — її супутники.

Перші два супутники нашої Галактики було відкрито 1519 р. під час кругосвітньої подорожі Фернандо Магеллана. Ці туманні плями, видимі неозброєним оком на зоряному небі Південної півкулі Землі, назвали відповідно Великою й Малою Магеллановими Хмарами (мал. 225). Неозброєним оком видно й галактику Туманність Андромеди, яку спочатку вважали за туманність, тому за нею збереглась така назва.

На сьогодні кількість супутників нашої Галактики зросла до кількох десятків.

Туманності, що є в Галактиці, поділяють, відповідно до їх зовнішнього вигляду, на планетарні й дифузні, а відповідно до фізичної природи, — на газові, пилові та газопилові. Усі планетарні туманності й частина дифузних є газовими.

У темні серпневі ночі, коли сузір'я Лебедя майже в зеніті, можна бачити, що Молочний Шлях, починаючи від Денеба — найяскравішої зорі в Лебеді, двома іскристими стрічками тягнеться до горизонту й далі під горизонт до сузір'я Кентавра. У багатьох його ділянках є зони, де майже відсутні яскраві зорі. Так проявляють себе темні туманності, які поглинають світло зір, що містяться далі. Маси окремих з них сягають $10\,000 M_{\odot}$.

Якщо поблизу туманності є достатньо яскрава зоря, то туманність відбиває її світло й завдяки цьому стає світлою туманністю. Якщо ж зорі, що

містяться поблизу або всередині туманності, дуже гарячі, то, йонізуючи своїм ультрафіолетовим випромінюванням газ, що входить до її складу, вони змушують його світитися так само, як це відбувається в полярних сяйвах на Землі. Тоді до відбитого пилом світла додається власне випромінювання газів туманності.

Найвідомішою серед світлих туманностей є знаменита туманність Оріона, яку видно навіть неозброєним оком як слабеньку хмарку (мал. 226).

Місце Сонячної системи в Галактиці.

Наша Сонячна система розташована на краю спірального рукава (Оріона) (див. мал. 224, а; с. 247). Наявність спіральних гілок у Галактиці пояснюють гігантськими хвильами стиснення і розрідження міжзорянного газу, які пробігають галактичним диском. Важливим є те, що орбітальна швидкість Сонця в Галактиці майже збігається зі швидкістю руху хвиль стиснення. Саме тому наша планетна система залишається попереду фронту хвилі вже кілька мільярдів років. Ця обставина, ймовірно, мала велике значення для виникнення і збереження життя на Землі. Відстань до центра Галактики становить близько 9000 пк (25 тис. св. р.). Перебуваючи на такій відстані, Сонце здійснює один оберт навколо нього за майже 230 млн років, які становлять галактичний рік

(швидкість руху Сонця — $220 \frac{\text{км}}{\text{с}}$).

Земля вже облетіла навколо центра Галактики приблизно 25 разів. Але, астрономи не можуть дійти згоди, в якому напрямку обертаються наша спіральна Галактика: закручується чи розкручується.

Закон Габблі. Спостереження галактик розпочалися ще в 20-х роках минулого століття. Американський астроном Едвін Габбл та бельгійський астроном, священник і математик Жорж Леметр,



а

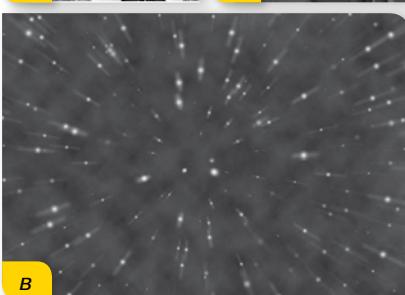


б



в

Мал. 226. Туманності:
а — Кінська Голова;
б — Оріона; в — Крабоподібна

*a**б**в*

Мал. 227.

а — Е. Габбл (1889–1953);
б — Ж. Леметр (1894–1966);
в — моделювання розбігання галактик

Про типи галактик читайте в електронному додатку.



досліджуючи спектри галактик, виявили важливу закономірність: що далі галактика від Землі, то з більшою швидкістю вона рухається, віддаляючись від нас (мал. 227). Залежність між відстанню до галактики та швидкістю її віддалення називають **законом Габбла**¹:

$$v = Hr,$$

де v — швидкість віддалення галактики від спостерігача, r — відстань до неї, а H — стала Габбла.

Сталу Габбла визначають на підставі спостережень і нині її значення оцінюють приблизно в $74,2 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$ (кілометрів за секунду на мегапарсек). На таку величину зростає швидкість руху галактики за кожний мегапарсек.

Закон Габбла також дає змогу оцінити вік Всесвіту. Вимірювши швидкості віддалення галактик та експериментально визначивши H , можна отримати оцінку часу, протягом якого галактики розбігаються. Це і є прогнозований час існування Всесвіту.

Із закону Габбла випливає два важливих висновки. Всесвіт розширюється в буквальному сенсі слова «в нікуди». Іншими словами, галактики не просто розлітаються в різні боки в порожньому просторі, а розсоваується сам простір. Водночас такі об'єкти, як зорі чи галактики, не зазнають цього розширення (принаймні досі

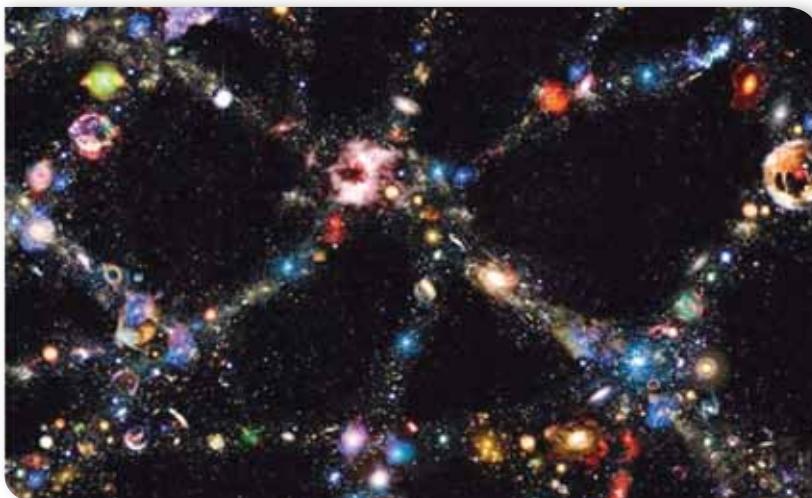
це не зареєстровано), бо завдяки гравітації є стійкими утвореннями. Ще одна особливість цього розширення — зі спостережень із Землі здається, що скupчення галактик розбігаються однаково в різних напрямках, згідно із законом Габбла так, ніби наша Галактика є центром Всесвіту. Однак це оманливе враження. Спостерігач хоч би де у Всесвіті буде бачити однукову картину — усі галактики розбігаються від нього. Це означає, що у Всесвіті немає центра, від якого йде розширення.

Другий висновок — Всесвіт колись мав початок. Такого висновку легко дійти, якщо подумки «прокрутити назад» умовну кінострічку розши-

¹ У 2018 р. виконавчий комітет Міжнародного астрономічного союзу прийняв рішення перейменувати його на закон Габбла — Леметра.

рення Всесвіту. У результаті ми дійдемо до моменту часу, коли вся речовина нашого світу була зосереджена в одній точці.

Великомасштабна модель Всесвіту. Ще в другій половині 50-х років минулого століття було виявлено, що більша частина найяскравіших галактик, видимих із Землі, утворюють цілісну структуру (мал. 228). Дослідження розподілу скupчень і надскupчень галактик у великих об'ємах простору впродовж останніх 50 років дало змогу космологам створити великомасштабну модель Всесвіту. Згідно із цією моделлю, Всесвіт має комірчасту структуру, тобто складається з велетенських порожнин (їх називають войдами), схожих на бджолині стільники, що дотикаються один до одного.



Мал. 228. Модель комірчастої структури Всесвіту

Скупчення й надскупчення галактик, зібрани в волокнисті структури, «нитки» завдовжки в десятки мегапарсек, утворюють своєрідні «стіни», які охоплюють порожнини. Та насправді порожнини — не зовсім порожні. Тепер відомо, що там, де ми бачимо начебто пустий простір, присутня темна матерія, природа якої досі не відома.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть, чому складно досліджувати нашу Галактику.
2. Назвіть основні складові будови Галактики.
3. Поясніть, чому зорі в Галактиці поділені на два типи населення.
4. Коротко описаніть місце розташування Сонячної системи в Галактиці.
5. Назвіть галактики, які можна спостерігати неозброєним оком. У якій півкулі неба їх видно?
6. Сформулюйте суть закону Габбла. На підставі яких спостережних результатів було відкрито закон Габбла?
7. Поясніть, як оцінюють вік Всесвіту.

§ 53

Елементи сучасної космології

Космологічні моделі Всесвіту. Всесвіт як ціле вивчає окремий розділ астрономії — космологія. Моделі, за допомогою яких намагаються описати загальні закономірності еволюції Всесвіту як цілого, називають космологічними моделями. Відтоді як Ісаак Ньютона створив теорію гравітації на підставі закону всесвітнього тяжіння, в астрономії панувала *теорія стаціонарного Всесвіту* — класична ньютонівська космологія. Вона спиралась на такі постулати: а) Всесвіт завжди був, є і буде стаціонарним, тобто незмінним (змінюватися можуть конкретні космічні системи, але не світ у цілому); б) простір і час абсолютно, метрично нескінчені, однорідні й ізотропні та не залежать від матеріальних об'єктів і процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Ньютонівська космологія криє в собі два парадокси, пов'язані з постулатом нескінченості Всесвіту. Перший парадокс дістав назву *гравітаційного*. Суть його полягає в наступному: якщо Всесвіт нескінчений і в ньому існує нескінчена кількість небесних тіл, то сила тяжіння буде нескінченно великою і Всесвіт має зазнати колапсу, а не існувати вічно. Другий парадокс називають *фотометричним*: якщо існує нескінчена кількість небесних тіл, то світність неба має бути нескінченою. Але ми такого явища не спостерігаємо.

Ще один парадокс — *термодинамічний* — пов'язаний із законами термодинаміки, згідно з якими будь-яка система, що не обмінюються енергією з іншими системами (для Всесвіту в цілому такий обмін, очевидно, виключений), прагне до найбільш вірогідного рівноважного стану — до стану з максимумом ентропії, за якого теплота рівномірно розподілиться між усіма тілами. А що це означає для Всесвіту? Це означає його «теплову смерть». Всесвіт продовжує своє існування, він не зникне, не перетвориться на ніщо, але всі термодинамічні процеси в ньому повністю припиняться. Висновок про теплову смерть Всесвіту сформулював Рудольф Клаузіус у 1865 р.

Розв'язати ці парадокси покликана сучасна космологія. Першу релятивістську космологічну модель Всесвіту розробив Альберт Ейнштейн у 1917 р. Він відкинув постулати ньютонівської космології про абсолютність і нескінченість простору й часу, а також застосував *космологічний принцип*, згідно з яким наш Всесвіт є однорідним та ізотропним. Поняття *однорідності* означає — вигляд Всесвіту в один і той самий момент часу не залежить від місця спостереження. Вивчаючи Всесвіт з будь-якої його точки в один і той самий момент часу, ви отримаєте однакові результати. А поняття *ізотропності* означає — властивості Всесвіту не залежать від напрямку, в якому його спостерігають. Усі напрямки у Всесвіті — рівноправні.

Потрібно зауважити, що на відносно невеликих масштабах (до 80 Мпк, або 260 млн св. р.) «нитки» та «стіни», утворені зі скупчень і надскупчень

галактик, що огортають велетенські порожнини — войди, є відхиленням від однорідності. Бо з різних точок цього об'єму картина ближнього Все-світу буде дещо різною. Але, як свідчать астрономічні спостереження: на великих масштабах (більших за 100 Мпк) однорідність розподілу матерії у Все-світі й відсутність видлених напрямків виконуються з належною точністю.

Космологічну модель Все-світу Альберт Ейнштейн розробив, спираючись на основне рівняння тяжіння, яке входить до створеної ним *загальної теорії відносності* (ЗТВ). Це рівняння пов'язує кривизну простору-часу з матерією — речовиною, що заповнює викривлений простір, який розглядають. Згідно із цією теорією, простір і час — величини взаємозалежні. Їх визначає розподіл гравітаційних мас у Все-світі. А властивості Все-світу як цілого зумовлені значенням середньої густини речовини та іншими фізичними параметрами. Тобто з рівнянь випливало, що Все-світ не є стаціонарним, а має або стискатись, або розширюватись.

Альберт Ейнштейн ще передбачав, що викривлення простору-часу масивними об'єктами має породжувати гравітаційні хвилі, що поширюються зі швидкістю світла. Гравітація є найслабшою з-поміж чотирьох фундаментальних сил, так що тільки космічні явища колosalного розміру, як-от зіткнення/взаємодія чорних дір, нейтронних зір/пульсарів, чи вибух наднової, — можуть стати джерелом відчутних для нас гравітаційних хвиль (мал. 229).

Перші докази існування гравітаційних хвиль були отримані в 1974 р., коли в системі однієї з подвійних зір зареєстрували зменшення періоду обертання внаслідок втрати енергії через випромінювання гравітаційних хвиль. За це відкриття американські радіоастрономи Джозеф Тейлор і Расселл Халс у 1993 р. отримали Нобелівську премію.

Зареєструвати гравітаційні хвилі вченні змогли лише у 2016 р. завдяки лазерному інтерферометру гравітаційно-хвильової обсерваторії LIGO (абревіатура від слів: лазерна інтерферометрична гравітаційно-хвильова обсерваторія, англ. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO). За це відкриття Райннер Вайс, Баррі Баріш і Кіп Торн отримали Нобелівську премію 2017 р.

Але на початку ХХ ст. ідея Альберта Ейнштейна не узгоджувалася з відомими



а



б

Мал. 229. Гравітаційні хвилі у Все-світі: а — моделювання процесу утворення гравітаційних хвиль; б — установка для їх фіксації на Землі

астрономічними спостережними даними. Для тодішніх астрономів простір не залежав від часу, а Всесвіт був нескінченним у часі й безмежним у просторі. Щоб отримати розв'язок свого рівняння для статичного й незмінного Всесвіту, Ейнштейн увів до нього безрозмірну космологічну сталу, задача якої полягала в тому, щоб протидіяти силам гравітації, тобто діяти у зворотному напрямку й запобігати стисканню.



Мал. 230. Олександр Фрідман

Всесвіту стає залежною від початкового значення густини речовини, а Всесвіт, заповнений масою, на яку діє сила тяжіння, не може бути статичним. Він має або розширюватися, або стискатися.

Якщо середня густина речовини й випромінювання ρ_c у Всесвіті дорівнює або менша від деякої критичної величини ρ_k , ($\rho_c = \rho_k$, або $\rho_c < \rho_k$), то Всесвіт необмежено розширюється від початкового точкового стану (відповідно геометрія простору є евклідовою, або Лобачевського). Якщо ρ_c більша за ρ_k , ($\rho_c > \rho_k$), то розширення Всесвіту на якомусь етапі зміниться на стискання (геометрія простору є рімановою), що триває аж до точки сингулярності. Нині, за різними оцінками, значення $\rho_k \sim (8-9,3) \cdot 10^{-30} \frac{\Gamma}{\text{см}^{-3}}$.

Космологічні моделі Всесвіту Олександра Фрідмана, як і його попередників, були за своєю суттю математичними моделями. Їх ще треба було перевірити на практиці, виконуючи астрономічні спостереження. І ці спостереження не забарілись. У 1926 р. Едвін Габбл виявив факт розбігання галактик.

Становлення теорії Великого Вибуху. У 1927 р. Жорж Леметр запропонував космологічну модель Всесвіту — теорію Великого вибуху, згідно з якою наш світ виник унаслідок вибуху надгустої матерії («первинного атома»). У 1948 р. одесит, а згодом американський фізик-теоретик і астрофізик Джорж (Георгій) Гамов припустив, що утворені під час періоду анігіляції фотони існують і донині, утворюючи космічний фон. Часто його називають реліктовим випромінюванням, оскільки воно справді є реліктом ранньої епохи розвитку Всесвіту.

Коли в 1965 р. американські радіоастрономи Арно Пензіас і Роберт Вілсон зареєстрували реліктове випромінювання, це стало одним із доказів на користь теорії Великого вибуху.

Коли було з'ясовано, що основне рівняння тяжіння ЗТВ має не одне, а багато розв'язків, з'явилися інші космологічні моделі Всесвіту. У 1922 р. російський математик і геофізик Олександр Фрідман (мал. 230) запропонував розв'язки рівняння тяжіння ЗТВ, з яких випливало кілька сценаріїв розвитку Всесвіту. Серед них був цікавий варіант, коли космологічна стала дорівнювала нулю. Тоді еволюція

У 1979 р. американський вчений Алан Гут удосконалив теорію Великого вибуху, ввівши поняття інфляції для пояснення стрімкого розширення Всесвіту на самому початку.

Основні етапи еволюції Всесвіту відповідно до теорії Великого вибуху.

Хоча момент народження Всесвіту називають Великим вибухом, варто розуміти, що зі звичайним вибухом він не має нічого спільного. Звичайний вибух відбувається в певну мить у певному місці простору й іноді справді буває грандіозним. Проте до моменту Великого вибуху не було ні простору, ні часу. Простір і час виникли після Великого вибуху. Тобто наслідком цієї події стала поява Всесвіту, який почав розширяватися. А тому порівнювати подію народження Всесвіту зі звичайним вибухом не можна.

Сучасні астрономічні та фізичні уявлення не пояснюють однозначно того, що було до Великого вибуху чи одразу після нього. Але відомі й перевірені на практиці закони фізики уможливлюють наукову екстраполяцію в минуле аж до моменту $t = 10^{-43}$ с від початку розширення.

Це так званий час Планка, що є гіпотетичною граничною природною одиницею вимірювання масштабу часу (квантом часу), яку ввів німецький фізик-теоретик Макс Планк. Подій у проміжку часу, що менший ніж час Планка, від $t = 0$ до $t = 10^{-43}$ с відомими нині законами фізики описати неможливо — вони в цьому часовому інтервалі просто не діють. Саме тому науковці не знають, що відбувалось у крихітну частку часу тривалістю 10^{-43} с, яка минула після Великого вибуху, тобто від часу $t = 0$.

Теоретичні розрахунки показують, що у віці 10^{-43} с Всесвіт був дуже малим ($l \approx 10^{-33}$ см) і мав величезну густину, але потім він зазнав розширення від дуже малих до неймовірно великих розмірів.

В економіці подібні процеси називають інфляцією, тому космологічну теорію, що описує перші миті існування Всесвіту, називають *інфляційною* теорією Великого вибуху. Її запропонував у 1980 р. американський вчений Алан Гут. Вона є вдосконаленою теорією Великого вибуху.

Початок інфляції був спричинений «хибним» вакуумом, або псевдовакуумом, — різновидом фізичного вакууму з від'ємним тиском (основними параметрами вакуума є енергія і тиск, залежно від них він може бути в різних енергетичних станах). Такий тиск створює силу відштовхування, що діє як *антигравітація*. Що вища енергія вакууму, то вищий тиск, а в разі псевдовакууму — відштовхування. Псевдовакуум — не стабільний і дуже швидко розпадається, перетворюючись на вакуум з низьким рівнем енергії. Вивільнена внаслідок розпаду енергія витрачається на утворення великої кількості елементарних частинок — кварків та антикварків, з яких уже через десятитисячну частку секунди утворились різні частинки, серед них — протони й нейтрони та їхні античастинки. Інакше кажучи, з енергії виникає речовина, яка має високу температуру.

Далі розвиток Всесвіту відбувається так, як передбачає стандартна космологія Великого вибуху.

Після закінчення інфляції Всесвіт розшировався й охолоджувався. Ще через одну десятитисячну частку секунди за температури 10^{12} К

відбулась анігіляція протонів з антипротонами і нейtronів з антинейтронами з утворенням фотонів. Та, вочевидь, від самого початку концентрація частинок перевищувала кількість античастинок приблизно на одну мільярдину частки. Цей «лишок» став будівельним матеріалом для світу речовини — галактик, зір, планет тощо. З фотонів, що утворилися під час анігіляції, значною мірою складається реліктове випромінювання. Через 1 с після Великого вибуху за температури 10^{10} К Всесвіт став прозорим для нейтрино, тоді як протони, нейtronи, електрони й позитрони були перемішані з фотонами. Через 3 с температура знизилась до $3 \cdot 10^9$ К, їх електрони проаніглювали з позитронами, а ще через 3 хв за температури $3 \cdot 10^8$ К почалось утворення перших хімічних елементів — Дейтерію, Гелію, Літію.

У наступні 300 000 років помітних змін не відбувалося. Уесь цей час Всесвіт був непрозорим для світла, бо електрони, протони, ядра гелію і в значно меншій кількості ядра літію, з яких складалася первісна плазма, безперервно поглинали, випромінювали й розсіювали фотони, без можливості вільного поширення. Та врешті-решт, розширюючись далі, Всесвіт охопив до температури близько 3000 К. Тоді енергія фотонів стала меншою від сили кулонівського притягання електронів і протонів, а відстані між частинками стали належно великими для того, щоб фотони перестали розбивати щойно утворені нейтральні атоми водню та гелію. Зв'язані в атомах, частинки перестали заважати руху фотонів, і Всесвіт раптово став «прозорим» для випромінювання: світло відокремилось від речовини. Від цього моменту випромінювання вільно поширюється у Всесвіті, бо практично не взаємодіє з речовою. З фізичної точки зору принципова різниця між видами матерії (речовою й електромагнітним випромінюванням) полягає в тому, що швидкість елементарних частинок (електронів, протонів, нейtronів), з яких утворені зорі, планети і, нарешті, ми з вами, ніколи не може досягти швидкості світла, у той час як кванти електромагнітних хвиль ніколи не можуть мати швидкість меншу, ніж швидкість світла.

Отже, через 300 000 років після Великого вибуху панівною формою матерії у Всесвіті стала речовина (видима й невидима). Відтак починають швидко збільшуватися в розмірах неоднорідності речовини. Розвиток гравітаційної нестійкості в наступні мільйони років «змусив» речовину збиратися в окремі згустки — протогалактики, у яких приблизно через мільярд років після Великого вибуху почали утворюватись перші зорі.

Темна речовина і темна енергія. Перший доказ на користь існування темної матерії було отримано Фріцем Цвіккі в Каліфорнійському технологічному інституті 1933 р. Він досліджував скupчення галактик у сузір'ї Кона та отримав свідчення про існування невидимої маси. Цвіккі оцінив загальну масу скupчення за допомогою аналізу руху галактик поблизу її краю та порівняв її з видимою масою, оціненою за кількістю галактик і загальною яскравістю скupчення. Він виявив, що розрахованої маси приблизно в 400 разів більше за візуально спостережувану. Маси видимих галактик у скуп-

ченні було занадто мало для пояснення їхніх орбітальних швидкостей. Цей факт відомий як «проблема прихованої маси». Цвіккі зробив висновок, що існує якась невидима форма матерії, яка забезпечує достатню кількість маси, а отже, і гравітації, що не дас змоги скупченню розлітатись.

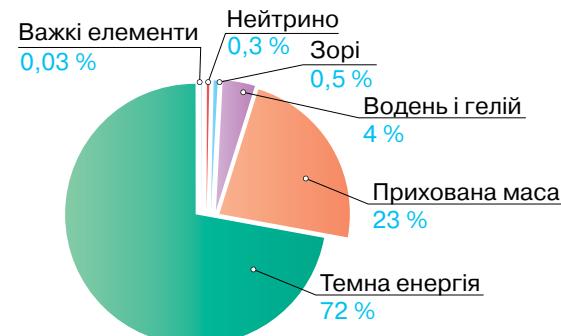
Згідно з нинішніми уявленнями, темна матерія відіграла особливу роль у формуванні великомасштабної структури Всесвіту. Якби темної матерії не було, то ця структура не змогла б виникнути. Ймовірно, спочатку виникли згустки темної матерії (їх називають гравітаційними ямами), а потім звичайна матерія скупчилася навколо них. Якщо темна матерія заповнює увесь Всесвіт, то це означає, що галактики існують не ізольовано, а в рамках колосальної мережевої структури, основою якої є темна матерія. Отже, галактики — скупчення звичайної матерії, розміщені у вузлових точках всесвітньої мережі з темної матерії. Галактики — це лише «піки» в концентрації речовини, розподіленої у Всесвіті.

Природа темної матерії досі не відома. Нині пошуки темної матерії виконують як прямими, так і непрямими методами. Велика частка доказів існування темної матерії походить з вивчення галактик. Одним з ефектів, що виявляється під час вивчення галактик, є гравітаційне лінзування. Ще в ЗТВ Ейнштейна вказується, що масивне тіло своїм гравітаційним полем викривлює простір. За допомогою гравітаційного лінзування можна дослідити гравітаційний потенціал досліджуваного об'єкта. Так, було встановлено, що існують скупчення галактик — найбільш стабільні системи у Всесвіті. І вірогідно, що цю стабільність забезпечує маса, яка проявляє себе тільки в гравітаційній взаємодії, — темна маса, або темна матерія.

Невелика частина темної матерії може виявитися баріонною темною матерією астрономічних тіл, як-от масивні компактні об'єкти гало (планети, чорні діри, холодні зорі на кшталт коричневих карликів тощо), які складаються зі звичайної матерії, однак випромінюють мало або взагалі не випромінюють електромагнітного випромінення. Більшість темної матерії у Всесвіті — не баріонна. І вважається, що вона не взаємодіє зі звичайною речовиною завдяки електромагнітній взаємодії.

Згодом було виявлено, що Всесвіт на космологічних відстанях розширюється швидше, ніж це випливає із закону Габбла, тобто розширення Всесвіту відбувається з прискоренням. Оскільки звичайна гравітуюча речовина не може надавати галактикам додаткової швидкості, а навпаки, вона сповільнює розліт, то з факту прискореного розширення випливає, що у Всесвіті є субстанція, спроможна діяти як антиgravітація і саме вона прискорює всі далекі об'єкти. Цю субстанцію назвали *темною енергією*. Природа її також достеменно не відома.

На сучасному етапі вік Всесвіту становить 13,7 млрд років. Його складниками є — 73 % темна енергія, 23 % — невидима темна матерія (допоки не з'ясованої природи) і лише 4 % — видима речовина, яку можна реєструвати всіма можливими приладами, а також різні поля й випромінювання (мал. 231, с. 258).



Мал. 231. Баланс речовини, темної матерії та темної енергії у Всесвіті

Подальша еволюція Всесвіту залежить від природи темної енергії. Розрізняють закриті й відкриті космологічні моделі.

«Закрита» модель. Припускають, що в майбутньому розширення Всесвіту зміниться його стисненням. Відштовхуючись від загальної маси Всесвіту 10^{52} т, можна припустити, що приблизно через 30 млрд років він почне стискатися, а через 50 млрд років знову повернеться в сингулярний стан, з якого він виник. Настане «Великий хруст», який згодом зміниться на новий «Великий вибух». Повний цикл розширення і стиснення Всесвіту становить приблизно 100 млрд років. Таким чином, Всесвіт може бути представлений як грандіозна закрита система, яка зазнає безліч еволюційних циклів. За переходу від одного циклу до іншого деякі загальні параметри Всесвіту можуть бути змінені. Наприклад, можуть бути змінені фундаментальні фізичні константи.

Зовсім інакше постає майбутнє Всесвіту у «відкритих» космологічних моделях, які, по суті, є сценаріями «теплової смерті» Всесвіту.

Варіант 1. Прискорене розширення Всесвіту триватиме вічно. Відстані між скupченнями галактик ставатимуть дедалі більшими, порожнеча все глибшою, простір між ними чимраз чорнішим. Зорі поступово витрачать своє ядерне пальне, згаснуть і вже ніколи не засвітяться знову, бо газ, з якого вони утворюються, буде вичерпано. Залишаться тільки охоплені колишні білі карлики, нейтронні зорі та чорні діри. Але і карлики, і нейтронні зорі також зникнуть, бо ті нейтрони і протони, з яких вони складаються, розпадуться. Приблизно через 10^{100} років чорні діри «випаруються» та перетворяться на випромінювання. Отак у Всесвіті зникне будь-яка структура й організація, лише необмежено довго триватиме розширення сукупності фотонів, нейтрино та вкрай розрідженого газу з електронів і позитронів, які ще залишилися. Усі «життєві сили» такого Всесвіту поступово виснажяться і замрут. Нескінчений простір, холод і темрява — ось неминучий фінал такого Всесвіту.

Варіант 2. Прискорене розширення ставатиме дедалі швидшим, і розвиток Всесвіту відбуватиметься за сценарієм, який називають «Великим розривом». Необмежене збільшення густини енергії спричинить катастрофічне зростання антигравітації, як наслідок — катастрофічне падіння гравітаційних сил і «розврив» об'єктів. Надскуччення розпадуться на окремі галактики, галактики — на окремі зорі, розірветься Сонячна система, далі планети, кожна молекула, кожний атом і навіть кожна елементарна частинка.

Проте доки фізичну природу темної енергії ще тільки з'ясовують, усе це — тільки гіпотези. Відомо лише, що темна енергія існує і створює антигравітацію.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть суть космологічного принципу.
2. У чому відмінність між класичною ньютонівською космологією та релятивістською космологічною моделлю Всесвіту А. Ейнштейна?
3. Що таке космологічна модель Всесвіту?
4. Поясніть, чи коректно порівнювати Великий вибух і вибух звичайний.
5. Чому відомі закони фізики не можуть описати першу мить після Великого вибуху?
6. Що таке реліктове випромінювання?
7. Як виявляє себе у Всесвіті темна матерія; темна енергія?

§ 54

Дослідження космосу

Про Сонячну систему із Землі та космосу. Землю з космосу можна дослідити краще, ніж перебуваючи на ній. Так, у 1999 р. запущено американський супутник Terra, на якому встановлені японські та канадські пристрії для дослідження клімату й навколошнього середовища. За даними пристріїв для вимірювання висоти точок рельєфу поверхні Землі укладено найдетальнішу на сьогодні топографічну mapu Землі.

Нині діють різні наукові проекти в галузі космічного моніторингу Землі, які дозволяють усебічно вивчати нашу планету як єдину інтегровану систему. Кожний супутник виконує одне із завдань з вивчення хімічного складу атмосфери, динаміки й енергетики атмосфери, хмарного покриву, водного й енергетичного балансу, динаміки, фізико-хімічних та енергетичних властивостей океану, глобального біохімічного циклу, біологічних ресурсів, гравітаційного поля, а також у галузі геодезії, геології, картографії.

Ще більше програм діє по дослідженю об'єктів Сонячної системи: планет, їх супутників, астероїдів, комет. Завдяки космонавтиці, астрономія отримала змогу не тільки виводити на орбіту Землі телескопи й обсерваторії, а й відправляти до тіл Сонячної системи автоматичні міжпланетні станції (АМС). Це суттєво розширило можливості астрономів у вивченні

таких об'єктів, бо їх тепер можна не лише спостерігати з близької відстані, а й виконувати експерименти на їхніх поверхнях чи в атмосферах. Розглянуті в попередніх параграфах відомості про Сонячну систему — результат досліджень, здійснених як із земних, так і з космічних обсерваторій.

За останні десятиліття спостерігається стійкий інтерес до дослідження Сонячної системи.

Ми не будемо детально описувати всі відкриття та місії, що здійснювалися і здійснюються для вивчення Сонячної системи. Для цього ви проведете урок-конференцію, на якому кожен з вас може обрати ту або ту місію, той чи той об'єкт і детальніше розповісти про те, які дослідження здійснювалися. Для цього вам потрібно скористатися інформаційними ресурсами, що популяризують астрономічні знання.

Сучасні дослідження планет Сонячної системи надають велику кількість нових наукових фактів, які дають змогу глибше зрозуміти, як сформувалася Сонячна система, яке майбутнє її очікує. Чи є можливості в людини в найближчий час створити космічні бази на Місяці або Марсі? Чи є можливим видобувати на Місяці й транспортувати на Землю рідкісні ізотопи, які можуть бути паливом для термоядерної енергетики?

І головне питання, що відвічно турбує людей: чи є життя на інших планетах? Поки в Сонячній системі його не виявлено. Але надія є. Якщо не на Марсі, то, можливо, в океані Європи — супутника Юпітера, чи

Про дослідження
космосу читайте
в електронному додатку.



на поверхні Титана — супутника Сатурна. Нині для дослідження цих тіл Сонячної системи з метою пошуку на них ознак життя готовять спеціальні космічні місії.

Пошуки життя у Всесвіті. Життя є однією з великих таємниць Всесвіту. Ми бачимо на Землі різноманітні організми, але нічого не знаємо про інші форми життя на планетах, що існують навколо далеких зір, — *екзопланетах*.

У питанні життя за межами Землі є дві суттєві складові:

- ▶ це пошук ознак життя як такого;
- ▶ реєстрація сигналів від позаземних цивілізацій або відправлення в космос повідомлень від землян у надії, що хтось їх зареєструє, розшифрує, а потім надішле відповідь.

Ці стратегії науковці та ентузіасти пошуку позаземного життя реалізують у рамках наукових програм SETI (абревіатура від слів: пошук позаземного розуму, англ. Search for Extra-Terrestrial Intelligence) і METI (абревіатура від слів: повідомлення позаземним цивілізаціям, англ. Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence). Програма SETI вирішує сухо наукове завдання реєстрації сигналу, його декодування й виділення з нього осмисленої інформації. Тобто науковий пошук відбувається так само, як і в разі пошуку нових природних явищ. Одна лише відмінність — результатом пошуку маєстати не якесь закономірне явище природи,

а осмислене повідомлення, надіслане розумними істотами. Завдання програми METI суттєво інше — скласти повідомлення, яке розвинена розумна істота не ототожнить із природним явищем, а прийме його як послання від іншої розумної істоти.

Необхідність такого роду досліджень визначається тим, що відкриття позаземних цивілізацій і встановлення контакту з ними можуть мати величезний вплив на науковий і технологічний потенціал суспільства, спра-вити позитивний вплив на майбутнє людства.

З 1999 р. пошук сигналів з космосу може виконувати кожний влас-ник персонального комп’ютера. Для цього треба приєднатися до проекту SETI@home, започаткованого астрономами Каліфорнійського університету.

Перше радіопослання землян до позаземних цивілізацій (мал. 232, а) було відправлено 1974 р. за допомогою 300-метрової антени радіотелес-копа в Аресібо. Сигнал спрямували в бік кулястого скупчення М13, що лежить на відстані 7670 пк (25 тис. св. р.) від Землі. Закодований сигнал містить базові відомості про людину, Землю та Сонячну систе-му. У Космос, але вже до зір, що лежать на відстані понад 10 пк (кількох десятків св. р.), спрямовували сигнали (вони містили малюнки, світлини, фрагменти музичних творів тощо (мал. 232, б) ще кілька разів. Для цієї мети використовували 70-метровий радіотелескоп, розміщений поблизу м. Феодосія в Криму.



Мал. 232. а — послання Аресібо;
б — «золоті пластинки»
з повідомленнями від землян

Але всі намагання зареєструвати сигнал від позаземних цивілізацій досі не були успішними. Як й інопланетяни не зафіксували сигнали із Землі. Адже з початком радіо- та телетрансляцій Земля випромінює радіосигнали в космос, які легко може зареєструвати розвинена цивілізація, що перебуває на відстані до 30 пк (100 св. р.) від нашої планети.

Космос мовчить. Знайти пояснення цьому факту не вдається. Гіпотез існує багато, але жодна з них досі не стала теорією.

Антрапний принцип. У 1973 р. на симпозіумі, присвяченому 500-річчю від дня народження Коперника, астрофізик Брандон Картер виступив з доповіддю про те, що незвичний збіг значень низки (до 30) незалежних

одна від одної фізичних сталах не випадковий. Він уможливлює утворення складних структур різних масштабів — від вірусів і бактерій до галактичних скупчень. Картер висловив припущення — існування людства свідчить про те, що закони Всесвіту цьому сприяють, і назвав свою ідею антропним принципом (від грец. *anthropos* — людина).

Картер сформулював **антропний принцип** так: «Очікувані результати спостережень мають бути обмежені умовами, які потрібні для нашого існування як спостерігачів». Це означає, що закони природи в якомусь сенсі спеціально обрані так, щоб допустити наше існування.

Питання існування інших всесвітів. Досі багато науковців скептично ставляться до антропного принципу, а окремі з них вважають, що уявлення про важливість тонкого налаштування фізичних констант у нашому всесвіті дуже перебільшені. Однак антропний принцип можна пояснити в рамках ідеї про *Мультиверсум* (*мультивсесвіт*), тобто про існування величезної кількості всесвітів, окремі з яких випадково є придатними для життя. І вже в таких всесвітах розумні спостерігачі зауважують дивовижне тонке налаштування фізичних сталах.

Ідея *Мультиверсуму* виникла як результат удосконалення інфляційної моделі виникнення Всесвіту. Виявилося, інфляція є одвічним явищем. Вона відбувається повсякчас і повсякдень. Безупинно виникають окремі ділянки інфляційного розширення, спричиненого розпадом псевдовакууму. Деякі з них породжують окремі всесвіти. Ми якраз живемо в одному з таких всесвітів. Вічна інфляція породжує велику кількість всесвітів з усіма можливими значеннями базових фізичних сталах.

Але питання взаємодії окремих всесвітів, їх співіснування та розміщення поки що лишається відкритим.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть різницю між програмами SETI і METI. 2. Поясніть суть антропного принципу. У рамках якої ідеї і як саме знайшов пояснення антропний принцип? 3. Яке явище спричиняє появу великої кількості всесвітів?



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ З історії вивчення Галактики.
- ▶ Історія відкриття квазарів.
- ▶ Послання позаземним цивілізаціям.
- ▶ Міжзоряні польоти й можливі контакти між цивілізаціями.
- ▶ Пошуки життя за межами Землі.



Перевірте себе (§ 43–54)



1. Момент, коли світило перебуває найвище над горизонтом, називається...
 - A** пряме сходження
 - B** верхня кульмінація
 - C** нижня кульмінація
 - D** елонгація

2. Зорі якого кольору мають на поверхні найвищу температуру?
 - A** блакитні
 - B** білі
 - C** жовті
 - D** червоні

3. Який космічний об'єкт називають пульсаром?
 - A** червоний гігант
 - B** нейтронну зорю
 - C** білий карлик
 - D** пульсуючу зорю

4. Абсолютна зоряна величина — це зоряна величина, яку б мала зоря на відстані...
 - A** 5 парсек
 - B** 10 парсек
 - C** 20 парсек
 - D** 15 парсек

5. Густота якої планети Сонячної системи менша від густини води?
 - A** Меркурія
 - B** Сатурна
 - C** Нептуна
 - D** Марса

6. Що спонукає частинки сонячного вітру покинути Сонце і прискорено рухатися проти його сили тяжіння в міжпланетний простір?
 - A** сила газового і світлового тиску у високотемпературній короні
 - B** темна енергія
 - C** антигравітація
 - D** сила гравітації ядра Галактики

7. На скільки тонн щосекунди зменшується маса Сонця, якщо у світовий простір випромінюється $E = 3,88 \cdot 10^{26}$ Дж світлової енергії?

8. Визначте синодичний період S обертання Юпітера, якщо його сидеричний період триває 12 років.



ПРАКТИКУМ

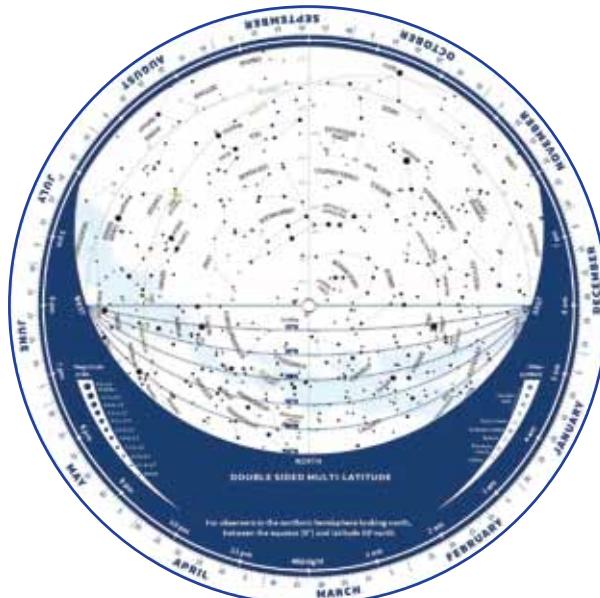
РОБОТА З РУХОМОЮ КАРТОЮ ЗОРЯНОГО НЕБА

Обладнання: рухома карта зоряного неба.

За допомогою рухомої карти зоряного неба можна визначити вид зоряного неба, умови спостереження світил для заданої широти в будь-який час. За необхідності можна користуватися астрономічними календарями.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Яким буде вигляд зоряного неба близько опівночі в середині травня і в середині червня?
2. Визначте координати Арктура, Веги, Денеба, Сиріуса, Альдебарана, Бетельгейзе, Капели, Спіки, Проціона та порівняйте отримані вами результати з табличними даними, що містяться в астрономічних довідниках і календарях.
3. Знаючи координати зір ($a = 7h\ 33m$ і $d = +31^{\circ}57'$; $a = 13h\ 24m$, і $d = -11^{\circ}02'$), з'ясуйте, що це за зорі.
4. Яке сузір'я буде поблизу зеніту у вашій місцевості 20 травня в 23 год?
5. Ви приступаєте до спостережень зоряного неба 30 травня о 22 год. Які сузір'я в цей момент сходять, які перебувають поблизу меридіана, а які — заходять?
6. У якому сузір'ї сьогодні розташоване Сонце і яке сузір'я кульмінує над точкою півдня опівночі?
7. За допомогою рухомої карти зоряного неба оцініть тривалість дня і ночі сьогодні.
8. Яка полуденна висота Сонця сьогодні? А якою вона буде у вашій місцевості в дні рівноден'я і сонцестояння?
9. Визначте горизонтальні координати Арктура 18 травня о 21 год.
10. У котрій годині й на якій висоті відбудеться верхня кульмінація Юпітера 13 червня?



Відповіді

Вправа 1

- $7,4 \cdot 10^{-2}$ Н; 0,3 м.
- $1 \cdot 10^{-5}$ Кл; $3 \cdot 10^{-5}$ Кл; 0,02 м.
- а) 4 мН; 3 мН; б) 4 мН, 1 мН.
- $1,1 \cdot 10^{-7}$ Кл.
- Збільшилася в 1,8 разу;
зменшилася в 1,25 разу.
- 2 мН.

Вправа 2

- На прямій, яка з'єднує заряди, на відстані $1/3a$ від меншого і $2/3a$ від більшого; на тій самій прямій на відстані a від меншого і $2a$ від більшого.
- 70 кВ/м; 10 кВ/м; 50 кВ/м; 50 кВ/м.
- $4 \cdot 10^4$ Н/Кл; $7,2 \cdot 10^{-5}$ Н.
- 40 кВ/м; 10 кВ/м.
- а) 576 кВ/м; б) 432 кВ/м.

Вправа 3

- $4 \cdot 10^4$ Н/Кл; $7,2 \cdot 10^{-5}$ Н.
- 40 кВ/м; 10 кВ/м.
- а) 0,125 кВ/м; б) 200 кВ/м, -75 кВ/м;
в) -200 кВ/м, 75 кВ/м; г) 0, -125 кВ/м.
- а) 576 кВ/м; б) 432 кВ/м.
- На прямій, яка з'єднує заряди, на відстані $1/3a$ від меншого і $2/3a$ від більшого; на тій самій прямій на відстані a від меншого і $2a$ від більшого.

Вправа 4

- а) ± 6 кВ; б) 0; в) $\pm 4,2$ кВ.
- 3,5 кВ.
- $8,4 \cdot 10^6$ м/с.

Вправа 5

- $1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл; $1,8 \cdot 10^{-7}$ Кл.
- $4,5 \cdot 10^{-2}$ м; 5 пФ.
- Збільшиться в 1,5 разу.
- 8.
- 580 пФ.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- Б; 2. В; 3. А; 4. В; 5. А; 6. Збільшити
у 2 рази; 7. $1,2 \cdot 10^{-4}$ Кл; 8. 0,27 Дж.

Вправа 6

- З'єднати три провідника паралельно
й один послідовно.
- 18 і 9 Ом.
- 3,3 Ом.
- $U_{AC} = 12$ В; $U_{DB} = 18$ В; $I_1 = 4$ А; $I_2 = 2$ А;
 $I_4 = 3,6$ А; $I_5 = 1,8$ А; $I_6 = 0,6$ А.
- 100 м.
- 400 Ом, 100 Ом, 100 Ом, 40 В, 0,1 А, 0,4 А.
- 0,48 В.

Вправа 7

- 6 кОм.
- У 10 разів.
- 4,5 В; 1 Ом.
- 6 Ом; 4 Ом.
- 5,5 А.
- 4,5 В; 1 Ом.
- 4 В; 2 В.

Вправа 8

- 0,2 Ом; 12 В.
- 15 кг.
- Збільшилась в 1,23 разу.
- 4 Ом.
- 45 %.
- 3 В; 2 Ом.
- 6 Ом, 33 %, 67 %.

Вправа 9

$$\alpha = \frac{\frac{R_1}{R_2} - 1}{t_1 - t_2 \frac{R_1}{R_2}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1};$$

$$R_1 = \frac{U^2}{10P} \approx 14,4 \text{ Ом.}$$

- 19,2 м.
- $l_1 \approx 43,6l_2$.
- $\Delta R = \frac{2\alpha\rho_0 l_0 t}{S}; \Delta R' = \frac{2\rho_0 l_0 t}{S}(\alpha + \beta)$.

Вправа 10

- 6,1 год; 5,3 Вт · год.
- 0,054 кг.
- 20 Вт.
- 1,3 Ом.
- 297 К.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- В; 2. Б; 3. Г; 4. Г; 5. А; 6. 18 кДж;
- $2,09 \cdot 10^{-2}$ кг, $0,23$ м 3 ; 8. 3,1 Ом.

Вправа 11

$$1. B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_1}{l+s} + \frac{l_2}{s} \right].$$

- 58 А.
- 66,6 мк Тл.

Вправа 12

- 20 мТл.
- $B = \frac{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}{I \cdot l}$.
- $9,3 \cdot 10^{-24}$ А · м 2 .

4. $6,3 \cdot 10^{-13}$ Н; 3,1 мм.

5. $\frac{R_n}{R_e} = \frac{m_n}{m_e}$.

Вправа 13

1. а) 0,5 А; б) 0,7 А; в) 0,3 А; ліворуч зі швидкістю 10 м/с.
2. 13 В.
3. За 0,49 с.
4. 100 витків.
5. 29 см.

Вправа 14

1. 2 м Тл.
2. 0,1 А.
3. 120 Дж; зменшиться в 4 рази.
4. 2,5 Дж.
5. 6,4 Дж.
6. 2500 В.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

А. Г; 2. В; 3. Б; 4. Б; 5. Г; 6. 120 Дж; зменшиться в 4 рази; 7. а) 0,26 Н; 0,13 Н; 8. $4 \cdot 10^{-16}$ Н.

Вправа 15

1. 1,4 см; -1,4 см.
2. $x = 0,1 \sin 5\pi t$; 1,36 м/с.
3. $x = 0,2 \cos \frac{\pi}{2} t$.
4. $x = 5 \cdot 10^{-2} \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$ (м).
5. $v_x = -\pi \sin 20\pi t$; $a_x = -20\pi^2 \cos 20\pi t$; 0,25 м; -2,7 м/с; -100 м/с².
6. а) $x = 5,5 \cdot 10^{-2} \cos \left(\frac{\pi}{3} t + \frac{\pi}{6} \right)$;
б) $x = 0,1 \cos 20\pi t$.
7. $x = 0,2 \cos \frac{\pi}{2} t$.
8. 35 мм; 0.

Вправа 16

1. 2,8 Дж; 3,8 м/с.
2. 150 мДж; 50 мДж.
3. $\frac{T}{8}; \frac{3T}{8}; \frac{5T}{8}; \frac{7T}{8}$.
4. $x = 0,1 \cos 10\pi t$; $F = -10 \cos 10t$; 10 Н; -5 Н.
5. $x = 4 \cdot 10^{-2} \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{3} \right)$.
6. 0,314 с.

Вправа 17

1. 2 с; 0,5 Гц; π с⁻¹.
2. 9 : 1.

3. 18 см; 50 см

4. Відставатимуть у всіх випадках
5. Зменшиться у 2 рази
6. 2,5 с
7. 9,81 м/с²

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г; 2. В; 3. Б; 4. В; 5. А; 6. $x = 0,02 \sin 10\pi t$; 7. 8,2 см/с, 1,49 мН, $2,21 \cdot 10^{-5}$ Дж; 8. 84 м.

Вправа 18

1. $q = 10^{-4} \cos 500t$; $i = -0,05 \sin 500t$; $u = 100 \cos 500t$; 50 мА; 100 В.
2. $4\pi \cdot 10^{-5}$ с; 2 мкКл; 0,5 В (на кожному конденсаторі).
3. $i = U_m \sqrt{\frac{3C}{4L}}$.
4. 120 мкДж; 40 мкДж.
5. 5,1 мкГн.
6. Зменшиться в 1,25 разу.
7. $Q = \frac{3}{8} CU_m^2 = 0,6$ Дж.

Вправа 19

1. $e = 0,1\pi \sin 10\pi t$; нормаль до площини рамки паралельна лініям індукції; 5 с⁻¹; 0,01 Вб; 0,314 В.
2. $\Phi = BS \cos \omega t = 0,08 \cos 50t$;
 $e = BS\omega \sin \omega t = 0,4 \sin 50t$.
3. 0 В; 0,4 с; 2,5 Гц; $e = 50 \cos 5\pi t$.
4. 100 Гц; 10 мс; 5 А; 2,5 А.
5. 100 В; 0; -200 В.

Вправа 20

1. 26,4 мкФ; 130 В.
2. 4,6 мА; 73,4 В; 146,6 В.
3. 0,13 Гн; 30 Вт; 11 Вт.
4. 300 Гц.
5. 74%; 68%.

Вправа 21

1. 95%.
2. 880; 144; 6,11.
3. 124 Вт.
4. 9,6 мм².
5. 1,5 А.

Вправа 22

1. Збільшити в 9 разів.
2. 18 км; 8300 с⁻¹.
3. 9000; 225 м.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г; 2. Б; 3. В; 4. А; 5. А; 6. 1 мс; 7. 400; 8. 25,4 пФ.

Вправа 23

1. $\Delta = S_1 O - SO = 0$.
2. 2,4 мм.
3. 600 нм.

4. Відстань між максимумами освітленості a , b , в збільшується.

Вправа 24

1. $1,5^\circ$.
2. 0,17 мкм.
3. 5 мкм.
4. 3,9 мкм.

Вправа 25

1. 3,9 м.
2. 97 см.
3. 64° .
4. $d = 2l \sin \varphi$ Зображення монети повернеться на кут 2φ навколо ребра двогранного кута, залишаючись на тій же відстані від нього.
5. $6 \cdot 10^{-2}$ м.
6. 1,2 см; 1 см.
7. 56° .

Вправа 26

1. 0,78 м.
2. $F = 2/9 L = 20$ см.
3. 0,5 см.
4. 562.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- 1. Б; 2. Б; 3. В; 4. В; 5. Б; 6.** Освітленість вертикальної площинки більша в 5,7 раза.; **7. 0,13 мкм; 8. 35° .**

Вправа 27

1. $0,73 \cdot 10^{-10}$ м.
2. $2,6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $5 \cdot 10^{-19}$ Дж.
3. Рентгенівські; видимі; радіохвилі.
4. 0,3 мкм.
5. $2,4 \cdot 10^{-12}$ м; $1,2 \cdot 10^{20}$ Гц.
6. 0,99 мкм.
7. 53.

Вправа 28

1. 94 нм.
2. $7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $9,1 \cdot 10^5$ м/с; $3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.
3. $1,8 \cdot 10^{-7}$ м.
4. $6,4 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
5. 0,51 В.

Вправа 29

1. 102 нм, 653 нм, 122 нм.
2. 0,49 мкм.
3. 0,25 мкм.
4. $3,4 \cdot 10^{15}$ Гц.
5. Збільшується в 9 разів; зменшується в 4 рази.
6. У 5,4 разу.
7. $3,1 \cdot 10^{-14}$ м.

Вправа 30

1. 2,2 МеВ.
2. 220 МеВ.
3. 5,6 МеВ; 8 МеВ.

- 4. 1,013; 235 а.о.м.**

Вправа 31

1. 0,29.
2. Через 64,5 доби.
3. 10,7 МБк.
4. За 5 хв 5 с.
5. $3,3 \cdot 10^5$ с.

Вправа 32

1. ${}_{11}^{24}\text{Na}; {}_{+1}^0e; {}_{12}^{26}\text{Mg}; {}_1^1\text{H}; {}_1^1\text{H}$.
2. Вбирається; виділяється, вбирається.
3. 2,8 МеВ.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- 1. Б; 2. Г; 3. Б; 4. В; 5. В; 6. $2,79 \cdot 10^{-19}$ Дж;** **7. Три; 8. поглинається.**

Вправа 33

1. $\delta = -\varphi$.
2. 85° .
3. 40° .
4. $h_2 = h_1 + \varphi_1 - \varphi_2$.
5. У південно-східній.

Вправа 34

1. Між північним і південним тропіками.
2. Пори року зникли б.
3. Зміщуватимуться на захід щомісяця на 15° .
4. Між точками південно-західного заходу й заходу.
5. $h = 62^\circ 48'$.

Вправа 35

1. Верхня.
2. У протистоянні. У цій конфігурації планети сходяться близько до заходу Сонця, а кульмінують опівночі? Відтак вони видимі для спостережень цілу ніч.
3. 29,47 року.
4. $m_{\text{u}} = 0,012m_{\oplus}$.

Вправа 36

1. Хромосфері під час повного затемнення Сонця.
2. З корони. Там космічний пил добре пропускає довгохвильові випромінювання нижчих (холодніших) атмосферних шарів, розсіюючи інші, а надвисока температура — джерело ультракоротких випромінювань.
3. 274 м/с^2 .
4. $4,31 \cdot 10^6 \text{ т/с}$.
5. 600 млн тонн.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- 1. Б; 2. А; 3. Б; 4. Б; 5. Б; 6. А;** **7. $4,31 \cdot 10^6 \text{ т/с}$; 8. 389 діб.**

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- | | | | |
|-----------------------------|----------|---------------------------------|--------------|
| Автоколивання | 105 | ► заломлення світла | 160 |
| Акцепторні домішки | 52 | ► збереження електричного | |
| Альфа-розділ | 191 | заряду | 7 |
| Альфа-частинка | 190 | ► електромагнітної індукції | 75 |
| Амплітуда коливань | 89 | ► Кулона | 8 |
| Аніон | 56 | ► Ома | 34, 40 |
| Античастинка | 202 | ► повного відбивання | 161 |
| Астероїд | 228 | ► радіоактивного розпаду | 192 |
| Астрономічна одиниця | 217, 241 | Закони | |
| Бета-розділ | 192 | ► Кеплера | 221, 222 |
| Бета-частинка | 190 | ► Фарадея | 56 |
| Болід | 230 | ► фотоефекту | 175 |
| Взаємодії | 201 | Заряд | |
| Галактики | 246 | ► електричний | 6 |
| Гамма-промені | 190 | ► пробний | 10 |
| Діелектрична проникність | | ► точковий | 7 |
| речовини | 18 | Зоря | 230 |
| Діюче (ефективне) значення | | Зоряна величина | |
| ► напруги | 122 | ► абсолютна | 240 |
| ► струму | 121 | ► видима | 240 |
| Діаграма спектр-світність | 243 | Ізотопи | 189 |
| Дисперсія | 153 | Індуктивність | 81 |
| Дифракція | 111, 148 | Інтерференція | 110, 142 |
| Довжина хвилі | 108, 135 | Катіон | 56 |
| Донорні домішки | 52 | Квант | 171 |
| Гратка дифракційна | 149 | Кварк | 202 |
| Екліптика | 207 | Когерентність | 110, 142 |
| Екзопланета | 260 | Коефіцієнт трансформації | 130 |
| Електроемність | 26 | Коливання | |
| Електроліз | 56 | ► вільні (власні) | 89, 115 |
| Електромагнітна індукція | 73 | ► вимушенні | 90, 103, 120 |
| Електронно-дірковий перехід | 53 | ► гармонічні | 92 |
| Електростатична індукція | 7, 15 | Конденсатор | 27 |
| Електрорушійна сила | 39 | Контур коливальний | 114 |
| Енергія | | Корпускулярно-хвильовий | |
| ► зарядженого конденсатора | 29 | дуалізм | 172 |
| ► зв'язку атомного ядра | 185 | Лінії | |
| ► магнітного поля | 82 | ► напруженості | |
| ► темна | 257 | електричного поля | 12 |
| Енергетичні рівні | 179 | ► індукції магнітного поля | 65 |
| Енергетичний вихід | | Магнітна індукція | 65 |
| ядерної реакції | 197 | Метеор | 230 |
| Закон | | Метеорит | 230 |
| ► відбиття світла | 159 | Мультиверсум | |
| ► Габбла | 250 | (мультивесевіт) | 262 |

Надпровідність	50	Рівняння механічної хвилі	109
Напруга	23, 34	Речовина темна	256
Напруженість електричного поля	10	Робота виходу	175
Небесна сфера	206	Розряд газовий	59
Опір		Резонанс	104
► електричний	33	Самоіндукція	80
► ємнісний	124, 126	Сила	
► індуктивний	124, 127	► Ампера	68
Оптична довжина шляху	143	► консервативна	19, 20
Оптична сила	165	► Лоренца	70
Паралакс		► струму	33
► горизонтальний	241	Сонячна стала	233
► річний	240	Спектр	
Парсек	240	► дифракційний	150
Період		► дисперсійний	153
► електричних коливань	117	► лінійчатий	182
► коливань математичного маятника	101	► неперервний	154, 183
► піврозпаду	192	► смугастий	183
► сидеричний	221	Спектральні класи зір	241
► синодичний	221	Струм	
Планета	216	► змінний	120
Планка стала	171	► індукційний	74
Поверхня еквіпотенціальна	23	► постійний	32
Поле		Температура ефективна	241
► вихрове	65	Теорія	
► індукційне	76	► Великого вибуху	255, 256
► електромагнітне	10, 76	► відносності загальна	253
► електростатичне	10	► стаціонарного всесвіту	252
► однорідне	12	Трансформатор	130
► потенціальне	19	Умови інтерференції	144
► стаціонарне	40	Фаза коливань	92
Поляризація світла	156	Фотон	172
Постулати Бора	179	Фотоефект	173
Потік магнітної індукції	73	Фронт хвилі	107
Потенціал електричного поля	22	Хвилі	
Принцип		► електромагнітна	134
► антропний	262	► механічна	107
► суперпозиції	11, 66	► стояча	109
Радіоактивність	189	Частинка елементарна	199
		Ядерна реакція	195

ДОДАТКИ

Періоди піврозпаду деяких радіоактивних речовин

Ізотоп	Період піврозпаду	Ізотоп	Період піврозпаду
Вісмут $^{210}_{83}\text{Bi}$	5,02 діб	Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 діб
Іридій $^{192}_{77}\text{Ir}$	75 діб	Стронцій $^{90}_{38}\text{Sr}$	28 років
Кальцій $^{45}_{20}\text{Ca}$	164 діб	Торій $^{233}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ років
Натрій $^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 год	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ років
Полоній $^{210}_{84}\text{Po}$	138 діб	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радій $^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 років		

Відносна атомна маса деяких ізотопів¹, а. о. м.

Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса
Гідроген ^1_1H	1,00783	Бор $^{11}_5\text{B}$	11,00930	Алюміній $^{28}_{13}\text{Al}$	27,9769
Дейтерій ^2_1H	2,01410	Карбон $^{12}_6\text{C}$	12,0	Силіцій $^{28}_{14}\text{Si}$	27,9769
Тритій ^3_1H	3,01605	Нітроген $^{13}_7\text{N}$	13,00574	Силіцій $^{30}_{14}\text{Si}$	29,97377
Гелій ^3_2He	3,01603	Нітроген $^{14}_7\text{N}$	14,00307	Фосфор $^{31}_{15}\text{P}$	30,97376
Гелій ^4_2He	4,00260	Оксиген $^{16}_8\text{O}$	15,99491	Ферум $^{56}_{26}\text{Fe}$	55,9349
Літій ^6_3Li	6,01512	Оксиген $^{17}_8\text{O}$	16,99913	Кобальт $^{59}_{27}\text{Co}$	58,93320
Літій ^7_3Li	7,01600	Флуор $^{19}_9\text{F}$	18,99840	Нікол $^{60}_{29}\text{Ni}$	59,9308
Берилій ^7_4Be	7,01693	Неон $^{20}_{10}\text{Ne}$	19,99244	Ксенон $^{131}_{54}\text{Xe}$	130,9051
Берилій ^8_4Be	8,00531	Натрій $^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	235,0493
Берилій ^9_4Be	9,01218	Натрій $^{24}_{11}\text{Na}$	23,99097	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	238,05353
Бор $^{10}_5\text{B}$	10,01294	Алюміній $^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154		

¹ Щоб визначити масу ядра, треба відняти сумарну масу електронів. Маса спокою електрона становить 0,0005486 а. о. м.

Таблиця значень синусів і тангенсів для кутів 0–90°

Градуси	Синуси	Тангенси	Градуси	Синуси	Тангенси	Градуси	Синуси	Тангенси
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,804
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,6249	62	0,8829	1,881
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,963
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,145
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,246
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,356
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,475
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,605
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,747
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,904
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,078
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,271
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,487
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,732
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,036	76	0,9703	4,011
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,072	77	0,9744	4,331
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,111	78	0,9781	4,705
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,150	79	0,9816	5,145
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,192	80	0,9848	5,671
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,235	81	0,9877	6,314
21	0,3584	0,3839	52	0,7880	1,280	82	0,9903	7,115
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,327	83	0,9925	8,114
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,376	84	0,9945	9,514
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,428	85	0,9962	11,43
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,483	86	0,9976	14,30
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,540	87	0,9986	19,08
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,600	88	0,9994	28,64
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,664	89	0,9998	57,29
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,732	90	1,0000	∞
30	0,5000	0,5774						

Навчальне видання

ЗАСЄКІНА Тетяна Миколаївна
ЗАСЄКІН Дмитро Олександрович

ФІЗИКА І АСТРОНОМІЯ

(рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу
під керівництвом Ляшенка О. І.)

Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Редактор О. С. Ісак
Головний художник І. П. Медведовська
Технічний редактор Е. А. Авраменко
Коректор С. В. Войтенко

При оформленні підручника використано малюнки та фотоілюстрації авторів:
Akira Okumura, Ateens Chen, CERN, Chen Yiming, Deborah Lee Soltesz, ESA, Gary Daines, Hi Tec Art, Hubble, Illia Miatka,
Jeff Dai, Jonathan Knowles, Kamioka Observatory, ICRR, Ligo Caltech, Luis Argerich, Modes Rodriguez, NASA, Raúl Dominguez,
The HESS Collaboration, Thom Holmes, Thomas O'Brien, а також матеріали сайту freepik.com.

Формат 70x100 1/₁₆.
Ум. друк. арк. 22,032 + 0,324 форзац.
Обл.-вид. арк. 21,50 + 0,55 форзац.
Зам. №
Наклад 38 270 пр.

ТОВ «Український освітянський видавничий центр “Оріон”»

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

Серія ДК № 4918 від 17.06.2015 р.
Адреса видавництва: вул. Миколи Шепелєва, 2, м. Київ, 03061

Віддруковано у ТОВ «КОНВІ ПРІНТ».

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

Серія ДК № 6115, від 29.03.2018 р.
03680, м. Київ, вул. Антона Цедіка, 12, тел. +38 044 332-84-73.