

# ФІЗИКА і АСТРОНОМІЯ

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ

**11**  
клас

# ФІЗИКА і АСТРОНОМІЯ

*«Фізика і астрономія (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом О.І. Ляшенка)»  
підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти*

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України*



Київ  
Педагогічна думка  
2019



УДК 52/53\*кл11(075.3)  
Ф50

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

**ВИДАНО ЗА ДЕРЖАВНІ КОШТИ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО**

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ГОЛОВКО Микола Васильович  
КРЯЧКО Іван Павлович  
МЕЛЬНИК Юрій Степанович  
НЕПОРОЖНЯ Лідія Вікторівна  
СІПІЙ Володимир Володимирович

## **Фізика і астрономія**

(рівень стандарту,  
за навчальною програмою  
авторського колективу  
під керівництвом О.І. Ляшенка)  
підручник для 11 класу  
закладів загальної середньої освіти

Редактор Сергій Бартош  
Комп'ютерна верстка Юрій Штефан  
Обкладинка Людмила Лук'яненко  
Коректура Ольга Яремійчук

Підписано до друку 22.05.2019 р.  
Формат 70х100 1/16.

Гарнітура шкільна.  
Друк. офсетний. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 23,4. Обл.-вид. арк. 22,23.  
Наклад 30525 пр. Зам.

Видавництво «Педагогічна думка»  
вул. Січових Стрільців, 52-а, корп. 2;  
м. Київ, 04053  
тел./факс: (044) 481-38-85  
books-xl@ukr.net  
4813885@ukr.net

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої  
справи до Державного реєстру видавців,  
виготовників розповсюджувачів  
видавничої продукції  
Серія ДК №3563 від 28.08.2009.

Віддруковано у ТОВ «КОНВІ ПРІНТ».  
Свідectво ДК № 6115, від 29.03.2018 р.  
вул. Антона Цедіка, 12, м. Київ, 03680  
тел. +38 044 332-84-73  
mail@konviprint.co.ua

**Фізика і астрономія** (рівень стандарту, за навчальною про-  
Ф50 грамою авторського колективу під керівництвом О.І. Ляшен-  
ка) підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти/  
авт. М.В. Головка, І.П. Крячко, Ю.С. Мельник, Л.В. Непорожня,  
В.В. Сіпій — Київ: Педагогічна думка, 2019. — 288 с.: іл.

ISBN 978-966-644-500-4

**УДК 52/53\*кл11(075.3)**

ISBN 978-966-644-500-4

© М. В. Головка, І. П. Крячко, Ю. С. Мельник,  
Л. В. Непорожня, В. В. Сіпій, 2019  
© Педагогічна думка, 2019

# ЗМІСТ

Слово до учнів.....	5
Слово до вчителя.....	5
<b>Розділ 1. Електродинаміка.....</b>	<b>6</b>
§ 1. Електромагнітна взаємодія. Закон Кулона.....	6
§ 2. Електричне поле.....	11
§ 3. Робота з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі. Потенціал.....	16
§ 4. Речовина в електричному полі.....	20
§ 5. Електроємність. Конденсатори.....	24
<b>Практикум із розв’язування задач № 1.....</b>	<b>31</b>
<b>Виконуємо навчальний проект разом.....</b>	<b>37</b>
<b>Виявляємо предметну компетентність № 1.....</b>	<b>38</b>
§ 6. Умови виникнення електричного струму. Робота і потужність струму.....	40
§ 7. Електрорушійна сила джерела струму. Закон Ома для повного кола.....	45
§ 8. Розрахунок електричних кіл із послідовним і паралельним з’єднанням елементів.....	49
§ 9. Природа електричного струму в металах. Електричний струм у вакуумі.....	56
§ 10. Електричний струм у рідинах.....	59
§ 11. Електричний струм у газах та його застосування. Плазма.....	62
§ 12. Електропровідність напівпровідників. Напівпровідники як елементна база сучасної мікроелектроніки.....	66
<b>Домашній експеримент.....</b>	<b>73</b>
<b>Практикум із розв’язування задач № 2.....</b>	<b>73</b>
<b>Виявляємо предметну компетентність № 2.....</b>	<b>81</b>
§ 13. Магнітне поле струму. Індукція магнітного поля.....	84
§ 14. Дія магнітного поля на провідник зі струмом. Рухомі заряджені частинки в магнітному полі.....	90
§ 15. Закон електромагнітної індукції. Індуктивність.....	98
<b>Практикум із розв’язування задач № 3.....</b>	<b>106</b>
<b>Виявляємо предметну компетентність № 3.....</b>	<b>114</b>
<b>Розділ 2. Коливання та хвилі.....</b>	<b>116</b>
§ 16. Вільні та вимушені коливання.....	116
§ 17. Перетворення енергії під час коливань.....	121
§ 18. Механічні хвилі та їх властивості.....	127
§ 19. Електромагнітні хвилі.....	133
§ 20. Розвиток поглядів на природу світла. Основні фотометричні величини та їх вимірювання.....	138
§ 21. Світло як електромагнітна хвиля.....	143
§ 22. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової.....	152
<b>Практикум із розв’язування задач № 4.....</b>	<b>159</b>
<b>Виявляємо предметну компетентність № 4.....</b>	<b>162</b>



<b>Розділ 3. Квантова фізика</b> .....	164
§ 23. Квантові властивості світла .....	164
§ 24. Фотоефект. .....	166
<b>Практикум із розв'язування задач № 5</b> .....	169
<b>Виявляємо предметну компетентність № 5</b> .....	173
§ 25. Випромінювання та поглинання світла .....	175
§ 26. Атомне ядро. Радіоактивність .....	179
§ 27. Ядерні реакції. Ядерна енергетика .....	186
<b>Домашній експеримент «Моделювання радіоактивного розпаду»</b> ...	192
§ 28. Елементарні частинки .....	193
<b>Практикум із розв'язування задач № 6</b> .....	194
<b>Виявляємо предметну компетентність № 6</b> .....	200
<b>АСТРОНОМІЧНИЙ СКЛАДНИК</b> .....	202
<b>Розділ 1. Основи практичної астрономії</b> .....	203
§ 29. Небесні світила, небесна сфера, сузір'я .....	203
§ 30. Видимі рухи світил, визначення часу, календарі .....	209
§ 31. Спостереження зоряного неба й орієнтування по небесних світилах .....	213
<b>Практична робота № 1</b> .....	217
<b>Виявляємо предметну компетентність з основ практичної астрономії</b> .....	219
<b>Розділ 2. Фізика Сонячної системи</b> .....	220
§ 32. Планети і їхні супутники .....	220
§ 33. Карликові планети і малі тіла .....	226
§ 34. Внесок космонавтики в астрономію. Космогонія Сонячної системи .....	230
<b>Виявляємо предметну компетентність з фізики сонячної системи</b> ...	234
<b>Розділ 3. Методи та засоби астрономічних досліджень</b> .....	235
§ 35. Методи і засоби досліджень в астрономії .....	235
<b>Виявляємо предметну компетентність з питань методів та засобів астрономічних досліджень</b> .....	241
<b>Розділ 4. Зорі та галактики</b> .....	242
§ 36. Сонце та інші зорі .....	242
§ 37. Подвійні та змінні зорі. Походження й еволюція зір .....	248
§ 38. Молочний Шлях та інші галактики .....	254
<b>Виявляємо предметну компетентність у питаннях зір та галактик</b> ..	261
<b>Розділ 5. Всесвіт</b> .....	262
§ 39. Походження і розвиток Всесвіту .....	262
§ 40. Життя у Всесвіті .....	267
<b>Виявляємо предметну компетентність у питаннях походження і розвитку Всесвіту</b> .....	270
<b>Лабораторний практикум</b> .....	271
<b>Відповіді до вправ</b> .....	286

## СЛОВО ДО УЧНЯ Й УЧЕНИЦІ

Шановні друзі! В 11-му класі ви продовжуєте вивчення предмета «Фізика і астрономія», в якому викладені основи фундаментальних наук про природу — фізики та астрономії.

Вивчаючи цей предмет, ви завершите ґрунтовне опанування наукових основ фізики і астрономії, поглибите уявлення про особливості перебігу природних явищ та процесів, а також методів їх дослідження, використання в побуті, техніці та технологіях. Намагайтеся не просто розширити свої знання з фізики та астрономії, а й спробуйте використовувати їх для вирішення різноманітних навчальних та життєвих практичних завдань: розв'язувати фізичні та астрономічні задачі, планувати й реалізовувати спостереження та експерименти, аналізувати їх результати, оцінювати ефективність побутових приладів та впроваджувати енергоощадні технології. Все це сприятиме успішній підготовці до незалежного зовнішнього оцінювання з фізики, свідомому вибору напрямку майбутньої навчальної та професійної діяльності, а також вступу до закладу вищої освіти.

Сподіваємося, що пропонований підручник допоможе вам у досягненні цих цілей та сприятиме формуванню цілісної природничо-наукової картини світу, розвитку фізичного мислення, усвідомленню того, що кожна людина є невід'ємною частинкою природи і саме від нас залежить її майбутнє.

До підручника включено різноманітні творчі завдання на формування практичних умінь і навичок, практикуми з розв'язування фізичних задач та лабораторний практикум. Ґрунтовне опанування фізики й астрономії передбачає системну самостійну роботу з матеріалом, виконання астрономічних і фізичних спостережень і дослідів. Розв'язуючи рекомендовані в підручнику завдання, пропонуйте власні оригінальні способи їх вирішення.

Намагайтеся не тільки уважно прочитати матеріал параграфів, а й проаналізувати та усвідомити прочитане, записати основні моменти, накреслити графіки або схеми. Виконуйте вправи та завдання для самоконтролю, розміщені наприкінці кожного параграфа. Це допоможе закріпити вивчений матеріал. Якщо ви не знаходите в підручнику відповіді на всі свої запитання, скористайтеся додатковими джерелами, наприклад, пошуковими системами Інтернету, але пам'ятайте, що користуватися ними потрібно, насамперед, з метою розв'язання навчально-пізнавальних завдань.

Якщо наполегливо і творчо підійдете до виконання навчальних проєктів, використовуючи знання та вміння з предмета, можливо, вам вдасться зробити й власні відкриття, що в майбутньому стануть основою новітніх технологій.

Тож бажаємо вам творчого, цікавого та успішного вивчення фізики й астрономії.

## СЛОВО ДО ВЧИТЕЛЯ/ВЧИТЕЛКИ

Підручник є складовою навчально-методичного забезпечення базового предмета «Фізика і астрономія», вивчення якого передбачено Типовими навчальними планами 10—11-х класів закладів загальної середньої освіти (наказ Міністерства освіти і науки України №1541 від 24.11.2017).

Зміст підручника відповідає навчальній програмі з фізики й астрономії, затвердженій МОН України (наказ №1539 від 24.11.2017, режим доступу: <http://mon.gov.ua/activity/education/zagalna-serednya/navchalni-programy.html>), згідно з якою на вивчення предмета в 11-му класі відведено 4 години на тиждень.

Оскільки в старшій школі засвоєння фізичного й астрономічного компонентів освітньої галузі «Природознавство» Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти мають споріднений предмет навчання, методи дослідження та роблять спільний внесок у формування наукової картини світу, ці два компоненти об'єднано в єдиний навчальний предмет «Фізика і астрономія» зі збереженням своєрідності кожного з цих складників.

На базовому рівні ці складники можуть реалізовуватися як у вигляді відносно самостійних модулів, так і інтегровано. У підручнику для 11-го класу астрономічний складник подано самостійним модулем, який включає «Вступ» та розділи: «Основи практичної астрономії», «Фізика Сонячної системи», «Методи та засоби астрономічних досліджень», «Зорі та галактики», «Всесвіт».

Оскільки навчання фізики і астрономії здійснюється на компетентнісних засадах, методичний апарат підручника орієнтований на формування ключових та предметної компетентностей учнів. Згідно з авторською концепцією, у підручнику втілено спробу реалізувати компетентнісний та особистісний підходи через побудову методичного апарату, диференційовану систему вправ, різноманітність завдань та вправ для самостійної роботи учнів, домашній фізичний експеримент, навчальні проєкти, лабораторний практикум та практикум із розв'язування задач.

З цією метою до підручника включено компетентнісно орієнтовані завдання, розв'язання яких передбачає використання набутих учнями знань та умінь із фізики й астрономії в практичних ситуаціях. Виокремлено спеціальну рубрику «Виявляємо предметну компетентність», в якій учням пропонуються завдання на виявлення рівня сформованості предметної компетентності у формі, максимально наближеній до формату зовнішнього незалежного оцінювання.

Сподіваємося, пропонований підручник стане вчителям помічником у реалізації авторських методичних систем та успішного навчання учнів.

*Автори*

*Автори*

# Розділ 1

## Електродинаміка

Упродовж тривалого часу електричні та магнітні явища вивчали відокремлено, і лише у другій половині XIX ст. Дж. Максвелл створив теорію єдиного електромагнітного поля. Теорія електромагнетизму є першою фізичною теорією поля, яка надає можливість здійснювати визначні відкриття, й становить основу сучасної техніки та технології.

Електромагнітна взаємодія є однією з фундаментальних у природі та обумовлює більшість явищ навколишнього світу. Завдяки їй притягуються негативно заряджені електрони до позитивно заряджених ядер, забезпечуючи стабільність атомів і молекул. До неї зводяться сили пружності, тертя, поверхневого натягу. Вона впливає на агрегатні стани речовини, оптичні явища та ін. Проявом електромагнітної взаємодії є поширення світла як потоку частинок.

Розділ фізики, що вивчає електромагнітні взаємодії, називають *електродинамікою*.

### § 1. Електромагнітна взаємодія. Закон Кулона

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете оперувати поняттями «електричний заряд», «електризація тіл», застосовувати закон Кулона та пояснювати природу електромагнітної взаємодії.*

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД ЯК ДЖЕРЕЛО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.** Електромагнітна взаємодія, так само, як і гравітаційна, є далекодіючою та проявляється і на мікро-, і на макрорівнях. Проте, якщо гравітаційна взаємодія властива всім матеріальним частинкам, то електромагнітна — лише *зарядженим* частинкам і тілам. Можуть існувати тіла та частинки без заряду, проте заряд без тіла чи частинки існувати не може. Тобто електромагнітна взаємодія частинок (або тіл) визначається їх електричними зарядами.

**Електричний заряд є джерелом і мірою електромагнітної взаємодії.**

Електромагнітна взаємодія поширюється в просторі зі швидкістю світла ( $c = 300\,000$  км/с),



**Джеймс Максвелл**  
(1831—1879),  
шотландський фізик,  
творець теорії єдиного  
електромагнітного поля



тому сила взаємодії між зарядженими частинками починає діяти не миттєво, а через деякий інтервал часу  $t = \frac{r}{c}$ .

Вираз «заряд» вживають для позначення невеликого зарядженого тіла чи зарядженої частинки. Досліди показали, що існують два види електричного заряду. Різноміненні заряди притягуються між собою, а одноіменні — відштовхуються.

*Тіла, заряджені різноміменно, притягуються, а одноіменно — відштовхуються.*

Заряд, що виникає на склі в результаті натирання його шовком, домілися називати позитивним і позначати знаком «+», а заряд, що виникає в результаті натирання ебоніту хутром, — негативним і позначати його знаком «-». Такий поділ є досить умовним, оскільки заряди різних видів виявляють однакові властивості.

Електричний заряд позначається латинською літерою  $q$  (від англ. *quantity* — кількість). Одиницею електричного заряду в СІ є кулон (Кл), вона названа на честь французького вченого Ш. Кулона:  $[q] = 1 \text{ Кл}$ .

### ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ.

Тіла, які набули електричного заряду, називають *наелектризованими*, а *процес набуття тілом електричного заряду — електризацією*. Скляна паличка, натерта об шовк, електризується, що виявляється в її здатності притягувати, наприклад, шматочки паперу та тонкі струмені води (рис. 1.1). При цьому шовк також електризується.

Під час електризації тертям двох тіл електризуються обидва дотичні тіла.

Якщо доторкнутися наелектризованим тілом до тіла, що не має електричного заряду (до електрично нейтрального), частина заряду переходить з одного тіла на друге. Тобто електричний заряд може поділятися на частини, найменшою з яких є заряд електрона.

*Носієм найменшого негативного заряду є електрон  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .*

Носієм найменшого позитивного заряду є протон. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона.

Отже, наелектризувати тіло, що не має електричного заряду, можна тертям або доторканням до наелектризованого тіла. Електризація може відбуватися й за відсутності контакту між тілами. Якщо до нейтрального тіла піднести заряджене тіло, то негативно заряджені вільні електрони в нейтральному тілі накопичуються в ближчій до зарядженого тіла частині, залишаючи іншу позитивно зарядженою. Таке явище називають електростатичною індукцією. Існують й інші способи електризації тіл, наприклад, нагріванням, опромінюванням тощо.



**Рис. 1.1.**  
Наелектризована скляна паличка притягує шматочки паперу та тонкі струмені води

Заряд, набутий тілом внаслідок електризації, можна визначити як добуток заряду електрона  $e$  та кількості електронів  $N$ , яких набуло чи втратило тіло внаслідок електризації:  $|q| = |e| \cdot N$

Процес електризації можна пояснити, розглянувши будову атома. Під час електризації заряди перерозподіляються між тілами. При цьому на скільки зменшиться кількість електронів в одному тілі, на стільки ж збільшиться в іншому. Повний заряд такої системи не зміниться і залишиться рівним нулю. Під час контакту зарядженого тіла з електрично нейтральним заряд перерозподілиться між тілами, проте сумарне його значення залишиться сталим.

Тобто для заряджених тіл, що утворюють замкнуту систему, виконується *закон збереження електричного заряду*:

**Алгебраїчна сума зарядів у замкнутій системі лишається сталою:**

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

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — електричні заряди тіл або частинок.

**ВЗАЄМОДІЯ ТОЧКОВИХ ЗАРЯДІВ. ЗАКОН КУЛОНА.** Електричний заряд є властивістю тіл або їхніх частинок діяти одні на одних із електричною силою. Закон взаємодії точкових зарядів (*заряджених тіл, розмірами яких в умовах даної задачі можна знехтувати*) встановив французький учений Ш. Кулон у 1785 р.

Сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів прямо пропорційна чисельному значенню добутку модулів цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними та напрямлена вздовж прямої лінії, що з'єднує заряди (рис. 1.2):

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

де  $q_1, q_2$  — модулі зарядів;  $r$  — відстань між точковими зарядами;  $k$  — коефіцієнт пропорційності.

Фізичний зміст коефіцієнта пропорційності  $k$  полягає в тому, що він показує, з якою силою взаємодіють у вакуумі два точкові заряди по 1 Кл на

відстані 1 м. У СІ  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .

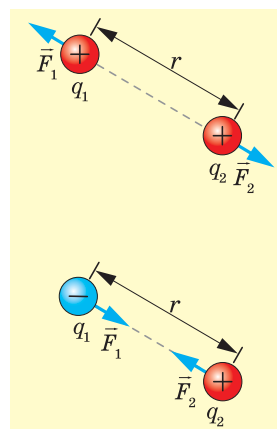
Замість коефіцієнта  $k$  використовують фундаментальну фізичну константу — електричну сталу

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Відповідно, закон Кулона записують у вигляді:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

Взаємодію нерухомих електричних зарядів називають *електростатичною, або кулонівською, взаємодією*.



**Мал. 1.2.**

Напрямок сили Кулона під час взаємодії однойменних та різнойменних зарядів

Розглянемо приклади розв'язування задачі на використання закону Кулона.

**Задача.** Три точкові заряди розташовані вздовж прямої на відстанях  $r_{12} = 4$  см та  $r_{23} = 6$  см один від одного. Обчислити значення результуючих кулонівських сил, що діють на кожен із цих зарядів, якщо значення зарядів  $q_1 = -20$  нКл,  $q_2 = 40$  нКл,  $q_3 = 10$  нКл.

**Дано:**

$$q_1 = -20 \text{ нКл} = -2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 40 \text{ нКл} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_3 = 10 \text{ нКл} = 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_{12} = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_{23} = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_{13} = r_{12} + r_{23} = 10 \text{ см} = 10^{-1} \text{ м}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

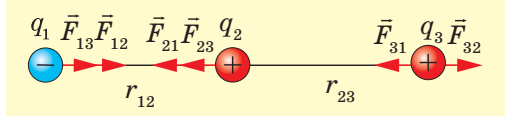
$$F_1 \text{ — ?}$$

$$F_2 \text{ — ?}$$

$$F_3 \text{ — ?}$$

**Розв'язування**

Виконаємо рисунок, на якому покажемо сили, що діють на кожен заряд з боку інших зарядів:



Врахуємо, що  $F_{12} = F_{21}$ ,  $F_{13} = F_{31}$ ,  $F_{32} = F_{23}$ .

Згідно із законами механіки, якщо на тіло діє  $n$  сил ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ ), то результуюча сила дорівнює їх геометричній сумі:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ .

Сили, прикладені до другого заряду, напрямлені в один бік, тому модуль рівнодійної сили також дорівнює сумі їх модулів:

$$F_2 = F_{21} + F_{23};$$

сили, прикладені до третього заряду, напрямлені в протилежні боки, тому модуль рівнодійної сили дорівнює різниці їх модулів, причому результуюча спрямована в бік більшої сили:

$$F_3 = F_{32} - F_{31}.$$

Відповідно до закону Кулона перший і другий заряд притягуються із силою:

$$F_{12} = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{12}^2}$$

Другий і третій заряди відштовхуються із силою, модуль якої дорівнює:

$$F_{23} = k \cdot \frac{|q_2| \cdot |q_3|}{r_{23}^2}$$

Перший і третій заряди притягуються із силою, модуль якої дорівнює:

$$F_{13} = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_3|}{r_{13}^2}$$

Запишемо рівнодійну сил, що діють на кожен із точкових зарядів. Сили, прикладені до першого заряду, напрямлені в один бік, тому модуль рівнодійної сили дорівнює сумі їх модулів:

$$F_1 = F_{12} + F_{13} = k|q_1| \left( \frac{|q_2|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{13}^2} \right) = 0,198 \text{ мН};$$

сили, прикладені до другого заряду, напрямлені в один бік, тому модуль рівнодійної сили також дорівнює сумі їх модулів:



$$F_2 = F_{12} + F_{23} = k|q_2| \left( \frac{|q_1|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{23}^2} \right) = 0,240 \text{ мН}$$

сили, прикладені до третього заряду, направлені в протилежні боки, тому модуль рівнодійної сили дорівнює різниці їх модулів, причому результуюча спрямована в бік більшої сили:

$$F_3 = F_{23} - F_{13} = k|q_3| \left( \frac{|q_2|}{r_{23}^2} - \frac{|q_1|}{r_{13}^2} \right) \approx 0,042 \text{ мН}$$

Відповідь:  $F_1 = 198 \text{ мкН}$ ;  $F_2 = 240 \text{ мкН}$ ;  $F_3 \approx 42 \text{ мкН}$ .

### ! Головне в цьому параграфі

Електричний заряд є джерелом і мірою електромагнітної взаємодії. Можуть існувати тіла та частинки без заряду, але заряд без тіла чи частинки існувати не може.

У процесі електризації тіло або втрачає частину електронів (позитивно заряджене тіло), або ж набуває надлишкових (негативно заряджене тіло). При цьому заряд перерозподіляється між тілами, проте сумарне його значення залишається сталим.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що є джерелом електромагнітної взаємодії? 2. Які заряди називають точковими? 3. Сформулюйте закон Кулона. 4. Що називають кулонівською взаємодією? 5. Чи можна тілу надати заряд  $2e$ ,  $\frac{2}{3}e$ ,  $\frac{3}{2}e$ ? Поясніть.

### Домашній експеримент

1. Візьміть дві повітряні кульки та підвісьте їх на нитках на деякій відстані одна від одної. Одну з них наелектризуйте, потерши об папір, другу — об шерстяну тканину чи хутро. Проведіть спостереження, як залежить сила притягання між кульками від відстані між ними та від величини електричного заряду.

2. Наелектризуйте повітряну кульку та спробуйте «приклеїти» її до стіни. Перевірте та поясніть, чи залежить результат цього експерименту від того, чим електризувати кульку (наприклад, хутром або шовком), та як саме.

### Вправа до § 1

- 1(с). Поясніть, як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо відстань між ними збільшити у 3 рази.
- 2(с). Поясніть, як зміниться сила взаємодії між двома зарядженими точковими тілами, якщо заряд кожного з них збільшити у два рази.
- 3(д). Дві дощові хмари мають електричні заряди 12 і 20 Кл. Хмари знаходяться на відстані 3 км одна від одної. Обчисліть силу кулонівської взаємодії між хмарами, вважаючи хмари точковими зарядами, оскільки розміри хмар значно менші за відстані між ними.
- 4(д). Обчисліть відстань між двома точковими зарядами 10 нКл і 3 нКл, якщо сила їх взаємодії становить  $24 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ .

- 5(д).** Два однакові точкові позитивні заряди перебувають на відстані 10 мм один від одного. Заряди взаємодіють із силою  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Визначте величини цих зарядів.
- 6(в).** Дві однакові маленькі заряджені кульки знаходяться на відстані 40 см одна від одної. Заряд однієї з них 8 нКл, а заряд другої -2 нКл. Кульки привели в контакт, а потім повернули на початкову відстань. Знайдіть силу взаємодії кульок до і після контакту.
- 7(в).** Точкові заряди 20 нКл і 40 нКл закріплені на відстані 10 см один від одного у вакуумі. Посередині між ними розміщують точковий заряд -5 нКл. Обчисліть модуль і напрямок результуючої сили, яка діє на цей заряд.

## § 2. Електричне поле

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати властивості електричного поля, сутність його силової характеристики та принцип суперпозиції полів, застосовувати формулу напруженості поля точкового заряду та принцип суперпозиції полів, зображати електричне поле за допомогою силових ліній.*

**ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ.** Закон Кулона кількісно описує взаємодію заряджених тіл. Проте механізм цієї взаємодії тривалий час залишався невідомим. Видатний англійський фізик М. Фарадей висунув гіпотезу, що навколо електрично заряджених тіл існує електричне поле, яке й забезпечує їх взаємодію.

**Електричне поле є особливим видом матерії, що існує навколо електрично заряджених тіл, викликає та забезпечує взаємодію між ними.**

Електричне поле є проявом єдиного електромагнітного поля. Електричне поле може створюватися рухомими та нерухомими електричними зарядами, а також змінними магнітними полями. Електричне поле, зв'язане з нерухомими (статичними) зарядами, називають *електростатичним*.

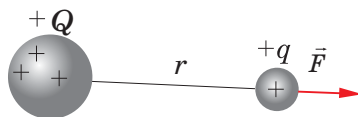
Основна властивість електричного поля, завдяки якій воно виявляє своє існування, — це здатність діяти на електричні заряди з певною силою і через певний час після початку електризації.

**НАПРУЖЕНОСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.** Електричне поле діє на заряджені тіла з різною інтенсивністю, яка залежить не тільки від величини заряду тіла, а й від характеристики самого поля.

Розглянемо електричне поле, яке створене точковим електричним зарядом  $Q$ . Внесемо в нього пробний заряд  $q$ .

**Пробним називають такий заряд, значення якого настільки мале, що під час внесення в досліджуване електричне поле цей заряд не змінює його.**

Електричне поле буде діяти на пробний заряд із силою  $F$ , яка залежить від величини пробного заряду (рис. 2.1). Проте дослі-



**Рис. 2.1.** Електричне поле точкового заряду  $Q$  діє на пробний заряд  $q$

ди показують, що відношення цієї сили до пробного заряду  $\frac{F}{q}$  не залежить від його значення.

Силова дія електричного поля характеризується його *напруженістю*.

**Напруженістю електричного поля називають векторну фізичну величину, яка дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на пробний позитивний точковий заряд, вміщений у певну точку простору, до величини цього заряду:**

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

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямом сили Кулона, що діє на одиничний позитивний заряд, вміщений у певну точку поля (рис. 2.2).

Одиницею напруженості в СІ є  $[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

Напруженість електричного поля, що створюється точковим зарядом, можна визначити за допомогою закону Кулона: заряд  $Q$  та пробний заряд  $q$  взаємодіють із силою  $F = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2}$ . Тоді модуль напруженості:

$$E = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2 \cdot |q|} = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Модуль напруженості  $\vec{E}$  електричного поля точкового заряду на відстані  $r$  від нього обчислюється за формулою:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

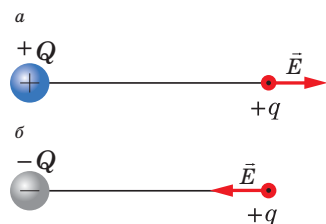
Знаючи напруженість поля в довільній точці простору, можна визначити силу, що діє на заряд  $q$ , уміщений у цю точку:

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

Приклади значень напруженості електричного поля в природі наведено в табл. 1. (див. QR-код)

**НАОЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.** Електричне поле виявляється через його дію на заряджені тіла. Щоб зобразити його наочно, будують вектори напруженості в декількох точках, які дають уявлення про розподіл електричного поля в просторі.

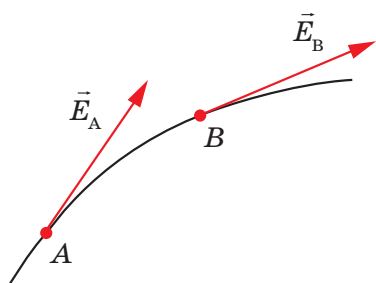
Вектор напруженості  $\vec{E}$  електричного поля має певні значення і напрям у кожній його точці. Для наочного зображення будують неперервні лінії, дотичні до яких у кожній точці поля, через яку вони проходять, збігаються з вектором напруженості. Такі лінії називають *силовими лініями* електричного поля або *лініями напруженості* (рис. 2.3).



**Рис. 2.2.** Напрямок вектора напруженості електричного поля: а — позитивного точкового заряду; б — негативного точкового заряду





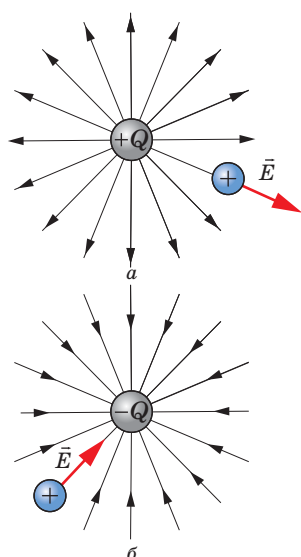


**Рис. 2.3.** Лінія напруженості електричного поля

Дві силові лінії ніколи не перетинаються, бо якби вони перетинались, то це означало б, що одній і тій самій точці простору відповідає два різних напрямки сили поля, що, звісно, неможливо.

Лінії напруженості електричного поля, що утворене позитивним точковим зарядом, напрямлені радіально від заряду (рис. 2.4, а), а утворені негативним зарядом, напрямлені радіально до заряду (рис. 2.4, б).

Лінії напруженості реально не існують, це лише спосіб наочного зображення електричного поля.



**Рис. 2.4.** Лінії напруженості електричного поля точкового заряду: а — позитивного; б — негативного

Чи можна побачити силові лінії електричного поля в просторі?  
(<http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-Phys11-14.pdf>)



**ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ.** Більшість практичних задач пов'язані з розрахунком електричних полів, які створюються не одним, а багатьма зарядами. У такому полі на пробний заряд буде діяти не одна кулонівська сила  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , а декілька. Їх результуюча дорівнює геометричній сумі сил:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ . З огляду на те, що напруженість є векторною величиною, а сили, що діють на пробний заряд з боку інших зарядів, не залежать одна від одної, можна зробити висновок, що напруженість результуючого поля всіх зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей окремих полів. Тобто напруженості полів додаються геометрично.

У цьому полягає принцип суперпозиції (накладання) електричних полів:

**напруженість електричного поля системи зарядів у певній точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, що створені в цій точці окремо кожним зарядом:**  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$ .

Розглянемо електричне поле двох точкових зарядів. Нехай  $\vec{E}_1$  — напруженість поля в точці А (рис. 2.5), що створюється позитивним зарядом  $q_1$  (коли заряд  $q_2$  відсутній), а  $\vec{E}_2$  — напруженість поля, що створюється негативним зарядом  $q_2$  (коли немає заряду  $q_1$ ).

Якщо в точку  $A$  помістити пробний заряд  $q_0$ , поля обох зарядів діятимуть на нього з силами  $\vec{F}_1 = q_0 \vec{E}_1$  та  $\vec{F}_2 = q_0 \vec{E}_2$ , результуюча сила  $\vec{F}$  дорівнює геометричній сумі:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = q_0 \vec{E}_1 + q_0 \vec{E}_2 = q_0 (\vec{E}_1 + \vec{E}_2).$$

Відповідно, напруженість результуючого поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Отже, результуюче поле можна визначити накладанням (суперпозицією) електричних полів окремих зарядів.

### Приклад розв'язування задачі на принцип суперпозиції

**Задача.** Два точкові заряди  $q_1 = -14,7$  нКл і  $q_2 = 7,5$  нКл розміщені на відстані  $r = 5$  см. Знайти напруженість  $E$  електричного поля у точці, що знаходиться на відстанях  $a = 3$  см від позитивного та  $b = 4$  см від негативного.

**Дано:**

$$q_1 = 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -14,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

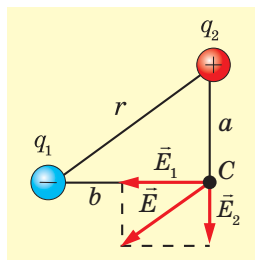
$$a = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$b = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$E$  — ?

**Розв'язування**



Зробимо рисунок і позначимо точку  $C$ , в якій потрібно знайти напруженість результуючого поля  $E$ .

Напруженість результуючого поля визначається за принципом суперпозиції (формула 3) як геометрична сума напруженостей полів, створених зарядами  $q_1$  і  $q_2$ :  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ .

$$\text{За теоремою косинусів: } E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1 \cdot E_2 \cos(\vec{E}_1 \wedge \vec{E}_2)}.$$

Кут між векторами  $\vec{E}_1$  та  $\vec{E}_2$  дорівнює куту  $\angle C$  між сторонами  $a$  і  $b$  трикутника  $q_1 C q_2$ , оскільки трикутник зі сторонами  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  та трикутник  $q_1 C q_2$  — подібні.

$$\angle C = 90^\circ \text{ (дійсно, } \Delta q_1 C q_2 \text{ — прямокутний, оскільки для нього } c^2 = a^2 + b^2, \text{ тобто } 5^2 = 3^2 + 4^2, \text{ або } \cos \angle C = \frac{a^2 + b^2 - r^2}{2a \cdot b} = \frac{3^2 + 4^2 - 5^2}{2 \cdot 3 \cdot 4} = 0).$$

$$\text{Тому } E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}.$$

Враховуючи, що напруженість електричного поля точкового заряду визначається за формулою  $E = k \cdot \frac{q}{r^2}$ , отримаємо:

$$E = \sqrt{k^2 \frac{q_1^2}{b^4} + k^2 \frac{q_2^2}{a^4}} = k \cdot \sqrt{\frac{q_1^2}{b^4} + \frac{q_2^2}{a^4}}.$$

Підставивши в цю формулу значення фізичних величин, отримаємо:

$$\begin{aligned}
 E &= 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \sqrt{\frac{216,09 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}^2}{256 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4} + \frac{56,25 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}^2}{81 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4}} = \\
 &= 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{0,85 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^4} + 0,7 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^4}} = \\
 &= 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 10^{-5} \sqrt{1,55} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = 9 \cdot 1,24 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1,12 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.
 \end{aligned}$$

Відповідь:  $E = 112 \frac{\text{кН}}{\text{Кл}}$ .

### ! Головне в цьому параграфі

Електричне поле є проявом єдиного електромагнітного поля. Електричне поле може створюватися рухомими та нерухомими електричними зарядами, а також змінними магнітними полями.

Силовa дія електричного поля характеризується його *напруженістю*. Лінії напруженості показують просторовий розподіл електричного поля.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Як можна виявити електричне поле в певній точці простору? 2. Сформулюйте визначення напруженості електричного поля. Назвіть одиницю напруженості. 3. Чому силові лінії електричного поля для точкових зарядів напрямлені радіально? 4. Де починаються і де закінчуються силові лінії електричного поля? Чому вони не перетинаються? 5. Чому дорівнює напруженість поля, створена в певній точці точковим зарядом? 6. Яке електричне поле називають однорідним? 7. Зобразіть силові лінії однорідного електричного поля. 8. У чому полягає принцип суперпозиції електричних полів? Про що він свідчить? 9. У певній точці поле створюється двома точковими зарядами. Як обчислити напруженість поля в цій точці?

### Вправа до § 2

- 1(с). Визначте напруженість електричного поля, яке діє на заряд 200 нКл із силою 1,65 мкН.
- 2(с). Визначте заряд тіла, на яке електричне поле з напруженістю  $15 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  діє з силою 12 мкН.
- 3(д). Обчисліть напруженість електричного поля  $E$  в точці, де на заряд  $q = 10^{-7} \text{ Кл}$  діє сила  $F = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$ . Чому дорівнює значення точкового заряду  $Q$ , який створює це поле, якщо ця точка поля знаходиться від нього на відстані  $r = 10 \text{ см}$ .
- 4(д). Визначте напруженість поля, що його створює протон на відстані  $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}$  від нього. Яка сила діє на електрон, що знаходиться в цій точці?
- 5(в). У двох сусідніх вершинах квадрата зі стороною 50 см містяться заряди по 27 нКл кожний. Визначте напруженість поля у двох інших вершинах квадрата.

### § 3. Робота з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі. Потенціал

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити сутність енергетичної характеристики електричного поля, зв'язок його напруженості з різницею потенціалів.*

**РОБОТА СИЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ З ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАРЯДУ.** З'ясуємо, як електричні заряди переміщуються в електричному полі. З курсу механіки ви знаєте, що для здійснення переміщення потрібно виконати роботу. Визначимо роботу, яку виконує однорідне електростатичне поле з переміщення позитивного заряду з точки 1 у точку 2. Таке поле можна створити, зарядивши різнойменно дві великі пластинки, розташовані на такій відстані одна від одної, яка значно менша за їхні розміри.

На точковий електричний заряд  $+q$ , внесений в однорідне електростатичне поле, діє сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

Робота з переміщення заряду:  $A = F \cos \alpha = qEs \cdot \cos \alpha$ . Оскільки заряд рухається в напрямі ліній напруженості електростатичного поля, то  $A = qEs$ .

Нехай переміщення заряду відбувається по лінії 1–3–2 (рис. 3.1.а). На відрізку прямої 1–3 поле виконує роботу  $A = qE(x_2 - x_1)$ , де  $x_1$  та  $x_2$  — початкова і кінцева координати заряду.

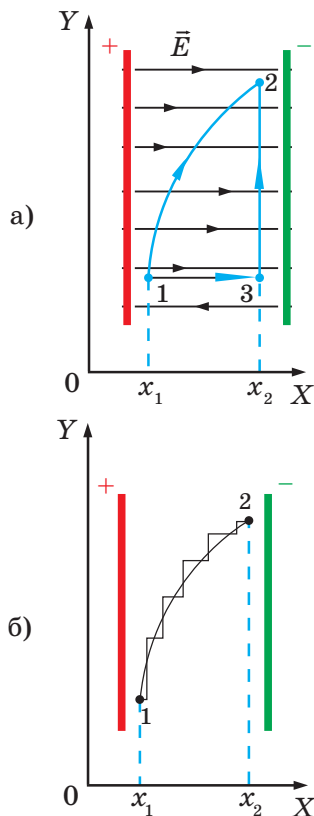
На відрізку 3–2 робота не виконується, оскільки сила діє перпендикулярно до переміщення. Отже, повна робота з переміщення заряду  $q$  з точки 1 у точку 2 по лінії 1–3–2 визначається за формулою:  $A = qE(x_2 - x_1)$ .

За цією ж формулою визначатиметься робота з переміщення заряду  $q$  з точки 1 у точку 2 за довільною кривою 1–2. Справді, криву 1–2 можна замінити східчастою лінією зі скільки завгодно малими східцями (рис. 3.1, б)).

**Робота сил однорідного електростатичного поля з переміщення електричного заряду  $q$  із точки 1 у точку 2 дорівнює:**

$$A = qE(x_2 - x_1).$$

Оскільки при переміщенні заряду вздовж осі  $Y$  робота не виконується (сила перпендикулярна переміщенню), на відрізках, паралельних осі  $X$ , буде виконана така сама робота, як і в попередньому прикладі руху по лінії 1–3–2.



**Рис. 3.1.** Переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

І хоч яку форму шляху ми оберемо, робота сил поля з переміщення цього заряду визначатиметься лише його початковим і кінцевим положенням.

Отже, робота з переміщення заряду в електростатичному полі залежить лише від його величини та визначається початковим і кінцевим положенням.

Якщо заряд переміщуватиметься проти напрямку поля (з точки 2 в точку 1), то сила електростатичного поля буде спрямована проти напрямку руху заряду і відіграє роль сили опору, а робота матиме від'ємне значення. Від'ємна робота поля на відрізку 2–1 дорівнює додатній роботі на відрізку 1–2–3.

**Отже, робота з переміщення електричного заряду в електростатичному полі замкнутою траєкторією дорівнює нулю.**

Цей висновок справедливий не тільки для однорідного, а й для будь-якого неоднорідного поля.

Поля, в яких робота сил не залежить від форми траєкторії, а визначається лише початковим і кінцевим положенням тіла, називаються потенціальними. Робота сил потенціального поля по замкнутій траєкторії дорівнює нулю. Електростатичне поле, так само, як і поле тяжіння Землі, є потенціальним.

**ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ.** На заряд, уміщений в електростатичне поле, діє електрична сила, здатна виконати роботу. Мірою її зміни є енергія. Подібно до того, як тіло, що взаємодіє із Землею за законом всесвітнього тяжіння, на різних відстанях від центру Землі має різне значення потенціальної енергії, пробний електричний заряд  $q_0$  на різних відстані від заряду  $q$ , що створює поле, також має різні значення енергії.

У вільному падінні тіла робота сили тяжіння дорівнює зменшенню його потенціальної енергії, так і при переміщенні заряду  $+q$  у напрямі силових ліній електричного поля робота  $A$  електричних сил дорівнює зменшенню потенціальної енергії заряду. Якщо значення потенціальної енергії заряду в точках 1 і 2 відповідно дорівнюють  $W_1$  і  $W_2$ , то величина роботи сил поля, що перемістили заряд, дорівнюватиме їх різниці:  $A = W_{11} - W_{12} = -\Delta W_{11}$ .

Потенціальна енергія взаємодії заряду  $q$  з однорідним електричним полем, створеним зарядом  $Q$ , визначається за формулою:  $W_{11} = k \frac{qQ}{r}$ .

Потенціальна енергія заряду  $q$  у довільній точці електростатичного поля характеризується потенціалом.

Потенціал — скалярна фізична величина, яка є енергетичною характеристикою електростатичного поля і дорівнює відношенню потенціальної енергії електричного заряду в певній точці поля до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{W_{11}}{q}.$$

Потенціал електростатичного поля, створеного зарядом  $Q$  у деякій точці на відстані  $r$  від нього, дорівнює:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$ .



Одиницею потенціалу в СІ є вольт:  $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$ .

Потенціал у довільній точці поля визначають як алгебраїчну суму потенціалів, створених окремими точковими зарядами:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n.$$

Практичне значення має не сам потенціал, а його зміна. Оскільки потенціальна енергія взаємодії заряду з однорідним електричним полем може бути виражена як  $W_{\Pi} = q\varphi$ , то робота:

$$A = -\Delta W_{\Pi} = -(W_{\Pi 2} - W_{\Pi 1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

де  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  — різниця потенціалів або напруга. Вона дорівнює:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}.$$

Відповідно:  $A = qU$ .

**Різниця потенціалів, або напруга між двома точками, — це фізична скалярна величина, що дорівнює відношенню роботи поля, яка виконується для переміщення заряду з початкової точки поля в кінцеву, до величини цього заряду.**

Одиницею напруги в СІ є вольт (В):  $[U] = 1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$ .

Напруга величиною  $U = 1 \text{ В}$  означає, що під час переміщення заряду в 1 Кл із однієї точки в іншу поле виконує роботу в 1 Дж.

Знаючи потенціал у кожній точці поля, можна знайти напруженість поля. Між напруженістю електростатичного поля  $E$  і напругою існує зв'язок.

Оскільки робота електростатичного поля з переміщення заряду на відстань  $d$  ( $d = x_2 - x_1$ ):  $A = qEd$  і  $A = qU$ , то:

$$E = \frac{U}{d}.$$

Отже, чим менше змінюється потенціал на відстані  $d$ , тим меншою є напруженість електричного поля. Якщо потенціал не змінюється, то напруженість дорівнює нулю. Напруженість електричного поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.

**ЕКВІПОТЕНЦІАЛЬНІ ПОВЕРХНІ.** Під час переміщення заряду під кутом  $90^\circ$  до силових ліній електричне поле не виконує роботу, оскільки сила перпендикулярна до переміщення, а це означає, що всі точки поверхні, перпендикулярної до силових ліній, мають однаковий потенціал. Поверхні однакового потенціалу називають *еквіпотенціальними*. Еквіпотенціальні поверхні однорідного поля є площинами, а поля точкового заряду — концентричними сферами (рис. 3.2).

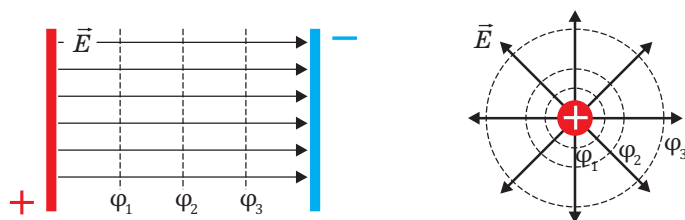


Рис. 3.2. Еквіпотенціальні поверхні

Силкові лінії, так само, як і еквіпотенціальні поверхні, якісно характеризують розподіл електричного поля у просторі. Вектор напруженості електричного поля перпендикулярний до еквіпотенціальних поверхонь. Еквіпотенціальною є будь-яка поверхня провідника в електростатичному полі.

### ! Головне в цьому параграфі

Електростатичне поле є потенціальним. Робота його сил з переміщення заряду залежить лише від величини поля та початкового й кінцевого положення. Робота на замкнутому шляху дорівнює нулю.

Потенціал електростатичного поля є його енергетичною характеристикою.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Як обчислюється робота з переміщення зарядженого тіла в однорідному електростатичному полі? 2. Чи залежить робота з переміщення заряду з однієї точки поля в іншу від форми траєкторії? 3. Які поля називаються потенціальними? Наведіть приклади потенціальних полів. 4. Яке перетворення енергії відбувається під час переміщення заряду в електричному полі під дією сил цього поля? 5. Що називають потенціалом електростатичного поля? За якою формулою його обчислюють? 6. Що називають різницею потенціалів між двома точками поля? 7. Що називають електричною напругою, який її зв'язок з різницею потенціалів? 8. За якою формулою обчислюють потенціал електростатичного поля точкового заряду? 9. Яка формула виражає зв'язок напруженості й різниці потенціалів в однорідному електричному полі? 10. Які поверхні називають еквіпотенціальними?

### Вправа до § 3

- 1(с). Обчисліть роботу однорідного електростатичного поля напруженістю  $50 \text{ Н/Кл}$ , в якому заряд величиною  $4 \text{ мКл}$  переміщується на  $5 \text{ см}$  у напрямі силових ліній поля.
- 2(с). Обчисліть потенціал поля, створеного точковим зарядом  $2 \text{ мКл}$ , на відстані  $3 \text{ м}$  від нього.
- 3(д). Обчисліть роботу, яку необхідно виконати, щоб заряд  $4,6 \text{ мКл}$  перемістити в полі між точками з різницею потенціалів  $2 \text{ кВ}$ .

- 4(д).** Обчисліть модуль напруженості електричного поля на відстані 5 м від відокремленого позитивно зарядженого тіла, якщо на відстані 4 м від нього потенціал поля дорівнює 100 В.
- 5(в).** Обчисліть зміну швидкості електрона в прискорювачі між двома точками його траєкторії, для яких  $\Delta\varphi = 20$  кВ,  $v_0 = 0$  м/с.
- 6(в).** Обчисліть роботу електростатичного поля напруженістю 1 кВ/м з переміщення точкового заряду 25 нКл на 2 см у напрямі силових ліній, зміну потенціальної енергії та різницю потенціалів між початковою та кінцевою точками.

#### § 4. Речовина в електричному полі

*Опрацювавши цей параграф, ви з'ясуєте особливості впливу речовини на інтенсивність та характер електростатичного поля.*

**ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ.** Електричні характеристики середовища визначаються рухливістю в ньому заряджених частинок. Рухливість заряджених частинок у середовищі визначається будовою атомів речовини та їх взаємним розміщенням.

Усі речовини за концентрацією та рухливістю в ньому заряджених частинок поділяють на *провідники, діелектрики і напівпровідники*.

У провідниках є заряджені частинки, здатні переміщатися всередині провідника під впливом електричного поля. Їх називають *вільними зарядами*.

Провідниками є всі метали, деякі хімічні сполуки, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей тощо.

У металах носіями вільних зарядів є електрони. Вільні електрони можуть вільно рухатися по всьому об'єму металу в будь-якому напрямі під дією електричного поля. Електрони зовнішніх оболонок втрачають зв'язки з конкретними атомами та утворюють електронний газ, в якому перебувають позитивно заряджені йони кристалічних ґраток.

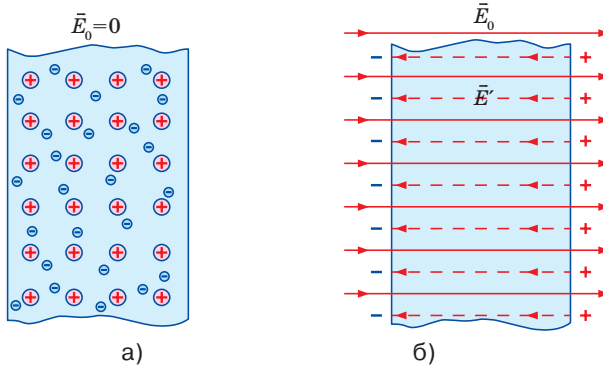
У розчинах солей вільними зарядами є позитивно і негативно заряджені йони. Вільними також можуть бути надлишкові заряди, що надані речовині ззовні.

За відсутності зовнішнього електричного поля негативний заряд електронів металевого провідника компенсується позитивним зарядом ядер його атомів. Якщо провідник внести в електричне поле, всередині провідника під дією поля виникне впорядкований рух вільних носіїв електричного заряду. Внаслідок такого руху на одному боці провідника утвориться надлишковий негативний заряд, а на іншому боці провідника їх нестача, яка призведе до утворення там надлишкового позитивного заряду, тобто в провіднику відбудеться розподіл зарядів, хоча в цілому провідник лишається незарядженим. У цьому можна переконатися, вийнявши провідник з електричного поля.

Явище утворення електричних зарядів на поверхні провідника, внесеного в електростатичне поле, називається *явищем електростатичної індукції*.

Накопичені електричні заряди на протилежних частинах провідника створюють електричне поле з напруженістю  $\vec{E}_{\text{вн}}$  (рис. 4.1). При цьому напруженість електричного поля в діелектрику  $E_{\text{вн}}$  буде меншою, ніж напруженість зовнішнього поля  $E_0$ . Відповідно,  $E = E_0 - E_{\text{вн}}$ ,  $E < E_0$ .

**Отже, діелектрик послаблює електричне поле.**



**Рис. 4.1.** Провідник за відсутності електричного поля (а) та в електричному полі (б)

Це зумовить те, що напруженість результуючого поля всередині провідника дорівнюватиме нулю, оскільки напруженості зовнішнього і внутрішнього полів однакові за величиною і напрямлені протилежно:

$$E = E_0 + E_{\text{вн}} = 0$$

**Отже, електростатичне поле всередині провідника відсутнє.**



Електростатичний захист

**ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ.** Діелектриками, або ізоляторами, називають речовини, які за певних умов не мають вільних носіїв електричного заряду. Проте якщо умови змінюються, наприклад, під час нагрівання, в діелектрику можуть виникнути вільні електричні заряди. Отже, поділ речовин на провідники і діелектрики є умовним.

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

Якщо полярний діелектрик помістити в електричне поле, то його молекули починають повертатися своїми позитивними зарядженими частинами до негативно заряджених пластин зовнішнього поля, а негативно зарядженими — до позитивно заряджених пластин (рис. 4.3). У результаті на поверхні діелектрика виникає досить тонкий шар зарядів протилежних знаків, які й створюють зустрічне поле.

Однак на відміну від провідників це поле вже не здатне повністю компенсувати зовнішнє, а лише послаблює його в декілька разів. Отже, на відміну від провідників усередині діелектрика електричне поле може існувати.

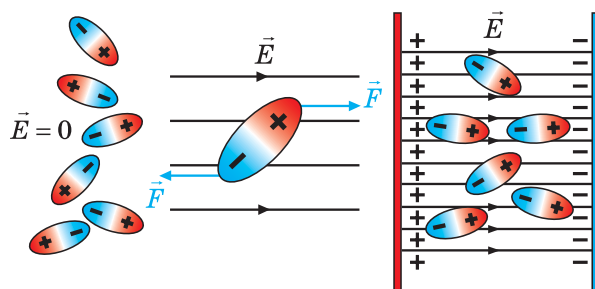


Рис. 4.3. Діелектрики в електричному полі

**Явище зміщення електричних зарядів діелектрика під впливом зовнішнього електричного поля, яке зумовлює виникнення протилежно до напрямку внутрішнього електричного поля, називають поляризацією діелектрика.**

Однак, якщо в електричному полі розділити поляризований діелектрик на дві частини, то ми не одержимо різноіменно заряджених тіл. У цьому полягає ще одна відмінність поведінки діелектриків від провідників у електричному полі.

Саме поляризацією діелектрика пояснюється притягання незарядженого діелектрика до електрично зарядженого тіла. Наприклад, електричне поле зарядженої палички діє на молекули, з яких складається папір. Унаслідок цього речовина поляризується. У результаті на ближчій до палички частині шматочка паперу утворюється заряд, який за знаком є протилежним заряду палички, і тому шматочки паперу притягуються до палички.

До *неполярних* молекул відносять  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ . Наприклад, молекула водню не містить йонів. Якщо зовнішнього електричного поля немає, центри позитивних і негативних зарядів молекул збігаються. Діелектрики, що складаються з таких молекул, називають *неполярними діелектриками*.

Під дією зовнішнього електричного поля електрони в атомах зміщуються проти напрямку вектора напруженості та утворюють диполі. Диполі орієнтуються певним чином в електричному полі, і діелектрик поляризується.

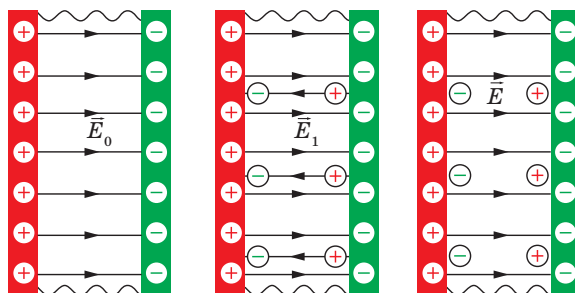
**ВІДНОСНА ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ.** Напруженість сумарного поля *зв'язаних* зарядів напрямлена протилежно напруженості зовнішнього поля. Внаслідок цього поле всередині діелектрика послаблюється (рис. 4.4).

Зменшення напруженості електричного поля в середовищі, якщо порівнювати з вакуумом, характеризується *відносною діелектричною проникністю середовища*.

**Відносна діелектрична проникність середовища ( $\varepsilon$ )** — число, яке показує, у скільки разів напруженість електричного поля в однорідному діелектрику менша, ніж напруженість у вакуумі:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$





**Рис. 4.4.** Напруженість результуючого поля в діелектрику менша за напруженість поля, створюваного вільними зарядами

Зменшення напруженості електричного поля в діелектрику призводить до того, що сила взаємодії точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , які перебувають у діелектрику на відстані  $r$  один від одного, також зменшується в  $\epsilon$  разів:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Явище поляризації частинок пилу в сильному електричному полі застосовується в електричних фільтрах у вугільній промисловості, а також для очищення газу.



Детальніше...

### **! Головне в цьому параграфі**

Електричне поле всередині провідника дорівнює нулю (сумарний від'ємний заряд скомпенсований додатнім зарядом).

На відміну від провідників, усередині діелектрика електричне поле може існувати. В діелектриках, внесених у зовнішнє електричне поле, електричні заряди зміщуються внаслідок виникнення протилежного за напрямом внутрішнього електричного поля (поляризація діелектрика).

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. На які два типи поділяють молекули речовини за характером просторового розподілу в них зарядів? 2. Які заряди називають вільними, а які зв'язаними? 3. Що відбувається з провідником, якщо вмістити його в електричне поле? 4. Поясніть, як можна наелектризувати тіло за допомогою електричного впливу. 5. Як діє зовнішнє електричне поле на молекули неполярного діелектрика? 6. Як впливає наявність діелектрика на сили кулонівської взаємодії? 7. У чому полягає дія зовнішнього електричного поля на молекули полярного діелектрика? 8. Що називають поляризацією діелектриків? 9. Чому діелектрик послаблює електричне поле? 10. Поясніть, на чому ґрунтується електростатичний захист. 11. Як використовується явище поляризації на практиці?

### **Вправа до § 4**

- 1(с).** Металеву пластинку зарядили негативним зарядом. Поясніть, що відбулося при цьому з деякою частиною атомів.

- 2(с).** Заряджена паперова гільза підвішена на шовковій нитці. Якщо наблизити руку до гільзи, вона притягається до руки. Поясніть це явище.
- 3(д).** Металеву паличку натирають вовняною тканиною. Після цього тканина починає притягувати дрібні шматочки паперу, а паличка — ні. Поясніть, чому так відбувається.
- 4(д).** На тонких шовкових нитках підвішені дві однакові паперові кульки. Одна заряджена, інша — незаряджена. Як визначити, яка з кульок заряджена, якщо не дається жодних додаткових приладів і матеріалів?
- 5(в).** Поясніть, як зміниться відхилення стрілки зарядженого електрометра, якщо піднести до нього (не торкаючись) тіло, що має однаковий із ним заряд, а потім тіло з протилежним зарядом.

## § 5. Електроємність. Конденсатори

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете обчислювати ємність конденсаторів та їх з'єднань, енергію електростатичного поля.*

**ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ.** Для характеристики здатності провідників накопичувати електричний заряд введено фізичну величину, яка називається електроємністю.

**Електроємністю** (або просто ємністю) називається фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню величини заряду провідника  $q$  до його потенціалу  $\varphi$ :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

**Електроємність відокремленого провідника чисельно дорівнює електричному заряду, який змінює потенціал провідника на одиницю.**

Чим більша ємність провідника, тим менше змінюється його потенціал при наданні йому заряду.

Ємність відокремленого провідника залежить від форм і розмірів поверхні (оскільки заряди розміщуються лише по його поверхні), а також від діелектричної проникності середовища, в якому перебуває провідник.

Оскільки потенціал невідокремленого провідника залежить від наявності й розташування заземлених тіл, що оточують його, ємність такого провідника також залежить від цих самих чинників. Однак за умови такого розташування тіл, що оточують його, ємність певного провідника не змінюється, оскільки чим більший заряд йому наданий, тим більшим буде його потенціал.

Ємність не залежить від матеріалу, агрегатного стану провідника, наявності в ньому порожнин або інших включень, а також від величини заряду на ньому.

Провідник характеризується електричною ємністю й у випадку, коли він зовсім не заряджений.

Одиницею електроємності в СІ є *фарад* (названа на честь англійського фізика М. Фарадея):

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 фарад — велика одиниця. Таку ємність мала б куля радіусом  $9 \cdot 10^{11}$  см (у 1400 разів більшим за радіус Землі). На практиці використовують кратні одиниці: мікрофарад (мкФ) —  $10^{-6}$  Ф і пікофарад (пФ) —  $10^{-12}$  Ф.

Ємність Земної кулі близько 709 мкФ. Вона в мільйони разів більша за електроємність приладів і провідників. З'єднуючи будь-який провідник із зарядом  $q$  з Землею, ми одержуємо провідник величезної ємності, потенціал якого практично не змінюється від додавання йому заряду  $q$ . З цієї причини вирішили прийняти потенціал Землі за нульовий і порівнювати з ним потенціали заряджених провідників.

**КОНДЕНСАТОРИ. ЄМНІСТЬ КОНДЕНСАТОРА.** Явище накопичення достатньо великих зарядів на провідниках за незначних напруг між ними використовують у пристроях, які називаються конденсаторами.

**Конденсатор** — система двох ізольованих один від одного провідників, яким надано однакові заряди протилежного знаку, поле яких зосереджено лише між цими провідниками.

Ці ізольовані діелектриком провідники називаються обкладками конденсаторів. Найпростіший плоский конденсатор складається з двох паралельних металевих пластин (обкладок), розміщених на малій відстані одна від одної і розділених діелектриком (рис. 5.1, а). Якщо заряди пластин однакові за величиною і протилежні за знаком, то майже всі силові лінії електричного поля зосереджені всередині конденсатора. У сферичного конденсатора, що складається з двох концентричних сфер, та у циліндричного, утвореного з двох коаксіальних металевих циліндрів, усе поле зосереджене всередині конденсатора.

Щоб зарядити конденсатор, треба його обкладки приєднати до джерела напруги, наприклад, акумуляторної батареї. Можна також з'єднати одну обкладку з джерелом напруги, а другу заземлити. Тоді на заземленій обкладці залишиться заряд, що дорівнює заряду першої обкладки, але є протилежним йому за знаком. Такий самий за модулем заряд піде в землю. Різноїменні заряди обох пластин, притягуючись один до одного, накопичуються лише на їх внутрішній стороні. Між пластинами виникає однорідне електричне поле, а поза конденсатором електричні поля зарядів обох пластин компенсують одне одного (рис. 5.1. б).

Фізичну величину, що дорівнює відношенню накопиченого в конденсаторі заряду  $q$  до різниці потенціалів між його обкладками ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) називають **ємністю конденсатора**:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \text{ або } C = \frac{q}{U},$$

де  $U$  — напруга між обкладками конденсатора, яка дорівнює різниці потенціалів між ними.

Чим більша ємність конденсатора, тим більший заряд можна надати його обкладкам за певної напруги між ними. Тобто, ємність конденсатора показує, який заряд можна йому надати, за певної напруги. Ємність конденсатора не залежить від навколишніх тіл.

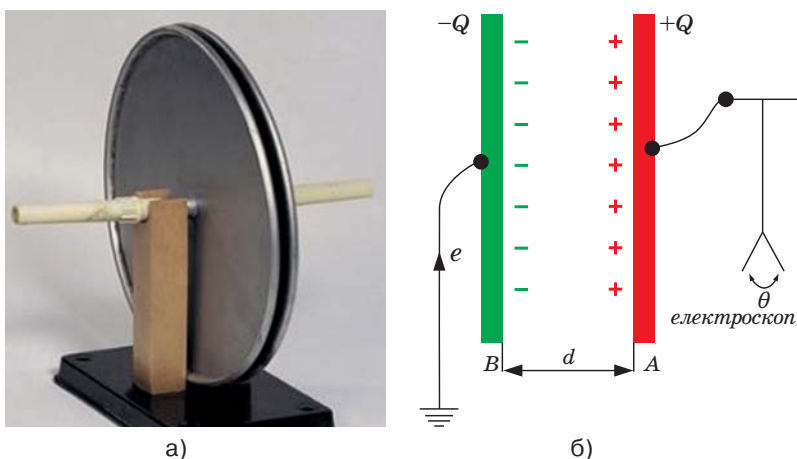


Рис. 5.1. Плоский повітряний конденсатор (а) та модель конденсатора (б)

Обчислимо ємність плоского конденсатора. Позначимо площу кожної його частини  $S$ , а відстань між пластинами  $d$ . Конденсатор заповнений діелектриком з діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Щоб обчислити ємність за формулою, треба виразити різницю потенціалів через заряд  $q$ . Ця різниця потенціалів визначається напруженістю поля  $\vec{E}$ , яка залежить від зарядів обкладок конденсатора. Напруженість поля між двома обкладками плоского конденсатора дорівнює сумі напруженостей полів, створених кожною з пластин:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . Напруженості поля позитивно і негативно заряджених пластин однакові за модулем та напрямлені всередині конденсатора в один і той самий бік. Саме тому модуль результуючої напруженості дорівнює:

$$E = 2E_1 = 2 \cdot \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

де  $\sigma$  — поверхнева густина зарядів ( $\sigma = \frac{q}{S}$ ). Напруженість поля в діелектрику зменшується в  $\epsilon$  разів. Отже, напруженість поля між обкладками конденсатора обчислюється за формулою:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}.$$

В однорідному електричному полі зв'язок між напругою (різницею потенціалів) і напруженістю визначається за формулою:  $U = Ed = \frac{qd}{\epsilon_0 \epsilon S}$ .

Підставивши цей вираз у формулу ємності, одержуємо формулу ємності плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

Електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі його пластин і діелектричній проникності та обернено пропорційна відстані між пластинами. Вона також залежить від електричних властивостей середовища. Електроємність конденсатора не залежить від матеріалу провідників.

**ЗАСТОСУВАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ.** Залежно від форми обкладок конденсатори поділяються на плоскі, циліндричні та сферичні (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Різні види конденсаторів

Властивість конденсаторів накопичувати великі заряди завдяки великій ємності використовують в електротехнічних та радіотехнічних пристроях.

Конденсатор може накопичувати енергію відносно тривалий час, а віддає її майже миттєво. Цю властивість широко застосовують на практиці.

Конденсатори використовуються в лампах-спалах для фотозйомки, у газорозрядних трубках збуджувачів лазерів, а також для згладжування пульсацій у випрямлячах змінного струму, в електромагнітних коливальних контурах, для налаштування радіоприймачів.



Детальніше...

**З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ.** Щоб одержати необхідну електроємність для заданої робочої напруги, конденсатори з'єднують у батареї.

Найпоширеніші такі з'єднання: послідовне, паралельне, змішане. Розглянемо їхні особливості.

Нехай послідовно з'єднано  $N$  конденсаторів (рис. 5.3). На обкладках кожного з них буде однаковий за модулем заряд:

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_N = Q,$$

де  $Q$  — заряд обкладок усієї батареї. Напруга на клеммах такої батареї дорівнюватиме сумі напруг на всіх послідовно з'єднаних конденсаторах, тобто:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N.$$

Отже, допустима робоча напруга батареї послідовно з'єднаних конденсаторів більша за допустиму робочу напругу окремого конденсатора.

$$\text{Оскільки } U = \frac{Q}{C}, \text{ то } U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, \dots, U_N = \frac{Q}{C_N}$$

Відповідно, формула для розрахунку електроємності батареї послідовно з'єднаних конденсаторів має вигляд:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}.$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів додаються обернені значення їх ємностей. Ємність батареї з  $n$  однакових, послідовно з'єднаних конденсаторів у  $n$  разів менша ємності одного конденсатора.



Щоб одержати велику електроємність, конденсатори з'єднують паралельно (рис. 5.4).

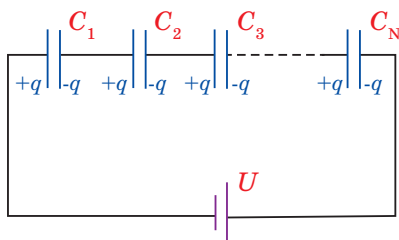


Рис. 5.3. Послідовне з'єднання конденсаторів

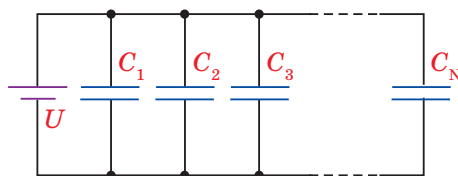


Рис. 5.4. Паралельне з'єднання конденсаторів

**Паралельним** називається з'єднання конденсаторів, за якого всі позитивно заряджені обкладки приєднані до одної вузлової точки, а негативно заряджені — до іншої. У цьому разі напруга на всіх конденсаторах однакова:

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N.$$

Заряд на батареї дорівнює сумі зарядів на окремих конденсаторах:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N.$$

Відповідно:  $CU = C_1U + C_2U + C_3U + \dots + C_NU$ .

Скоротивши ліву і праву частини виразу на  $U$ , отримуємо формулу для обчислення електроємності батареї паралельно з'єднаних конденсаторів:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N.$$

Електроємність батареї паралельного з'єднання конденсаторів більша, ніж найбільша з електроємностей окремого конденсатора.

На практиці рідко застосовують лише один вид з'єднання конденсаторів. Зазвичай використовують різні сполучення послідовного і паралельного з'єднань, які називають змішаними (рис. 5.5). Їх ємність розраховують за правилами послідовного та паралельного з'єднань конденсаторів. Наприклад, змішане з'єднання конденсаторів, зображене на рис. 5.5, можна розглядати як дві послідовно з'єднані батареї, що, своєю чергою, складаються із паралельно з'єднаних конденсаторів.

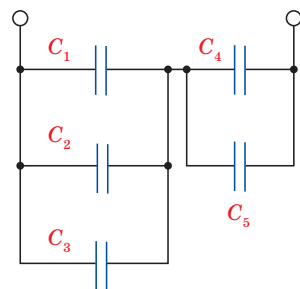


Рис. 5.5. Змішане з'єднання конденсаторів

**ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ.** У тому, що заряджений конденсатор має енергію, можна переконатися, якщо розрядити його за допомогою спеціального розрядника з ізолюваною ручкою. При цьому між кульками розрядника та конденсатора проскакує іскра, тим більша, чим більші ємність та напруга конденсатора. Електричне поле має енергію, яка може перетворюється у світлову, теплову, механічну форми енергії.

Енергія електричного поля зарядженого конденсатора дорівнює тій роботі, яку треба виконати для його зарядки, тобто для розділення позитивних і негативних зарядів. Напруженість поля, що створюється зарядом кожної із пластин, дорівнює  $E/2$ , де  $E$  — напруженість поля в конденсаторі.

В однорідному полі однієї пластини є заряд  $q$ , розподілений по поверхні другої пластини. Згідно з формулою потенціальної енергії заряду, енергія конденсатора дорівнює:

$$W_p = \frac{qEd}{2},$$

де  $q$  — заряд конденсатора;  $E$  — напруженість електричного поля;  $d$  — відстань між пластинами.

Оскільки  $Ed = U$  — різниця потенціалів між обкладками конденсатора, то його енергія дорівнює:

$$W_p = \frac{qU}{2}.$$

Формулу можна перетворити, щоб у вираз для потенціальної енергії входили або заряд, або напруга. Для цього скористаємося формулою електроємності конденсатора:  $C = \frac{q}{U}$ . Підставляючи необхідну величину у вихідну формулу, одержуємо:

$$W_p = \frac{q^2}{2C}, \quad W_p = \frac{CU^2}{2}.$$

Обчислюючи енергію конденсатора, можна користуватися будь-якою з цих формул, залежно від відомих величин.

Енергію електричного поля можна виразити через основну характеристику поля — напруженість. Підставимо у формулу значення електроємності плоского конденсатора і виразимо різницю потенціалів через напруженість поля:  $U = Ed$ .

Одержуємо ще одну формулу:

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd.$$

В останню формулу входять лише характеристики поля. Зокрема, добуток  $Sd$  є об'ємом, що його займає поле. Отже, енергія однорідного поля пропорційна об'єму поля. Поділивши вираз на  $Sd$ , визначимо енергію, яка припадає на одиницю об'єму, тобто густину енергії:

$$w_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}.$$

Ця формула справедлива не тільки для однорідного поля плоского конденсатора, а й для будь-якого іншого електростатичного поля і навіть для змінних електричних полів.

**! Головне в цьому параграфі**

Здатність провідників накопичувати електричний заряд характеризується електроємністю. Ємність конденсатора показує, який заряд можна йому надати за певної напруги. Максимальна робоча напруга батареї послідовно з'єднаних конденсаторів більша за робочу напругу окремого конденсатора. Електроємність батареї паралельного з'єднання конденсаторів більша, ніж найбільша з електроємностей окремого конденсатора.

**? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Що називають електроємністю відокремленого провідника? Яка формула виражає суть цього поняття? 2. Від чого залежить електроємність провідника? Чи впливає середовище на неї? 3. У яких одиницях вимірюється електроємність у СІ? 4. Чи можна змінити потенціал провідника, не торкаючись його і не змінюючи його заряд? 5. Що називають конденсатором? 6. Що показує ємність конденсатора? 7. Опишіть будову плоского конденсатора і напишіть формулу для визначення його електроємності. 8. Плоский повітряний конденсатор заряджають від джерела струму до напруги  $U$ , а потім від'єднують. Після цього обкладки розсувають. Чи буде змінюватися напруга між ними? 9. Як змінюється енергія зарядженого конденсатора при зменшенні відстані між його пластинами, якщо конденсатор: а) відключений від джерела напруги; б) підключений до джерела напруги?

**Вправа до § 5**

- 1(с). Обчисліть електроємність провідника, заряд якого  $8 \cdot 10^{-3}$  Кл, а потенціал  $10^3$  В.
- 2(с). Обчисліть заряд, який необхідно надати провіднику ємністю 150 пФ, щоб зарядити його до потенціалу 30 В.
- 3(д). Дві металеві кульки, які мають ємності 10 пФ і 15 пФ та заряди 0,5 нКл і 1,5 нКл відповідно, з'єднали провідником. Чи будуть розміщатися заряди з однієї кульки на іншу?
- 4(д). Обчисліть заряд кожної з обкладок конденсатора, електроємність якого  $C = 5$  пФ, а різниця потенціалів між ними  $U = 1000$  В.
- 5(д). Плоский повітряний конденсатор заряджений і відключений від джерела струму. Як зміниться напруга між пластинами конденсатора, якщо відстань між ними збільшиться у 2 рази?
- 6(д). Визначте загальну електроємність чотирьох конденсаторів, що мають електроємності 2 пФ, 5 пФ, 10 пФ, 20 пФ, якщо вони: а) з'єднані послідовно; б) з'єднані паралельно.
- 7(д). Обчисліть енергію конденсатора, електроємність якого становить 200 пФ, а різниця потенціалів на його обкладках 1000 В.
- 8(в). Чому дорівнює електроємність плоского конденсатора, обкладки якого — це дві смужки фольги площею  $S = 0,4$  м<sup>2</sup> кожна, розділені парафінованим папером ( $\epsilon = 2,2$ ) завтовшки  $d = 0,08$  мм?
- 9(в). Заряд плоского конденсатора із слюдяним діелектриком дорівнює  $2,7 \cdot 10^{-4}$  Кл. Площа кожної пластини 2500 см<sup>2</sup>. Діелектрична проникність слюди  $\epsilon = 7$ . Знайдіть напруженість поля в діелектрику.

## ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ № 1

Розв'язування задач з електростатики полягає переважно в тому, щоб за відомим розподілом зарядів у просторі обчислити в довільній точці напруженість і потенціал створеного ними електричного поля або, навпаки, — знаючи характеристики поля, знайти заряди, що його створюють. За відомим розташуванням, формою та потенціалом провідників визначити розподіл зарядів у них, силові й енергетичні характеристики створеного поля.

Задачі з електростатики умовно поділяють на дві групи. До першої належать задачі про точкові заряди і системи, що зводяться до них, до другої — про заряджені тіла, розмірами яких не можна знехтувати. Розв'язування задач першої групи базується на застосуванні законів механіки та Кулона. Їх розв'язують за таким алгоритмом:

- зображають сили, що діють на точковий заряд, розміщений в електричному полі, і записують рівняння рівноваги або основне рівняння динаміки матеріальної точки;
- виражають сили електричної взаємодії через заряди і характеристики електростатичного поля, обчислюючи їх за законом Кулона або за формулою  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ . При цьому приймають, що один із зарядів розташований у полі іншого.

Якщо під час взаємодії тіл здійснюється перерозподіл зарядів, то потрібно врахувати закон збереження заряду  $\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$ .

Під час розв'язування задач враховують векторний характер напруженості  $\vec{E}$  та алгебраїчний знак потенціалу  $\phi$ .

Обчислення роботи, що здійснюється електростатичним полем над точковими зарядами, а також його енергії виконується за формулами:

$$A = F \cdot d = q \cdot E \cdot d; \quad W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

### Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Дві кульки масами  $m_1 = m_2 = 0,2$  г підвішені на тонких шовкових нитках довжиною  $l = 0,5$  м кожна. Отже, що їхні поверхні торкаються одна одної. Кульки зарядили однаковими за величиною електричними зарядами, і вони відштовхнулися одна від одної та розійшлися на відстань  $r = 5$  см (відстань між центрами кульок).

Визначити величину заряду кожної кульки, враховуючи, що вони у повітрі.

Дано:

$$m_1 = m_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$l = 0,5 \text{ м}$$

$$r = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\varepsilon = 1$$

$$q_1, q_2 \text{ — ?}$$

#### Розв'язування

На кожную з двох кульок діє сила тяжіння  $m\vec{g}$ , кулонівська сила відштовхування  $\vec{F}$  та сила натягу нитки  $\vec{T}$  (рис. 1). Розглянемо одну з кульок (для іншої можна провести аналогічні міркування).

Оскільки кульки перебувають в рівновазі, то сила земного тяжіння та кулонівська сила зрівноважується силою натягу:  $m\vec{g} + \vec{F} = \vec{T}$ . Рівнодіюча сила  $\vec{N}$  (вона зрівноважується силою натягу нитки  $\vec{T}$ ) визначається як діагональ паралелограма, сторонами якого є вектори сил тяжіння та кулонівського відштовхування.

Прямокутний трикутник із катетами  $mg$ ,  $F$  та гіпотенузою  $N$  подібний прямокутному трикутнику, утвореному ниткою, на якій підвішена кулька, та перпендикуляром. Тому кут між  $mg$  та  $N$  дорівнює  $\alpha$ .

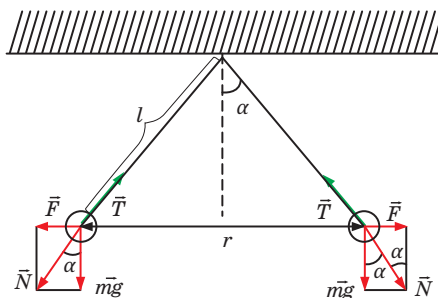


Рис. 1

Тоді можна записати, що  $\operatorname{tga} = \frac{F}{m \cdot g}$ . Оскільки кут  $\alpha$ , на який розійшлися кульки, достатньо малий, щоб використати співвідношення  $\sin \alpha \approx \operatorname{tga}$ , а  $\sin \alpha = \frac{r}{2 \cdot l}$ , то  $F = \frac{m \cdot r \cdot g}{2 \cdot l}$ . Водночас, за законом Кулона  $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2}$ , а враховуючи, що  $q_1 = q_2$ ,  $F = \frac{q^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2}$ .

$$\text{Отже, } \frac{m \cdot r \cdot g}{2 \cdot l} = \frac{q^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2}. \text{ Знайдемо звідси } q: q = r \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot g \cdot r \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon}{l}}.$$

Підставивши у кінцеву формулу значення фізичних величин відповідно до умови та виконавши обчислення, отримаємо:

$$q_1 = q_2 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot 1}{0,5 \text{ м}}} \approx 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 5,2 \text{ нКл}$$

**Відповідь:**  $q_1 = q_2 = 5,2 \text{ нКл}$ .

**Задача 2.** Ємність батареї конденсаторів, зображеної на рис. 2, не змінюється при замиканні ключа  $K$ . Визначити величину ємності  $C_x$ , якщо  $C = 1 \text{ мкФ}$ .

**Дано:**

$$C = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$$

$C_x = ?$

**Розв'язування**

Розглянемо коло (рис. 2).

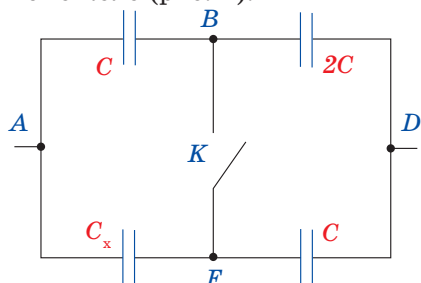


Рис. 2



Якщо замкнути ключ  $K$ , то загальну ємність батареї конденсаторів  $C_{B1}$  можна визначити як ємність двох послідовно з'єднаних ділянок, кожна з яких складається з двох паралельно з'єднаних між собою конденсаторів:

$$\frac{1}{C_{B1}} = \frac{1}{C+2C} + \frac{1}{C_x+C} = \frac{1}{3C} + \frac{1}{C_x+C} = \frac{3C+C+C_x}{3C(C_x+C)} = \frac{4C+C_x}{3C(C_x+C)}.$$

Отже, загальна ємність батареї конденсаторів дорівнює:

$$C_{B1} = \frac{3C(C_x+C)}{4C+C_x}.$$

Якщо ключ  $K$  розімкнути, то загальну ємність батареї конденсаторів  $C_{B2}$  можна знайти як ємність двох паралельно під'єднаних ділянок, кожна з яких складається з двох послідовно з'єднаних конденсаторів:

$$C_{B2} = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_x}} + \frac{1}{\frac{1}{2C} + \frac{1}{C}} = \frac{C_x \cdot C}{C+C_x} + \frac{2}{3}C.$$

Оскільки  $C_{B1} = C_{B2}$  (за умовою задачі ємність батареї не змінюється при замиканні ключа  $K$ ), то можна записати:

$$\frac{3C(C_x+C)}{4C+C_x} = \frac{C_x \cdot C}{C+C_x} + \frac{2}{3}C.$$

З отриманої рівності визначимо  $C_x$ . Перенесемо всі доданки вліво і зведемо до спільного знаменника. Отримаємо:

$$\frac{4C \cdot C_x^2 - 4C^2 \cdot C_x + C^3}{3(4C+C_x)(C+C_x)} = 0.$$

Розв'яжемо рівняння відносно  $C_x$ . Прирівняємо чисельник до 0.

Тоді:

$$4C \cdot C_x^2 - 4C^2 \cdot C_x + C^3 = 0.$$

Поділимо ліву і праву частини рівняння на  $C$ . Отримаємо:

$$4C_x^2 - 4C \cdot C_x + C^2 = 0.$$

Розв'язавши квадратне рівняння, отримаємо:  $C_x = \frac{1}{2}C$ .

Тоді:  $C_x = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,5 \text{ мкФ}$ .

**Відповідь:**  $C_x = 0,5 \text{ мкФ}$ .

**Задача 3.** Електрон влітає в плоский повітряний конденсатор паралельно його пластинам із швидкістю  $6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Відстань між ними дорівнює  $1 \text{ см}$ , а різниця потенціалів становить  $600 \text{ В}$ . Знайти відхилення електрона, викликане електричним полем конденсатора, якщо довжина його пластини становить  $5 \text{ см}$ .

**Дано:**

$$v = 6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$d = 1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$$

$$U = 600 \text{ В}$$

$$l = 500 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$h$  — ?

**Розв'язування**

На електрон, що влетів в електричне поле, діє сила  $F = |e| \cdot E$ , де  $E = \frac{U}{d}$ . Оскільки напруженість електричного поля спрямована вгору (рис. 3), то сила, що діє на електрон, напрямлена донизу.

Рух електрона можна розглядати як суперпозицію двох незалежних рухів, що здійснюються в горизонтальному і вертикальному напрямках. У горизонтальному напрямку електрон, як і раніше, рухатиметься рівномірно, оскільки в цьому напрямку на нього не діють жодні сили. Одночасно під дією електричної сили він рівноприскорено переміщається вниз. Траєкторією його руху є парабола.

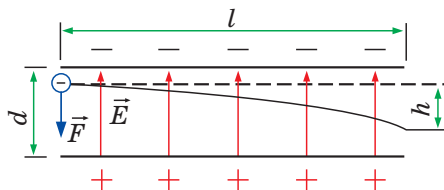


Рис. 3

Рух електрона в конденсаторі подібний до руху тіла, кинутого горизонтально. За час руху в конденсаторі електрон пролетить горизонтальну

відстань  $l=vt$  (1), а вертикально переміститься вниз на відстань  $h = \frac{at^2}{2}$  (2), де  $a$  — прискорення.

Розв'язуючи систему рівнянь (1) і (2), отримаємо  $h = \frac{a \cdot l^2}{2v^2}$  (3).

Щоб визначити прискорення, застосуємо рівняння другого закону Ньютона. Оскільки на електрон у вертикальному напрямку діє лише одна сила  $F$  (силою тяжіння, що діє на електрон, нехтуємо), то  $F = ma$ , або

$$a = \frac{|e| \cdot E}{d \cdot m} \quad (4).$$

Підставляючи вираз (4) у (3):

$$\text{отримуємо } h = \frac{l^2 |e| U}{2v^2 d m}; \quad h = \frac{(5 \cdot 10^{-2})^2 \text{ м}^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 600 \text{ В}}{2 \cdot (6 \cdot 10^7)^2 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \approx 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

**Відповідь:**  $h \approx 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

**Задача 4.** Дві кульки із зарядами 6,7 нКл та 13,3 нКл розташовані на відстані 40 см одна від одной. Яку роботу потрібно виконати, щоб наблизити їх до 25 см?

**Дано:**

$$q_1 = 6,7 \text{ нКл} = 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 13,3 \text{ нКл} = 13,3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$$

$$r_2 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$A_{\text{зовн}} = ?$$

**Розв'язування**

У задачах такого типу одну з кульок приймають за нерухому і таку, що створює електричне поле, а другу — що рухається в ньому. Нехай заряд  $q_1$  кульки створює поле, а кулька із зарядом  $q_2$  рухається в ньому.

Оскільки заряди мають один знак, для того, щоб їх наблизити один до одного, потрібно виконати роботу зовнішніх сил, яка протилежна за знаком роботі сил електростатичного поля:  $A_{\text{зовн}} = -A = q_2(\varphi_1 - \varphi_2)$  (1), де  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  — потенціали в початковій і кінцевій точках поля. Оскільки поле створене точковим зарядом, то  $\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}$  і  $\varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_2}$  (2). Підставивши

вираз (2) в (1), отримаємо:

$$A_{\text{зовн}} = q_2 \left( \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} - \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} \right) = \frac{q_1 q_2 (r_1 - r_2)}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1 r_2};$$

$$A_{\text{зовн}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 13,3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot (0,4 - 0,25) \text{ м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 0,4 \text{ м} \cdot 0,25 \text{ м}} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

Відповідь:  $A_{\text{зовн}} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$

**Задача 5.** Відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора, під'єданого до джерела живлення з напругою 180 В, дорівнює 5 мм. Площа його пластин становить 175 см<sup>2</sup>. Знайти роботу, яка здійснюється під час розсування пластин конденсатора до відстані 12 мм, якщо його від'єдали від джерела.

**Дано:**

$$U = 180 \text{ В}$$

$$d_1 = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$d_2 = 12 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$S = 175 \text{ см}^2 = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$A_1 - ?; A_2 - ?$$

**Розв'язування**

1. Робота, що здійснюється в першому випадку, дорівнює зміні енергії конденсатора, тобто:  $A_1 = \Delta W = W_2 - W_1$  (1), де

$$W_1 = \frac{q^2}{2C_1} \text{ — енергія і } C_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d_1} \text{ — ємність}$$

конденсатора до розсування пластин;

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} \text{ і } C_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d_2} \text{ — відповідно після розсування. Якщо конденсатор}$$

від'єднано від джерела, то заряд  $q$  на його пластинах залишається постійним:  $q = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U}{d_1}.$

Враховуючи вирази  $W_1, W_2, C_1, C_2$  і  $q$ , формулу (1) запишемо так:

$$A = \frac{\epsilon_0^2 \epsilon^2 S^2 U^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon_0 \epsilon S} - \frac{\epsilon_0^2 \epsilon^2 S^2 U^2 d_1}{2d_1^2 \epsilon_0 \epsilon S} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d_1^2} (d_2 - d_1);$$

$$A = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 180^2 \text{ В}^2 \cdot (12 - 5) \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 \text{ м}^2} =$$

$$= 705 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} = 705 \text{ нДж}.$$

Відповідь:  $A = 705 \text{ нДж}.$

### Задачі для самостійного розв'язування

- 1(с).** Дано дві кульки масою 1 г кожна. Який заряд треба надати кожній із них, щоб сила їх взаємного відштовхування врівноважила гравітаційну силу притягання? Кульки перебувають у повітрі.
- 2(с).** Дві однаково заряджені кульки масою 0,5 г кожна, що підвішені на нитках довжиною 1 м, відштовхуються і віддаляються на 4 см одна від одної. Знайдіть заряди кожної з них.

- 3(с).** У скільки разів сила притягання між двома протонами менша від сили їх кулонівського відштовхування?
- 4(с).** Маленька кулька масою 100 мг і зарядом 16,7 нКл підвішена на нитці. На яку відстань знизу потрібно піднести до неї однойменний і рівний їй заряд, щоб сила натягу нитки зменшилася удвічі?
- 5(с).** Кулька масою 40 мг і зарядом 1 нКл переміщується з нескінченності зі швидкістю 10 см/с. На яку мінімальну відстань вона зможе наблизитися до точкового заряду величиною 1,33 нКл?
- 6(с).** Площа пластини плоского повітряного конденсатора становить  $60 \text{ см}^2$ , його заряд — 1 нКл, різниця потенціалів між його пластинами — 90 В. Визначте відстань між пластинами конденсатора.
- 7(с).** Пластини плоского конденсатора ізолювані одна від одної шаром діелектрика. Конденсатор заряджено до різниці потенціалів 1 кВ і відключено від джерела напруги. Визначте діелектричну проникність діелектрика, якщо під час його видалення різниця потенціалів між пластинами зростає до 3 кВ.
- 8(с).** Плоский повітряний конденсатор, відстань між пластинами якого становить 5 см, заряджено до 200 В і відключено від джерела напруги. Якою буде напруга на ньому, якщо пластини розсунути до 10 см?
- 9(д).** Три негативні заряди величиною 9 нКл кожен розташовані у вершинах рівностороннього трикутника. Який заряд треба помістити в його центр, щоб система перебувала в рівновазі?
- 10(д).** Кулька, що має масу 0,4 г і заряд 4,9 нКл, підвішена на нитці в полі плоского повітряного конденсатора, заряд якого становить 4,43 нКл, а площа пластини —  $50 \text{ см}^2$ . На який кут від вертикалі відхилиться кулька?
- 11(д).** Два позитивно заряджених тіла із зарядами 1,67 нКл і 3,33 нКл перебувають на відстані 20 см одне від одного. У якій точці на лінії їх з'єднання потрібно розмістити третє тіло із зарядом 0,67 нКл, щоб воно перебувало в рівновазі? Масами тіл знехтувати.
- 12(д).** Два заряди по 10 нКл містяться в повітрі в точках А та В на відстані 8 м один від одного. Визначити напруженість результуючого електричного поля, що створюється цими зарядами в точці, яка знаходиться на відстані 5 м від обох зарядів. Точка і заряди розміщені в одній площині.
- 13(д).** Відстань між зарядами 1 нКл і  $-6,67 \text{ нКл}$  дорівнює 10 см. Яку роботу потрібно виконати, щоб перемістити другий заряд у точку, розташовану на відстані 1 м від першого?
- 14(д).** Матеріальна точка із зарядом 0,67 нКл, рухаючись у прискорюючому електричному полі, набуває кінетичної енергії  $10^7 \text{ еВ}$ . Знайдіть різницю потенціалів між початковою і кінцевою точками траєкторії частинки, якщо її початкова енергія дорівнює нулю.
- 15(д).** Під час радіоактивного розпаду з ядра атома полонію вилітає  $\alpha$ -частинка з швидкістю  $1,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Яку різницю потенціалів потрібно прикласти, щоб надати їй такої ж швидкості?
- 16(в).** У трьох вершинах квадрата зі стороною 40 см містяться однакові позитивні заряди величиною 5 нКл кожен. Знайдіть напруженість поля в четвертій вершині.
- 17(в).** Конденсатор складається із трьох смужок станіолу площею  $10 \text{ см}^2$  кожна, розділених шарами слюди товщиною 0,5 мм. Крайні смужки з'єднані між собою. Визначте ємність конденсатора.

- 18(в).** Конденсатор, заряджений до напруги 100 В, з'єднується паралельно з другим такої ж ємності, але зарядженим до напруги 200 В. Яка напруга встановиться між обкладками батареї?
- 19(в).** Обчисліть загальну електроємність змішаного з'єднання конденсаторів (рис. 4), якщо електроємність кожного конденсатора 20 пФ.

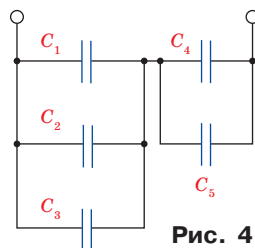


Рис. 4

### ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

Шановні друзі! У попередніх класах ви вже мали змогу працювати над навчальними проектами та долучитися до процесу наукових відкриттів. Працюючи над проектами в 11-му класі, зверніть увагу на те, що всі природничі науки досліджують фундаментальні закони природи — закони збереження та розв'язують найактуальніші для людства проблеми — пошук екологічно чистих джерел енергії, відновлення природи, створення технологій, які зберігають здоров'я. Тому найбільш результативними будуть проекти, в яких вам вдасться комплексно використати знання та вміння, набуті під час вивчення цих природничих предметів.

Ви почали вивчати тільки перший розділ «Фізики і астрономії», але вже є сенс розпочати роботу над проектом. Тому спільно з учителем поміркуйте над вибором теми та сплануйте свою роботу.

Нагадаємо основні види навчальних проектів:

*інформаційні* — спрямовані на пошук інформації про певний об'єкт або явище, її аналіз і узагальнення фактів;

*практичні* — передбачають розв'язування практичних завдань та створення різноманітних моделей, макетів, приладів, розроблення рекомендацій щодо їх використання;

*дослідницькі* — це міні-наукові дослідження, що мають чітку та добре обмірковану структуру. Під час роботи над ними увагу приділяють аргументації актуальності теми дослідження, визначенню його методології, предмета та завдань дослідження, формулюванню гіпотез, вибору шляхів розв'язування проблем дослідження.

Роботу над проектом організовують у декілька основних етапів:

– організаційно-підготовчий (мотивація, формування мікрогруп, визначення мети та завдань проекту, розроблення плану);

– пошуковий (збирання, аналіз і систематизація інформації, її обговорення в мікрогрупах, висунення й перевірка гіпотези, практична частина проекту, оформлення макета або моделі проекту, оцінка проміжних результатів);

– підсумковий (оформлення проекту, підготовка презентації, аналіз виконаної роботи, оцінювання внеску кожного з виконавців);

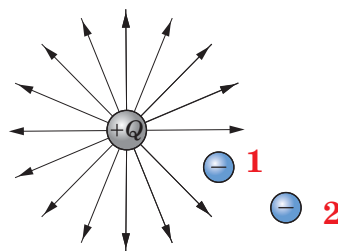
– презентація результатів (подання отриманих результатів та їх захист, відповіді на запитання, оцінювання результатів роботи, усвідомлення отриманих результатів і способів їх отримання).

Тему навчального проекту ви можете обрати з наведених нижче або запропонувати власну, погодивши її з учителем. Наприклад: 1. Вплив електростатичних полів на живі організми. 2. Еквіпотенціальні поверхні людини та їх використання в біомедицині. 3. Способи захисту від електростатичних полів. 4. Візуалізація та вимірювання електричного поля. 5. Електричні потенціали клітин. 6. Макро- та мікросструми і напруги в природі та техніці. 7. Як впливає електричний струм на організм людини? 8. Як зменшити втрати електричного струму в провіднику? 9. Як створити надпотужне магнітне поле?

Бажаємо успіхів!

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ № 1**

- 1(п).** Вкажіть, на які частинки не діє електричне поле:  
**А** На позитивно заряджені рухомі частинки.  
**Б** На негативно заряджені рухомі частинки.  
**В** На рухомі заряджені мікрочастинки дуже малої маси.  
**Г** На рухомі незаряджені частинки.
- 2(п).** Вкажіть, що відбувається під час електризації двох тіл тертям:  
**А** Обидва тіла втрачають електрони.  
**Б** Обидва тіла набувають електронів.  
**В** Обидва тіла перетворюються в позитивні йони.  
**Г** Одне тіло втрачає електрони, а інше стільки ж їх набуває.
- 3(с).** Визначте, як зміниться сила взаємодії між зарядами, якщо відстань між ними зменшити в 3 рази:  
**А** Збільшиться в 3 рази. **Б** Збільшиться в 9 разів.  
**В** Зменшиться в 3 рази. **Г** зменшиться в 9 разів.
- 4(с).** Вкажіть, якого заряду (кратному заряду електрона  $e$ ) може набути тіло внаслідок електризації:  
**А**  $\frac{1}{5}e$ . **Б**  $\frac{1}{2}e$ . **В**  $\frac{3}{2}e$ . **Г**  $\frac{4}{2}e$ .
- 5(д).** На рис. 4 зображено силові лінії електричного поля. Виберіть правильне твердження:  
**А** Під час переміщення заряду з точки 1 у точку 2 електричне поле не виконує роботу.  
**Б** Під час переміщення заряду з точки 1 у точку 2 електричне поле виконує додатну роботу.  
**В** В точках 1 та 2 потенціали електростатичного поля однакові.  
**Г** Під час переміщення негативного заряду із точки 1 у точку 2 потенціальна енергія заряду збільшується.

**Рис. 5**

- 6(д).** Визначте характер і модуль сили взаємодії двох протонів, що розташовані у вакуумі на відстані 0,3 нм один від одного.  
**А** Притягуються із силою  $2,56 \cdot 10^{-9}$  Н.  
**Б** Відштовхуються із силою  $2,56 \cdot 10^{-9}$  Н.  
**В** Притягуються із силою  $2,56 \cdot 10^{-8}$  Н.  
**Г** Відштовхуються із силою  $2,56 \cdot 10^{-8}$  Н.
- 7(д).** Визначте, у скільки разів змінився модуль кулонівської взаємодії двох однакових металевих кульок із зарядами 1 нКл і 5 нКл, які спочатку привели в контакт, а потім повернули у початкове положення. Розмірами кульок знехтувати.  
**А** Зменшився у 5 разів. **Б** Зменшився у 1,25 раз.  
**В** Збільшився у 2,5 рази. **Г** Збільшився у 5 рази.
- 8(д).** Обчисліть роботу, яку виконали сили електростатичного поля під час переміщення заряду 2 Кл із точки з потенціалом 20 В у точку з потенціалом 0 В.  
**А** 40 Дж. **Б** 20 Дж. **В** 10 Дж. **Г** 0 Дж.



- 9(д).** Визначте зміну потенціальної енергії електрона, який перемістився в електричному полі із точки з потенціалом 10 В, у точку з потенціалом 60 В.  
**А**  $8 \cdot 10^{-18}$  Дж.    **Б**  $3,2 \cdot 10^{-21}$  Дж.    **В**  $-3,2 \cdot 10^{-21}$  Дж.    **Г**  $-8 \cdot 10^{-18}$  Дж.
- 10(д).** Визначте, як зміниться електроємність плоского конденсатора, якщо відстань між його пластинами збільшити в 4 рази.  
**А** Збільшиться в 4 рази    **В** Зменшиться в 4 рази  
**Б** Збільшиться в 16 разів    **Г** Зменшиться в 16 разів
- 11(д).** Обчисліть заряд на обкладках конденсатора, що перебував під напругою 10 В, якщо внаслідок його розрядження виділилася енергія 0,05 Дж.  
**А** 0,1 Кл.    **Б** 0,01 Кл.    **В** 0,001 Кл.    **Г** 1 Кл.
- 12(д).** Визначте величину заряду частинки масою  $10^{-8}$  г, яка зависла між пластинками плоского повітряного конденсатора. До обкладок конденсатора прикладено напругу 5 кВ, а відстань між ними становить 5 см.  
**А**  $9,8 \cdot 10^{-16}$  Кл.    **Б**  $6,8 \cdot 10^{-16}$  Кл.    **В**  $3,2 \cdot 10^{-16}$  Кл.    **Г**  $1,6 \cdot 10^{-16}$  Кл.
- 13(д).** Визначте напругу на конденсаторі з електроємністю 10 мкФ, який з'єднаний послідовно з конденсатором електроємністю 2 мкФ та напругою 15 В.  
**А** 3,5 В.    **Б** 3 В.    **В** 1,5 В.    **Г** 4 В.
- 14(д).** Установіть відповідність між фізичними величинами та формулами для їх обчислення.
- Електроємність плоского конденсатора
  - Напруженість поля точкового заряду
  - Потенціал електростатичного поля
  - Енергія електричного поля
- А**  $\varphi = \frac{W_p}{q}$ .    **Б**  $E = k \frac{q}{r^2}$ .    **В**  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ .    **Г**  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ .    **Д**  $W_p = \frac{qU}{2}$
- 15(в).** Визначте напругу, яка встановиться між обкладками двох конденсаторів однакової електроємності, якщо напруга на одному з них була 200, а на другому 50 В. Обидва конденсатори від'єднані від джерела струму.

## § 6. Умови виникнення електричного струму.

### Робота і потужність струму

*Опрацювавши цей параграф, ви з'ясуєте умови виникнення та підтримання електричного струму, зв'язок між основними характеристиками електричного кола, зможете розрахувати роботу і потужність електричного струму.*

**УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.** У сучасній техніці та технологіях широко використовують електричний струм. Завдяки йому рухаються електромобілі, працюють гаджети, обігріваються та освітлюються оселі.

Ви вже знаєте, що вільні електрони в металах, а також йони в розчинах солей рухаються хаотично та переміщуються в усьому об'ємі речовини. Якщо провідник помістити в електричне поле, то рух заряджених частинок стає впорядкованим — вони починають переміщуватися вздовж ліній напруженості електричного поля.

**Електричним струмом** називають впорядкований (направлений) рух заряджених частинок.

Електричний струм виникає та підтримується за таких умов:

- ▶ наявність вільних носіїв електричного заряду;
- ▶ наявність чинників, що зумовлюють рух вільних заряджених частинок у певному напрямі (зовнішнє електричне чи магнітне поля, прискорений рух провідника).

Заряджені частинки переміщуються між двома точками електричного поля за наявності між ними різниці потенціалів. Тому, щоб у провіднику існував електричний струм, потрібно, аби між його кінцями існувала постійна різниця потенціалів. Ця умова забезпечується включенням в електричне коло джерела живлення, в якому відбувається перетворення певного виду енергії в електричну. Наприклад, у гальванічних елементах та акумуляторах в електричну енергію перетворюється хімічна енергія взаємодій, а в електромеханічних генераторах механічна енергія перетворюється в електричну.

**За напрям електричного струму** приймають напрям упорядкованого руху позитивно заряджених частинок (протилежний руху електронів). Напрямок струму збігається з напрямком напруженості електричного поля, яке породжує цей струм.

**ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ТА ЙОГО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.** Електричний струм характеризується фізичною величиною, яку називають силою струму.

**Силою струму** називають величину, що характеризує швидкість перенесення заряду частинками, які створюють струм, через поперечний переріз провідника.

Сила струму визначає інтенсивність руху заряджених частинок у провіднику та дорівнює величині заряду  $\Delta Q$ , який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу  $\Delta t$ :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Сила струму є скалярною фізичною величиною. Одиницею сили струму в СІ є ампер:

$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}.$$

У радіотехніці також використовують частинні й кратні одиниці сили струму:

$$1 \text{ мікроампер} = 1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А};$$

$$1 \text{ міліампер} = 1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А};$$

$$1 \text{ кілоампер} = 1 \text{ кА} = 10^3 \text{ А}.$$

**Якщо під час проходження електричного струму за будь-які однакові інтервали часу через поперечний переріз провідника переноситься однаковий заряд, то такий струм називають *постійним*.**

Тобто для постійного струму сила струму не змінюється з часом.

Силу струму вимірюють амперметром, який вмикають в електричне коло послідовно зі споживачем (рис. 6.1).

**До електричного кола входять джерела струму та його споживачі, вимірювальні та регулювальні прилади, вимикачі, з'єднувальні провідники.**

Робота електричного поля з перенесення заряду 1 Кл в певній ділянці електричного кола характеризується напругою.

Напругу вимірюють вольтметром, який включають в електричне коло паралельно зі споживачем (рис. 6.1).

Напруга  $U$  на ділянці кола чисельно дорівнює відношенню роботи струму до електричного заряду  $Q$ , що переміщується в цій ділянці:

$$U = \frac{A}{Q}.$$

Одиницею напруги в СІ є вольт:  $1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$

Також використовують частинні й кратні одиниці напруги:

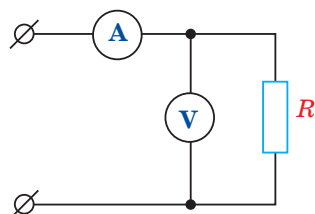
$$1 \text{ мілівольт} = 1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В};$$

$$1 \text{ мікрровольт} = 1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В};$$

$$1 \text{ кіловольт} = 1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В};$$

$$1 \text{ мегавольт} = 1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}.$$

Сила струму та напруга є основними характеристиками електричного кола.



**Рис. 6.1.**

Вмикання амперметра та вольтметра в електричне коло

**Пригадайте!**

Залежність між основними фізичними характеристиками ділянки електричного кола встановив німецький учений Г. Ом у 1826—1827 рр. (закон Ома для ділянки кола): сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна її електричному опору:

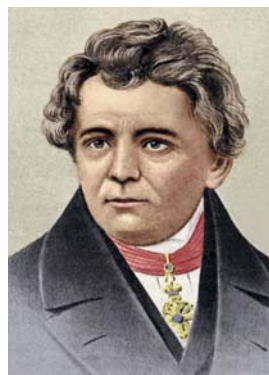
$$I = \frac{U}{R}.$$

За законом Ома можна розрахувати також напругу на кінцях ділянки електричного кола  $U = I \cdot R$

та опір ділянки  $R = \frac{U}{I}$ .

**Зверніть увагу:** з останньої формули не випливає, що опір провідника залежить від напруги на його кінцях або сили струму в ньому.

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



**Георг Ом**  
(1787—1854), німецький фізик, який встановив залежність між силою струму та напругою ділянки електричного кола

Опір характеризує провідник та залежить від його геометричних і фізичних параметрів:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

де  $R$  — опір провідника;  $l$  — довжина провідника;  $S$  — площа поперечного перерізу провідника;  $\rho$  — коефіцієнт пропорційності, який залежить від матеріалу провідника і називається питомим опором.

За одиницю опору приймають 1 Ом — опір такого провідника, у якому при напрузі на його кінцях 1 вольт сила струму дорівнює 1 ампер:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

На практиці також використовують частинні й кратні одиниці:

1 міліом = 1 мОм =  $1 \cdot 10^{-3}$  Ом;

1 кілоом = 1 кОм =  $1 \cdot 10^3$  Ом;

1 мегаом = 1 МОм =  $1 \cdot 10^6$  Ом.

Електричний опір є основною електричною характеристикою провідника. Вона характеризує протидію провідника напрямленому руху вільних електричних зарядів. Електричний опір провідника зумовлений взаємодією вільних носіїв електричного заряду з йонами (атомами) речовини. При цьому енергія вільних носіїв електричного заряду перетворюється в інші види енергії.

**РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ.** Електрична енергія струму може перетворюватися в інші види. Тому електричний струм супроводжується фізичними діями: *теплова дія* (нагрівання провідника, по якому тече

електричний струм), *хімічна дія* (зміна хімічного складу провідника, наприклад, виділення міді на електроді під час протікання струму через розчин мідного купоросу), *магнітна дія* (силовий вплив на провідники з електричним струмом та намагнічені тіла), *світлова дія* (світіння речовини під час проходження через неї електричного струму).

Перетворення одного виду енергії в інший супроводжується виконанням роботи.

Робота електричного поля  $A$  з переміщення електричного заряду  $\Delta Q$  визначається як добуток кількості перенесеного електричного заряду через поперечний переріз провідника та напруги  $U$  на кінцях провідника:

$$A = \Delta Q \cdot U.$$

Врахувавши, що  $\Delta Q = I \Delta t$ , можна отримати вираз для обчислення роботи електричного поля:

$$A = IU \Delta t.$$

**Робота електричного струму на ділянці кола дорівнює добутку сили струму, напруги на цій ділянці та часу, впродовж якого виконувалася ця робота.**

Якщо в цю формулу підставити вираз для обчислення сили струму  $I = \frac{U}{R}$ , то робота буде дорівнювати:

$$A = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Одиницею роботи в СІ є джоуль (Дж):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$ .

Із практики ви знаєте, що важливою характеристикою будь-якого електричного приладу (лампи, електричного чайника, обігрівача) є споживана потужність.

**Потужність електричного струму — фізична величина, що дорівнює роботі електричного поля з напрямленого переміщення електричних зарядів у провіднику за одиницю часу.**

Середня потужність електричного струму визначається за формулою:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU.$$

Ця залежність є справедливою лише тоді, коли робота струму повністю витрачається на збільшення внутрішньої енергії.

Одиницею потужності струму в СІ є ват (Вт):  $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Для вимірювання потужності струму також використовують частинні й кратні одиниці:

1 мікроват =  $1 \text{ мкВт} = 10^{-6} \text{ Вт}$ ;

1 міліват =  $1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$ ;

1 гектоват =  $1 \text{ гВт} = 10^2 \text{ Вт}$ ;

1 кіловат =  $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$ ;

1 мегават =  $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$ .

На практиці для вимірювання роботи струму (наприклад, в електролічильнику) використовують таку одиницю, як кіловат-година (кВт·год):  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

Принцип дії багатьох електричних побутових приладів (електрочайник, праска, обігрівач, бойлер, електроплита) ґрунтується на використанні теплової дії електричного струму.

Кількість теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом за певний час, визначається за законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t,$$

де  $I$  — сила струму;  $R$  — опір провідника;  $\Delta t$  — час дії електричного струму.

**Кількість теплоти, яка виділяється провідником з електричним струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника й часу проходження струму.**

Цей закон справедливий не тільки для металевих провідників, а й для розчинів електролітів та газів, оскільки під час проходження струму збільшується кількість зіткнень вільних носіїв зарядів з іншими зарядженими або нейтральними частинками речовини.

### **! Головне в цьому параграфі**

Електричний струм є впорядкованим рухом заряджених частинок. Він виникає та підтримується за наявності в речовині вільних носіїв електричного заряду, а також чинників, що зумовлюють їх рух у певному напрямі (зовнішнє електричне чи магнітне поля, прискорений рух провідника). Щоб у провіднику існував електричний струм, потрібно підтримувати між його кінцями постійну різницю потенціалів.

Сила струму та напруга є основними характеристиками електричного кола. Зв'язок між ними встановлює закон Ома для ділянки кола.

Кількість теплоти, яка виділяється провідником з електричним струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму.

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Сформулюйте визначення електричного струму.
2. Назвіть умови існування електричного струму.
3. Порівняйте особливості руху заряджених частинок за наявності та відсутності зовнішнього електричного поля.
4. Як визначається напрям електричного струму?
5. Назвіть дії електричного струму та наведіть приклади їх застосування на практиці.
6. Яка фізична величина характеризує інтенсивність руху заряджених частинок, в яких одиницях вона вимірюється?
7. Назвіть складові електричного кола.
8. Поясніть, чим зумовлений електричний опір провідників? Від чого він залежить?
9. Сформулюйте та запишіть закон Ома для ділянки кола.
10. Запишіть формули роботи та потужності електричного струму.
11. Як можна розрахувати кількість теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом?



## § 7. Електрорушійна сила джерела струму.

### Закон Ома для повного кола

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити роль джерела струму та фізичний зміст електрорушійної сили, основні характеристики повного електричного кола та встановлювати взаємозв'язок між ними.*

**ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ТА ЙОГО ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА.** Для того щоб у провіднику виник та існував електричний струм, необхідно на кінцях цього провідника створити та підтримувати різницю потенціалів. Тобто потрібно постійно підводити до кінців провідника додаткові заряди протилежних знаків. У електричному колі функцію елемента, який розділяє заряди, виконує джерело струму.

**Джерело струму — пристрій, який розділяє позитивні та негативні заряди.**

Джерело струму виконує роботу з розділення зарядів за рахунок своєї внутрішньої енергії.

Усередині джерела завдяки роботі з розділення зарядів негативні заряди переміщуються від позитивного до негативного полюса, тобто в напрямку, протилежному напрямку кулонівських сил.

Робота з переміщення електричних зарядів у напрямку, протилежному напрямку дії кулонівських сил, виконується так званими сторонніми силами, які мають неелектростатичне походження.

**Сторонніми називають сили неелектричного походження, які розділяють електричні заряди.**

Сторонні сили можуть мати різне походження. Наприклад, в електрофорній машині заряди розділяються внаслідок виконання механічної роботи з обертання її дисків. У сонячних батареях електричні заряди розділяються в результаті взаємодії атомів речовини, з якої вони складаються, з фотонами.

У гальванічних елементах електричні заряди розділяються завдяки енергії хімічних реакцій між різнорідними речовинами. Наприклад, в елементі Вольта в розчин сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) занурено мідний (Cu) та цинковий (Zn) електроди (рис. 7.1).

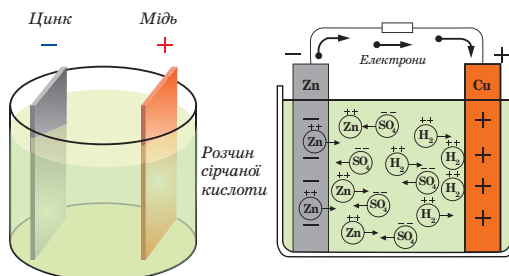


Рис. 7.1. Розділення електричних зарядів у елементі Вольта

Негативні йони  $SO_4^{2-}$ , які знаходяться біля електродів, притягують до себе позитивні йони цинку ( $Zn^{2+}$ ) та міді ( $Cu^{2+}$ ), що містяться у вузлах кристалічних ґраток. Якщо енергія зв'язку між йонами  $SO_4^{2-}$  та йонами металу більша, ніж енергія зв'язку між йонами в кристалічних ґратках, то йони металу залишають кристалічні ґратки та переходять у розчин. Оскільки енергія зв'язку між йонами міді та кристалічними ґратками мідного електрода більша, порівняно з енергією зв'язку між йонами цинку та кристалічною ґраткою цинкового електрода, то кількість йонів цинку, які переходять у розчин кислоти є більшою, ніж кількість йонів міді. Тому цинковий електрод стає катодом, а мідний — анодом.

**ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА.** Дію сторонніх сил характеризують фізичною величиною, яку називають електрорушійною силою (ЕРС).

Електрорушійна сила джерела струму  $\mathcal{E}$  — скалярна фізична величина, яка характеризує здатність сторонніх сил створювати та підтримувати різницю потенціалів і чисельно дорівнює відношенню їх роботи  $A_{\text{стор}}$  до значення розділених зарядів  $\Delta Q$ :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{\Delta Q}.$$

Одиницею електрорушійної сили в СІ є вольт (В):  $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$ .

Електрорушійна сила є характеристикою джерела струму та не залежить від зовнішнього навантаження, приєднаного до його полюсів. ЕРС чисельно дорівнює напрузі між полюсами джерела живлення, коли його полюси не замкнуті.

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА.** Розглянемо електричне коло, що складається з джерела струму, резистора, вимикача та з'єднувальних провідників (рис. 7.2).

Якщо замкнути вимикач, то електричні заряди під дією кулонівських сил будуть переміщуватися в елементах кола (резисторі та з'єднувальних провідниках) від полюса «+» до полюса «-» джерела.

Ділянку кола, що розташована ззовні від джерела струму (споживачі електричної енергії та з'єднувальні провідники), називають зовнішньою, або *однорідною*, а  $R$  — *зовнішнім опором*.

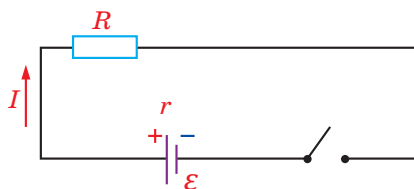


Рис. 7.2. Повне електричне коло

У середині джерела струму сторонні сили виконують роботу з розділення електричних зарядів та підтримують постійну різницю потенціалів, переміщуючи позитивні заряди проти сил електричного поля від катода до анода.

**Ділянку кола, по якій електричні заряди рухаються під впливом сторонніх сил (джерело струму), називають *внутрішньою*, або *неоднорідною*.**

У внутрішній ділянці проходить електричний струм, а вона чинить йому протидію — опір. Цей опір називають внутрішнім опором джерела струму. Його позначають  $r$  та вимірюють в омах (Ом). Внутрішній опір  $r$  та електрорушійна сила  $\mathcal{E}$  є основними характеристиками джерела струму.

**Сукупність з'єднаних між собою джерел та споживачів електричного струму, перемикачів, через які проходить електричний струм, називають *повним електричним колом*.**

Якщо розглядають і враховують як зовнішню, так і внутрішню ділянки електричного кола, його називають повним. Загальний опір повного електричного кола дорівнює сумі опорів його зовнішньої та внутрішньої ділянки:  $R_{\text{заг}} = R + r$ .

За законом збереження енергії робота сторонніх сил у джерелі живлення  $A_{\text{стор}}$  дорівнює роботі з переміщення електричних зарядів по зовнішній та внутрішній ділянках електричного кола:  $A_{\text{стор}} = A_{\text{вн}} + A_{\text{зовн}}$ .

Оскільки  $A_{\text{стор}} = \mathcal{E}Q$ ,  $A_{\text{вн}} = U_{\text{вн}}Q$ ,  $A_{\text{зовн}} = U_{\text{зовн}}Q$ , де  $U_{\text{вн}}$  — падіння напруги на внутрішній ділянці кола,  $U_{\text{зовн}}$  — падіння напруги на зовнішній ділянці кола.

Тоді:

$$\mathcal{E}Q = U_{\text{вн}}Q + U_{\text{зовн}}Q \text{ та } \mathcal{E} = U_{\text{вн}} + U_{\text{зовн}}.$$

***ЕРС джерела живлення дорівнює сумі падіння напруги на зовнішній та внутрішній ділянках електричного кола.***

Відповідно до закону Ома для ділянки кола, та врахувавши, що за одиницю часу через поперечний переріз провідників заряджені частинки переміщують однаковий заряд, можна записати:  $U_{\text{вн}} = Ir$ ,  $U_{\text{зовн}} = IR$ , а  $\mathcal{E} = IR + Ir$  або  $\mathcal{E} = I(R + r)$ .

Звідси отримуємо закон Ома для повного кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

***Сила струму в повному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела і обернено пропорційна повному електричному опору кола.***

### **Знання, корисні для практики!**

Як правило, зовнішній опір повного електричного кола значно перевищує його внутрішній опір ( $R \gg r$ ). Якщо  $R \rightarrow 0$ , сила струму значно збільшується і виникає явище короткого замикання. Під час короткого замикання сила струму на-

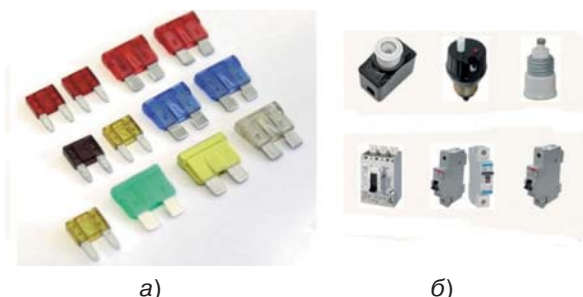
ближається до  $I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ , стрімко зростаючи порівняно зі звичайним значенням струму. Наприклад, у системі освітлення автомобіля лампочка фари має опір

$R = 10$  Ом, а внутрішній опір акумулятора становить  $r = 0,01$  Ом. Відношення струму короткого замикання  $I_{кз}$  до звичайного струму  $I$ :

$$\frac{I_{кз}}{I} = \frac{\mathcal{E}(R+r)}{r\mathcal{E}} = \frac{R+r}{r} = \frac{10,01}{0,01} = 1001.$$

Тобто під час короткого замикання сила струму зростає приблизно в 1000 разів. При цьому виділяється значна кількість теплоти, а отже, може виникнути пожежа. Тому використовують запобіжники, які розмикають електричне коло автомобіля або помешкання при збільшенні сили струму до критичного значення (рис. 7.3).

**Запам'ятайте!** Не можна користуватися електричною мережею з несправними запобіжниками або замінювати їх саморобними пристроями!



**Рис. 7.3.** Запобіжники: а) системи електроживлення автомобіля; б) системи електроживлення помешкання

### ! Головне в цьому параграфі

Джерело струму виконує роботу з розділення зарядів за рахунок своєї внутрішньої енергії. Цю роботу виконують сторонні сили, які мають неелектростатичне походження.

Дію сторонніх сил характеризують фізичною величиною, яку називають електрорушійною силою (ЕРС).

Сила струму в повному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела і обернено пропорційна повному електричному опору кола.



### Домашній експеримент.

Складіть схему та спробуйте виготовити найпростіше хімічне джерело електричного струму (рис. 7.4). Опишіть його принцип дії та особливості.

**Рис. 7.4.** Саморобне хімічне джерело струму

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що називають джерелом струму і яке його основне призначення в електричному колі? 2. Які сили називають сторонніми? Яка їх природа? 3. Чому накопичення зарядів на полюсах джерела живлення може відбуватися тільки під дією сторонніх сил? 4. Що називають електрорушійною

силою? 5. Яке електричне коло називають повним? 6. Які особливості руху заряджених частинок по зовнішній та внутрішній ділянках електричного кола? 7. Що таке внутрішній опір джерела струму? 8. Сформулюйте й запишіть закон Ома для повного кола.

## § 8. Розрахунок електричних кіл із послідовним і паралельним з'єднанням елементів

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете розраховувати електричні кола, використовуючи правила послідовного та паралельного з'єднання його елементів.*

**ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ.** Розрахунок електричних кіл, тобто визначення їх основних характеристик, значно спрощується з урахуванням особливостей з'єднань елементів. Одним із них є послідовне з'єднання. Ділянка електричного кола з послідовним з'єднанням елементів не містить розгалужень, а всі провідники по черзі сполучаються один за одним (рис. 8.1).

**При послідовному з'єднанні провідників кінець попереднього провідника з'єднується з початком тільки одного наступного.**

При послідовному з'єднанні провідників з електричним опором  $R_1$  та  $R_2$  сила струму, який проходить через кожен з резисторів, залишається сталою:

$$I_1 = I_2 = I.$$

Ця рівність випливає із закону збереження електричного заряду. Якби через провідники за одиницю часу проходила різна кількість електричного заряду, то між ними мав би бути спеціальний генератор зарядів.

Робота електричного поля ( $A$ ) з переміщення електричного заряду в ділянці кола, яка містить послідовно з'єднані елементи, дорівнюватиме сумі робіт з переміщення заряду  $A_1$  у першому та  $A_2$  у другому провіднику:

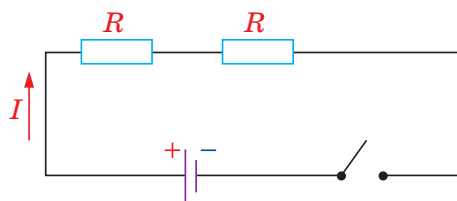
$$A = A_1 + A_2.$$

Оскільки робота електричного поля з переміщення електричного заряду дорівнює добутку різниці потенціалів ( $U$ ) та величини перенесеного заряду ( $Q$ ), то  $UQ = U_1Q + U_2Q$ . Відповідно:

$$U = U_1 + U_2.$$

Отже, загальна напруга на ділянці кола послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі напруг на кожному з них. При цьому  $UI = IU_1 + IU_2$ , або:

$$P = P_1 + P_2.$$



**Рис. 8.1.** Послідовне з'єднання провідників

**Потужність струму на ділянці кола з послідовно з'єднаними провідниками дорівнює сумі потужностей на окремих провідниках.**

Згідно із законом Ома для ділянки кола, електрична напруга на провіднику чисельно дорівнює добутку сили струму в провіднику та його електричного опору. Отже:

$$IR = IR_1 + IR_2 \text{ або } R = R_1 + R_2.$$

**Опір ділянки кола, що складається з послідовно з'єднаних провідників, дорівнює сумі їх електричних опорів.**

Якщо ділянка кола містить  $n$  послідовно з'єднаних провідників, то опір цієї ділянки визначається за формулою:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

де  $R_1, R_2, \dots, R_n$  — відповідно опір кожного з провідників.

У випадку  $n$  послідовно з'єднаних однакових провідників з опором  $R_0$  кожний, загальний опір такої ділянки дорівнює добутку опору одного провідника та їх кількості:  $R = R_0 n$ .

Опір ділянки з послідовним з'єднанням провідників більший за опір будь-якого з цих провідників.

**ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ.** Поширеними є електричні кола з розгалуженнями. Точку розгалуження, в якій з'єднуються два і більше провідників, називають вузлом електричного кола.

**Паралельним називають таке з'єднання елементів електричного кола, за якого одні кінці всіх провідників приєднують до однієї вузлової точки електричного кола, а інші кінці — до другої вузлової точки (рис. 8.2).**

За законом збереження електричний заряд, який надходить за одиницю часу до розгалуження, дорівнює сумі зарядів, які виходять з цієї точки за той самий час:  $I = I_1 + I_2$ .

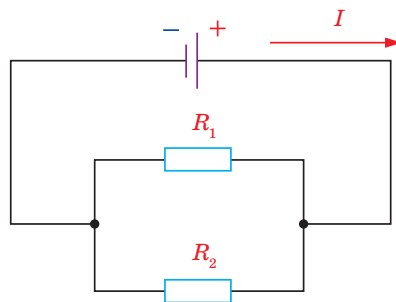
Сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у окремих паралельно з'єднаних елементах електричного кола:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Потенціали на кінці провідників, приєднаних до одного вузла, є однаковими, тому різниця потенціалів (напруга) на кожному з паралельно з'єднаних розгалужень дорівнює різниці потенціалів між вузлами:

$$\phi_1 - \phi_2 = U = U_1 = U_2.$$

**При паралельному з'єднанні напруга на провідниках та кінцях ділянки однакова:**



**Рис. 8.2.** Паралельне з'єднання провідників



$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

Для знаходження опору ділянки кола з паралельним з'єднанням провідників, врахуємо, що в такому колі  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ , а згідно із законом Ома

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}. \text{ Скоротивши на } U, \text{ отримаємо:}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

**При паралельному з'єднанні елементів електричного кола величина, обернена до повного опору з'єднання, дорівнює сумі величин, обернених до опору кожного з розгалужень:**

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Опір ділянки кола, яка складається з двох паралельно з'єднаних провідників опороми  $R_1$  та  $R_2$  відповідно становить:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

У випадку  $n$  паралельно з'єднаних однакових провідників з опором  $R_0$  кожний, загальний опір такої ділянки:

$$R = \frac{R_0}{n}.$$

Опір паралельного з'єднання провідників є меншим за найменше значення опору окремого провідника.

Оскільки вольтметр для вимірювання електричної напруги під'єднують паралельно до ділянки кола, його опір роблять максимально великим.

### **Знання, корисні для практики!**

Властивості паралельного з'єднання елементів електричного кола широко використовують у техніці та побуті. Так, усі побутові електроприлади розраховані на однакову робочу напругу 220 В, тому їх під'єднують до електромережі паралельно (при паралельному з'єднанні напруга на окремих елементах та кінцях ділянки однакова). Також споживачі можна вмикати і вимикати незалежно один від одного, тому вихід із ладу одного приладу не впливає на роботу інших.

Проте при паралельному з'єднанні елементів кола загальна сила струму дорівнює сумі струмів у окремих споживачах. Тому не можна одночасно вмикати потужні побутові прилади (електрочайник, праску, бойлер), **оскільки загальна сила струму в нерозгалуженій ділянці електричного кола буде значною**. Відповідно, виділятиметься велика кількість теплоти, і виникає небезпека пошкодження провідників, виходу з ладу пристроїв та виникнення пожежі (рис. 8.3).



**Рис. 8.3.** Перевантаження за паралельного з'єднання споживачів електричного струму

**ПОСЛІДОВНЕ ТА ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ.** Якщо зовнішній опір електричного кола (опір навантаження) великий порівняно з внутрішнім опором джерела струму, то використовують послідовне з'єднання джерел струму (рис. 8.4).

При послідовному з'єднанні джерел струму з'єднують один з одним їх різноміненні полюси (позитивний попереднього з негативним наступного).



**Рис. 8.4.** Послідовне з'єднання джерел струму

Як правило, у батареї з'єднують однакові джерела. Тому ЕРС такої батареї  $\mathcal{E}_{\text{бат}} = Ne$ , а її внутрішній опір  $r_{\text{бат}} = Nr$ .

Закон Ома для повного кола з батареєю послідовно з'єднаних однакових джерел струму можна записати у вигляді:

$$I = \frac{N\mathcal{E}}{R + Nr}.$$

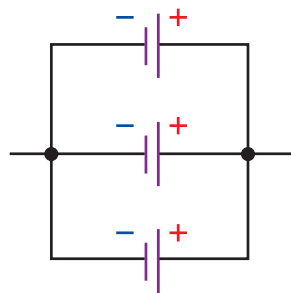
Якщо в колі потрібно отримати значну силу струму за порівняно невеликої напруги, використовують паралельне з'єднання джерел струму (рис. 8.5).

**При паралельному з'єднанні джерел струму всі їх однойменні полюси з'єднуються в окремий вузол.**

ЕРС батареї однакових паралельно з'єднаних джерел струму дорівнює ЕРС одного джерела:  $\mathcal{E}_{\text{бат}} = \mathcal{E}$ . Внутрішній опір при паралельному з'єднанні в  $N$  разів менший за внутрішній опір одного джерела:  $r_{\text{бат}} = \frac{r}{N}$ .

Закон Ома для повного кола при паралельному з'єднанні однакових джерел струму можна записати у вигляді:

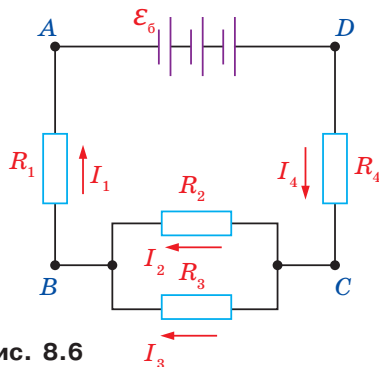
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{N}}.$$



**Рис. 8.5.** Паралельне з'єднання джерел струму

### Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Визначити силу струму і напругу на ділянках зовнішнього кола (рис. 8.6), якщо батарея містить три елементи. Кожен елемент має ЕРС  $\mathcal{E}_{\text{ел}} = 1,5$  В і внутрішній опір  $r_{\text{ел}} = 0,5$  Ом. У зовнішнє коло під'єднані споживачі з опорами:  $R_1 = 0,75$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $R_3 = 0,8$  Ом,  $R_4 = 1,58$  Ом.



**Рис. 8.6**

**Дано:**

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{ел}} &= 1,5 \text{ В}; \\ r_{\text{ел}} &= 0,5 \text{ Ом}; \\ N_6 &= 3; \\ R_1 &= 0,75 \text{ Ом}; \\ R_2 &= 4 \text{ Ом}; \\ R_3 &= 0,8 \text{ Ом}; \\ R_4 &= 1,58 \text{ Ом}\end{aligned}$$

$$I_1 \text{ —?}, I_2 \text{ —?}$$

$$I_3 \text{ —?}, I_4 \text{ —?}$$

$$U_{AB} \text{ —?}, U_{BC} \text{ —?}$$

$$U_{CD} \text{ —?}$$

**Розв'язування**

За законом Ома для повного кола загальний струм в колі  $I = \frac{\mathcal{E}_6}{R_{\text{зовн}} + r_6}$ ,

Електричне коло включає послідовне з'єднання споживачів з опорами  $R_1 + R_{BC} + R_4$ .

Відповідно:  $I = I_1 = I_{BC} = I_4$ ;  $R_{\text{зовн}} = R_1 + R_{BC} + R_4$ .

Ділянка BC містить паралельне з'єднання двох споживачів. Отже,  $I_{BC} = I_2 + I_3$ .

На ділянці BC резистори з'єднані паралельно,

тому  $R_{BC} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$ ;  $R_{BC} = 0,67 \text{ Ом}$ ;

$$R_{\text{зовн}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4; R_{\text{зовн}} = 3 \text{ Ом}.$$

Батарея складається із трьох однакових послідовно з'єднаних джерел струму, тому:

$$\mathcal{E}_6 = N_6 \mathcal{E}_{\text{ел}}; \mathcal{E}_6 = 3 \cdot 1,5 \text{ В} = 4,5 \text{ В}; r_6 = N_6 r_{\text{ел}}; r_6 = 3 \cdot 0,5 \text{ Ом} = 1,5 \text{ Ом}.$$

$$\text{Тоді } I_{BC} = \frac{4,5 \text{ В}}{3 \text{ Ом} + 1,5 \text{ Ом}} = 1 \text{ А}.$$

Напругу на ділянках AB, BC, CD знаходимо за законом Ома для ділянки кола, врахувавши, що  $I_{AB} = I_{BC} = I_{CD}$ :

$$U_{AB} = I_{AB} \cdot R_{AB}, U_{AB} = 1 \text{ А} \cdot 0,75 \text{ Ом} = 0,75 \text{ В}.$$

Аналогічно знайдемо:  $U_{BC} \approx 0,67 \text{ В}$ ,  $U_{CD} = 1,58 \text{ В}$ . Сила струму на ділянці BC:  $I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2}$ ;  $I_2 = 0,17 \text{ А}$ ,  $I_3 = \frac{U_{BC}}{R_3}$ ;  $I_3 = 0,83 \text{ А}$ .

**Відповідь:**  $I_1 = I_4 = 1 \text{ А}$ ,  $I_2 = 0,17 \text{ А}$ ,  $I_3 = 0,83 \text{ А}$ ,  $U_{AB} = 0,75 \text{ В}$ ,  $U_{BC} = 0,67 \text{ В}$ ,  $U_{CD} = 1,58 \text{ В}$ .

**Задача 2.** Два електричних чайники, об'ємом 1 л кожен, мають по дві спіралі потужністю 150 Вт та з коефіцієнтом корисної дії  $h = 0,75$ . У першому чайнику спіралі з'єднані послідовно, а в другому — паралельно. Визначити, в якому чайнику й у скільки разів швидше закипить вода кімнатної температури ( $t = 18^\circ \text{C}$ ). Знайти час закипання води в цьому чайнику.

**Дано:**

$$\begin{aligned}V &= 10^{-3} \text{ м}^3, \\ P_1 &= P_2 = P = 150 \text{ Вт}, \\ t_{\text{води1}} &= 18^\circ \text{C}, \\ t_{\text{води2}} &= 100^\circ \text{C}, \\ c &= 4200 \text{ Дж/кг}^\circ \text{C} \\ \eta &= 0,75\end{aligned}$$

**Розв'язування:**

Коефіцієнт корисної дії чайника визначають за формулою:  $\eta = \frac{Q_K}{Q_3}$ . Оскільки  $Q_K$  (корисна) =

$c \cdot m \cdot \Delta t$  ( $\Delta t = t_{\text{води1}} - t_{\text{води2}}$ ), а  $Q_3$  (затрачена) =  $P \cdot t$  (добуток потужності нагрівача на час, протягом якого відбувається нагрівання).

$$\text{Тоді } \eta = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{P \cdot t}, \text{ а час нагрівання } t = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{\eta \cdot P}.$$

$$\frac{t_1}{t_2} \text{ —?}, t_{\text{min}} \text{ —?}$$

Потужність нагрівача електричного чайника, що складається з двох спіралей,  $P = I \cdot U$ , або  $P = \frac{U^2}{R}$ , де  $R$  — загальний опір спіралей. У першому чайнику спіралі з'єднані послідовно, отже, загальний опір нагрівача  $R_3 = R + R = 2R$ , а потужність  $P_1 = \frac{U^2}{2R} = \frac{P}{2}$ .

$$\text{Тоді } t_1 = \frac{2 \cdot c \cdot m \cdot \Delta t}{\eta \cdot P}.$$

У другому чайнику спіралі з'єднані паралельно, отже, загальний опір нагрівача  $\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R}$ , звідки  $R_3 = \frac{R}{2}$ , а потужність  $P_2 = \frac{2U^2}{R} = 2P$ .

$$\text{Тоді } t_2 = \frac{C \cdot m \cdot \Delta t}{2 \cdot \eta \cdot P}.$$

$$\text{Знайдемо відношення } \frac{t_1}{t_2}: \frac{t_1}{t_2} = \frac{2 \cdot C \cdot m \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \eta \cdot P}{C \cdot m \cdot \Delta t \cdot \eta \cdot P} = 4. \text{ Звідси: } t_1 = 4t_2.$$

Отже, другий чайник закипить у 4 рази швидше, ніж перший.

Визначимо час, упродовж якого у другому чайнику закипить 1 л води (1 л води становить  $1 \text{ м}^3$  або 1 кг):

$$t_2 = t_{\min} = \frac{4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 82^\circ\text{C}}{2 \cdot 0,75 \cdot 150 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}} = 1530,7 \text{ с} = 25,5 \text{ хв.}$$

$$\text{Відповідь: } \frac{t_1}{t_2} = 4; t_{\min} = 25,5 \text{ хв.}$$

### ! Головне в цьому параграфі

При послідовному з'єднанні провідників сила струму, який проходить через кожен з них, залишається сталою. Загальна напруга на ділянці кола дорівнює сумі напруг на кожному з провідників. Опір ділянки кола послідовно з'єднаних провідників, дорівнює сумі їх електричних опорів.

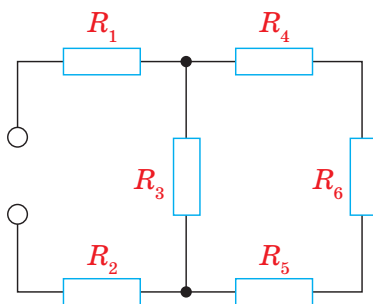
При паралельному з'єднанні провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів в окремих його елементах. Напруга на провідниках та кінцях ділянки однакова. А величина, обернена до повного опору з'єднання, дорівнює сумі величин, обернених до опору кожного з розгалужень.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що називають джерелом струму і яке його основне призначення в електричному колі? 2. Які сили називають сторонніми? Яка їх природа? 3. Чому накопичення зарядів на полюсах джерела живлення може відбуватися тільки під дією сторонніх сил? 4. Що називають електрорушійною силою? 5. Яке електричне коло називають повним? 6. Які особливості руху заряджених частинок по зовнішній та внутрішній ділянках електричного кола? 7. Що таке внутрішній опір джерела струму? 8. Сформулюйте і запишіть закон Ома для повного кола.

**Вправа до § 8**

- 1(д).** До джерела, що має ЕРС 12 В і внутрішній опір 1 Ом, приєднали реостат, опір якого дорівнює 5 Ом. Визначте силу струму в колі та напругу на затискачах джерела.
- 2(д).** У колі, схему якого зображено на рис. 8.7, усі споживачі мають однаковий опір по 2 Ом. Визначте розподіл струмів та напруг, якщо в коло подається напруга 55 В.
- 3(д).** Визначте ЕРС та внутрішній опір джерела струму, замкненого на реостат, якщо за опору 1,65 Ом напруга на ньому становить 3,3 В, а за опору 3,5 Ом — 3,5 В.
- 4(в).** При підключенні електромагніта до джерела з ЕРС 30 В і внутрішнім опором 2 Ом напруга на затискачах джерела дорівнює 28 В. Обчисліть силу струму в колі та роботу сторонніх сил джерела за 5 хв.

**Рис. 8.7**

### ПРАВИЛА БЕЗПЕЧНОГО КОРИСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИБАДАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

Життєдіяльність сучасної людини пов'язана з широким використанням різноманітних електричних приладів, які працюють під високою напругою та споживають значний електричний струм. Тіло людини є провідником електричного струму, тому за неправильного використання електричних приладів це може бути небезпечним для здоров'я та життя. Фізіологічна дія електричного струму на організм людини може виявлятися в судомних скороченнях м'язів, опіках, порушеннях біологічних функцій, роботи нервової системи, електролізі крові. Негативний вплив електричного струму на організм людини пропорційний тривалості дії. Небезпека враження електричним струмом значно підвищується, якщо людина працює з електричним обладнанням в умовах підвищеної вологості, торкається оголених частин дроту з пошкодженою ізоляцією обома руками.

Потрібно чітко дотримуватися правил безпеки під час проведення дослідів з електричним струмом та застосування побутових електроприладів:

- не використовувати несправні електричні прилади, а також обладнання з пошкодженою ізоляцією з'єднувальних провідників;
- не намагатися самостійно відремонтувати електромережу та електричні побутові прилади;
- не використовувати саморобні запобіжники;
- не користуватися електричними приладами, зокрема обігрівачем, феном, зарядним пристроєм мобільного телефону, у ванній кімнаті та приміщеннях з підвищеною вологістю;
- мінімізувати перебування під лініями електропередач;
- під час виконання лабораторних робіт вмикати електричне коло лише з дозволу та після перевірки вчителем;
- використовувати для фізичних експериментів лише джерела струму, ЕРС яких не перевищує 36 В;

- перед початком виконання лабораторних робіт оглянути цілісність ізоляції з'єднувальних провідників, не торкатися оголених частин установок;
- при виявленні пошкодження електричного обладнання повідомити вчителя, а вдома батьків;
- при ураженні товаришів електричним струмом потрібно від'єднати джерело струму з дотримання вимог безпеки, повідомити вчителя, викликати лікарів.

## § 9. Природа електричного струму в металах.

### Електричний струм у вакуумі

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити природу електричного струму в металах та їх електронну провідність, особливості проходження електричного струму у вакуумі, явища надпровідності та термоелектронної емісії і їх застосування.*

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ. НАДПРОВІДНІСТЬ.** Експериментальне підтвердження електронної природи струму в металах було здійснене в 1916 р. фізиками Р. Толменом та Б. Стюартом у дослідях із вивчення інерції електронів. Котушка з великою кількістю витків тонкого дроту швидко оберталася навколо своєї осі. Кінці обмотки котушки за допомогою спеціальних контактів та гнучких провідників були з'єднані з чутливим балістичним гальванометром ( $\Gamma$ ) (рис. 9.1).

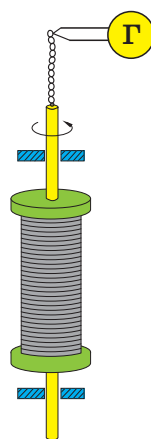
Коли котушка швидко оберталася, струму в колі не було. Під час різкого гальмування котушки в її обмотці виникав короточасний струм, який фіксувався гальванометром. Аналіз результатів експерименту дав можливість ученим установити, що струм у котушці зумовлений рухом негативних заряджених частинок — електронів. Під час обертання котушки вони отримували велику швидкість, а після гальмування продовжували деякий час рухатися за інерцією та створювали електричний струм.

Вимірявши величину струму, можна було визначити відношення заряду, що переноситься в провіднику, до маси заряджених частинок. Це відношення виявилось сталим і таким, що є характерним для

$$\text{електрона } \frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Тому було зроблено висновок, що *під час протікання електричного струму в металевому провіднику перенесення речовини не відбувається.*

Так було експериментально встановлено електронну природу електричного струму в металах та підтверджено запропоновану німецьким ученим П. Друдом в 1900 р. електронну теорію провідності металів. Згідно з нею, електрони в металах поводяться, як електронний газ, подібний до ідеального, що заповнює простір між йонами кристалічних ґраток (рис. 9.2).



**Рис. 9.1.**  
Схема дослідів  
Р. Толмена  
і Б. Стюарта



У зовнішньому електричному полі електрони зміщуються в напрямку його силових ліній. У металевому провіднику виникає упорядкований рух електронів, тобто електричний струм.

**Електричний струм у металах є напрямленим рухом електронів.**

Йони кристалічних ґраток здійснюють коливання навколо положень рівноваги (вузлів). Вільні електрони під час руху взаємодіють з йонами та віддають їм частину своєї енергії. Внаслідок цього амплітуда коливань йонів зростає, а швидкість вільних електронів зменшується — провідник нагрівається.

Отже, під час проходження електричного струму з боку провідника виникає опір, який залежить від температури. Тобто, якщо провідник нагрівати від зовнішнього джерела, то амплітуда теплових коливань йонів та інтенсивність їх взаємодії з вільними електронами зростає. Відповідно, збільшиться й опір провідника. Під час охолодження провідника його опір буде зменшуватися.

Здатність речовини, з якої виготовлено провідник, чинити опір проходженню електричного струму характеризується питомим опором  $r$ . Його одиницею в СІ є питомий опір провідника довжиною 1 м та площею поперечного перерізу  $1 \text{ м}^2$ , що має опір 1 Ом:  $1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Залежність питомого опору металу від температури виражається формулою:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T),$$

де  $\rho_0$  — питомий опір металу при  $0 \equiv \text{С}$ ;  $\alpha$  — термічний коефіцієнт опору.

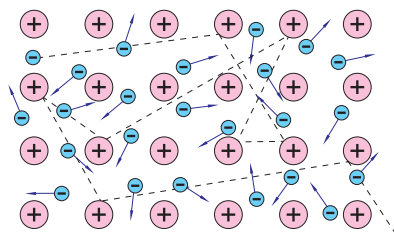
Враховуючи незначну зміну розмірів провідника, отримаємо:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T).$$

**Зміна опору металевого провідника пропорційна зміні його температури.**

У 1911 р. нідерландський фізик Г. Камерлінг-Оннес виявив, що під час охолодження металевих провідників рідким гелієм до температури, близької до абсолютного нуля, їх опір стає практично рівним нулю. Таке явище отримало назву надпровідності. Для багатьох металів, наприклад, ртуті, явище надпровідності спостерігається під час охолодження до температури близько 4 К.

**Надпровідність** — стан провідника, в якому він практично втрачає електричний опір.



**Рис. 9.2.**  
Електронний газ у металах

Вивчення та застосування надпровідності є одним із перспективних напрямів сучасної фізики. Він надає значні можливості у створенні нових технологій, зокрема, систем передачі електроенергії без втрат, надпотужних електромагнітів та обчислювальних систем.

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ.** Якщо в металевих провідниках концентрація вільних носіїв електричного заряду є максимальною порівняно з іншими речовинами, то у вакуумі вільні носії практично відсутні.

*Вакуум – це середовище, в якому немає частинок речовини.*

Електричний струм у такому середовищі можливий лише за умови, якщо за допомогою додаткового джерела ввести заряджені частинки в обмежений простір та створити в ньому електричне поле, яке на них діятиме.

Вільні носії заряджених частинок у вакуумі отримують двома основними способами: нагріванням та опроміненням. Якщо металевий електрод нагріти до високої температури, то його поверхня починає випускати електрони, які зосереджуються біля неї, утворюючи електронну хмаринку.

**Явище випускання електронів нагрітими тілами у вакуумі називають термоелектронною емісією.**

Якщо температуру електрода підтримувати сталою, то кількість електронів, що вилітають із поверхні, дорівнюватиме кількості електронів, що повертаються в електрод. Щоб вилетіти з поверхні металу електрон виконує роботу з подолання сил кулонівської взаємодії з позитивними йонами, яку називають *роботою виходу* ( $A_{\text{вих}}$ ). Вона є величиною, що характеризує конкретний метал та вимірюється в електрон-вольтах (eV).

Якщо нагрітий металевий електрод помістити у вакуумі разом із іншим електродом та приєднати їх, відповідно, до негативного та позитивного полюсів джерела струму, то електрони почнуть рухатися впорядковано між електродами — виникає електричний струм. Якщо змінити полярність підключення джерела, то струму не буде.

**Електричний струм у вакуумі створюється вільними електронами емісії.**

Це явище було покладено в основу будови вакуумного діода (<http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-Phys11-60.pdf>).



Детальніше...

### **! Головне в цьому параграфі**

Електричний струм у металах є напрямленим рухом електронів. Здатність речовини, з якої виготовлено провідник, чинити опір проходженню електричного струму характеризується питомим опором. Зміна опору металевого провідника пропорційна зміні його температури.

Надпровідність — це стан провідника, в якому він практично втрачає електричний опір.

Явище випускання електронів нагрітими тілами у вакуумі називають термоелектронною емісією. Електричний струм у вакуумі створюється вільними електронами емісії.

**? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Чим зумовлений електричний струм у металах? Наведіть приклад дослідів, який підтверджує вашу відповідь. 2. Як електропровідність металів пов'язана з їх внутрішньою будовою? 3. Порівняйте, як рухаються електрони провідності в металічному провіднику за відсутності та за наявності в ньому електричного поля. 4. Чому металевий провідник нагрівається під час проходження по ньому електричного струму? 5. Як можна пояснити таку властивість металевого провідника, як опір? 6. Як питомий опір провідника залежить від температури? 7. Коли через спіраль електричної лампочки протікає більший електричний струм: у момент вмикання чи коли вона починає світитись? 8. У чому полягає явище надпровідності металів та які ефекти його підтверджують? 9. Яке значення має надпровідність для техніки та технологій? 10. Що таке термоелектронна емісія? 11. Що є носіями струму у вакуумі? 12. Де застосовують явище термоелектронної емісії?

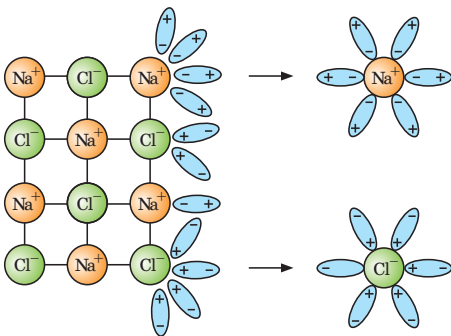
**§ 10. Електричний струм у рідинах**

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати природу електричного струму в електролітах, застосовувати закони електролізу для розв'язування задач, оцінювати перспективи використання електролізу в техніці та технологіях.*

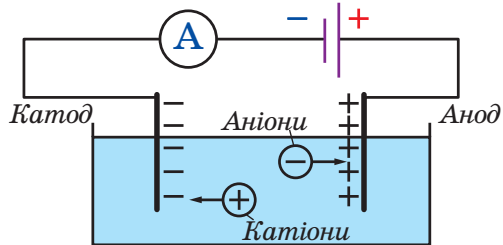
**ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РОЗЧИНАХ І РОЗПЛАВАХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ.**

Одним із поширених видів провідників електрики є електроліти. Їх розчини або розплави є провідниками електричного струму. У розчині під впливом полярних молекул води речовина-електроліт розпадається на позитивно та негативно заряджені йони. Це явище називають *електролітичною дисоціацією* (рис. 10.1)

Якщо в такому розчині створити електричне поле, то позитивно заряджені йони (катіони) рухатимуться до катода (негативно зарядженого електрода), а негативно заряджені йони (аніони) — до анода (позитивно зарядженого електрода) (рис. 10.2).



**Рис. 10.1.** Процес електролітичної дисоціації кухонної солі



**Рис. 10.2.** Виникнення електричного струму в розчині електроліту

**У розчинах і розплавах електролітів електричний струм створюється позитивними та негативними йонами.**

**ЕЛЕКТРОЛІЗ. ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОЛІЗУ.** У постійному за напрямом електричному полі позитивні йони електроліту рухаються до катода, а негативні до анода. Коли катіони стикаються з катодом, вони отримують від нього електрони та відновлюються (наприклад,  $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \rightarrow \text{Cu}$ ). На аноді негативний йон віддає електрон, тобто відбувається процес окислення ( $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}$ ). Отже, проходження електричного струму в розчинах і розплавах електролітів супроводжується виділенням речовини на електродах.

**Електроліз — процес виділення речовин на електродах, пов'язаний з окисно-відновними реакціями, що відбуваються під час проходження струму.**



**Майкл Фарадей**  
(1791–1867),  
англійський фізик, один  
із основоположників  
учення про електро-  
магнетизм, установив  
закони електролізу

Англійський фізик Майкл Фарадей експериментально встановив, що маса  $m$  речовини, яка виділяється на електроді під час електролізу, пропорційна силі струму  $I$  та часу  $t$  його проходження через електроліт:

$$m = k \cdot I \cdot t,$$

де  $k$  — електрохімічний еквівалент речовини.

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

Другий закон Фарадея встановлює залежність між хімічним та електрохімічним еквівалентами. Нагадаємо, що хімічним еквівалентом називають відношення атомних мас речовин  $M$  до їх валентностей:  $\frac{M}{Z}$ .

**Електрохімічний еквівалент речовини пропорційний його хімічному еквіваленту:**

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{Z},$$

де  $F$  — коефіцієнт пропорційності, який називають сталою Фарадея:

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$$

**Приклад розв'язування задачі на закони електролізу.**

**Задача 1.** Нікелювання поверхні прямокутної деталі площею  $48 \text{ см}^2$  здійснюється під час проходження струму силою  $0,15 \text{ А}$ . Визначте товщину шару покриття, якщо електроліз триває  $2 \text{ год}$ .

**Дано:**

$$S = 48 \text{ см}^2 = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$I = 0,15 \text{ А}$$

$$\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$$

$$k = 3,04 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$$

$$t = 2 \text{ год} = 7200 \text{ с}$$

$$h \text{ — ?}$$

**Розв'язування**

Згідно з першим законом електролізу Фарадея  $m = kIt$  (1). Масу виділеного нікелю можна обчислити за формулою  $m = \rho V$ , де  $\rho$  — густина нікелю.  $V = Sh$ , де  $S$  — площа поверхні деталі,  $h$  — товщина шару покриття. Тоді маємо  $m = \rho Sh$  (2). Прирівнявши вирази (1) і (2), отримаємо:  $\rho Sh = kIt$ .

$$\text{Звідси } h = \frac{k \cdot I \cdot t}{\rho \cdot S}; h = \frac{3,04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 0,15 \text{ А} \cdot 7200 \text{ с}}{8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2} =$$

$$= 7,685 \cdot 10^{-4} \text{ м} \approx 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 0,8 \text{ мм}$$

**Відповідь:**  $h = 0,8 \text{ мм}$ .

**Задача 2.** Визначте, який найменший заряд повинен мати акумулятор, щоб під час електролізу підкисленої води, густина якої  $1,43 \text{ кг/м}^3$ , вивільнилося 5 л кисню за температури  $27^\circ \text{C}$  і нормального атмосферного тиску?

**Дано:**

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

$$T = 300 \text{ К}$$

$$p_0 = 101325 \text{ Па}$$

$$\rho_{\text{пкв}} = 1,43 \text{ кг/м}^3$$

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

$$q \text{ — ?}$$

**Розв'язування**

Потрібну для електролізу кількість електрики можна визначити із співвідношення:

$$m = kq : q = m/k.$$

Масу вивільненого кисню — за формулою  $m = \rho_0 V_0$ , а  $V_0$  — із закону Гей-Люссака  $V_0 = VT_0/T$ .

Отже,  $q = \frac{VT_0 \rho_0}{T_k}$ . Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 273 \text{ К} \cdot 1,43 \text{ кг/м}^3}{300 \text{ К} \cdot 8,29 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}} = 78,5 \text{ Кл}$$

**Відповідь:**  $78,5 \text{ Кл}$ .

**ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ В ТЕХНІЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЯХ.** Явище електролізу широко використовують у техніці та технологіях. Під час *гальваностегії* (від *гальвано* і грец. *stego* — покриваю) на поверхню металевих виробів наносять покриття методом електролітичного осадження (<http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-Phys11-64.pdf>).



Детальніше...

### ! Головне в цьому параграфі

Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів створюється позитивними та негативними йонами. Проходження електричного струму в розчинах і розплавах електролітів супроводжується виділенням речовини на електродах.

Процеси, що відбуваються під час проходження електричного струму через розчини електролітів, називають електролізом. Електрохімічний еквівалент речовини  $k$  чисельно дорівнює масі речовини, яка виділяється на електроді за 1 с під час проходження через електроліт струму силою 1 А.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що є носіями електричного струму в електролітах? 2. Дистильована вода не проводить електричний струм. Поясніть, чому вона стає провідником, якщо в ній розчинити солі, кислоти, луги? 3. Сформулюйте закон електролізу Фарадея. 4. Що називають електрохімічним еквівалентом речовини? 5. Який фізичний зміст сталої Фарадея? 6. Як пов'язані електрохімічний еквівалент речовини та її валентність? 7. Чи залежить опір розчинів електролітів від температури? Як саме? 8. Наведіть приклади практичного використання електролізу.

### Вправа до § 10

- 1(с). Під час посріблення виробу на катоді за 30 хв осіло 4,55 г срібла. Визначте силу струму.
- 2(с). Під час електролізу мідного купоросу за 1 год виділилося 0,5 кг міді. Площа поверхні електродів становить 7,5 м<sup>2</sup>. Обчисліть густину струму  

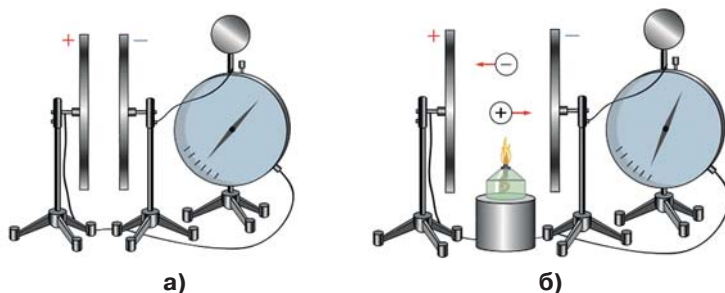
$$J = \frac{I}{S}$$
- 3(д). За сили струму 5 А впродовж 10 хв у електролітичній ванні виділилося 1,017 г двовалентного металу. Визначте його атомну масу.
- 4(д). Скільки нікелю виділиться під час електролізу за час  $t = 1$  год і сили струму  $I = 10$  А, якщо відомо, що молярна маса нікелю становить  $M = 0,0587$  кг/моль, а валентність  $n = 2$ ?
- 5(д). Яку кількість електричної енергії потрібно витратити, щоб під час електролізу розчину азотно-кислого срібла виділилося 500 мг срібла? Різниця потенціалів на електродах становить 4 В.
- 6(в). Для електролізу розчину  $ZnSO_4$  необхідно затратити енергії  $W = 2$  кВт · год. Визначте масу  $m$  цинку, яка виділиться, якщо напруга дорівнює  $U = 4$  В.
- 7(в). Визначте товщину шару міді, що виділилася за 5 год під час електролізу мідного купоросу, якщо густина струму дорівнює 0,8 А/дм<sup>2</sup>.

## § 11. Електричний струм у газах та його застосування. Плазма

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати природу електричного струму в газах, особливості несамотійного та самотійного газових розрядів, оцінювати перспективи їх використання в техніці.*

**ЙОНІЗАЦІЯ ГАЗУ. НЕСАМОСТІЙНИЙ ГАЗОВИЙ РОЗРЯД.** Із курсу фізики та власного досвіду ви знаєте, що гази є діелектриками. Цю властивість можна спостерігати в будь-якій кімнаті: повітря не проводить електричний струм, підведений до розеток. Тобто за звичайних умов у газах майже відсутні вільні носії заряду, які б створювали електричний струм. Підтверджується цей висновок і дослідом із двома зарядженими різнойменно металевими пластинами та електрометром (рис. 11.1).





**Рис. 11.1.** За звичайних умов у повітрі майже відсутні вільні носії заряду, які б створювали електричний струм

Якщо пластини розташувати паралельно та з'єднати одну зі стрижнем електрометра, а іншу з його корпусом (рис. 11.1, а), то можна помітити, що електрометр не розряджається. Молекули газів, які утворюють повітря, у природному стані є електрично нейтральними.

Якщо нагрівати повітря між пластинами полум'ям спиртівки (рис. 11.1, б), то кут відхилення стрілки електрометра буде зменшуватися, що вказує на зменшення різниці потенціалів між пластинами. Тобто нагріте повітря між пластинами стало провідником електричного заряду.

Під час нагрівання газу відбувається йонізація його молекул чи атомів, у результаті чого утворюються вільні електрони та позитивні йони. Деякі електрони можуть приєднуватися до нейтральних атомів та утворювати негативні йони.

**Електричний струм у газах створюється позитивними і негативними йонами та вільними електронами.**

Йонізація газу може відбуватися не тільки під час нагрівання, а й під впливом ультрафіолетового, рентгенівського, радіоактивного, космічного випромінювання. Такий процес називається фотойонізацією. Чинники, що зумовлюють йонізацію газу, називаються *йонізаторами*.

Явище виникнення електричного струму в газі під дією йонізатора називається *несамостійним розрядом*.

Особливістю несамостійного розряду в газі є те, що він з часом припиняється. Якщо йонізатор перестає діяти, кількість носіїв заряду з часом зменшується, оскільки вільні електрони та позитивні йони можуть об'єднуватися в нейтральні атоми. Так само негативні йони можуть віддавати надлишковий електрон позитивним йонам, тобто *рекомбінувати*. Відповідно, й струм із часом припиняється.

**Зверніть увагу!** Пропонуємо вам ознайомитися з особливостями залежності струму від прикладеної напруги під час газового розряду (вольт-амперною характеристикою — ВАХ).



**САМОСТІЙНИЙ РОЗРЯД У ГАЗІ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ТЕХНІЦІ Й ТЕХНОЛОГІЯХ.** Включимо в електричне коло замість повітряного конденсатора скляний балон, заповнений газом, що має два електроди (рис. 11.2.).

Якщо напругу між електродами збільшувати, то сила струму може зрости в сотні й тисячі разів, а кількість заряджених частинок, що виникають у процесі розряду, може збільшитися настільки, що для його підтримки не буде вже потрібний зовнішній йонізатор.

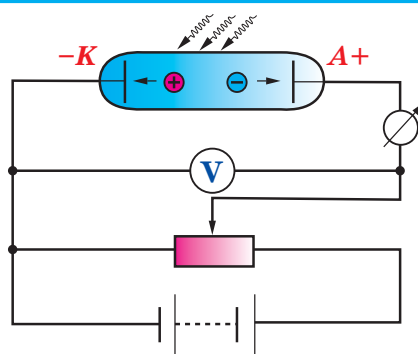
**Електричний розряд у газі, що зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, називають самостійним.**

На відміну від електролітів, під час проходження електричного струму в газах не відбувається виділення речовин на електродах. На них здійснюється нейтралізація заряджених частинок. Газові йони віддають електродам власні заряди, перетворюються на нейтральні молекули і дифундують знову в газ.

Основними видами самостійного розряду в газах є тліючий, коронний, іскровий розряди, електрична дуга.

Дуговий розряд використовують в електрозварюванні — процесі, у якому за рахунок тепла, що виділяється електричною дугою між електродом і поверхнею металу, метал починає плавитися.

Температура в місці зварювання за атмосферного тиску досягає 4000 °С.



**Рис. 11.2.** Умови виникнення самостійного розряду в газі



Детальніше...



**Борис Євгенович Патон** (нар. 1918 р.), президент НАН України, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, всесвітньо відомий учений у галузі технологій електрозварювання

**Євген Оskarович Патон** (1870—1953), український інженер, засновник Інституту електрозварювання НАН України. Здійснив дослідження наукових основ електрозварювання, розрахунку й міцності зварних конструкцій, механізації зварювальних процесів



Україна є світовим лідером сучасного електрозварювання. Учені Інституту електрозварювання НАН України імені Є. О. Патона розробили методи зварювання, які широко використовуються в різних галузях техніки, а також унікальні технології електрозварювання в різних середовищах, зокрема під водою та в космосі,

а також технологію зварювання м'яких тканин. Сьогодні Інститут очолює всесвітньо відомий учений, президент НАН України, академік Борис Євгенович Патон (син Є. О. Патона). Сайт інституту електрозварювання: <http://paton.kiev.ua/>



**ПЛАЗМА ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ.** При високих температурах (у декілька десятків тисяч Кельвінів) більшість атомів будь-якого газу будуть йонізованими. Наприклад, за  $T = 30\,000\text{ К}$  на 20 000 позитивних йонів припадає лише один нейтральний атом. При цьому газ переходить у стан, який називають плазмою.

Електронна оболонка атома Гідрогену містить тільки один електрон, а тому з його втратою йонізація завершується. В атомах інших елементів електронна оболонка містить електрони, що мають різні зв'язки з атомом. Чим більший порядковий номер елемента, тим більша кількість електронів у атомі і тим міцніші зв'язки вони мають з атомним ядром. Повна йонізація важких елементів можлива лише за надвисоких температур (десятки мільйонів Кельвінів). За таких умов подальша йонізація відбувається за рахунок зіткнення атомів або молекул, які швидко рухаються. Майже всі речовини за поступового підвищення їх температури послідовно проходять твердий, рідкий, газоподібний стани і перетворюються в плазму.

Плазма існує у вигляді сонячного вітру, що заповнює магнітосферу та іоносферу Землі. Вони захищають її від жорсткого космічного випромінювання та забезпечують стійкий радіозв'язок (рис. 11.3).

Під дією сонячного вітру відбувається йонізація атомів і молекул газів, що входять до складу атмосфери Землі, зумовлюючи магнітні бурі. Випромінювання збуджених атомів спостерігається як полярне сяйво.



**Рис. 11.3.** Зміна форми магнітного поля Землі під дією сонячного вітру

### ! Головне в цьому параграфі

Електричний струм, що проходить через газ, називають газовим розрядом. Електричний розряд у газі, що зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, називається самостійним.

Широкого застосування в техніці та технологіях набув дуговий розряд, який є основою електрозварювання.

Плазма — це четвертий агрегатний стан речовини. Більшість атомів будь-якого газу у стані плазми є йонізованими.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Чим зумовлений електричний струм у газах? 2. Як відбувається йонізація газів? 3. Наведіть приклади йонізаторів газу. 4. Який розряд нази-

вають самостійним? За яких умов він виникає та підтримується? 5. Пояснить основні відмінності несамостійного та самостійного розрядів у газах. 6. Які особливості протікання електричного струму в газах порівняно зі струмом у металах та електролітах? 7. Назвіть основні види самостійного газового розряду, опишіть їх прояв у природі та використання в техніці і технологіях. 8. Що називають плазмою та які властивості відрізняють її від газу? 9. Чим відрізняється високотемпературна плазма від низькотемпературної? 10. Наведіть приклади речовини, яка перебуває в стані плазми у Всесвіті.

## § 12. Електропровідність напівпровідників. Напівпровідники як елементна база сучасної мікроелектроніки

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати природу електричного струму в напівпровідниках та його особливості, властивості електронно-діркового переходу, оцінювати перспективи використання напівпровідників у техніці та технологіях як основи сучасної мікроелектроніки.*

**ПРИРОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ. ВЛАСНА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ.** Основою елементної бази сучасної радіоелектроніки є речовини, електрична провідність яких має проміжне значення між провідниками та діелектриками. Їх називають напівпровідниками.

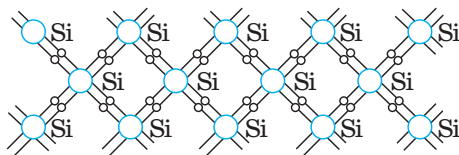
**Напівпровідниками називають речовини, електрична провідність яких менша, ніж у провідників електричного струму, та більша, ніж у діелектриків.**

Типовими напівпровідниками є германій та кремній, які утворені, відповідно, елементами четвертої групи Германієм (Ge) та Силіцієм (Si). Атоми цих елементів розташовані в строгому порядку. Кожен з них зв'язаний із чотирма сусідніми двоелектронними або ковалентними зв'язками (рис. 12.1).

Сусідні атоми розташовані настільки близько один від одного, що їх валентні електрони утворюють спільні орбіти, які проходять навколо всіх сусідніх атомів, зв'язуючи їх в єдину речовину.

За температури, близької до абсолютного нуля, напівпровідник має властивості абсолютного діелектрика, оскільки в нього немає вільних електронів. З підвищенням температури зв'язок валентних електронів з атомними ядрами слабшає і деякі з них унаслідок теплового руху можуть залишати свої атоми. Атом напівпровідника, що втратив хоча б один електрон, стає позитивним йоном.

Електрон, що залишає міжатомний зв'язок, стає вільним, а там, де



**Рис. 12.1.** Взаємозв'язки атомів у кристалі кремнію

він був, утворюється вакантне місце (вакантний енергетичний рівень), яке називають діркою (рис. 12.2).

Утворення в напівпровіднику дірки пов'язане з виходом з оболонки атома валентного електрона. Виникнення дірки відповідає появі позитивного електричного заряду, що дорівнює за модулем заряду електрона. Чим вища температура напівпровідника, тим більше в нього з'являється вільних електронів і дірок. За температури, вищої від абсолютного нуля, у напівпровіднику безперервно виникають вільні електрони і дірки. Вільні електрони можуть займати вакантні місця — відбувається рекомбінація. Дірки можуть замінюватися і сусідніми валентними електронами. При цьому дірка «рухається» — вона з'являється в іншому місці.

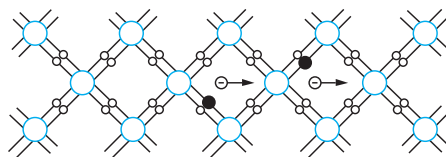


Рис. 12.2. Утворення вільних електронів та дірок

**Електропровідність напівпровідників зумовлена наявністю в них негативно заряджених вільних електронами та позитивно заряджених дірок.**

Електрони та дірки за відсутності зовнішнього електричного поля рухаються хаотично в різні боки і не виходять за межі напівпровідника. Саме вони зумовлюють *власну електропровідність напівпровідника*.

У чистому напівпровіднику кількість електронів, що вивільняються в кожен момент часу, дорівнює кількості дірок, що утворюються при цьому. Загальна їх кількість за кімнатної температури відносно невелика. Саме тому власна електропровідність такого напівпровідника невелика і він чинить значний опір електричному струму.

Якщо до напівпровідника прикласти електричне поле, то електрони поблизу позитивного полюса джерела притягуються до нього та вивільняються, залишаючи після себе дірки (рис. 12.3, а).

Електрони, що розірвали міжатомні зв'язки на деякій відстані від позитивного полюса, теж притягуються до нього і рухаються в його бік. Зустрічаючи на своєму шляху вакантні місця, вони можуть займати їх. Здійснюється заповнення деяких міжатомних зв'язків (рис. 12.3, б, в).

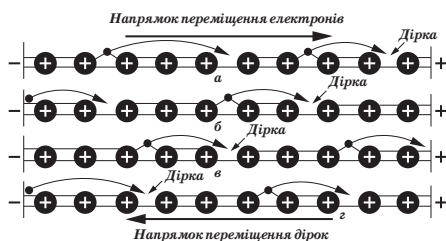


Рис. 12.3. Рух носіїв заряду в напівпровіднику під дією електричного поля

Ближчі до негативного полюса джерела дірки заповнюються іншими електронами, що вирвалися з атомів, розташованих ще ближче до негативного полюса (рис. 12.3, г). Поки в напівпровіднику діє електричне поле, цей процес триває: порушуються одні міжатомні зв'язки (з них вириваються валентні електрони та утворюються дірки) і заповнюються інші (дірки заповнюються електронами, що звільнилися від інших міжатомних зв'язків).

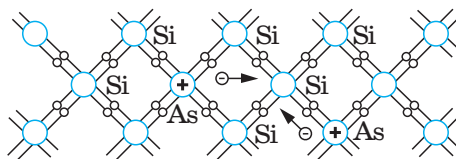


**ДОМІШКОВА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ.** Якщо в чистий напівпровідник додати навіть невелику кількість домішки у вигляді атомів інших елементів, електропровідність його різко підвищиться. Залежно від структури атомів домішкових елементів, електропровідність напівпровідника буде електронною або дірковою.

Якщо до чотирьохвалентного напівпровідника (наприклад, кремнію) додати атоми миш'яку, що має в зовнішньому шарі електронної оболонки п'ять валентних електронів, цей атом чотирма електронами зв'язується з чотирма сусідніми атомами основного напівпровідника. П'ятий валентний електрон атома миш'яку залишається незв'язаним і стає вільним (рис. 12.4).

Чим більше в напівпровідник буде введено атомів домішки з більшою валентністю, тим більше в його масі опиниться вільних електронів. Такий напівпровідник з домішкою за властивостями провідності наближається до металу: для того, щоб через нього проходив електричний струм, у ньому не обов'язково повинні руйнуватися міжатомні зв'язки.

Домішки такого типу називають *донорними* (атоми донорної домішки віддають електрони). Напівпровідники, що мають такі властивості, називають напівпровідниками з електропровідністю *n*-типу, або напівпровідниками *n*-типу (від *negativ* — негативний).

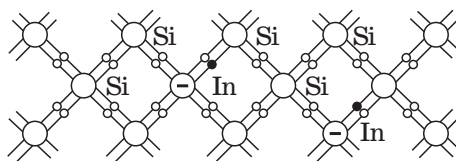


**Рис. 12.4.** Донорна провідність напівпровідників

**Основними носіями заряду в напівпровіднику *n*-типу є вільні електрони.**

Якщо до чотирьохвалентного напівпровідника ввести атоми трьохвалентного елемента (наприклад, до кремнієвого напівпровідника додати атоми індію), кожен атом індію своїми трьома електронами зв'язується тільки з трьома сусідніми атомами кремнію (рис. 12.5).

Для заповнення зв'язку з четвертим атомом у нього не вистачає одного електрона. Один зв'язок залишається незаповненим — утворюється дірка. Вона може заповнитися електроном, що вивільнився з валентного зв'язку інших атомів напівпровідника, але в масі напівпровідника з такою домішкою не вистачатиме електронів для заповнення всіх дірок. Чим більше до напівпровідника ввести атомів домішки з меншою валентністю, тим більше в ньому утворюється дірок.



**Рис. 12.5.** Акцепторна провідність напівпровідників

Домішки, атоми яких приймають електрони від сусідніх атомів основного напівпровідника і утворюють надлишок дірок у напівпровіднику, називаються *акцепторними домішками*. Напівпровідники, що мають таку властивість, називають напівпровідниками з дірковою електропровідністю, або напівпровідниками *p*-типу (від *positiv* — позитивний).



**Основними носіями заряду у провідниках  $p$ -типу є дірки.**

Отже, у напівпровіднику з акцепторною домішкою проходження електричного струму супроводжується безперервним виникненням і заповненням вакантних місць, тобто рухом дірок. Напівпровідники типу  $p$ , так само як і напівпровідники типу  $n$ , мають у багато разів вищу електропровідність порівняно з чистими напівпровідниками.

**Зверніть увагу!** Рух дірки можна змодельювати в класі. Уявіть, що учень за першою партою моделює електрон напівпровідника, який залишає валентний зв'язок (своє місце за партою) та стає вільним електроном. Його місце за партою (вакантне місце) може зайняти товариш із задньої парти, а місце товариша — учень, що сидить за ним. Так вакантне місце «переміститься» з першої парти на останню. При цьому стілець не переміщується, хоч вакантне місце змінює своє розташування, що подібно до руху дірок.

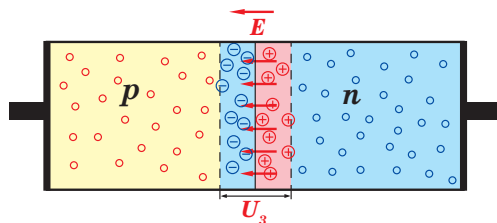
Оскільки у валентному зв'язку між атомами напівпровідника, де виникло вакантне місце, не вистачає електрона, то дірку ототожнюють із позитивним зарядом.

**Особливостями електропровідності напівпровідників є те, що вона: зумовлена рухом вільних електронів і дірок; збільшується з підвищенням температури, під дією світла та зі зростанням напруженості електричного поля; залежить від домішок.**

**ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ.** Практичне застосування в радіоелектроніці мають напівпровідники, утворені контактом двох областей із різними типами провідності (рис. 12.6).

**Перехід між двома областями напівпровідника з різними типами електропровідності називається електронно-дірковим або  $n$ - $p$ - ( $p$ - $n$ )-переходом.**

Електронно-дірковий перехід утворюється в момент сплавлення двох областей із різними типами провідності. У  $p$ - і  $n$ -областях виникає дифузний струм основних носіїв заряду: дірок з  $p$ -області в  $n$ -область і електронів у зворотному напрямку. Дифундуючи, електрони і дірки залишають за собою відповідно позитивно і негативно заряджені йони домішок (ці йони жорстко закріплені в кристалічній ґратці й переміщуватися не можуть).



**Рис. 12.6.** Електронно-дірковий перехід

Дифундуючи в  $n$ -область, дірки рекомбінують з електронами, різко зменшуючи концентрацію електронів і додатково утворюючи позитивні йони, що не компенсуються. Аналогічно в  $p$ -області дифундуючі електрони рекомбінують з дірками, різко зменшу-

ючи концентрацію основних носіїв заряду і додатково утворюючи негативні йони, що не компенсуються. У такий спосіб поблизу межі  $p$ - і  $n$ -областей концентрація основних носіїв заряду різко зменшується, а неосновних зростає. На межі переходу утворюються протилежно заряджені області, що викликає появу в переході електричного поля. Це поле напрямлене так, що перешкоджає подальшій дифузії.

Цьому електричному полю, відповідає контактна різниця потенціалів (запірна напруга)  $U_s$ . Для германієвого переходу  $U_s = 0,2\text{--}0,3$  В, для кремнієвого  $U_s = 0,6\text{--}0,8$  В.

Якщо контакти  $p$ - $n$ -переходу під'єднати до джерела постійного струму так, щоб його позитивний полюс був приєднаний до  $p$ -, а негативний до  $n$ -області (рис. 12.7.), то через перехід протікатиме електричний струм: основні носії заряду кожної з областей будуть рухатися до протилежних полюсів (дірки до негативного полюса джерела, а електрони до позитивного). При цьому зовнішнє електричне поле, що створюється джерелом струму, напрямлене протилежно електричному полю переходу та компенсує його.

Таке включення  $p$ - $n$ -переходу називають прямим. Відповідно, напруга, за якої струм через  $p$ - $n$ -перехід швидко збільшується, називається *прямою напругою*, а струм — *прямим струмом*.

Якщо змінити включення  $p$ - $n$ -переходу на протилежне (негативний полюс до  $p$ -області, а позитивний до  $n$ -області), напруженість зовнішнього електричного поля, що створюється джерелом, збігається за напрямком з напруженістю внутрішнього поля в  $p$ - $n$ -переході (рис. 12.8). Напруженість результуючого поля в переході збільшується, дифузія основних носіїв заряду зменшується, а з подальшим збільшенням прикладеної напруги повністю припиняється. Перехід закривається. Через нього буде проходити лише незначний електричний струм, зумовлений рухом неосновних носіїв заряду, — дрейфовий струм.

Оскільки опір переходу великий, а концентрація неосновних носіїв у напівпровіднику мала, дрейфовий струм за інших рівних умов набагато менший від прямого.

Таке включення  $p$ - $n$ -переходу називають зворотним. Відповідно, подана напруга називається *зворотною напругою*, а невеликий струм, що виникає при цьому, — *зворотним струмом*.

Залежність струму в електронно-дірковому переході від прикладеної до нього напруги графічно зображують за допомогою вольт-амперної характе-

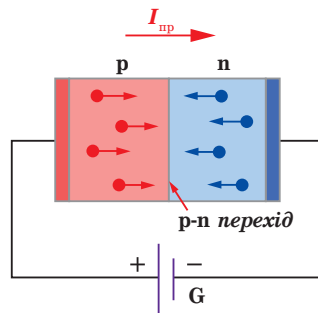


Рис. 12.7. Пряме включення електронно-діркового переходу

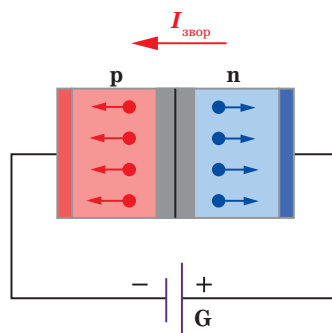


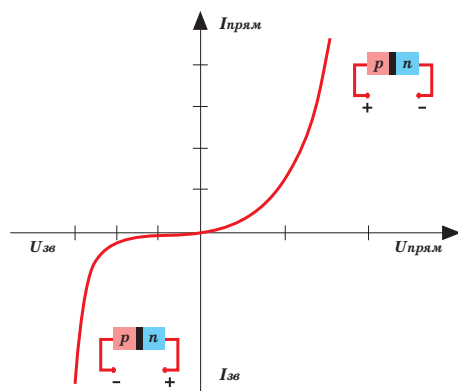
Рис. 12.8. Зворотнє включення електронно-діркового переходу

тики (рис. 12.9). На вольт-амперній характеристиці  $p$ - $n$ -переходу  $U_{\text{прям}}$ ,  $I_{\text{прям}}$  — пряма напруга та прямий струм,  $U_{\text{зв}}$ ,  $I_{\text{зв}}$  — зворотна напруга та зворотний струм.

Отже, важливою особливістю електронно-діркового переходу є властивість пропускати електричний струм в одному напрямі.

**Властивість однобічної провідності електронно-діркового переходу — це здатність пропускати струм в одному напрямі.**

Властивість однобічної провідності електронно-діркового переходу перебуває в основі принципу дії напівпровідникового діода, який використовують для випрямлення змінного електричного струму.



**Рис. 12.9.** Вольт-амперна характеристика електронно-діркового переходу

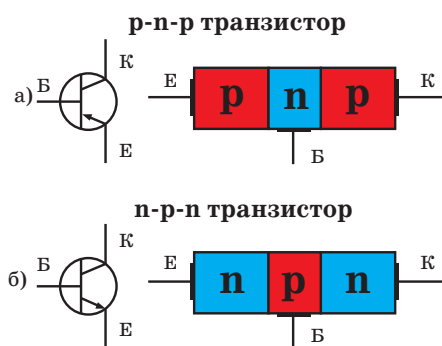
**НАПІВПРОВІДНИКОВА БАЗА СУЧАСНОЇ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ.** Напівпровідникові прилади широко застосовуються в сучасній радіоелектроніці та мікропроцесорній техніці.

Створення сучасних комп'ютерів та різноманітних гаджетів стало можливим завдяки винайденню напівпровідникового транзистора — напівпровідникового елемента з двома електронно-дірковими переходами та трьома електродами, один з яких використовується для управління струмом між двома іншими.

Виводи транзистора називаються *емітером*, базою і *колектором*. Дві крайні області мають електропровідність одного типу, середня — іншого. У кожній області свій контактний вивід. Якщо крайні області з дірковою електропровідністю, а середня з електронною (рис. 12.10, а), то такий

прилад називають транзистором  $p$ - $n$ - $p$ -типу. В  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторах, навпаки, крайні ділянки з електронною електропровідністю, а між ними — область з дірковою електропровідністю (рис. 12.10, б).

Транзистор винайшли в 1947 р. Джон Бардін і Волтер Браттейн під керівництвом Шоклі з Bell Labs (Bell Labs — американська корпорація, великий дослідницький центр у галузі телекомунікацій, електронних та комп'ютерних систем, заснована в 1925 р.), за що отримали Нобелівську премію з фізики. Винахід транзистора став ключовим



**Рис. 12.10.** Схема будови та умовні позначення транзисторів: а)  $p$ - $n$ - $p$ -типу; б)  $n$ - $p$ - $n$ -типу

у розвитку обчислювальної техніки (зокрема комп'ютерів). Завдяки напівпровідниковим діодам та транзисторам вдалось досягти підвищення надійності в роботі обчислювальної техніки і — що найголовніше — зменшення габаритів і маси приладів.

Поява інтегральних схем, або кремнієвих чипів, у 70-ті роки XX ст. ознаменувала ще один великий етап у розвитку обчислювальної техніки, оскільки інтегральна схема здатна замінити тисячі транзисторів (рис. 12.11).

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



**Рис. 12.11.**  
Інтегральна мікросхема

Інтегральна мікросхема виконує певні функції перетворення і має високу щільність пакування електрично з'єднаних між собою елементів і компонентів, які є одним цілим з точки зору її використання як елемента мікроелектроніки.

Розрізняють напівпровідникові, плівкові, гібридні інтегральні схеми, які за видом оброблюваної інформації поділяються на цифрові та аналогові, а за складністю і якістю оцінки — на малі, середні, великі та надвеликі. Надвелика інтегральна схема (НВІС) — інтегральна мікросхема зі ступенем інтеграції понад 1000 елементів у кристалі. Одна така схема містить десятки тисяч транзисторів, які розміщуються на кристалі кремнію, меншому за людський ніготь.

### **! Головне в цьому параграфі**

Носіями електричного заряду в напівпровідниках є електрони й дірки. Провідність чистих (без домішок) напівпровідників називають власною.

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю домішок, називають домішковою. Домішки бувають двох типів: донорні й акцепторні.

Перехід між двома областями напівпровідника з різними типами електропровідності називається електронно-дірковим або *p-n*-переходом. Його основною властивістю є однобічна провідність.

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Як виникають електронна та діркова провідність напівпровідників?
2. Що називають власною провідністю напівпровідників?
3. Чому зменшується питомий опір напівпровідників із підвищенням температури?
4. Яку валентність повинна мати домішка, що додається до германієвого напівпровідника, щоб він мав: а) електронну провідність; б) діркову провідність?
5. Чому незначна кількість домішок *p*- або *n*-типу збільшує його провідність?
6. Назвіть властивості *p-n*-переходу.
7. Наведіть приклади практичного використання напівпровідникових матеріалів.
8. Яким чином можна визначити тип провідності (*n*- чи *p*-) напівпровідникової пластинки з домішкою?

**Домашній експеримент**

Запропонуйте схему досліду з визначення полюсів напівпровідникового діоду. Опишіть етапи та результати експерименту.

**ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ № 2**

Задачі про рух електричних зарядів у провідниках умовно поділяють на такі типи: обчислення опору, сили струму або напруги на будь-якій ділянці кола; визначення роботи, потужності, теплової дії струму; задачі на електроліз.

У процесі розв'язування задач із визначення сили струму, напруги або опору на ділянці кола потрібно: 1) накреслити електричну схему й зобразити на ній джерела струму, резистори й конденсатори; 2) встановити, які елементи кола під'єднано послідовно, які — паралельно; 3) у кожній точці розгалуження записати рівняння струмів і напруги; 4) використовуючи закон Ома, встановити зв'язок між ними; 5) із одержаної системи рівнянь визначити шукану величину.

Розв'язування переважної кількості задач на постійний електричний струм здійснюється на основі застосування закону Ома для повного кола.

Його записують у звичайному вигляді  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$  або у формі  $U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r}$ .

Знаючи напругу на ділянці кола, за законом Ома знаходимо силу струму в ній. Значні ускладнення зазвичай викликають задачі з розрахунку кіл, що містять кілька з'єднаних послідовно або паралельно джерел струму.

Якщо джерела з'єднані послідовно, рекомендуємо такий алгоритм дій:

1) знайти загальну ЕРС контура  $\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i$ , 2) визначити його повний опір; 3) обчислити силу струму за формулою

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_n}{R + (r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n)} \quad \left( I = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i}{R + \sum_{i=1}^n r_i} \right).$$

Якщо джерела з'єднані паралельно, зручно діяти так: 1) зобразити струми, що протікають через елементи кола (іноді їх напрямки можна передбачати заздалегідь, якщо ж ні, то вибрати його довільно); 2) записати рівняння струмів у вузлах і використати формулу  $I_{\text{діл}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{\text{діл}}}{r_{\text{діл}}}$

для кожної із паралельних гілок, що містять ЕРС. Оскільки вони з'єднані між собою паралельно, то напруга на них буде однаковою.

Задачі з визначення роботи, потужності й теплової дії струму поділяють умовно на три групи.

1. У задачах першої групи під час розрахунку параметрів електричного кола до відомих рівнянь закону Ома додають формули обчислення роботи і потужності струму:  $A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$ ;  $P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}$ ;

$$P_0 = I\varepsilon = I^2(R+r) = \frac{\varepsilon^2}{R+r} \text{ — повна потужність джерела;}$$

$$P = I\varepsilon - I^2r = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} \text{ — потужність на зовнішній ділянці кола.}$$

2. До другої групи належать задачі на теплову дію струму, що розв'язуються на основі закону Джоуля — Ленца:  $Q = I^2 R t$ . Якщо ж в отриманому рівнянні виявиться два і більше невідомих, до нього додають формули калориметрії і визначення загального опору кола. Якщо на певній ділянці немає джерела струму, то  $Q = I U t = I^2 R t$ .

3. Третю групу утворюють задачі про перетворення електричної енергії в механічну, внутрішню і хімічну під час виконання роботи електромашинами постійного струму. Розв'язування таких задач здійснюється на основі застосування рівняння закону збереження і перетворення енергії  $I\varepsilon = I^2 R + N_{\text{мех}} + N_x$ .

### Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Визначте загальний опір ділянки кола і струми в кожному резисторі (рис. 1), якщо напруга між точками  $A$  і  $D$  дорівнює 26 В;  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 3$  Ом,  $R_3 = 6$  Ом,  $R_4 = 1$  Ом,  $R_5 = 2$  Ом,  $R_6 = 2$  Ом,  $R_7 = 4$  Ом,  $R_8 = 12$  Ом.

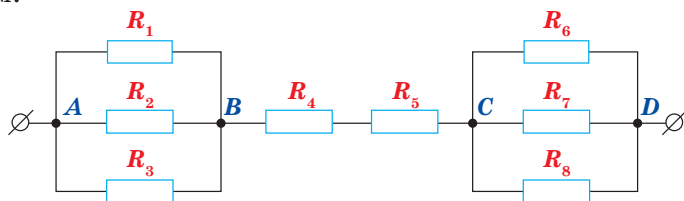


Рис. 1

**Дано:**

$$U = 26 \text{ В;}$$

$$R_1 = R_5 = R_6 = 2 \text{ Ом;}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом;}$$

$$R_3 = 6 \text{ Ом;}$$

$$R_4 = 1 \text{ Ом;}$$

$$R_7 = 4 \text{ Ом;}$$

$$R_8 = 12 \text{ Ом}$$

$$R \text{ — ?}$$

$$I, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7,$$

$$I_8 \text{ — ?}$$

**Розв'язування**

На ділянках  $AB$  і  $CD$  резистори з'єднані паралельно. Опір кожної ділянки відповідно:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad \frac{1}{R_{CD}} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}.$$

Тоді загальний опір кола складатиметься з послідовно з'єднаних ділянок  $AB$ ,  $BC$  і  $CD$ :  $R = R_{AB} + R_{BC} + R_{CD}$ , де  $R_{BC} = R_4 + R_5$ ;  $R_{BC} = 1 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом} = 3 \text{ Ом}$ ;  $R_{AB} = 1 \text{ Ом}$ ;  $R_{CD} = 1,2 \text{ Ом}$ . Після підставлення даних загальний опір кола  $R = 5,2 \text{ Ом}$ .

$$\text{За законом Ома, для ділянки кола знаходимо: } I = \frac{U}{R}; \quad I = \frac{26 \text{ В}}{5,2 \text{ Ом}} = 5 \text{ А.}$$

Такий струм тече через резистори  $R_4$  і  $R_5$ , тобто  $I_4 = I_5 = I = 5 \text{ А}$ .

Спад напруги на ділянці  $AB$ :  $U_{AB} = I R_{AB}$ ;  $U_{AB} = 5 \text{ В}$ , така сама напруга і на кожному з резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , оскільки вони з'єднані паралельно.

$$\text{Тоді } I_1 = \frac{U_{AB}}{R_1}; \quad I_1 = 2,5 \text{ А. Аналогічно знаходимо } I_2 = 1,7 \text{ А, } I_3 = 0,8 \text{ А.}$$

Так само знаходимо розподіл струмів і на ділянці  $CD$ .

Напруга на ділянці  $CD$ :  $U_{CD} = IR_{CD}$ ;  $U_{CD} = 6$  В, тоді  $I_6 = 3$  А,  $I_7 = 1,5$  А,  $I_8 = 0,5$  А.

**Відповідь:**  $R = 5,2$  Ом,  $I_1 = 2,5$  А,  $I_2 = 1,7$  А,  $I_3 = 0,8$  А,  $I_4 = I_5 = I = 5$  А,  $I_6 = 3$  А,  $I_7 = 1,5$  А,  $I_8 = 0,5$  А.

**Задача 2.** Обчисліть загальний опір електричного кола (рис. 2), якщо внутрішній опір джерела струму становить 1 Ом, а опори інших ділянок відповідно дорівнюють 4, 3, 12 і 6 Ом.

**Дано:**

$r = 1$  Ом

$R_1 = 4$  Ом;  $R_2 = 3$  Ом;

$R_3 = 12$  Ом;  $R_4 = 6$  Ом

$R = ?$

**Розв'язування**

На схемі (рис. 2, а) опори  $R_1$  і  $R_3$  з'єднані паралельно, тому її можна накреслити інакше, поєднавши точки А і В (рис. 2, б). Тоді простіше обчислити загальний опір кола. Позначимо  $R'$  опір з'єднання резисторів  $R_1$  та  $R_3$ , тоді

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \text{ знаходимо } R' = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Опори  $R_2$  з'єднані послідовно. Позначимо їх загальний опір  $R''$ . Тоді  $R'' = R' + R_2 = \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3} + R_2$  (1). Об-

числюємо загальний опір  $R'''$  паралельних ділянок з опорами  $R''$  і  $R_4$ :  $\frac{1}{R'''} = \frac{1}{R''} + \frac{1}{R_4}$  або, врахо-

вуючи вираз (1),  $\frac{1}{R'''} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3} + R_2} + \frac{1}{R_4}$ , звідки

$$R''' = \frac{R_4 (R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3)}{R_1 R_4 + R_2 R_4 + R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2} \quad (2).$$

Нарешті, знайдемо загальний опір повного кола:

$R = r + R'''$  або, враховуючи вираз (2), одержимо:

$$R = r + \frac{R_4 (R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3)}{R_1 R_4 + R_2 R_4 + R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2}; R = 1 + \frac{6(4 \cdot 12 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 12)}{4 \cdot 6 + 12 \cdot 6 + 4 \cdot 12 + 4 \cdot 3 + 3 \cdot 12} = 4 \text{ (Ом)}.$$

**Відповідь:** 4 Ом

**Задача 3.** 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? Визначте потужність, яку споживає кожна лампа, та кількість теплоти, що виділиться за 30 хв роботи кожної лампи.



**Дано:**

$U = 220 \text{ В};$

$U_{1н} = U_{2н} = 110 \text{ В}$

$n = 2;$

$P_{1н} = 60 \text{ Вт};$

$P_{2н} = 250 \text{ Вт};$

$t = 1800 \text{ с}$

$U_1 - ? \quad U_2 - ?$

$P_1 - ? \quad P_2 - ?$

$Q_1 - ? \quad Q_2 - ?$

**Розв'язування**

Напруга на кожній із послідовно з'єднаних ламп прямо пропорційна їх опорам. Саме тому спочатку роз-

рахуємо опір кожної лампи:  $R_1 = \frac{U_1^2}{P_{1н}}, \quad R_2 = \frac{U_{1н}^2}{P_2},$

$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ . Оскільки  $U_1 + U_2 = U$ , то  $\frac{U_1}{U - U_1} = \frac{R_1}{R_2}$ . За за-

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

$$\frac{U_1}{220 \text{ В} - U_1} \approx \frac{200 \text{ Ом}}{48 \text{ Ом}}, \quad U_1 \approx 177 \text{ В}, \quad U_2 = 43 \text{ В}.$$

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

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

$$P_1 = IU_1; \quad P_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \approx 159 \text{ Вт}, \quad P_2 = IU_2; \quad P_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} = 39 \text{ Вт},$$

$$Q_1 = IU_1 t; \quad Q_1 = 0,9 \text{ А} \cdot 177 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 290 \text{ кДж}, \quad Q_2 = IU_2 t;$$

$$Q_2 = 0,9 \text{ А} \cdot 43 \text{ В} \cdot 1800 \text{ с} \approx 70 \text{ кДж}.$$

**Відповідь:**  $U_1 \approx 177 \text{ В}, \quad U_2 = 43 \text{ В}; \quad P_1 \approx 159 \text{ Вт}, \quad P_2 = 39 \text{ Вт}, \quad Q_1 \approx 290 \text{ кДж}, \quad Q_2 \approx 70 \text{ кДж}.$

**Задача 4.** Визначте ЕРС і внутрішній опір акумулятора, якщо він продукує в зовнішнє коло потужність 9,5 Вт за сили струму 5 А і 14,4 Вт — за сили 8 А.

**Дано:**

$I_1 = 5 \text{ А}; \quad I_2 = 8 \text{ А}$

$P_1 = 9,5 \text{ Вт}; \quad P_2 = 14,4 \text{ Вт}$

$\mathcal{E} - ?; \quad r - ?$

**Розв'язування**

За законом Ома для замкнутого кола

$$\text{маємо } I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r} \quad (1).$$

Опори  $R_1$  і  $R_2$  знаходимо із співвідношень  $P_1 = I_1^2 R_1$  і  $P_2 = I_2^2 R_2$  звідки маємо  $R_1 = \frac{P_1}{I_1^2}$  і  $R_2 = \frac{P_2}{I_2^2}$  (2). Підставляючи вираз (1) у формулу (2), отри-

маємо  $I_1 = \frac{\mathcal{E}}{\frac{P_1}{I_1^2} + r}$ ,  $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{\frac{P_2}{I_2^2} + r}$  (3). Розв'язуючи систему рівнянь (3), зна-

ходимо  $\mathcal{E} = \frac{P_1 I_2^2 - P_2 I_1^2}{I_1 I_2 (I_2 - I_1)}$ ;  $r = \frac{P_1 I_2 - P_2 I_1}{I_1 I_2 (I_2 - I_1)}$ . Тоді

$$\mathcal{E} = \frac{9,5 \text{ Вт} \cdot 8^2 \text{ А}^2 - 14,4 \text{ Вт} \cdot 5^2 \text{ А}^2}{5 \text{ А} \cdot 8 \text{ А} (8 \text{ А} - 5 \text{ А})} \approx 2,1 \text{ В};$$

$$r = \frac{9,5 \text{ Вт} \cdot 8 \text{ А} - 14,4 \text{ Вт} \cdot 5 \text{ А}}{5 \text{ А} \cdot 8 \text{ А} (8 \text{ А} - 5 \text{ А})} \approx 0,03 \text{ Ом}.$$

**Відповідь:**  $\mathcal{E} \approx 2,1 \text{ В}$ ;  $r \approx 0,03 \text{ Ом}$ .

**Задача 5.** Повітря, що міститься в закритій посудині ємкістю 1 л за нормальних умов, підігрівається електричним нагрівачем, розрахованим на струм 0,2 А і напругу 10 В. Через який час тиск у посудині підвищиться до 1 МПа? ККД нагрівача становить 50 %.

**Дано:**

$$V = 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$I = 0,2 \text{ А}$$

$$U = 10 \text{ В};$$

$$\eta = 50 \%$$

$$p_2 = 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 0^\circ$$

$$t = ?$$

**Розв'язування**

Кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму за час  $t$ , знаходимо із закону Джоуля — Ленца:  $Q_1 = I^2 R t = I U t$  (1). Для нагрівання повітря від температури  $T_1 = 273 \text{ К}$  до  $T_2$ , потрібно витратити кількість теплоти  $Q_2 = c m (T_2 - T_1)$  (2), де  $c$  — питома теплоємність повітря,  $m$  — його маса.

За умовою задачі:  $Q_2 = 0,5 Q_1$  або з урахуванням виразів (1) і (2) отримаємо  $c m (T_2 - T_1) = 0,5 I U t$ , звідки маємо  $t = \frac{c m (T_2 - T_1)}{0,5 I U}$  (3), де  $m = \rho V$  ( $\rho$  — густина повітря).

Оскільки об'єм  $V$ , який займає газ, під час нагрівання не змінюється, то, застосовуючи закон Шарля  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ , знаходимо кінцеву температуру

газу:  $T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1}$ . Підставивши вирази  $m$  і  $T_2$  у формулу (3), отримаємо

$$t = \frac{c_p V \left( \frac{T_1 p_2}{p_1} - T_1 \right)}{0,5 I U} = \frac{c_p V T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}{0,5 I U};$$

$$t = \frac{1,005 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1,29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 273 \text{ К} \left( \frac{10^6 \text{ Па}}{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}} - 1 \right)}{0,5 \cdot 0,2 \text{ А} \cdot 10 \text{ В}} \approx 3,18 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

**Відповідь:**  $t \approx 3,18 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

**Задача 6.** У розчині мідного купоросу анодом слугує пластина із міді, що містить 12 % домішок. Під час електролізу мідь розчиняється і в чистому вигляді виділяється на катоді. Обчислити вартість очищення 1 кг такої міді, якщо напруга на ванні підтримується рівною 6 В, а вартість 1 кВт·год енергії складає 90 коп.?

Дано:	Розв'язування
$m = 1 \text{ кг}$	Маса чистої міді, що виділяється на катоді, $m = M —$
$U = 6 \text{ В}$	$0,12 \text{ М} = 0,88 \text{ М}$ . За законом Фарадея $m = \frac{AIt}{Fn} = \frac{Aq}{Fn}$ , звід-
$x — ?$	ки маємо $q = \frac{mFn}{A} = \frac{0,88MnF}{A}$ (1).

Енергія, що витрачається під час електролізу, рівна  $W = qU$ , або з урахуванням виразу (1)  $W = \frac{0,88MnFU}{A}$ ;

$$W = \frac{0,88MnFU}{A} = \frac{0,88 \cdot 1 \text{ кг} \cdot 2 \cdot 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}} \cdot 6 \text{ В}}{64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^7 \text{ Дж} = \frac{1,6 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{3\,600\,000 \frac{\text{Дж}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}} = 4,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, вартість очищення 1 кг такої міді становить  $x = 405 \text{ коп} = 4,05 \text{ грн}$ .

**Відповідь:**  $x = 4,05 \text{ грн}$ .

### Задачі для самостійного розв'язування

**1(п).** До точки А однорідного дріт'яного кільця під'єднано дріт, а до діаметрально протилежної В — ковзаючий контакт. Укажіть, як змінюватимуться показники вольтметра під час руху контакту (рис. 1)?

**2(п).** Чому під час короткого замикання напруга на затискачах джерела близька до нуля, хоча сила струму в колі максимальна?

**3(п).** Чому нитка електролампи значно нагрівається, а підвідні дроти ні?

**4(с).** Знайдіть загальний опір між точками А і D (рис. 2), якщо кожен з трьох інших дорівнює 1 Ом (опором сполучних дротів знехтувати).

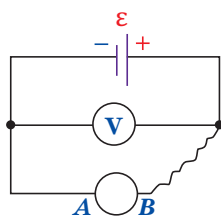


Рис. 1

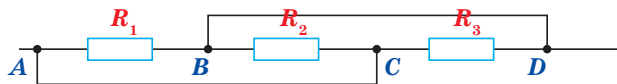


Рис. 2

**5(с).** Обчисліть падіння потенціалу на мідному дроті завдовжки 500 м і діаметром 2 мм, якщо в ньому протікає струм силою 2 А.

**6(с).** Коло опором 100 Ом живиться від джерела постійної напруги. На шкалі під'єданого до нього амперметра із внутрішнім опором

1 Ом відображається сила струму 5 А. Якою вона була до під'єднання амперметра?

- 7(с).** Елемент із ЕРС 2,1 В і внутрішнім опором 0,2 Ом під'єднано до реостату. Визначте силу струму і опір реостата, якщо напруга на затискачах елементу складає 2 В. Якої довжини залізний дріт площею перерізу 0,75 мм<sup>2</sup> потрібен для його виготовлення?
- 8(с).** Гальванічний елемент із ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнуто на зовнішній опір 4 Ом. Знайдіть силу струму в колі, падіння напруги у його внутрішній частині і на затискачах елементу.
- 9(с).** Знайдіть ЕРС і внутрішній опір джерела струму, зашунтованого опором 6 Ом, якщо без шунта ЕРС джерела становить 12 В, а його внутрішній опір — 3 Ом.
- 10(с).** Вольтметром із внутрішнім опором 2500 Ом, під'єднаним до мережі, зафіксовано напругу 125 В. Визначте додатковий опір, після під'єднання якого напруга становить 100 В (рис. 3).
- 11(д).** Внутрішній опір  $r$  елемента в  $k$  разів менший зовнішнього —  $R$ , яким замкнуто елемент із ЕРС  $\mathcal{E}$ . Визначте, у скільки разів напруга  $U$  на затискачах елементу відрізняється від його ЕРС.
- 12(д).** Міліамперметр призначено для вимірювання сили струму не більше 10 мА. Як ним виміряти струм силою 1 А, якщо його внутрішній опір становить 0,9 Ом (рис. 4)?
- 13(д).** Два елементи, ЕРС яких становить 1,9 і 1,1 В, внутрішні опори 0,8 і 0,1 Ом, замкнуті паралельно на зовнішній опір 10 Ом (рис. 5). Визначте силу струму в зовнішньому колі.

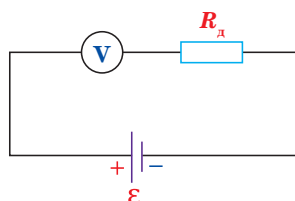


Рис. 3

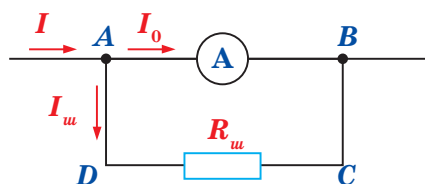


Рис. 4

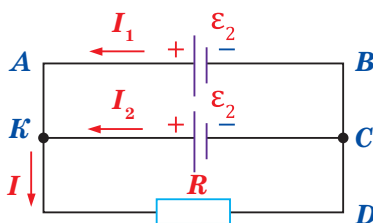


Рис. 5

- 14(д).** Елемент, що має ЕРС 1,1 В і внутрішній опір 1 Ом, замкнуто на зовнішній опір 9 Ом. Визначте струм, падіння потенціалу в зовнішньому колі і всередині елемента. Який його ККД?
- 15(д).** Обчисліть загальний опір ділянки кола, якщо опір кожної сторони і діагоналі квадрата становить 8 Ом. Опором з'єднувальних дрітів знехтувати (рис. 6).
- 16(д).** Вісім провідників опором 20 Ом кожен попарно з'єднано в чотири паралельні ланцюги. Визначте загальний опір кола.
- 17(д).** Мідний і залізний дроти однакової довжини з'єднано паралельно, причому залізний має удвічі більший діаметр. Сила струму в мідному дроті становить 60 мА. Яка сила струму в залізному дроті?

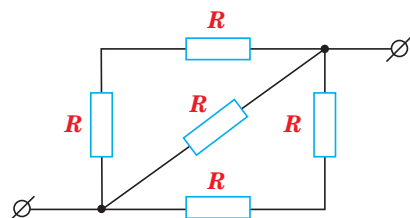


Рис. 6

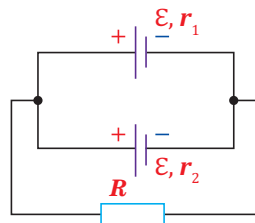


Рис. 7

- 18(д).** Джерелом струму в колі є батарея з ЕРС 30 В. Напруга на її клеммах становить  $U = 18$  В, а сила струму в колі  $I = 3$  А. Визначте зовнішній  $R$  і внутрішній  $r$  опори.
- 19(д).** Елемент, що замикається на зовнішній опір 5 Ом, виробляє в колі силу струму 0,25 А, а на опір 9 Ом — 0,15 А. Яку силу струму вироблятиме елемент, якщо його замкнути накоротко?
- 20(д).** Елементи із ЕРС 1,8 і 2 В і внутрішніми опороми 0,3 і 0,2 Ом з'єднано у батарею так, що в зовнішньому колі з опором 0,2 Ом проходить струм 4 А. Як з'єднано елементи?
- 21(д).** Зовнішній опір кола становить 1,4 Ом, ЕРС кожного джерела дорівнює 2 В, їх внутрішні опори відповідно складають 1 і 1,5 Ом. Знайдіть силу струму в кожному джерелі та зовнішньому колі (рис. 7).
- 22(д).** Визначте силу струму, яку показує амперметр, якщо напруга на затискачах джерела становить 2,1 В, а опори відповідно дорівнюють 5,6 і 3 Ом. Опором амперметра і джерела знехтувати (рис. 8).
- 23(д).** Три провідники, опори яких відповідно дорівнюють 3 Ом, 6 Ом, 8 Ом, з'єднано паралельно. У першому виділяється 21 кДж енергії. Визначте кількість теплоти, що виділяється в другому і третьому провідниках за той же час.
- 24(д).** Два провідники однакового опору  $R$  під'єднано до мережі з напругою  $U$  спочатку паралельно, а потім послідовно. У якому з випадків споживається більша потужність?
- 25(д).** Скільки атомів двовалентного металу виділиться на 1 см<sup>2</sup> поверхні електроду за 5 хв якщо густина струму становить 0,1 А/дм<sup>2</sup>?
- 26(д).** У процесі електролізу розчину азотнокислого срібла впродовж години виділилося 9,4 г срібла. Визначте ЕРС поляризації, якщо напруга на затискачах ванни становить 4,2 В, а опір розчину дорівнює 1,5 Ом.
- 27(д).** Однорідний залізний провідник завдовжки 100 м на 10 с під'єднують до джерела постійної напруги 100 В. Як зміниться його температура? Зміною опору під час нагрівання знехтувати.
- 28(в).** Знайдіть силу струму в опорі  $R_2$  і падіння напруги на ньому, якщо опори ділянок кола дорівнюють:  $R_1 = R_3 = 40$  Ом;  $R_2 = 80$  Ом;  $R_4 = 34$  Ом; ЕРС генератора становить 100 В. Його внутрішнім опором знехтувати (рис. 9).
- 29(в).** Шість елементів з ЕРС 1,5 В і внутрішніми опороми 0,4 Ом кожен з'єднано в батарею так, що в зовнішньому колі з опором 0,2 Ом проходить струм 6 А. Як з'єднано елементи?

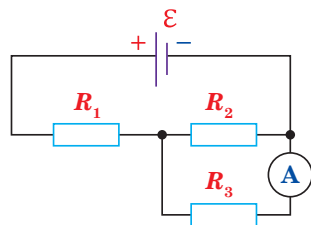


Рис. 8

**30(в).** Батарея складається із паралельно з'єднаних елементів. При силі струму в зовнішньому колі 2 А корисна потужність дорівнює 7 Вт. Визначте кількість елементів у батареї, якщо ЕРС кожного з них становить 5,5 В, а внутрішній опір — 5 Ом.

**31(в).** Батарея складається з п'яти послідовно з'єднаних елементів з ЕРС по 1,5 В і внутрішнім опором по 0,3 Ом. За якої сили струму потужність у зовнішньому колі буде максимальною?

**32(в).** Два провідники опорами 10 і 6 Ом з'єднано послідовно, а потім паралельно між двома точками кола з різницею потенціалів 20 В. Знайдіть кількість теплоти, виділену в кожному провіднику за 1 с.

**33(в).** Під час ремонту електричної плитки спіраль укоротили на 0,1 початкової довжини. У скільки разів змінилася потужність плитки?

**34(в).** На електроплитці потужністю 600 Вт підігрівають каструлю, що вміщує 1 л води і 0,5 кг льоду при 0 °С. Через який час температура води в ній підвищиться до 60 °С, якщо ККД плитки становить 80 %?

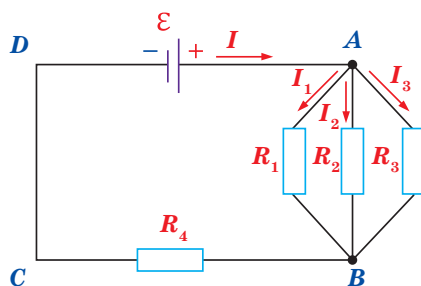


Рис. 9

### ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

**Формуємо ключові компетентності: фінансова грамотність та екологічна безпека.**

Підготуйте навчальний проект на тему «Ефективність та екологічність використання електричної енергії».

Оцініть фінансову ефективність використання різних джерел енергії для нагрівання води для побутових цілей. Порівняйте вартість фіксованого об'єму гарячої води заданої температури, отриманої від централізованої мережі, нагрітої під час спалювання природного газу та електричним бойлером.

Вартість постачання 1 м<sup>3</sup> холодної води становить 10,1 грн, 1 м<sup>3</sup> гарячої води — 74,5 грн (для м. Києва), вартість 1 м<sup>3</sup> природного газу — 8,5 грн, а 1 кВт·год електричної енергії 90 коп. Питома теплота згоряння природного газу 47 МДж/кг. Температура холодної води з крана взимку — близько +5 °С, гарячої — від +50 до +75 °С.

Технічні характеристики електричного приладу для нагрівання води знайдіть в Інтернеті.

Запропонуйте систему заходів щодо енергозбереження під час використання електричної енергії в побуті.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №2

**1(п).** Установіть відповідність між назвами формул, що стосуються законів постійного струму, і власне формулами.

1. Закон Джоуля–Ленца

3. ЕРС

2. Потужність струму

4. Закон Ома для повного кола

А  $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$

Б  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стоп}}}{q}$

В  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$

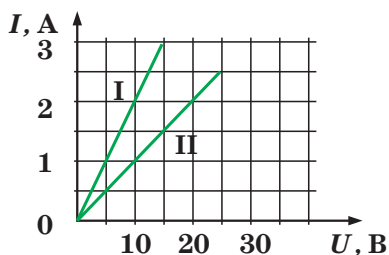
Г  $P = \frac{U^2}{R}$

Д  $Q = \frac{U^2}{R} t$

2(п). Яким розрядом є блискавка?

- А** Іскровий      **Б** Коронний      **В** Тліючий      **Г** Дуговий

3(с). На рисунку зображено графіки залежності сили струму від напруги для двох провідників. Виберіть правильне твердження.



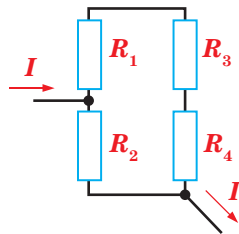
- А.** Опір провідника I більший, ніж II.  
**Б.** Опір провідника I перевищує 6 Ом.  
**В.** Опір провідника II менше 8 Ом.  
**Г.** Якщо провідники виготовлені з одного металу й мають однакову довжину, то площа поперечного перерізу першого — більша.

4(с). Визначте, як зміниться електричний опір дроту, якщо його діаметр зменшиться втричі, а довжина збільшиться втричі.

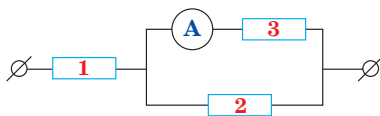
- А** Збільшиться у 27 разів      **Б** Не зміниться  
**В** Збільшиться у 3 рази      **Г** Зменшиться у 3 рази

5(с). Чому дорівнює загальний опір ділянки кола, зображеної на рисунку, якщо  $R_1=60$  Ом;  $R_2=12$  Ом;  $R_3=15$  Ом;  $R_4=3$  Ом?

- А** 90 Ом      **Б** 42 Ом  
**В** 12 Ом      **Г** 10,4 Ом

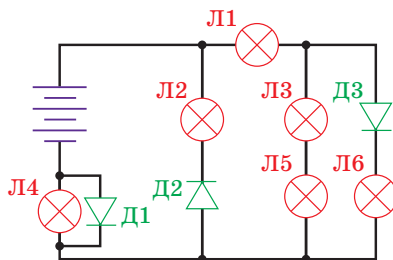


6(с). Знайдіть напругу, подану на ділянку кола (рисунок), якщо показники амперметра становлять 1,2 А, а опір кожного резистора дорівнює 2,0 Ом.



- А** 0,6 В      **Б** 2,4 В      **В** 3,6 В      **Г** 7,2 В

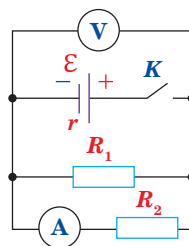
7(с). Лампи в електричному колі (рисунок) однакові. Визначте, в якому з варіантів відповіді їх номери розташовано в порядку зростання яскравості.



- А** 6, 5, 1, 2      **Б** 2, 3, 6, 4      **В** 6, 3, 2, 4      **Г** 3, 6, 1, 2



- 8(д).** На рисунку зображено схему електричного кола. ЕРС джерела струму дорівнює 6 В, внутрішній опір — 0,2 Ом. Визначте, якими є показники амперметра, коли ключ замкнено ( $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом).



**А** 6 А                      **Б** 4,8 А  
**В** 2,4 А                      **Г** 1,2 А

- 9(д).** Коли до джерела живлення під'єднано резистор опором 10 Ом, сила струму в колі становить 1,0 А, а коли — опором 4,5 Ом, то — 2,0 А. Визначте внутрішній опір джерела.

**А** 0,5 Ом      **Б** 1,0 Ом      **В** 5,5 Ом      **Г** 14,5 Ом

- 10(д).** Джерело струму із ЕРС 2 В і внутрішнім опором 0,8 Ом замкнено нікеліновим дротом довжиною 2,1 м і перерізом 0,21 мм<sup>2</sup>. Визначте напругу на його затискачах.

**А** 0,55 В      **Б** 1,85 В      **В** 1,68 В      **Г** 2,85 В

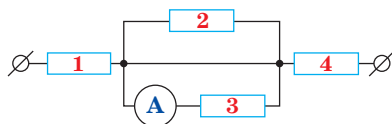
- 11(д).** Визначте кількість теплоти, яку виділяє в провіднику струм силою 5 А за 1,5 хв, якщо напруга на кінцях провідника становить 200 В.

**А** 300 Дж      **Б** 90 кДж      **В** 180 кДж      **Г** 270 кДж

- 12(д).** Елемент із внутрішнім опором 4 Ом й ЕРС 12 В замкнено провідником із опором 8 Ом. Яка кількість теплоти виділяється в зовнішній частині кола за 1 с?

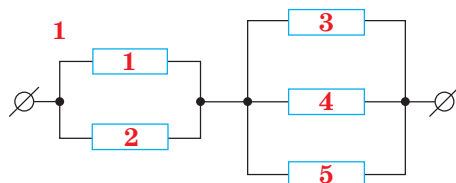
**А** 8 Дж      **Б** 80 Дж      **В** 120 Дж      **Г** 240 Дж

- 13(д).** На рисунку зображено схему ділянки електричного кола. Показники амперметра становлять 2 А. У якому з резисторів за той же час виділиться більша кількість теплоти, якщо  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом,  $R_4 = 4$  Ом?



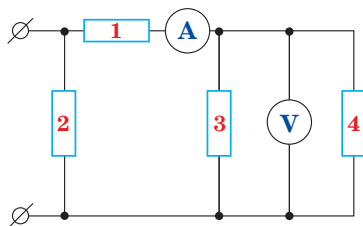
**А** У першому      **Б** У другому      **В** У третьому      **Г** У четвертому

- 14(в).** На рисунку зображено схему ділянки електричного кола. До клем подано напругу 10 В. Яка кількість теплоти виділиться на ній за 5 с, якщо  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом,  $R_4 = 3$  Ом;  $R_5 = 3$  Ом?



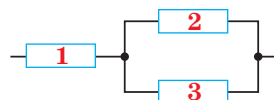
**А** 30 Дж      **Б** 120 Дж      **В** 200 Дж      **Г** 300 Дж

- 15(в).** На рисунку зображено схему ділянки електричного кола. Показники вольметра становлять 4 В. У якому із резисторів виділяється більша потужність, якщо  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2 \text{ Ом}$ ?



**А** У першому      **Б** У другому      **В** У третьому      **Г** У четвертому

- 16(в).** Визначте відношення потужностей струму в резисторах 1 і 2, зображеної на рисунку ділянки кола, якщо  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 3 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 6 \text{ кОм}$ .



- 17(в).** Нікелювання в процесі електролізу металеві пластинки площею  $S = 48 \text{ см}^2$  триває  $t = 4$  год, а сила струму становить  $I = 0,15 \text{ А}$ . Знайдіть товщину шару нікелю. Його валентність  $n = 2$ .
- 18(в).** Визначте масу цинку, одержану внаслідок електролізу розчину, якщо витрачено  $3,6 \cdot 10^6$  Дж енергії, а різниця потенціалів між затискачами ванни становить 2 В ( $k = 0,34 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}}$ )?

### § 13. Магнітне поле струму. Індукція магнітного поля

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати взаємозв'язок електричних та магнітних явищ як прояв єдиної електромагнітної взаємодії, властивості магнітного поля, сутність його силової характеристики, зображати електричне поле струму за допомогою силових ліній.*

**ЕЛЕКТРИЧНА ТА МАГНІТНА ВЗАЄМОДІЯ.** Магнітні явища людина почала використовувати для практичних потреб досить давно (перші компаси були створені кілька тисячоліть тому), проте їхня природа залишалася невідомою. Тривалий час магнітні та електричні взаємодії вважали різними сутностями, не пов'язаними між собою. Лише у XIX ст. було встановлено взаємозв'язок між ними та сформувався уявлення про магнітне поле. У 1820 р. данський вчений Г. Х. Ерстед за допомогою магнітної стрілки виявив магнітне поле провідника зі струмом, уперше експериментально встановивши взаємозв'язок між електричними та магнітними явищами.

Магнітна стрілка є найпростішим індикатором магнітного поля.

У цьому ж році французький фізик А. Ампер спостерігав силову взаємодію двох провідників зі струмами і встановив закон взаємодії струмів. Якщо два гнучкі провідники приєднаємо до джерела струму так, щоб у провідниках виникли струми протилежного напрямку (рис. 13.1, б). Провідники почнуть відштовхуватися один від одного.

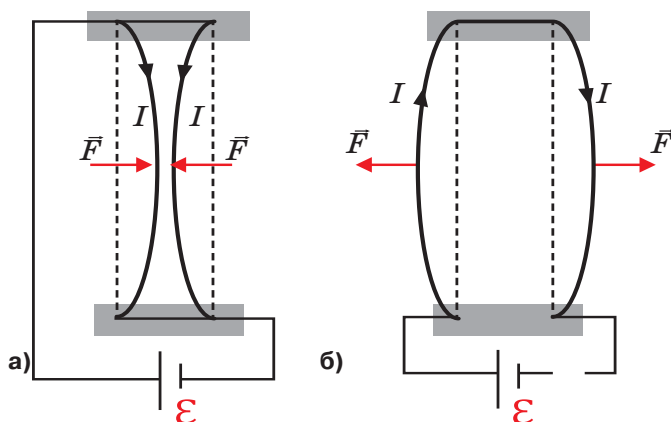


Рис. 13.1. Схема дослідів А. Ампера

Якщо струми одного напрямку, то провідники притягуватимуться (рис. 13.1, а). Оскільки струм в одному з провідників не може безпосередньо діяти на струм в іншому провіднику, їх взаємодія відбувається завдяки магнітному полю. Так само, як навколо нерухомих електричних зарядів, існує електричне поле, навколо струмів існує магнітне поле. Електричний струм в одному з провідників створює магнітне поле, яке діє на струм у другому провіднику, та навпаки.

Таку взаємодію між провідниками зі струмом, тобто взаємодію між рухомими електричними зарядами, називають **магнітною**. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного, називають магнітними силами.

**Магнітне поле існує навколо будь-якого провідника зі струмом, тобто навколо рухомих електричних зарядів. Електричний струм і магнітне поле невідокремлювані один від одного.**

Магнітне поле виникає навколо провідника, коли в ньому проходить електричний струм. Тому струм слід розглядати як джерело магнітного поля.

**Магнітне поле — особливий вид матерії, яка забезпечує взаємодію між рухомими електрично зарядженими частинками.**

**Якщо навколо нерухомих електричних зарядів існує тільки електричне поле, то навколо зарядів, що рухаються (електричного струму) існує одночасно і електричне, і магнітне поле.**

**Отже, магнітне поле є окремим проявом електромагнітного.**

Оскільки джерелами магнітного поля є рухомі електричні заряди (струми), то магнітне поле постійних магнітів також створюється електричними

мікрострумами, які циркулюють всередині молекул речовини (гіпотеза Ампера). Правильність гіпотези Ампера підтверджується сучасними уявленнями про внутрішню електронно-ядерну будову атомів речовини. А з неї випливає важливий висновок: *немагнітних речовин у природі не існує*. Усі речовини тією чи іншою мірою є *магнетиками* (умовна назва речовини, магнітні властивості якої вивчають).

Перспективним напрямом сучасних досліджень з магнетизму є застосування матеріалів з унікальними магнітними властивостями. В Україні дослідження магнітних явищ здійснюються в Інституті магнетизму Національної Академії наук України, створеному в 1995 р. зусиллями відомого вченого в галузі теоретичної фізики, фізики магнітних явищ та твердого тіла, академіка В. Г. Бар'яхтара. Учені цієї потужної науково-дослідної установи розв'язують теоретичні та практичні проблеми магнетизму, створюють нові магнітні матеріали (магнітні носії з надвисокою щільністю запису інформації, матеріали з ефектом магнітної пам'яті), будують достовірні 3D-моделі різних геохімічних і геофізичних процесів (наприклад, розподілу радіоактивного забруднення місцевості), що є важливим інструментом із розроблення системи заходів для ліквідації наслідків таких екологічних катастроф світового масштабу, як аварія на Чорнобильській АЕС.



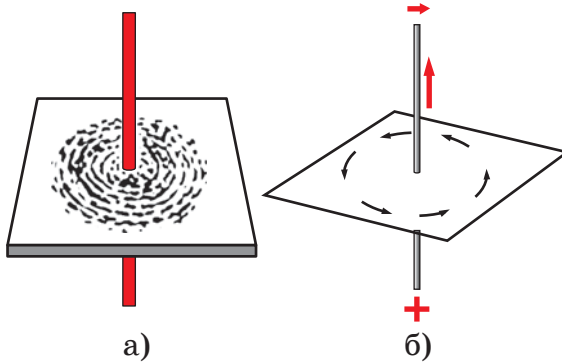
**В. Г. Бар'яхтар**,  
засновник та директор,  
почесний  
директор Інституту  
магнетизму НАН  
України, академік, Герой  
України,  
видатний учений  
у галузі теоретичної фізики,  
фізики твердого тіла та магнітних явищ

**ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТА КОЛОВОГО СТРУМУ.** Силова дія магнітного поля характеризується його *індукцією*. Індукція магнітного поля є векторною величиною і позначається літерою  $\vec{B}$ . Подібною характеристикою електричного поля є напруженість  $\vec{E}$ .

**Індукція магнітного поля  $\vec{B}$  — це фізична величина, яка характеризує силову дію магнітного поля.**

Вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  визначає сили, що діють на струми або рухомі заряди в магнітному полі. За напрямом вектора  $\vec{B}$  приймається напрям від південного  $S$  до північного полюса  $N$  магнітної стрілки, яка може вільно обертатися в магнітному полі. Напрямок вектора індукції магнітного поля струму в кожній точці простору можна визначити за допомогою магнітної стрілки або залізних ошурок. У магнітному полі ошурки намагнічуються, стають маленькими магнітними стрілочками та орієнтуються вздовж його силових ліній.

Якщо навколо прямого провідника зі струмом розташувати залізні ошурки або маленькі магнітні стрілки, то під час протікання електричного струму вони зорієнтуються так, що їх осі будуть напрямлені вздовж силових ліній магнітного поля, тобто концентричними колами (рис. 13.2).

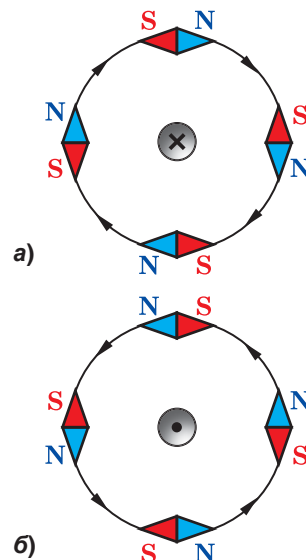


**Рис. 13.2.** Залізні ошурки (а) та магнітні стрілки (б) навколо прямого провідника із струмом

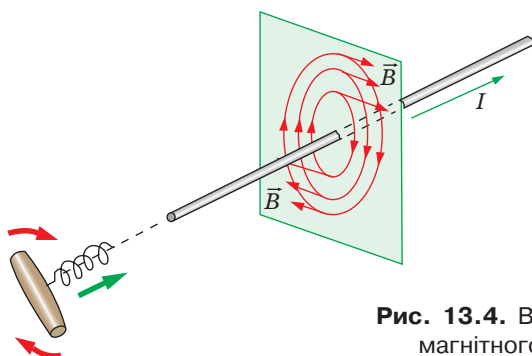
За напрямок силових ліній магнітного поля взято напрямок, який показує північний полюс магнітної стрілки у кожній точці магнітного поля. На рис. 13.3 розташування магнітних стрілок на площині, якщо на неї дивитися зверху: а) струм спрямований від нас, у площину рисунка, що умовно позначено знаком «плюс» у кружечку; б) струм у провіднику спрямований до нас, що умовно позначено кружечком з крапкою всередині.

Отже, напрямок ліній магнітного поля струму пов'язаний з напрямком струму в провіднику. При зміні напрямку електричного струму в провіднику всі магнітні стрілочки повертаються на  $180^\circ$ .

Оскільки за напрям електричного струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок (напрямок від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого), то, знаючи напрям струму в провіднику, можна визначити напрямок силових ліній магнітного поля. Цей напрям збігається з напрямком вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$  у кожній точці магнітного поля. Для визначення напрямку силових ліній магнітного поля користуються т. зв. правилом свердлика (правилом гвинта) (рис. 13.4):



**Рис. 13.3.**  
Магнітні стрілки в магнітному полі прямого провідника зі струмом



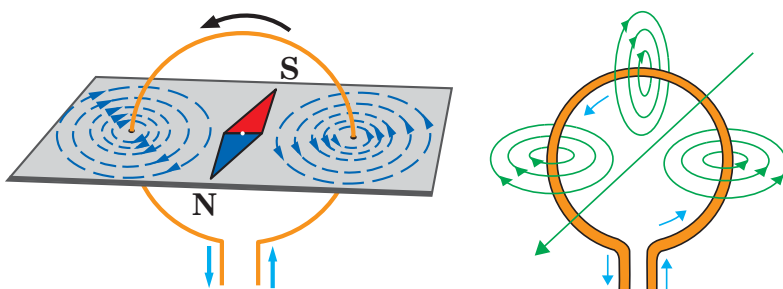
якщо свердлик закручувати в напрямку проходження струму, то напрям обертання його ручки вказує напрямок силових ліній магнітного поля.

**Рис. 13.4.** Визначення напрямку силових ліній магнітного поля за правилом свердлика

Відповідно, знаючи напрямок силових ліній магнітного поля, за правилом свердлика можна визначити напрям електричного струму в провіднику та полярність джерела струму:

якщо ручку свердлика обертати в напрямку силових ліній магнітного поля (напрямку його північного полюса), то напрям поступального руху його вістря вказуватиме напрям струму в провіднику (від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого).

Під час проходження електричного струму в коловому провіднику навколо нього виникає магнітне поле, напрямок силових ліній якого можна визначити, якщо умовно розділити його на невеликі близькі до прямолінійних ділянки та скористатися правилом свердлика (рис. 13.5).



**Рис. 13.5.** Магнітне поле колового струму

Магнітне поле окремого колового провідника зі струмом незначне. Якщо ж на каркас із ізоляційного матеріалу намотати велику кількість витків ізольованого дроту, то отримаємо котушку. При проходженні електричного струму магнітне поле окремих витків взаємно підсилюється і його дія виявляється значно сильніше. Тому котушка зі струмом має значно потужніше магнітне поле. Лінії магнітного поля котушки всередині її витків мають вигляд паралельних прямих, розташованих уздовж осі котушки (рис. 13.6).

Магнітне поле, силові лінії якого максимально наближені до паралельних, отримують за допомогою **соленоїдів** (від грец. *solen* — трубка) — довгих прямих котушок зі струмом. Магнітне поле соленоїда вважають

однорідним. У ньому напрямок магнітних ліній та вектора індукції магнітного поля збігаються.

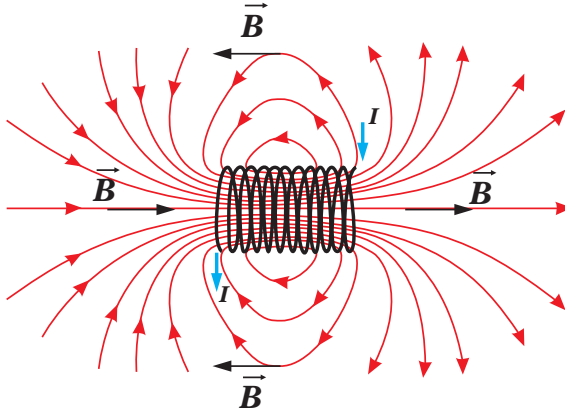


Рис. 13.6. Магнітне поле котушки зі струмом

Лінії магнітного поля котушки зі струмом, так само, як і постійного магніту, є замкнутими кривими. Поза котушкою силові лінії спрямовані від її північного полюса до південного (рис. 13.7).

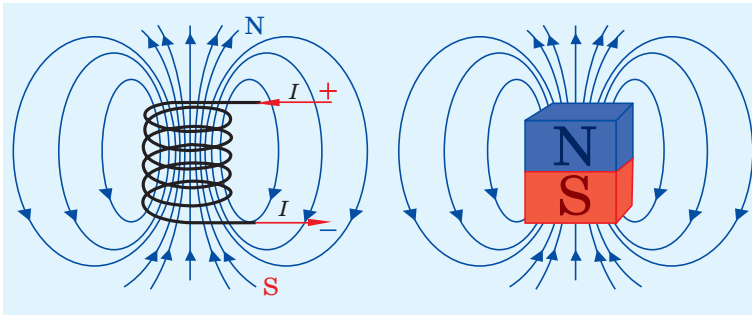


Рис. 13.7. Лінії магнітного поля котушки зі струмом, так само як і постійного магніту, є замкнутими кривими

**Отже, лінії індукції магнітного поля завжди замкнені, вони не мають ні початку, ні кінця.**

Поля із замкненими силовими лініями називають вихровими. Магнітне поле є вихровим, тобто не існує магнітних зарядів, на яких починалися б та закінчувалися лінії магнітної індукції, подібних до електричних зарядів.

У XIX ст. фізики намагалися створити теорію магнітного поля за аналогією з електростатикою, розглядаючи так звані магнітні заряди двох знаків. Проте експерименти показали, що ізольованих магнітних зарядів не існує.

Магнітне поле котушки зі сталим струмом в ній можна значно підсилити, якщо ввести в неї осердя з феромагнетика, наприклад, заліза. Така котушка легко притягує різноманітні залізні предмети.



**Котушку із залізним осердям усередині називають електромагнітом.**

Електромагніти широко використовують у техніці та на виробництві ([http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-13\\_physics11.pdf](http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-13_physics11.pdf)).



### **! Головне в цьому параграфі**

Магнітне поле породжується електричним струмом (рухомими зарядами). Воно виявляється за дією на електричний струм (рухомі заряди). Так само, як і електричне, магнітне поле існує реально, що підтверджується наявністю електромагнітних хвиль. Силовою характеристикою магнітного поля є індукція.

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Які явища називають магнітними? 2. Як пов'язані між собою електричні та магнітні явища? 3. Що називають магнітним полем? 4. Що є джерелом магнітного поля? 5. Як взаємодіють між собою паралельні провідники зі струмами? Чим викликається їх взаємодія? 6. Чи може магнітне поле існувати окремо від електричного? 7. Які основні властивості магнітного поля? 8. Як визначають напрям магнітного поля (ліній магнітної індукції)? 9. У чому полягає основна відмінність магнітного поля від електростатичного?

## **§ 14. Дія магнітного поля на провідник зі струмом.**

### **Рухомі заряджені частинки в магнітному полі**

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснювати сутність силової характеристики магнітного поля, його дію на провідник зі струмом та рухомі заряджені частинки, визначати напрям сили Ампера та сили Лоренца й розв'язувати задачі на застосування формул сили Ампера та сили Лоренца*

### **ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ. СИЛА АМПЕРА.**

Якщо провідник розташувати між полюсами постійного підковоподібного магніту та пропустити через нього електричний струм, він почне рухатися (рис. 14.1, а).

Якщо вимкнути струм, провідник повернеться в початкове положення. Якщо змінити напрям струму в провіднику на протилежний, провідник у магнітному полі підковоподібного магніту буде рухатися у протилежний бік (рис. 14.1, б). Також напрямок руху провідника зміниться на протилежний і в разі зміни напрямку магнітного поля (положення полюсів магніту).

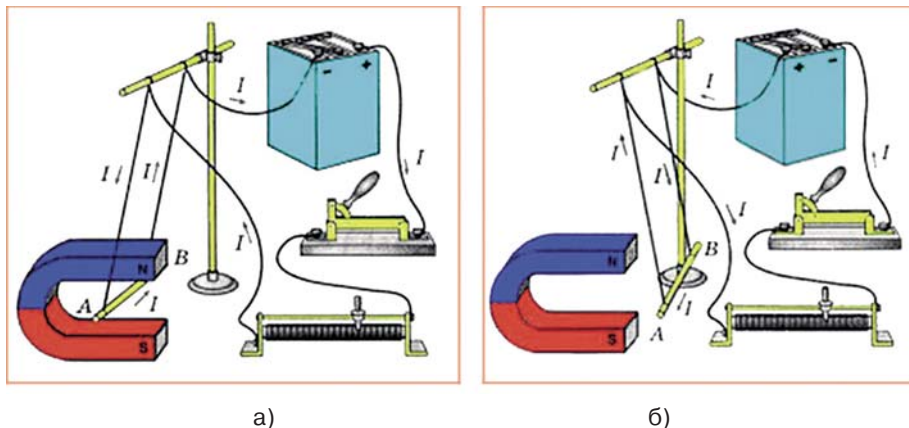


Рис. 14.1. Дія магнітного поля на провідник зі струмом

Отже, на провідник з боку магнітного поля діє механічна сила, яку називають **силою Ампера** та позначають  $\frac{F}{m \cdot g}$  (рис. 14.2, а).

Сила Ампера є сумарним результатом дії магнітного поля на окремі рухомі заряджені частинки, які створюють струм у провіднику. Вона виникає внаслідок взаємодії електронів, які відхиляються під впливом поля постійного магніту, з йонами кристалічної ґратки металу.

Напрямок дії магнітного поля на провідник зі струмом, тобто напрямку сили Ампера, визначається напрямком як струму в провіднику, так і магнітного поля, в якому він розміщений.

Для визначення напрямку сили Ампера можна скористатися так званим правилом лівої руки (рис. 14.2, б):

якщо ліву руку розташувати так, щоб магнітні лінії входили в долоню (долонею до північного полюса постійного магніту), а чотири пальці вказували напрям струму в провіднику, то великий палець, відігнутий на  $90^\circ$ , вкаже напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом із боку магнітного поля (сили Ампера).

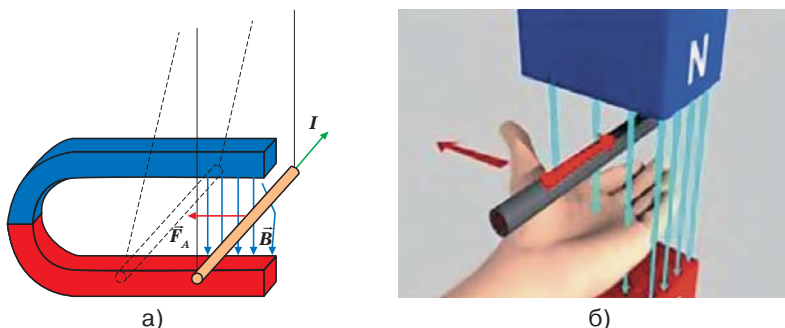


Рис. 14.2. Сила Ампера: а) на провідник зі струмом у магнітному полі діє механічна сила — сила Ампера  $\vec{F}_A$ ; б) визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

Відповідно, знаючи напрямки сили Ампера та ліній магнітного поля, можна визначити напрям струму в провіднику (полюси джерела струму). Або, знаючи напрям струму в провіднику та напрямок сили Ампера, можна легко визначити полюси магнітного поля.

Експериментально було встановлено, що сила Ампера, яка діє на провідник у магнітному полі, тим більша, чим більший струм проходить по провіднику і чим сильніше магнітне поле, в якому він розміщений. Тобто сила Ампера пропорційна силі струму в провіднику  $I$  та індукції магнітного поля  $B$ . Вона також залежить від довжини провідника  $l$  та його розташування в магнітному полі.

Величину сили Ампера, що діє на провідник зі струмом в однорідному магнітному полі ( $\vec{B} = \text{const}$ ), обчислюють за формулою:

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де  $B$  — значення індукції магнітного поля;  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина ділянки провідника, що перебуває в однорідному магнітному полі;  $\alpha$  — кут між напрямом струму  $I$  в провіднику та вектором індукції магнітного поля  $\vec{B}$ .

Максимальне значення сили Ампера  $F_{A\text{max}} = BIl$ , що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, досягається, коли провідник розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля. При цьому кут між напрямом струму  $I$  в провіднику та вектором індукції магнітного поля дорівнює  $\alpha = 90^\circ$ , а  $\sin 90^\circ = 1$ .

Оскільки за величиною індукції магнітного поля оцінюють його силову дію, тобто індукція магнітного поля є його силовою характеристикою, то модуль вектора магнітної індукції в кожній точці магнітного поля визначається силою, що діє на ділянку провідника зі струмом.

Тому за одиницю магнітної індукції в СІ приймають магнітну індукцію поля, в якому на провідник довжиною 1 м зі струмом 1 А діє сила 1 Н. Цю одиницю називають **тесла** (Тл):

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$



Чи є потужним магнітне поле величиною 1 Тл?

### Приклади розв'язування задач на використання формули сили Ампера

**Задача 1.** Визначте модуль сили Ампера, яка діє на провідник зі струмом завдовжки 20 см, розміщений у магнітному полі з індукцією 0,4 Тл перпендикулярно до вектора його магнітної індукції. Сила струму в провіднику дорівнює 0,5 А.

**Дано:**

$$\Delta l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$B = 0,4 \text{ Тл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$I = 0,5 \text{ А}$$

$$F_A = ?$$

**Розв'язування**

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила  $F_A = BIl \sin \alpha$ . Підставимо значення фізичних величин, врахувавши, що  $\sin 90^\circ = 1$ . Тоді маємо

$$F_A = 0,4 \text{ Тл} \cdot 0,2 \text{ А} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 1 = 0,04 \text{ Н}$$

**Відповідь:** модуль сили Ампера дорівнює 0,04 Н.

**Задача 2.** Під яким кутом до силових ліній магнітного поля з індукцією 0,04 Тл розмістили провідник довжиною 25 см, по якому тече електричний струм 0,25 А, якщо на нього діє сила Ампера величиною 1,25 мН.

**Дано:**

$$\Delta l = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$$

$$B = 0,04 \text{ Тл}$$

$$I = 0,25 \text{ А}$$

$$F_A = 1,25 \text{ мН} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$\alpha = ?$$

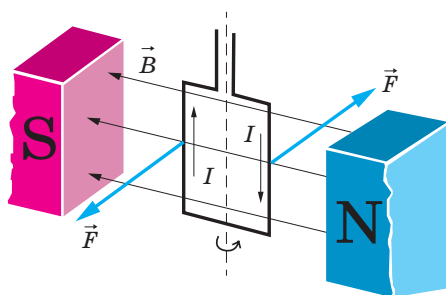
**Розв'язування**

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила  $F_A = B I \Delta l \sin \alpha$ . Виразимо шукану величину:  $\sin \alpha = \frac{F_A}{B I \Delta l}$ ; звідси  $\alpha = \arcsin \frac{F_A}{B I \Delta l}$ .

Підставимо значення фізичних величин:

$$\alpha = \arcsin \frac{1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н}}{0,04 \text{ Тл} \cdot 0,25 \text{ А} \cdot 0,25 \text{ м}} = \arcsin 0,5 = 30^\circ; \alpha = 30^\circ.$$

**Відповідь:** провідник розміщено під кутом  $\alpha = 30^\circ$ .



**Рис. 14.3.** Рамка зі струмом у полі постійного магніту повертається під дією сили Ампера

Якщо у полі постійного магніту розмістити прямокутну рамку зі струмом, то вона буде повертатися під дією сили Ампера (рис. 14.3).

Вертикальні сторони рамки є ділянками прямого провідника зі струмом, і на них діє сила Ампера. Ці провідники мають однакову довжину і по них проходить струм однакової величини у протилежних напрямках. Тому на сторони рамки діють сили, однакові за величиною та протилежні за напрямком. Під дією цих сил рамка зі струмом по-

вертається в магнітному полі. Якщо змінити полярність джерела струму, до якого під'єднана рамка, або поміняти місцями полюси магніту, рамка повертатиметься у протилежному напрямку.

Явище повертання рамки зі струмом у магнітному полі покладене в основу конструкції електричних двигунів постійного струму.

**Електродвигун — пристрій, у якому енергія електричного струму перетворюється в механічну.**



Детальніше...

## ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РУХОМУ ЗАРЯДЖЕНУ ЧАСТИНКУ.

**СИЛА ЛОРЕНЦА.** На відрізок провідника довжиною  $\Delta l$ , по якому протікає струм  $I$ , вміщений у магнітне поле  $B$ , діє сила Ампера  $F_A = I B \Delta l \sin \alpha$ .

На кожен окремий носій заряду, що створює електричний струм, діє сила Лоренца:  $F_{\text{л}} = \frac{F_A}{N}$ , де  $N$  — кількість вільних носіїв заряду в провіднику.

**Силу, яка діє на кожен рухомий заряд з боку магнітного поля, називають силою Лоренца.**

Розглянемо ділянку провідника зі струмом (рис. 14.4).

Нехай його довжина  $\Delta l$  і площа поперечного перерізу  $S$  настільки малі, що індукцію магнітного поля  $\vec{B}$  можна вважати незмінною в межах провідника. Тоді силу струму в провіднику можна записати як  $I = q_0 n \langle v \rangle S$ , де  $q_0$  – заряд елементарної частинки;  $n$  – їх концентрація;  $\langle v \rangle$  – середнє значення швидкості носіїв заряду;  $S$  – площа поперечного перерізу провідника

З урахуванням цього виразу, формула сили Ампера набуває вигляду:

$$F_A = q_0 n S \langle v \rangle \Delta l B \sin \alpha,$$

де  $n S \Delta l = N$  – кількість вільних носіїв заряду.

Підставивши отриманий вираз для сили Ампера у формулу  $F_n = \frac{F_A}{N}$ , отримаємо вираз для сили Лоренца:

$$F_n = \frac{F_A}{N} = \frac{q_0 \cdot v \cdot N \cdot B \sin \alpha}{N} = |q_0| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

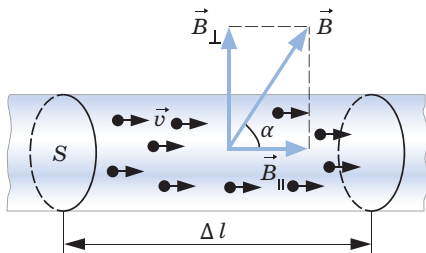
де  $\alpha$  – кут між векторами швидкості вільних носіїв заряду і магнітної індукції.

Напрямок сили Лоренца, як і сили Ампера, визначають за допомогою **правила лівої руки** (рис. 14.5):

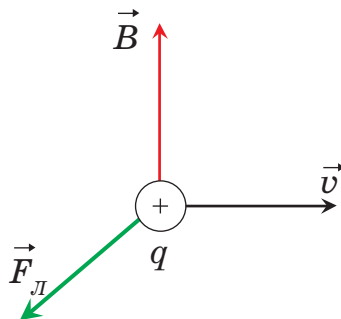
**якщо ліву руку розмістити так, щоб складова магнітної індукції  $\vec{B}$ , перпендикулярна до швидкості заряду, входила в долоню, а чотири пальці були напрямлені за рухом позитивного заряду (проти руху негативного), то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець покаже напрямок сили Лоренца  $F_n$ , що діє на заряд.**

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості частинки, то вона не виконує роботу. Згідно з теоремою про кінетичну енергію це означає, що вона не змінює кінетичної енергії частинки і, отже, модуля її швидкості. Під дією сили Лоренца змінюється лише напрямок швидкості частинки. Отже, сила Лоренца в цьому випадку відіграє роль доцентрової сили.

Якщо частинка влітає перпендикулярно до вектора магнітної індукції, то в магнітному полі вона буде рухатися по колу (рис. 14.6).



**Рис. 14.4.** Рух заряджених частинок у провіднику



**Рис. 14.5.** Визначення напрямку дії сили Лоренца

Формулу для отримання його радіуса можна отримати, врахувавши, що частинка рухається згідно з другим законом Ньютона  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , набуваючи доцентрового прискорення.

Оскільки на заряджену частинку в магнітному полі діє сила Лоренца  $\vec{F}_\perp = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B}$ , а прискорення  $a = \frac{v^2}{R}$ , отримаємо  $q \cdot v \cdot B = \frac{v^2}{R}$ ,

$$\text{звідки } R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}.$$

Період обертання частинки в однорідному магнітному полі обчислюється за формулою:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Якщо частинка влітає під кутом  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ ,

то вона в магнітному полі буде рухатися по спіралі (рис. 14.7).

Траєкторія зарядженої частинки ніби «намотується» на лінії магнітної індукції. Це явище використовують у техніці для магнітної термоізоляції високотемпературної плазми. Речовину в такому стані отримують в установках типу «Токамак» для вивчення керованих термоядерних реакцій, де плазма не повинна стикатися зі стінками камери. Термоізоляція досягається шляхом створення магнітного поля спеціальної конфігурації. Як приклад на рис. 14.8 зображена траєкторія руху зарядженої частинки в магнітній «пляшці» (або пастці).

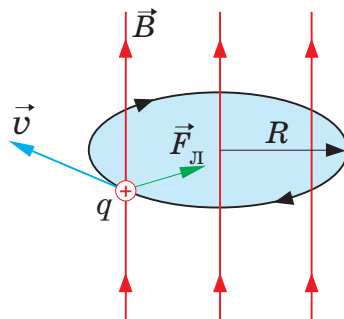


Рис. 14.6. Коловий рух зарядженої частинки в магнітному полі

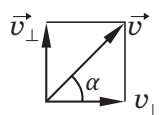
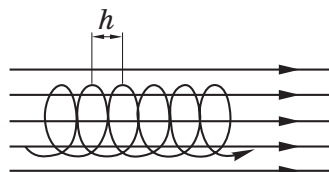


Рис. 14.7. Рух зарядженої частинки в магнітному полі по спіралі

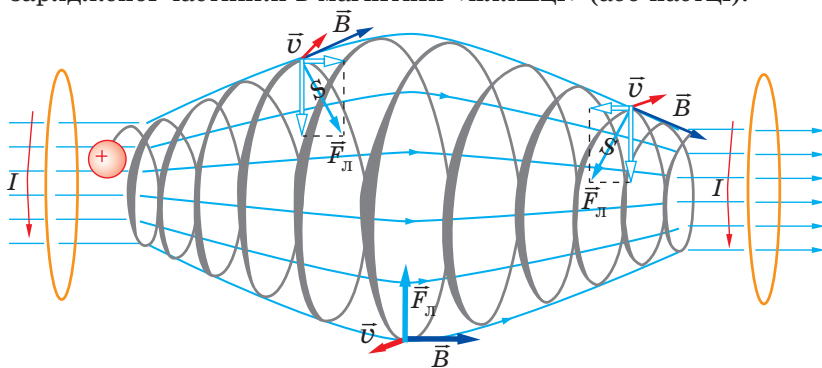


Рис. 14.8. Траєкторія руху частинки в магнітній «пляшці»

Аналогічне явище відбувається в магнітному полі Землі, яке є захищає все живе від потоків заряджених частинок з космічного простору. Швидкі





**Рис. 14.9.** Рух заряджених частинок у радіаційних поясах Землі

північного географічного полюса (на північному заході Гренландії). Природа земного магнетизму дотепер ще не вивчена.

Дію магнітного поля на рухомий заряд також широко використовують у сучасній техніці, зокрема під час вивчення заряджених частинок у мас-спектрографах — приладах, що дають змогу визначати маси частинок за знайденими значеннями їх питомих зарядів.

### *Приклад розв'язування задачі на використання формули сили Лоренца*

**Задача.** Електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією  $6,28 \cdot 10^{-2}$  Тл так, що його швидкість перпендикулярна до ліній магнітного поля. Визначити період обертання електрона.

**Дано:**

$$B = 6,28 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$\alpha = 90^\circ;$$

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$T = ?$

**Розв'язування**

На електрон у магнітному полі діє сила Лоренца, яка дорівнює  $F_n = Bev$ , оскільки  $\sin \alpha = 1$ . Вона перпендикулярна до швидкості зарядженої частинки і в магнітному полі надає їй доцентрового прискорення  $a_n = \frac{v^2}{R}$ , де  $R$  — радіус дуги кола, якою рухається частинка.

Рівняння другого закону Ньютона у векторній формі має вигляд:

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

Проектуючи його на вісь, напрямлену вздовж радіуса до центра, знаходимо:  $Bev = \frac{mv^2}{R}$ ;  $R = \frac{mv}{eB}$ . Період обертання електрона  $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{eB}$  (див. § 28), тобто не залежить від його швидкості. Остаточного маємо:

$$T = \frac{6,28 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 6,28 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}} = 5,7 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

**Відповідь:**  $T = 5,7 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$



### !Головне в цьому параграфі

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера.

Сила Ампера є сумарним результатом дії магнітного поля на окремі рухомі заряджені частинки, які створюють струм у провіднику. Заряджена частинка в магнітному полі рухається під дією сили Лоренца.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Які досліди підтверджують дію магнітного поля на провідник зі струмом? 2. Що називають силою Ампера? 3. Від чого залежить напрямок сили Ампера? 4. Як визначають напрямок сили Ампера? 5. За якою формулою обчислюють величину сили Ампера? 6. Чому рамка зі струмом повертається в зовнішньому магнітному полі? Де на практиці використовують це явище? 7. Яку силу називають силою Лоренца? 8. Як рухається заряджена частинка в однорідному магнітному полі у випадку, коли напрямок її швидкості: а) перпендикулярний до вектора магнітної індукції; б) напрямлений під гострим кутом?

### Вправа до § 14

- 1(с). Порівняйте силу Ампера, що діє на два провідники, виготовлені з одного матеріалу однакового поперечного перерізу, які розміщені в зовнішньому магнітному полі під одним і тим же кутом до напрямку поля, якщо довжина першого становить 12 см, а сила струму в ньому становить 1 А, довжина другого 4 см, а сила струму — 3 А.
- 2(с). Визначте напрямок дії сили Ампера на провідник зі струмом у зовнішньому магнітному полі (рис. 1).
- 3(с). Яка конструктивна особливість забезпечує обертання рамки в магнітному полі?
- 4(с). Як можна змінити напрямок обертання вала електродвигуна?
- 5(д). Прямий провідник довжиною 30 см розміщений у магнітному полі з індукцією 0,4 Тл перпендикулярно до його силових ліній. Знайдіть силу струму в провіднику, якщо магнітне поле діє на нього з силою 24 мН.
- 6(д). Визначте полярність підключення провідника, розміщеного в зовнішньому магнітному полі, що діє на нього, як показано на рис. 2.
- 7(д). Визначте напрямок обертання рамки в магнітному полі, зображеної на рис. 3.

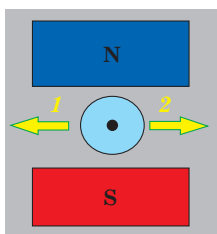


Рис. 1

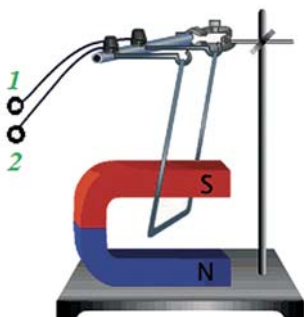


Рис. 2

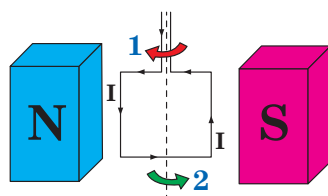


Рис. 3

- 8(д).** Чому у статорах потужних електродвигунів використовують не постійні магніти, а котушки з багатьох витків ізолюваного дроту? Поясніть відповідь.
- 9(в).** Якою має бути сила струму в обмотці якоря електродвигуна для того, щоб на ділянку обмотки із 20 витків довжиною 10 см, розміщену перпендикулярно до вектора індукції в магнітному полі з індукцією 1,5 Тл, діяла сила 120 Н?

## § 15. Закон електромагнітної індукції. Індуктивність.

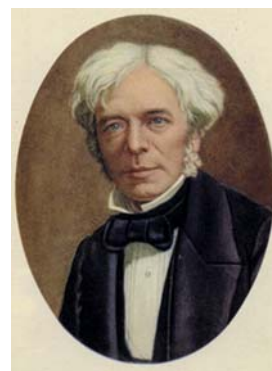
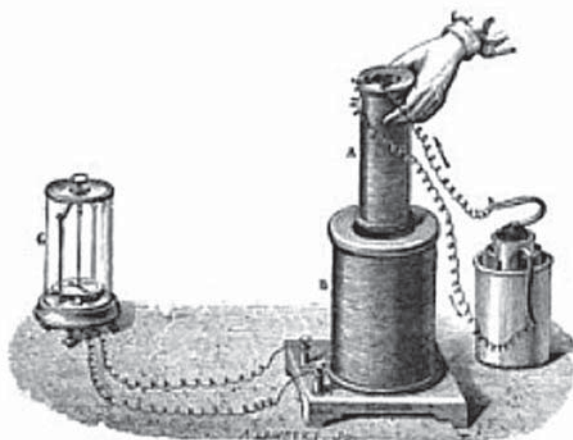
### Енергія магнітного поля

*Опрацювавши параграф, ви зможете пояснювати закон електромагнітної індукції, суть енергетичної характеристики магнітного поля, визначати напрям індукційного струму.*

**ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. МАГНІТНИЙ ПОТІК.** На основі численних фізичних дослідів (рис. 15.1) у 1831 р. М. Фарадей відкрив та описав явище виникнення в провіднику, вміщеному в магнітне поле, індукційного струму:

**електричний струм у замкнутому провіднику виникає за умови зміни магнітного поля, в якому він міститься.**

Виникнення індукційного струму пов'язане зі змінами магнітного поля незалежно від причини цих змін.



**Майкл Фарадей**  
(1791—1867),  
видатний англійський  
учений, один із осно-  
вположників вчення  
про електромагнітне  
поле, який відкрив  
явище електромагнітної  
індукції

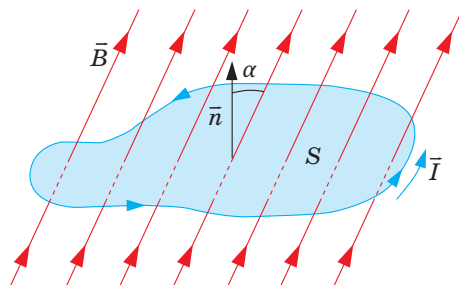
**Рис. 15.1.** Історичний дослід М. Фарадея з експериментального відкриття явища електромагнітної індукції

Виникнення індукційного струму в замкнутому провіднику, вміщеному в магнітне поле, є наслідком явища *електромагнітної індукції*:

**явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електричного струму в замкнутому провіднику, вміщеному в магнітне поле, яке змінюється.**

Поява електричного струму в замкнутому контурі під час зміни магнітного поля, що його пронизує, свідчить про дію в контурі сторонніх сил, або про виникнення ЕРС індукції. Кількісний опис явища електромагнітної індукції виконують на основі встановлення зв'язку між ЕРС індукції і фізичною величиною, яку називають **магнітним потоком**. Ця величина залежить від значень вектора  $\vec{B}$  не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским замкненим контуром.

**Магнітним потоком  $\Phi$  через поверхню з площею  $S$  називають скалярну фізичну величину, що дорівнює добутку модуля вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  на площу поверхні  $S$  та косинус кута між вектором  $\vec{B}$  і вектором нормалі до поверхні  $\vec{n}$  (рис. 15.2):**



$$\Phi = BS \cos \alpha .$$

**Рис. 15.2.** Магнітний потік

Добуток  $B \cos \alpha = B_n$  — проекція вектора магнітної індукції на нормаль до площини контуру, тому  $\Phi = B_n S$ .

Магнітний потік можна представити як величину, пропорційну кількості ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню площею  $S$ .

Одиниця магнітного потоку в СІ — Вебер. Магнітний потік в 1 Вб створюється однорідним магнітним полем з індукцією 1 Тл через площу  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярну до ліній магнітної індукції:  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

**ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА.** Досліди М. Фарадея показали, що сила індукційного струму пропорційна швидкості зміни магнітного потоку  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  через поверхню, обмежену контуром:  $I_i \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

Опір провідника не залежить від швидкості зміни магнітного потоку. Тому ЕРС індукції також пропорційна  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

Це дало можливість сформулювати **закон електромагнітної індукції**:

**ЕРС індукції в замкнутому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром:**

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

Під час проведення дослідів з електромагнітної індукції можна помітити, що стрілка приладу відхиляється чи то в один, чи то в другий бік, що свідчить про різні напрями індукційного струму (рис. 15.3, а, б).

Російський вчений Е. Х. Ленц застосував до явища електромагнітної індукції закон збереження і перетворення енергії та сформулював правило, користуючись яким можна визначити напрям індукційного струму.

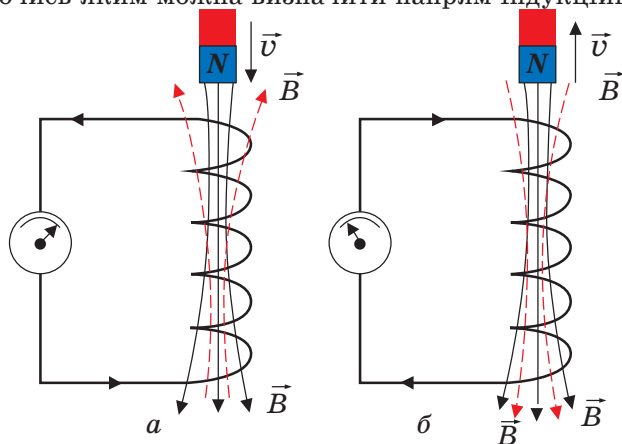


Рис. 15.3. Напрямы індукційного струму

Напрямы індукційного струму визначається за правилом, сформульованим у 1834 р. російським фізиком Е. Х. Ленцом:

**індукційний струм у замкнутому провіднику завжди має такий напрям, що створюваний ним власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.**

Індукційний струм, який виникає в провіднику внаслідок зміни магнітного поля, у свою чергу, породжує власне магнітне поле, яке протидіє зовнішньому. Правило Ленца є проявом закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах. Енергія індукційного струму в провіднику дорівнює тій роботі, яка виконується для подолання протидії магнітного поля індукційного струму.

На практиці напрям індукційного струму в замкнутому провіднику визначають за правилом правої руки (рис. 15.4):

**якщо праву руку розмістити в магнітному полі так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, відставлений великий палець відповідав би напрямку руху провідника, то витягнуті пальці руки вказуватимуть напрям індукційного струму в провіднику.**

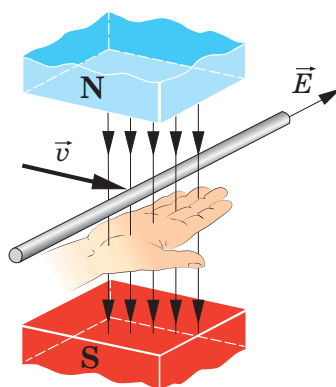
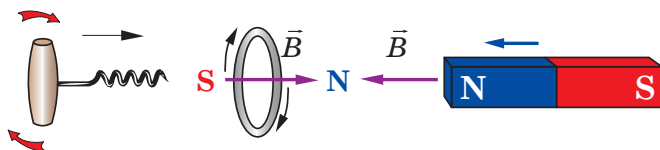


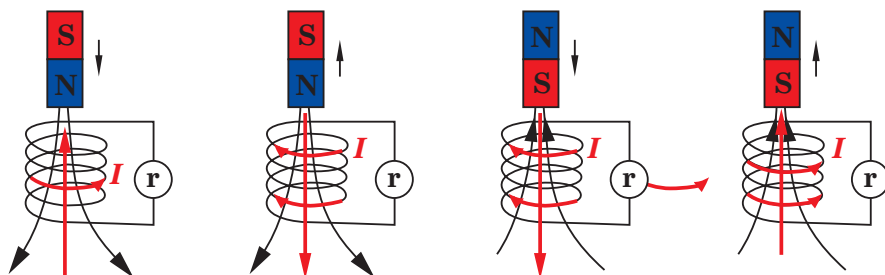
Рис. 15.4. Визначення напрямку індукційного струму за правилом правої руки

Напрямок індукційного струму в коловому витку зручно визначати за правилом свердлика, врахувавши, що власне магнітне поле струму протидіє магнітному полю, яке зумовлює індукційний струм. Наприклад, якщо постійний магніт вводиться в коловий виток (рис. 15.5), то у витку виникає індукційний струм такого напрямку, щоб створене ним магнітне поле протидіяло зовнішньому магнітному полю, тобто полюси електромагніту, яким стає виток зі струмом, та постійного магніту були однойменними.



**Рис. 15.5.** Визначення напрямку індукційного струму в коловому витку за правилом свердлика

На рис. 15.6. показано приклад визначення напрямку індукційного струму в котушці для різних варіантів взаємодії котушки та постійного магніту.

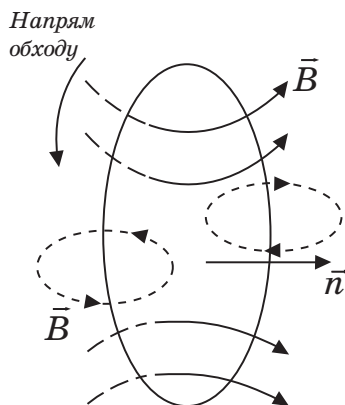


**Рис. 15.6.** Визначення напрямку індукційного струму в котушці для різних варіантів її взаємодії з постійним магнітом

Якщо індукційний струм створюється в котушці не постійним магнітом, а соленоїдом зі струмом, то напрям індукційного струму протилежний напрямку струму джерела.

Застосуємо це правило до закону електромагнітної індукції. На рис. 15.7 зображено замкнений контур. Додатним вважатимемо напрям обходу контуру проти руху годинникової стрілки. Нормаль до контуру  $\vec{n}$  утворює правий гвинт з напрямом обходу. Нехай магнітна індукція  $\vec{B}$  напрямлена вздовж нормалі до контуру і з часом зростає. Тоді

$$\Phi > 0 \text{ і } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0.$$



**Рис. 15.7.** Замкнутий контур

Згідно з правилом Ленца індукційний струм створює магнітний потік  $\Phi' < 0$ . Силкові лінії магнітного поля індукційного струму зображено на рис. 15.7 пунктиром. Отже, цей струм  $I_i$  згідно з правилом свердлика напрямлений за рухом годинникової стрілки (проти напрямку додатного обходу), і ЕРС індукції від'ємна. Тому в рівнянні електромагнітної індукції має стояти знак мінус, який вказує, що  $\mathcal{E}_i$  і  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  мають різні знаки:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Якщо в з'єднаних послідовно контурах відбуваються однакові зміни магнітного потоку, то ЕРС індукції в них дорівнює сумі ЕРС індукції в кожному з контурів. Тому, якщо змінюється магнітний потік у котушці, що складається із  $N$  однакових витків провідника, загальна ЕРС індукції буде в  $N$  разів більшою від ЕРС індукції в окремому контурі:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Під час будь-якої зміни магнітного поля в навколишньому просторі виникає електричне поле. Це поле приводить у рух вільні електричні заряди в контурі, викликаючи появу індукційного електричного струму. Його називають *вихровим електричним полем*.

Робота сил вихрового електричного поля з переміщення електричних зарядів і є роботою сторонніх сил, джерелом ЕРС індукції в замкненому контурі.

Особливо великі індукційні струми виникають у масивних провідниках через їх малий опір. Ці струми названо *струмами Фуко* на честь французького фізика, який їх досліджував. Вихрові струми здебільшого шкідливі, і тому, щоб зменшити їх вплив, вживають спеціальних заходів. Наприклад, у трансформаторах, електродвигунах суцільні деталі із заліза заміняють на виготовлені з окремих тонких, ізольованих пластинок або дротин. Це збільшує опір для проходження вихрових струмів і зменшує нагрівання.

Нагрівання металів аж до їх плавлення у вакуумі використовують в індукційних печах, коли інші способи малоприматні.

**САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ.** Окремим важливим випадком електромагнітної індукції є явище *самоіндукції*, коли змінний магнітний потік, що викликає ЕРС індукції, створюється струмом у самому контурі.

Якщо струм у розглянутому контурі з якихось причин змінюється, то змінюється і магнітне поле цього струму, а отже, і власний магнітний потік, що пронизує контур. У контурі виникає ЕРС самоіндукції, яка згідно з правилом Ленца перешкоджає зміні струму в контурі.

Під час самоіндукції провідний контур відіграє подвійну роль: по ньому проходить струм, що викликає індукцію, і в ньому ж з'являється ЕРС індукції  $\mathcal{E}_i$ .

Згідно з правилом Ленца в мить збільшення сили струму напруженість електричного вихрового поля напрямлена проти струму. Отже, в цей мо-

мент самоіндукція перешкоджає наростанню струму. Навпаки, у мить зменшення струму самоіндукція його підтримує.

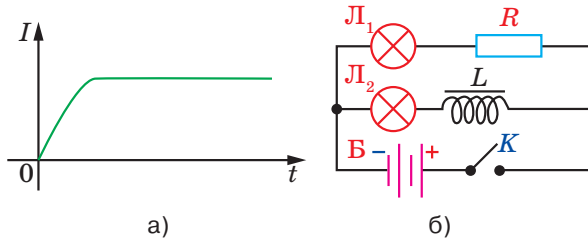


Рис. 15.8. До пояснення явища самоіндукції

Це зумовлює те, що під час замикання кола зі сталою ЕРС певне значення струму встановлюється не одразу, а поступово, з часом (рис. 15.8, а). Під час вимикання джерела струм у замкненому контурі значення струму не зникає миттєво. При цьому ЕРС самоіндукції може перевищувати ЕРС джерела, оскільки зміна струму  $i$ , отже, його магнітного поля під час вимкнення джерела відбувається дуже швидко. Цим міркуванням можна знайти експериментальне підтвердження. Нехай дві однакові лампочки  $L_1$  і  $L_2$  з'єднані паралельно через резистор  $R$  і котушку індуктивності  $L$  у колі з джерелом постійного струму  $B$  і перемикачем  $K$  (рис. 15.8, б).

Під час замикання кола ключем  $K$  лампочка  $L_1$  загоряється миттєво, а лампочка  $L_2$  загоряється із запізненням. Це пояснюється тим, що сила струму на ділянці кола з котушкою через явище самоіндукції встановлюється не одразу, а поступово.

Під час розмикання кола ключем  $K$  спалахнуть обидві лампочки. У цьому випадку струм у колі підтримується ЕРС самоіндукції, що виникає під час зменшення магнітного потоку в котушці.

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» контуру відносно змін сили струму в ньому (аналогічно масі тіла в механіці) в електродинаміці є **індуктивність** або коефіцієнт самоіндукції контуру  $L$ . Це коефіцієнт пропорційності між струмом у провідному контурі і створеним ним магнітним потоком, що пронизує цей контур:

$$\Phi = LI.$$

Використовуючи закон електромагнітної індукції і цей вираз за умови, що форма контуру залишається незмінною, дістаємо рівність:

$$\mathcal{E}_{ci} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

З формули випливає, що індуктивність — це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі внаслідок зміни струму на 1 А за 1 с.



Індуктивність, як і електроємність, залежить від геометричних чинників: від розмірів провідника та його форми, але не залежить безпосередньо від сили струму в провіднику. Крім того, індуктивність залежить від магнітних властивостей середовища, в якому перебуває провідник. Наприклад, індуктивність соленоїда (довгої котушки, обкрученої дротом із міді):

$$L = \mu \mu_0 n^2 V,$$

де  $\mu_0$  — магнітна стала;  $n$  — кількість витків на одиницю довжини ( $n = \frac{N}{l}$ );  $V = Sl$  — об'єм соленоїда.

Одиниця індуктивності в СІ — генрі (Гн). Індуктивність провідника дорівнює 1 Гн, якщо в ньому із зміною сили струму на 1 А за 1 с виникає ЕРС самоіндукції 1 В:

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

Явище самоіндукції відіграє дуже важливу роль в електротехніці й радіотехніці. Індуктивність кола істотно впливає на проходження в ньому змінного електричного струму.

**ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.** Повернемося до досліду (рис. 15.8). Під час розмикання кола лампа розжарення  $L_1$ , ввімкнена паралельно котушці, дає короткочасний спалах. Струм у колі виникає під дією ЕРС самоіндукції. Джерелом енергії, що виділяється при цьому в електричному колі, є магнітне поле котушки.

Енергію магнітного поля котушки індуктивності знайдемо, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується з часом лінійно. У цьому разі ЕРС самоіндукції має постійне значення, що дорівнює

$$\mathcal{E}_{\text{ci}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

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:

$$q = I_{\text{ср}} t = \frac{I}{2} t.$$

Робота електричного струму при цьому:

$$A = q \mathcal{E}_{\text{ci}} = \frac{I t}{2} \cdot \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}.$$

Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності.

Енергія  $W_{\text{м}}$  магнітного поля котушки індуктивності дорівнює половині добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній:

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$

Як і у випадку з конденсатором, ця енергія міститься безпосередньо в об'ємі магнітного поля, а густина енергії  $\omega_{\text{м}} = \frac{W_{\text{м}}}{V}$  за розрахунками:

$$\omega_m = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

де  $\mu_0$  — магнітна стала, значення якої в СІ дорівнює  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ . Цей вираз справедливий не тільки для однорідного поля, а й для довільних змінних магнітних полів.

### Приклад розв'язування задачі

**Задача.** Котушку індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму з ЕРС, яка дорівнює 15 В. Визначте час, через який струм у котушці досягне значення 50 А. Опором котушки та внутрішнім опором джерела струму знехтувати.

**Дано:**

$$L = 3 \text{ Гн}$$

$$\mathcal{E}_1 = 15 \text{ В}$$

$$I = 50 \text{ А}$$

$$t = ?$$

**Розв'язування**

За законом Ома  $\mathcal{E} = I(R + r)$ , де  $\mathcal{E}$  — повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі  $\mathcal{E}_1$  (ЕРС джерела) і  $\mathcal{E}_2$  (ЕРС самоіндукції), яка виникає після під'єднання котушки до джерела:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ , ЕРС самоіндукції визначаємо за формулою:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Тоді  $\mathcal{E}_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r)$ . За умовою задачі опори  $R$  і  $r$  дуже малі, тому

$$\mathcal{E}_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0. \text{ Звідки можна знайти швидкість зміни струму: } \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_1}{L}.$$

$$\text{Отже, маємо } \Delta t = \frac{L \Delta I}{\mathcal{E}_1}. \quad \Delta t = \frac{3 \text{ Гн} \cdot 50 \text{ А}}{15 \text{ В}} = 10 \text{ с}.$$

**Відповідь:**  $t = 10 \text{ с}$ .

### !Головне в цьому параграфі

Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електричного струму в замкнутому провіднику, вміщеному в магнітне поле, яке змінюється.

У замкнутому контурі ЕРС індукції дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром.

Індукційний струм у замкнутому провіднику має такий напрям, що створюване ним магнітне поле протидіє зміні магнітного поля, що зумовила цей струм.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. У чому полягає сутність явища електромагнітної індукції та яке його значення для встановлення взаємозв'язку між електричними й магнітними явищами? 2. Що називають магнітним потоком? 3. Що називають ЕРС індукції? 4. Як формулюється закон електромагнітної індукції? 5. Яка формула виражає закон електромагнітної індукції? 6. Що називають явищем самоіндукції? 7. Що називають індуктивністю провідника? Який фізичний зміст індуктивності? 8. За якою формулою визначається енергія магнітного поля провідника зі струмом?

## ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ № 3

Задачі з електромагнетизму курсу фізики 11-го класу умовно поділяють на: 1) силову дію однорідного магнітного поля на провідники із струмом і заряджені частинки; застосування законів; 2) електромагнітної індукції; 3) збереження і перетворення енергії під час роботи електричних машин.

Задачі про сили, що діють на провідники зі струмом в однорідному магнітному полі, розв'язують за таким орієнтовним алгоритмом: 1) накреслити схематичний рисунок, на якому вказати контур зі струмом і напрямком ліній магнітної індукції та позначити кути між напрямком вектору індукції і окремими елементами контуру; 2) використовуючи правило лівої руки, визначити напрямки сил, що діють на кожен з них; 3) записати рівняння  $F = IlB \sin \alpha$  (1) та визначити шукану величину.

Якщо в задачі розглядається рівновага провідника або контура зі струмом у магнітному полі, то, крім сили Ампера, вказують й інші сили, прикладені до нього, та записують умову його рівноваги  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = 0$  ( $\sum \vec{F} = 0$ ). Потім у формулу (1) підставляють їх вирази. Отримують рівняння, із якого визначаємо шукану величину.

Розв'язування задач про рух заряджених частинок в електричному і магнітному полях здійснюється за допомогою застосування основного рівняння динаміки матеріальної точки і сил електромагнітного поля, що діють на заряджену частинку. Алгоритм розв'язування таких задач подібний до попереднього: 1) накреслити схематичний рисунок, вказавши на ньому лінії індукції магнітного й напруженості електричного полів, вектор початкової швидкості частинки й визначивши знак її заряду; 2) швидкість частинки слід спроектувати на осі, одна з яких має бути спрямована перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ , інша — паралельно йому; 3) зобразити сили, що діють на неї (зазвичай дію сили тяжіння на елементарні частинки не враховують, оскільки вона нескінченно мала порівняно із силами електромагнітного поля). Переважно напрямки сили Лоренца визначають за напрямком струму і користуються лише правилом лівої руки; 4) сили, що діють на заряджену частинку, проєктують на осі, спрямовані уздовж ліній індукції магнітного поля і перпендикулярно їм; 5) складають основне рівняння динаміки матеріальної точки у проєкціях на кожну вісь і визначають сили, використовуючи формули електростатики і магнетизму. Іноді до рівнянь динаміки долучають формули кінематики.

Розв'язуючи задачі на застосування закону електромагнітної індукції, користуються таким алгоритмом: 1) аналізуючи умову задачі, визначають, яка з величин  $B$ ,  $S$  або  $\alpha$  змінюється з часом. Потім записують співвідношення  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  або  $\mathcal{E} = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ . Якщо в задачі розглядається поступальний рух провідника, то ЕРС індукції визначають за формулою  $\mathcal{E} = lvB \sin \alpha$ ; 2) у довільні моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  визначають магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , що пронизують контур. Зміна магнітного потоку за час  $\Delta t$  залежно від умови задачі дорівнюватиме  $\Delta \Phi = B \Delta S \cos \alpha$ , де  $\Delta S$  — зміна площі контуру, описаного в просторі рухомим провідником; 3) підставляють вираз  $\Delta \Phi$  у початкову формулу закону електромагнітної індукції і,

записавши додаткові умови, розв'язують систему отриманих рівнянь відносно шуканої величини.

Розв'язування задач про роботу електричних машин постійного струму здійснюється через складання рівняння закону збереження і перетворення енергії. У простих задачах його достатньо для знаходження шуканої величини, у складніших до рівняння енергетичного балансу додають допоміжні, наприклад:  $N = P_{\text{ел}}$  або  $N = I\mathcal{E}$ ;  $IU = I^2R + N$  і  $\mathcal{E} = U - IR$ .

### Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Двома довгими прямими провідниками, розташованими на відстані 5 см один від одного, протікають в одному напрямі струми силою 10 А. Визначте індукцію магнітного поля в точці, що знаходиться на відстані 3 см від кожного з них.

**Дано:**

$$l = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$I_1 = I_2 = I = 10 \text{ А}$$

$$r = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$B = ?$$

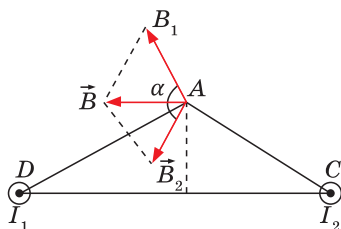


Рис. 1

### Розв'язування

Вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  у точці А дорівнює геометричній сумі індукцій  $\vec{B}_1$  і  $\vec{B}_2$ , що створюються кожним струмом окремо (рис. 1). Напрямки векторів  $\vec{B}_1$  і  $\vec{B}_2$  визначаємо за правилом буравчика. Величина індукції магнітного поля в точці А обчислюється за теоремою косинусів:  $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2\cos\alpha}$  (1). Індукції магнітних полів, що створюються кожним струмом в точці А, відповідно дорівнюють

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_1} \quad \text{і} \quad B_2 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_2}. \quad \text{Оскільки} \quad r_1 = r_2 = r, \quad B_1 = B_2, \quad \text{то}$$

$$B = \sqrt{2B_1^2 + 2B_1^2\cos\alpha} = B_1\sqrt{2+2\cos\alpha} \quad (2). \quad \text{Із } \triangle ADC \text{ за теоремою косинусів знаходимо } l^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\alpha, \text{ звідки маємо } \cos\alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - l^2}{2r_1r_2} = \frac{2r^2 - l^2}{2r^2}.$$

Підставивши вирази  $B_1$  і  $\cos\alpha$  в (2), отримаємо:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} \sqrt{2 + \frac{2(2r^2 - l^2)}{2r^2}} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r^2} \sqrt{4r^2 - l^2};$$

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2} \cdot 10 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 \text{ м}^2} \sqrt{4 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 - (5 \cdot 10^{-2})^2} \text{ м} \approx 66,6 \text{ мкТл}.$$

**Відповідь:**  $B \approx 66,6 \text{ мкТл}$ .

**Задача 2.** Циклотрон призначено для прискорення протонів до енергії 5 МеВ. Визначте найбільший радіус орбіти, якою рухатиметься протон, якщо індукція магнітного поля становить 1 Тл.

**Дано:**

$$W_k = 5 \text{ MeV} = 8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

 $R = ?$ **Розв'язування**

Протон рухається в циклотроні спіральною орбітою, що складається з напівкіл, радіус яких поступово збільшується. На нього діє сила Лоренца  $F = qvB$ .

Запишемо для протона другий закон Ньютона в проекції на вісь  $Y$ , напрямлену до центра кола:  $F = ma_y$  (1), де  $a_y = a = \frac{v^2}{R}$ . Тоді рівняння (1)

можна записати так:  $qvB = \frac{mv^2}{R}$ , звідки маємо  $R = \frac{mv}{qB}$  (2). Перетворивши

вираз (2), отримаємо  $mv = \sqrt{2m} \cdot \sqrt{\frac{mv^2}{2}} = \sqrt{2mW_k}$  (3), де  $W_k$  — кінетична

енергія протона. Підставивши вираз (3) у (2), отримаємо  $R = \frac{\sqrt{2mW_k}}{qB}$ ;

$$R = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ Тл}} = 0,32 \text{ м}.$$

**Відповідь:**  $R = 0,32 \text{ м}$ .

**Задача 3.** Електрон рухається в магнітному полі, індукція якого дорівнює 2 мТл, гвинтовою лінією радіусом 2 см й кроком 5 см. Визначте його швидкість.

**Дано:**

$$R = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$h = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$B = 2 \text{ мТл} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

 $v = ?$ **Розв'язування**

Рух електрона гвинтовою лінією можна представити як складний рух по колу з швидкістю  $v$  під дією сили Лоренца в площині, перпендикулярній індукції магнітного поля, і рівномірний рух уздовж поля із швидкістю  $vx$  (рис. 2). Тоді повна швидкість електрона дорівнює  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  (1). Знайдемо окремо проекції  $vx$  і  $vy$ . Запишемо для електрона другий закон Ньютона в проекціях на вісь  $Y$ :  $F = ma_y$ ,

де  $F = ev_y B$ ,  $a_y = \frac{v_y^2}{R}$ . Тоді  $eBv_y = \frac{mv_y^2}{R}$ , звідки

$$\text{маємо } v_y = \frac{eBR}{m} \quad (2).$$

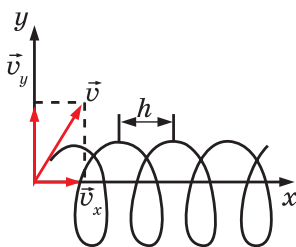


Рис. 2

Швидкість руху  $vx$  знаходимо із співвідношення  $h = v_x T$ , звідки  $v_x = \frac{h}{T}$

(3), де  $T$  — час, упродовж якого електрон переміщується горизонтально на один крок гвинта. Він дорівнює часу, протягом якого електрон долає

довжину кола із швидкістю  $vy$ , тобто  $T = \frac{2\pi R}{v_y}$  або з урахуванням форму-

ли (2) отримаємо  $T = \frac{2\pi Rm}{eBR} = \frac{2\pi m}{eB}$  (4). Використовуючи співвідношення

(3) і (4), отримуємо  $v_x = \frac{h}{T} = \frac{heB}{2\pi m}$  (5). Підставивши вирази (2) і (5) у фор-

мулу (1), знаходимо  $v = \sqrt{\frac{h^2 e^2 B^2}{4\pi^2 m^2} + \frac{e^2 B^2 R^2}{m^2}} = \frac{eB}{2\pi m} \cdot \sqrt{h^2 + 4\pi^2 R^2}$ ;

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \sqrt{(5 \cdot 10^{-2})^2 \text{ м}^2 + 4 \cdot 3,14^2 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2 \text{ м}^2} \approx 7,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Відповідь:**  $v \approx 7,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Задача 4.** В однорідному магнітному полі індукцією  $4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$  перпендикулярно її лініям розташовано круговий виток дроту радіусом 5 см, яким протікає струм силою 1 А. Яку роботу потрібно виконати, щоб повернути його на  $90^\circ$  навколо власного діаметра (рис. 3)?

**Дано:**

$$R = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$I = 1 \text{ А}; \quad \varphi = 90^\circ = \frac{\pi}{2} \text{ рад}$$

$$A_{\text{зовн}} - ?$$

**Розв'язування**

Початковий стан витка із струмом є станом стійкої рівноваги, оскільки обертальний момент у цьому положенні дорівнює нулю. Тому під час повороту витка магнітне поле здійснює від'ємну роботу, а робота зовнішньої сили — додатна.

За означенням, робота магнітного поля під час повороту рамки обчислюється за формулою  $A = I(\Phi_2 - \Phi_1)$  (1), де  $\Phi_1 = BS \cos \alpha_1$  і  $\Phi_2 = BS \cos \alpha_2$  — потік магнітної індукції крізь площину витка в його початковому і кінцевому положеннях;  $S = \pi R^2$  — площа поверхні, обмежена витком із струмом.

Оскільки  $\alpha_1 = 0$  і  $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ , то  $\Phi_1 = B\pi R^2 \cos \alpha_1$ ,

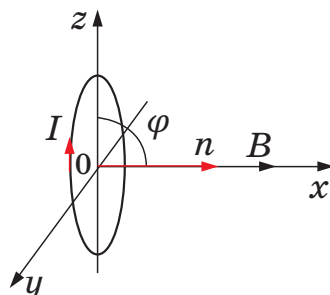
$\Phi_2 = B\pi R^2 \cos \alpha_2$ ,. Тоді вираз (1) матиме вигляд

$A = IB\pi R^2 (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$ . Оскільки  $A_{\text{зовн}} = -A$ , то робота зовнішньої сили,

що повертає виток, рівна  $A_{\text{зовн}} = IB\pi R^2 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$ .

$$A_{\text{зовн}} = 1 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2 (1 - 0) = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

**Відповідь:**  $A_{\text{зовн}} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ .



**Рис. 3**

**Задача 5.** Алюмінієве кільце розташоване в однорідному магнітному полі перпендикулярно вектору його індукції. Діаметр кільця становить 25 см, товщина дроту — 2 мм. Визначте швидкість зміни магнітної індукції поля з часом, якщо в кільці виникає індукційний струм силою 12 А.

**Дано:**

$D = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$

$d = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$I = 12 \text{ А}$

$\frac{\Delta B}{\Delta t} - ?$

**Розв'язування**

За законом Фарадея маємо  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ , де  $\Phi = BS$  — магнітний потік крізь поверхню, обмежену кільцем. Оскільки площа  $S$  поверхні — величина постійна, запишемо  $\Delta \Phi = \Delta(BS) = S \Delta B$  і  $\mathcal{E} = -\frac{S \Delta B}{\Delta t}$  (1), звідки маємо  $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{\mathcal{E}}{S}$ .

Оскільки поверхня, обмежена кільцем, має форму кола, то її площа становить  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  (2). За законом Ома для замкнутого кола  $\mathcal{E} = IR$ , де

$R = \frac{\rho l}{S_{\text{оп}}}$  — опір кільця. Оскільки довжина кільця рівна  $l = \pi D$ , а площа пере-

різу дроту — відповідно  $S_{\text{оп}} = \frac{\pi d^2}{4}$ , то його опір обчислюємо за формулою

$R = \frac{4\rho D}{d^2}$ . Тоді маємо  $\mathcal{E} = \frac{4\rho DI}{d^2}$  (3). Підставляючи вирази (2) і (3) у співвід-

ношення (1), отримуємо  $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{16 \rho}{\pi D d^2}$ ;  $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = \frac{16 \cdot 12 \text{ А} \cdot 0,26 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{3,14 \cdot 0,25 \text{ м} \cdot (2 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2} \approx 1,6 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$ .

**Відповідь:**  $\left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \approx 1,6 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$ .

**Задача 6.** Соленоїд завдовжки 50 см і діаметром 0,8 см має 20 000 витків мідного дроту і перебуває під постійною напругою. Визначити час, впродовж якого в обмотці соленоїда виділиться кількість теплоти, що дорівнює енергії магнітного поля в соленоїді.

**Дано:**

$l = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$

$D = 0,8 \text{ см} = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

$N = 2 \cdot 10^4$

$t - ?$

**Розв'язування**

За законом Джоуля–Ленца, кількість теплоти, що виділяється в обмотці соленоїда під час проходження постійного струму за час  $t$ , дорівнює  $Q = I^2 R t$ ,

де  $R = \frac{\rho l}{S_{\text{оп}}}$  — опір мідного дроту обмотки соленоїда. Довжина дроту, на-

мотаного на соленоїд, дорівнює добутку довжини одного витка на їх кількість:  $l = \pi D N$ . Площа поперечного перерізу дроту дорівнює  $S_{\text{оп}} = \frac{\pi d_{\text{оп}}^2}{4}$ .

Оскільки витки намотані впритул один до одного, то діаметр дроту становить  $d = \frac{l}{N}$ . Тоді  $S_{\text{оп}} = \frac{\pi l^2}{4 N^2}$  і  $R = \frac{4 I^2 \rho D N^3 t}{l^2}$  (1). Енергія магнітного поля

соленоїда  $W = \frac{LI^2}{2}$  (2), де  $L = \mu_0 n^2 l S$  — індуктивність соленоїда. Оскільки кількість витків на одиницю довжини соленоїда і площа його попереч-



ного перерізу відповідно рівні  $n = \frac{N}{l}$  і  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ , то індуктивність солено-

їда становить  $L = \frac{\mu\mu_0\pi D^2 N^2}{4l}$  (3). Враховуючи вираз (3), формула (2) ма-

тиме вигляд:  $W = \frac{\mu\mu_0\pi D^2 N^2 I^2}{8l}$  (4). Прирівнявши за умовою задачі вирази

(1) і (4), отримуємо  $\frac{I^2 4\rho DN^3 t}{l^2} = \frac{\mu\mu_0\pi D^2 N^2 I^2}{8l}$ , звідки маємо:

$$t = \frac{\mu\mu_0\pi D l}{32\rho N}; t = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2} \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м}}{32 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 2 \cdot 10^4} = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

**Відповідь:**  $t = 1,45 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$

### Задачі для самостійного розв'язування

- 1(п). Поясніть, чому два провідники, якими протікають струми в одному напрямі, притягуються (рис. 1).
- 2(п). Як поведуться два провідники із струмами, розташовані перпендикулярно один одному (рис. 2)?
- 3(п). Як напрямлена сила, з якою магнітне поле Землі в Північній півкулі діє на горизонтальний провідник із струмом, якщо він розташований у площині магнітного меридіана, а струм протікає з півночі на південь?
- 4(п). У якому напрямі проходитиме струм через амперметр у момент розмикання ланцюга (рис. 3)?

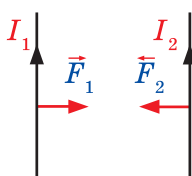


Рис. 1

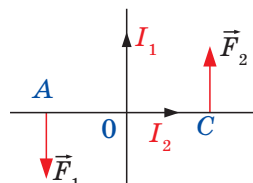


Рис. 2

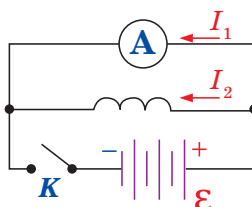


Рис. 3

- 5(с). Кільцем мідного дроту із площею перерізу  $1 \text{ мм}^2$  протікає струм силою  $10 \text{ А}$ . До його кінців прикладено різницю потенціалів  $0,15 \text{ В}$ . Знайдіть індукцію магнітного поля в центрі кільця.
- 6(с). Два паралельні провідники із однаковими струмами, розташовані на відстані  $8,7 \text{ см}$  один від одного, притягуються із силою  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ . Визначте силу струму в провідниках, якщо довжина кожного з них становить  $320 \text{ см}$ , а струми напрямлені в один бік.
- 7(с). Знайдіть індукцію магнітного поля в точці, віддаленій на  $2 \text{ см}$  від нескінченно довгого прямого дроту, яким протікає струм силою  $5 \text{ А}$ .
- 8(с). Знайдіть індукцію магнітного поля в центрі кругового дрітвяного витка радіусом  $1 \text{ см}$ , яким протікає струм силою  $1 \text{ А}$ .
- 9(с). На прямий провідник довжиною  $0,5 \text{ м}$ , розташований перпендикулярно силовим лініям поля з індукцією  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ , діє сила  $0,15 \text{ Н}$ . Знайдіть силу струму, який протікає провідником.
- 10(с). Яку роботу потрібно виконати для переміщення провідника довжиною  $40 \text{ см}$ , якщо в ньому протікає струм силою  $21 \text{ А}$ , в однорідному

- магнітному полі з індукцією 1,2 Тл на 25 см? Провідник рухається перпендикулярно лініям індукції.
- 11(д).** Потрібно виготовити соленоїд довжиною 20 см і діаметром 5 см, що створює магнітну індукцію величиною 1,26 мТл. Знайдіть різницю потенціалів, яку потрібно прикласти до кінців обмотки соленоїда, якщо для неї використовують мідний дріт діаметром 0,5 мм.
- 12(д).** В однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 2 Тл і напрямлена під кутом  $30^\circ$  до вертикалі, угору рухається прямий провідник масою 2 кг, через який протікає струм 4 А. Через 3 с провідник набуває швидкості 10 м/с. Визначте його довжину.
- 13(д).** Електрон, прискорений різницею потенціалів 300 В, рухається паралельно прямолінійному провіднику на відстані 4 мм від нього (рис. 4). Яка сила діятиме на електрон, якщо ним протікає струм силою 5 А?
- 14(д).** Приймаючи, що електрон в атомі водню обертається круговою орбітою радіусом  $0,53 \cdot 10^{-3}$  м, визначте індукцію магнітного поля в її центрі. Круговий струм дорівнює 0,01 мА.
- 15(д).** Обчисліть магнітну індукцію в соленоїді із залізним сердечником, якщо на 40 см його довжини розташовано 400 витків дроту. Витками протікає струм силою 8 А, а магнітна проникність заліза дорівнює 183.
- 16(д).** Двома довгими паралельним дротами, відстань між якими 16 см, протилежно один одному протікають струми силою 30 А кожен. Визначте індукцію магнітного поля в точці, відстань від якої до обох дротів однакова і дорівнює 10 см.
- 17(д).** Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно його силовим лініям із швидкістю  $10^8$  см/с. Магнітна індукція поля дорівнює 20 мТл. Обчисліть радіус кола, яким рухатиметься електрон.
- 18(д).** Протон рухається із швидкістю  $10^8$  см/с перпендикулярно силовим лініям однорідного магнітного поля з індукцією 1 Тл. Знайдіть силу, що діє на протон, і радіус кола, яким він рухається.
- 19(д).** Електрон описує в магнітному полі коло радіусом 4 мм. Його швидкість становить  $3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Знайдіть величину магнітної індукції.
- 20(д).** Соленоїд із 80 витків діаметром 8 см кожен, розміщений в однорідному магнітному полі, повертається на  $180^\circ$  за 0,2 с. Магнітна індукція поля дорівнює 60,3 мТл. Знайдіть середнє значення ЕРС, що виникає в ньому, якщо вісь обертання до і після повороту напрямлена вздовж поля.
- 21(д).** Котушку з нескінченно малим опором й індуктивністю 3 Гн під'єднають до джерела струму з ЕРС 15 В і незначним внутрішнім опором. Через який час сила струму в котушці досягне 50 А?
- 22(д).** В однорідному магнітному полі розміщено плоский виток площею  $10 \text{ см}^2$  перпендикулярно лініям індукції. Знайдіть силу струму у ньому, якщо поле зменшується з постійною швидкістю 0,1 Тл/с. Опір витка становить 10 Ом.
- 23(д).** У котушці довжиною 50 см і діаметром 10 см, що має 1000 витків, сила струму рівномірно збільшується на 0,1 А за 1 с. На неї натягнуте кільце з мідного дроту перерізом  $2 \text{ мм}^2$ . Знайдіть силу струму в ньому, якщо магнітні потоки в соленоїді і кільці однакові.

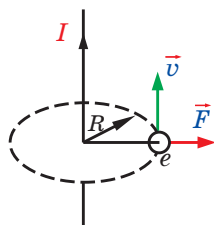


Рис. 4

- 24(д).** Квадратна рамка з мідного дроту площею  $25 \text{ см}^2$  розміщена в магнітному полі індукцією  $0,1 \text{ Тл}$ . Нормаль до рамки паралельна вектору магнітної індукції. Площа перерізу дроту дорівнює  $1 \text{ мм}^2$ . Який заряд пройде рамкою після вимкнення поля?
- 25(д).** Рамка, що має 30 витків, обертається навколо горизонтальної осі перпендикулярно площині магнітного меридіана з частотою  $10 \text{ с}^{-1}$ . Напруженість магнітного поля Землі становить  $40 \text{ А/м}$ . У рамці індукується максимальна ЕРС  $0,001 \text{ В}$ . Знайдіть площу рамки.
- 26(д).** Між полюсами динамомашини створено поле індукцією  $0,7 \text{ Тл}$ . Її якір складається із 100 витків площею  $500 \text{ см}^2$  кожен. Знайдіть частоту обертання якоря, якщо в ньому індукується максимальна ЕРС  $200 \text{ В}$ .
- 27(д).** Котушкою довжиною  $20 \text{ см}$  і діаметром  $3 \text{ см}$ , що має 400 витків, протікає струм силою  $2 \text{ А}$ . Знайдіть індуктивність котушки і магнітний потік, що її пронизує.
- 28(д).** Якщо сила струму, що протікає через соленоїд, змінюється на  $50 \text{ А}$  за секунду, то на кінцях її обмотки виникає ЕРС самоіндукції  $0,08 \text{ В}$ . Визначте індуктивність соленоїда.
- 29(д).** Обмотка електромагніту має індуктивність  $0,5 \text{ Гн}$ , опір  $15 \text{ Ом}$  і перебуває під постійною напругою. Визначте час, упродовж якого в обмотці виділяється кількість теплоти, що дорівнює енергії магнітного поля в сердечнику електромагніту.
- 30(д).** Замкнутий соленоїд із залізним сердечником довжиною  $150 \text{ см}$  і перерізом  $20 \text{ см}^2$  має 1200 витків. Визначте енергію магнітного поля соленоїда, якщо ним протікає струм силою  $1 \text{ А}$ . Магнітна проникність заліза дорівнює 1400.
- 31(в).** Три довгі прямі дроти, розташовані паралельно в одній площині на відстані  $3 \text{ см}$  один від одного, протікають струми  $I_1 = I_2$  й  $I_3 = I_1 + I_2$  (рис. 5). Визначте положення уявної прямої, в кожній точці якої індукція магнітного поля дорівнює нулю.
- 32(в).** В однорідному магнітному полі індукцією  $0,06 \text{ Тл}$  розміщено прямокутну рамку площею  $40 \text{ см}^2$ , яка має 200 витків і обертається навколо осі, перпендикулярній лініям індукції. Якщо витками протікає струм силою  $0,5 \text{ А}$ , рамка розташовується перпендикулярно лініям індукції поля. Яку роботу потрібно виконати, щоб повернути рамку на  $1/4$ ,  $1/2$  та повний оборот?
- 33(в).** В однорідному магнітному полі індукцією  $4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$  розміщено круговий виток радіусом  $5 \text{ см}$ , яким протікає струм силою  $1 \text{ А}$ . Виток розташований перпендикулярно лініям індукції. Яку роботу потрібно виконати, щоб повернути його на  $90^\circ$  навколо власного діаметра (рис. 6)?
- 34(в).** Котушка, що має 100 витків, замкнута накоротко і розміщена в магнітному полі напруженістю  $9,6 \text{ кА/м}$ . Площа її кожного витка становить  $5 \text{ см}^2$ , а їх площини перпендикулярні лініям індукції магнітного поля. Який заряд пройде котушкою, якщо її видалити з поля? Опір котушки дорівнює  $2 \text{ Ом}$ .

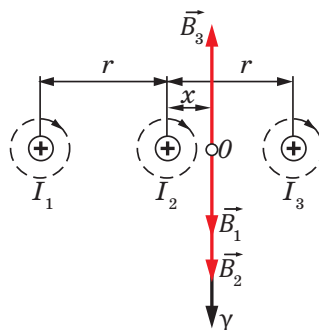


Рис. 5

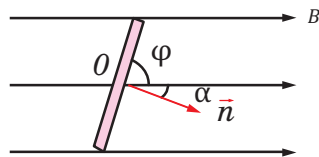


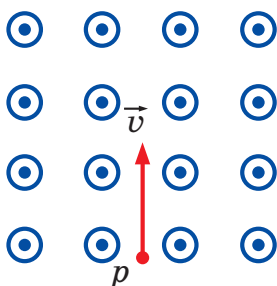
Рис. 6

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ № 3**

- 1(п).** Установіть відповідність між поняттями, що характеризують явище електромагнітної індукції, і формулами.

1. Закон електромагнітної індукції.	<b>А</b> $\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$	<b>Г</b> $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
2. ЕРС індукції в рухомих провідниках.	<b>Б</b> $\Phi = BS \cos \alpha$	<b>Д</b> $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$
3. ЕРС самоіндукції.		
4. Магнітний потік	<b>В</b> $L = \mu \mu_0 \frac{N^2}{l} S$	

- 2(п).** Вкажіть, як буде рухатися протон, що влітає в однорідне магнітне поле, напрямлене, як зображено на рисунку.



- А.** Поверне праворуч.  
**Б.** Поверне ліворуч.  
**В.** Поверне перпендикулярно до креслення на нас.  
**Г.** Поверне перпендикулярно до креслення від нас

- 3(с).** Котушку з нескінченно малим опором та індуктивністю 3 Гн під'єднують до джерела струму з ЕРС 15 В і малим внутрішнім опором. Через який проміжок часу сила струму в котушці сягне 50 А?

**А** 25 с      **Б** 5 с      **В** 15 с      **Г** 10 с

- 4(с).** У магнітному полі з індукцією 4 Тл перпендикулярно до її ліній рухається електрон із швидкістю  $10^7$  м/с. Яка сила на нього діє?

**А**  $0,4 \cdot 10^{-11}$  Н    **Б**  $6,4 \cdot 10^{-12}$  Н    **В**  $2,4 \cdot 10^{-16}$  Н    **Г**  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Н

- 5(с).** На прямий провідник довжиною 50 см, розташований перпендикулярно силовим лініям поля із індукцією 0,02 Тл, діє сила 0,15 Н. Яка сила струму протікає провідником?

**А** 2 А      **Б** 5 А      **В** 15 А      **Г** 25 А

- 6(с).** Протон рухається із швидкістю  $10^8$  см/с перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля. Знайдіть радіус кола, по якому він рухається, якщо величина індукції дорівнює 1 Тл.

**А** 1 см      **Б** 2 см      **В** 4 см      **Г** 8 см

- 7(с).** Яка сила діє на позитивний заряд 2 нКл, що рухається в магнітному полі індукцією 200 мТл із швидкістю 2 км/с? Напрямок руху заряду перпендикулярний до напрямку ліній індукції магнітного поля.

**А** 5 нН      **Б** 0,8 мкН      **В** 20 мкН      **Г**  $2 \cdot 10^{11}$  Н

- 8(с).** В однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 2 Тл і напрямлена під кутом  $30^\circ$  до вертикалі, вгору рухається прямий провідник масою 2 кг, по якому протікає струм 4 А. Через 3 с після початку руху провідник має швидкість 10 м/с. Визначте його довжину.

- А** 5,5 м      **Б** 6,9 м      **В** 6,6 м      **Г** 6,1 м
- 9(д).** Магнітний потік через замкнений провідний контур впродовж 3 мкс рівномірно змінюється від 5 до 20 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.  
**А** 100 В      **Б** 60 В      **В** 5 В      **Г** 4 В
- 10(д).** З якою швидкістю потрібно переміщувати провідник, довжина активної частини якого становить 1 м, під кутом  $60^\circ$  до вектора магнітної індукції, модуль якої дорівнює 0,2 Тл, щоб у ньому виникла ЕРС величиною 1 В?  
**А** 2 м/с      **Б** 6 м/с      **В** 8 м/с      **Г** 12 м/с
- 11(д).** Яка індуктивність котушки, якщо внаслідок рівномірної зміни струму від 5 до 10 А за 0,1 с, в ній виникає ЕРС самоіндукції величиною 20 В?  
**А** 0,4 Гн      **Б** 1,2 Гн      **В** 2,4 Гн      **Г** 3,6 Гн
- 12(д).** Чому дорівнює сила струму в котушці індуктивністю 40 мГн, якщо енергія магнітного поля становить 0,15 Дж?  
**А** 0,8 А      **Б** 1,2 А      **В** 2,7 А      **Г** 3,8 А
- 13(д).** Обмотка електромагніту індуктивністю 0,5 Гн і опором 15 Ом перебуває під постійною напругою. Через який час в обмотці виділиться кількість теплоти, що дорівнює енергії магнітного поля в осерді електромагніту.  
**А** 0,02 с      **Б** 0,2 с      **В** 1,4 с      **Г** 4с
- 14(д).** Електрон описує в магнітному полі коло радіусом 4 мм. Швидкість його руху становить  $3,6 \cdot 10^6$  м/с. Знайдіть індукцію магнітного поля.  
**А** 5 мТл      **Б** 15 мТл      **В** 25 мТл      **Г** 35 мТл
- 15(д).** Котушку надіто на залізне осердя площею поперечного перерізу  $15 \text{ см}^2$ . Коли індукція магнітного поля в осерді зростає із швидкістю 30 Тл/с, у ній виникає ЕРС величиною 9 В. Визначте кількість витків у котушці.  
**А** 18      **Б** 20      **В** 180      **Г** 200
- 16(в).** Горизонтальний провідник масою 20 г підвішений за кінці на двох проводах. Середня частина провідника завдовжки 25 см перебуває у вертикальному однорідному магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. У провіднику протікає струм 4 А. Визначте кут, на який відхиляються проводи від вертикалі. Вважайте, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
- 17(в).** В обмотці котушки із індуктивністю 0,6 Гн сила струму дорівнює 5 А. Визначте густину енергії магнітного поля котушки, якщо її об'єм становить  $150 \text{ см}^3$ .
- 18(в).** Два електрони влетіли в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній індукції. Перший електрон, який мав кінетичну енергію 12 кеВ, описав коло радіусом 5 мм. Визначте кінетичну енергію іншого електрона, якщо він описав коло радіусом 10 мм.
- 19(в).** Замкнутий провідний контур опором 25 Ом і площею  $50 \text{ см}^2$ , розташований в однорідному магнітному полі перпендикулярно до ліній його індукції. Впродовж певного часу магнітна індукція рівномірно зменшилась від 0,85 до 0,35 Тл. Який заряд проходить через поперечний переріз дроту за цей час?

## Розділ 2

# Коливання та хвилі

Вивчаючи фізику в основній школі, ви вже ознайомилися з таким видом механічного руху, як механічні коливання. Вивчаючи цей розділ, ви ознайомитеся з поняттям «електромагнітні коливання» та дізнаєтеся про те, що вони відбуваються за однаковими законами. Однакові кількісні закони описують і хвильові процеси різної природи. Тому в сучасній фізиці виокремлюють розділ «Коливання та хвилі».

### § 16. Вільні та вимушені коливання

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтесь про види механічних та електромагнітних коливань, зокрема про гармонічні коливання; навчитесь визначати період і частоту коливань математичного та пружинного маятника, а також вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі.*

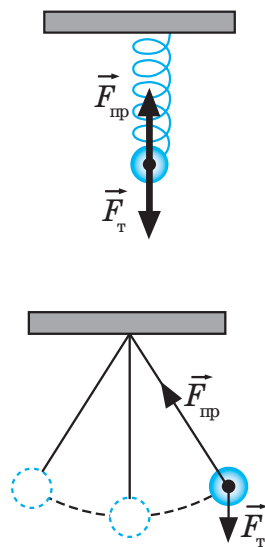
**ВІЛЬНІ МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ.** Звук від музичного інструмента, змінний електричний струм, світло від природного або штучного джерела є різними фізичними процесами, проте в них є одна спільна ознака — періодичність.

Фізичні процеси різної фізичної природи, в яких зміна фізичних величин періодично повторюється з плином часу, називають **коливаннями**.

Систему тіл, що взаємодіють, в якій можуть виникати коливання, називають **коливальною системою**.

Коливання, які виникають у коливальній системі під впливом внутрішніх сил, називають **вільними коливаннями**. Наприклад, вільні коливання здійснює тіло, закріплене на нитці, або на пружині після того, як її відвели від положення рівноваги та відпустили (рис. 16.1). Під час вільних коливань у коливальній системі відбувається періодичне перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки. Наприклад, під час коливань гітарної струни потенціальна енергія пружної деформації перетворюється в кінетичну енергію її руху, а потім кінетична енергія перетворюється в потенціальну енергію пружної деформації і т. д.

Коливання, що виникають під впливом зовнішніх періодично змінних сил, називають **вимушеними коливаннями**. Такими є, наприклад, коливання



**Рис. 16.1.**  
Вільні коливання здійснюються під впливом внутрішніх сил системи

поршнів у двигуні внутрішнього згоряння внаслідок періодичної дії газу, що розширюється під час робочого ходу поршня, крила літаків, тощо.

**Пригадайте.** Проміжок часу, через який повторюється коливання, називають періодом  $T$ . У СІ період коливань вимірюється в секундах,  $[T] = \text{с}$ . Період коливань можна обчислити за формулою

$$T = \frac{t}{N},$$

де  $t$  — час здійснення коливальною системою  $N$  коливань.

Кількість коливань, що здійснює система за одиницю часу, називають частотою й позначають літерою  $\nu$  («ню»). Частота показує, кількість коливань ( $N$ ), що здійснюється в системі за одиницю часу:

$$\nu = \frac{N}{t} \text{ і вимірюється в герцах (Гц). } 1 \text{ Гц} = \frac{1}{1 \text{ с}}.$$

Як бачимо, період і частота є взаємно оберненими величинами:

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

Вивчаючи фізику в основній школі, ви вже розглядали такі коливальні системи, як математичний маятник та пружинний маятник.

**Математичним маятником** називають коливальну систему, яка складається з матеріальної точки, що перебуває в полі земного тяжіння й підвішена на довгій невагомій і нерозтяжній нитці. Період коливань математичного маятника в полі земного тяжіння визначається за формулою Гюйгенса:

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

де  $l$  — довжина нитки;  $g$  — прискорення вільного падіння.

Якщо маятник набуває додаткового прискорення  $a$ , то період коливань математичного маятника визначатиметься за формулою

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{|\vec{g} \pm \vec{a}|}}.$$

Коли напрями прискорень  $\vec{g}$  та  $\vec{a}$  збігаються (наприклад, маятник рухається рівноприскорено донизу або ж рівносповільнено вгору), то  $|\vec{g} \pm \vec{a}| = g - a$ . Якщо напрями прискорень  $\vec{g}$  та  $\vec{a}$  протилежні (маятник рівноприскорено піднімається вгору, або рівносповільнено рухається до низу), то  $|\vec{g} \pm \vec{a}| = g + a$ . Коли прискорення  $\vec{g}$  та  $\vec{a}$  перпендикулярні (наприклад, маятник рухається по горизонталі з прискоренням), то  $|\vec{g} \pm \vec{a}| = \sqrt{g^2 + a^2}$ .

**Пружинним маятником** називають коливальну систему, що складається з тіла, закріпленого на пружині. Пружина може розташовуватися як вертикально так і горизонтально. Період коливань пружинного маятника визначається формулою:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

де  $m$  — маса тіла, закріпленого на пружині;  $k$  — жорсткість пружини.



**Частоту вільних коливань називають власною частотою коливальної системи.**

**ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ.** Багато коливань, що мають різну фізичну природу, відбуваються за однаковими законами. З великої кількості різних коливань у природі й техніці особливо часто зустрічаються гармонічні коливання.

**Гармонічними** називають коливання, що відбуваються за законом косинуса або синуса (рис. 16.2):

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

де  $x$  — коливна величина;  $x_m$  — максимальне значення коливної величини, яке називають *амплітудою коливань*;  $t$  — час;  $\omega$  — циклічна частота. Аргумент синуса або косинуса гармонічних коливань називають *фазою коливань* і позначають літерою  $\varphi$  («фі»):

$$\varphi = \omega t + \varphi_0.$$

*Фазу коливань*  $\varphi_0$  у початковий момент часу називають *початковою фазою*. Початкова фаза визначає значення коливної величини  $x$  в початковий момент часу  $t = 0$ .

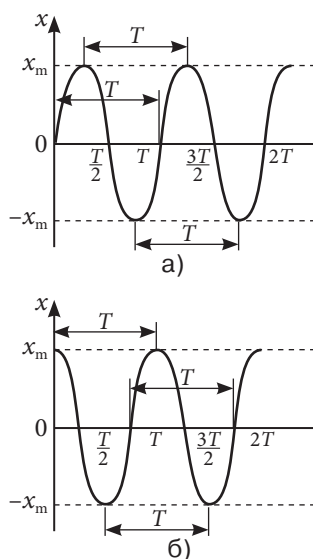
*Циклічна частота*  $\omega$  показує, яка кількість коливань у системі відбувається за  $2\pi$  с. Отже:

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

Циклічна частота вільних коливань, розглянутих нами коливальних систем, визначається такими залежностями:

$$\text{для математичного маятника } \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \text{ для пружинного } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Якщо на момент початку коливань коливна величина має максимальне значення, то її залежність від часу описують законом косинуса  $x = x_m \cos \omega t$ . Якщо в початковий момент часу значення коливної величини дорівнювало 0, то за законом синуса  $x = x_m \sin \omega t$ . Наприклад, кулька, закріплена на нитці, почала коливання після того, як її відхилили від положення рівноваги і відпустили. Отже, в момент  $t = 0$  її зміщення від положення рівноваги (координата) мало максимальне значення, тому залежність координати кульки від часу здійснюватиметься за законом косинуса. Якщо ж в початковий момент часу кулька перебувала в положенні рівноваги і почала свій рух після того, як їй надали кінетичної енергії, наприклад унаслідок удару, то координата кульки з часом змінюватиметься за законом синуса.



**Рис. 16.2.** Графіки гармонічних коливань, що відбуваються: а) за законом косинуса; б) синуса

**ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ.** Вільні коливання можуть бути не тільки механічними, а й електромагнітними. Електромагнітні коливання відбуваються в електричних колах.

**Електромагнітними коливаннями називають зміну заряду, напруги і сили струму.**

Система, в якій можуть відбуватися вільні електромагнітні коливання, складається з конденсатора і котушки, приєднаної до його пластин (обкладок). Таку систему називають *коливальним контуром* (рис. 16.3).



**Рис. 16.3.** Модель (а) та електрична схема (б) коливального контура

Після зарядження конденсатора в системі виникають вільні електромагнітні коливання, конденсатор починає розряджатися і в колі виникає електричний струм. Виявляється, сила струму не відразу досягає максимального значення, а збільшується поступово. Це пов'язано з явищем самоіндукції. ЕРС самоіндукції виникає під час виникнення струму в колі й перешкоджає його збільшенню, тому струм у колі збільшується поступово, а заряд конденсатора поступово зменшується до нуля. В той момент часу, коли заряд конденсатора дорівнює нулю, сила струму в колі має максимальне значення. Після цього сила струму буде зменшуватися, а заряд конденсатора збільшуватися і процес повториться.

Період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі визначається *формулою Томсона*:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

де  $L$  — індуктивність котушки;  $C$  — ємність конденсатора.

Подібно до того, як координата тіла під час механічних коливань пружинного або математичного маятника змінюється за законом синуса або косинуса, так і заряд конденсатора, напруга на ньому та сила струму в контурі змінюються за гармонічним законом. Наприклад, якщо коливання в контурі виникли після зарядки конденсатора (тобто в початковий момент він був максимальним), то рівняння, відповідно до якого змінюється заряд конденсатора:

$$q = q_m \cos \omega t,$$

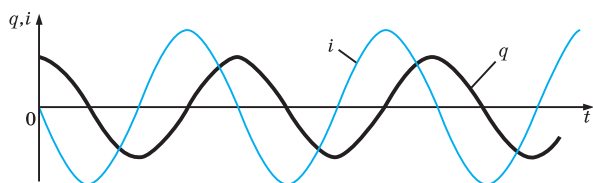
де  $q_m$  — максимальне значення заряду (амплітуда).

Подібно до того, як швидкість тіла є першою похідною від координати, так і сила струму є першою похідною від заряду. Отже:

$$i = q' = (q_m \cos \omega t)' = -q_m \omega \sin \omega t = -I_m \sin \omega t = I_m (\cos \omega t + \pi/2),$$

де  $I_m = q_m \omega$  — амплітуда коливань сили струму.

Коливання сили струму випереджають по фазі на  $\pi/2$  коливання заряду (рис. 16.4).



**Рис. 16.4.** Коливання сили струму випереджають за фазою на  $\pi/2$  коливання заряду

### ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. ЗМІННИЙ СТРУМ.

Вимушеними електромагнітними коливаннями називають процеси, що відбуваються в електричних колах під дією зовнішньої періодичної ЕРС джерела струму.

Струм, сила і напрям якого періодично за законом синуса або косинуса, змінюється називають змінним.

Одним із найпростіших генераторів змінного струму є провідна рамка, що обертається в магнітному полі. Нехай рамка площею  $S$ , яка складається з  $N$  витків дроту, обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  в однорідному магнітному полі з індукцією  $B$  (рис. 16.5). При цьому через рамку проходить магнітний потік, що змінюється за формулою:

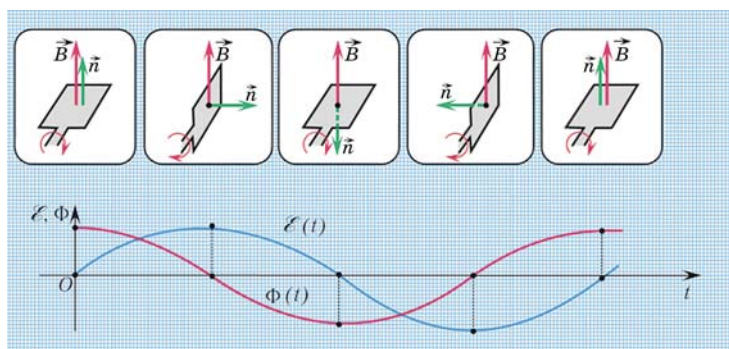
$$\Phi = BSN \cos \omega t = \Phi_{\max} \cos \omega t,$$

де  $\Phi_{\max} = BSN$  — максимальне значення магнітного потоку.

Відповідно до закону електромагнітної індукції в рамці буде виникати ЕРС, яка змінюватиметься за законом:

$$\mathcal{E} = -BSN\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \cos \omega t,$$

де  $\mathcal{E}_{\max} = BSN\omega$  — амплітудне значення ЕРС.



**Рис. 16.5.** В виникнення вимушених коливань в рамці, що обертається в магнітному полі.

Частота вимушених коливань, що виникають при цьому дорівнює частоті зміни ЕРС. Частота  $\nu$  змінного струму, який виробляє генератор, пов'язана з частотою обертання ротора генератора співвідношенням:

$$v = n \cdot v_{\text{рот}},$$

де  $n$  — кількість пар полюсів генератора.

**Змінний струм** — це такий самий напрямлений рух електрично заряджених частинок, як і постійний струм. Так само він чинить теплову, хімічну та магнітну дії. Проте він періодично змінює напрям і значення (це вимушені коливання в електричному колі сили струму і напруги).

Тому змінний електричний струм характеризується діючими значеннями сили струму ( $I_{\text{max}}$ ) та напруги ( $U_{\text{max}}$ ), які визначають ефективне значення струму, що чинить таку саму дію, як і постійний струм такої ж величини:

$$I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}.$$

Щоб зменшити втрати енергії змінного електричного струму, його передають за високої напруги (до понад 100 кВ), використовуючи підвищувальні трансформатори, а потім за допомогою знижувальних трансформаторів отримують струм потрібної напруги (наприклад, для виробничих потреб 380 В, а для побутових електричних приладів 220 В).

Завдяки трансформаторам змінний електричний струм передають на значні відстані.

Трансформатор є системою, що складається з двох і більше котушок (обмоток), що мають спільне осердя (рис. 16.6). Якщо первинна обмотка, яка приєднується до джерела змінної напруги, має  $N_1$  витків, а вторинна, що приєднується до споживача, має  $N_2$  витків, то коефіцієнт трансформації  $k$  обчислюється за формулою:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2},$$

де  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$  — ЕРС індукції в первинній і вторинній обмотках.

Якщо опори первинної і вторинної обмоток незначні, то  $\mathcal{E}_1 = U_1$ ,  $\mathcal{E}_2 = U_2$ , то

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

ККД трансформатора називають відношення потужності  $P_2$ , що віддає вторинна обмотка, до потужності  $P_1$ , що подається на первинну котушку:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

ККД сучасних трансформаторів становить приблизно 97–98%.

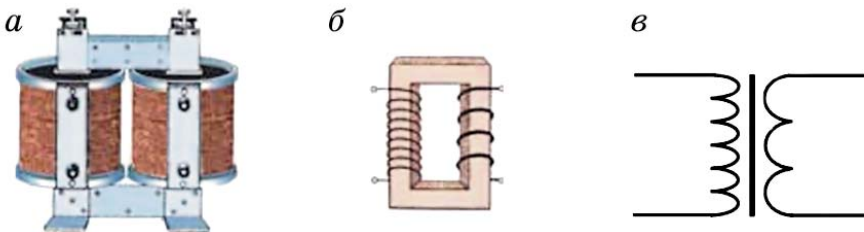


Рис. 16.6. Трансформатор: а) загальний вигляд; б) схематичне зображення; в) умовне позначення

**ЯК ГЕНЕРУЄТЬСЯ ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ?**

<http://www.protocols.co.ua/uk/sho-vy-znaete-o-generatorah/>

**! Головне в цьому параграфі**

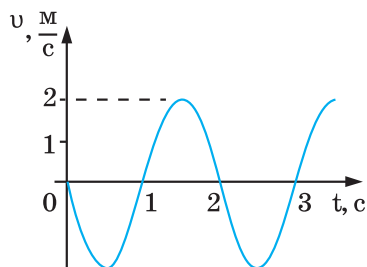
Механічні і електромагнітні коливання відбуваються за аналогічними законами. Вільні коливання математичного й пружинного маятника, а також електромагнітні коливання в коливальному контурі є гармонічними.

**? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Які коливання називають гармонічними? 2. Що називають періодом коливань? 3. Що називають частотою коливань? 4. Що називають амплітудою коливань? 5. Що називають фазою коливань? 6. Що називають початковою фазою коливань? 7. Який зв'язок циклічної частоти з періодом коливань; з частотою коливань? 8. Як визначається період вільних коливань в коливальному контурі? 9. Як пов'язані між собою амплітудне значення заряду і сили струму вільних коливань?

**Вправа до § 16**

1. Матеріальна точка здійснює гармонічні коливання вздовж осі  $OX$  із періодом  $0,2$  с і амплітудою  $0,1$  м. Початкова фаза коливань  $\pi/2$ . Запишіть залежність координати цієї точки від часу (аналітична залежність) та побудуйте графік залежності координати від часу (графічна залежність).
2. Зміна фізичної величини відбувається за законом  $x = 5 \cos\left(2t + \frac{\pi}{4}\right)$  (см). Зобразіть графічну залежність цієї фізичної величини від часу.
3. На рис. 1 подано графік гармонічних коливань. Запишіть рівняння цих гармонічних коливань.
4. Конденсатор ємністю  $C = 15$  мкФ і котушка індуктивністю  $L = 16$  мкГн. Визначте частоту вільних електромагнітних коливань у контурі.
5. Вхідний контур радіоприймача має коливальний контур із котушкою індуктивності  $L = 0,32$  мГн. У яких межах має змінюватися ємність конденсатора контура, щоб радіоприймач міг приймати сигнал від радіостанції, яка працює в діапазоні від  $\nu_1 = 8,0$  МГц до  $\nu_2 = 24$  МГц?
6. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю  $L = 0,32$  мГн і плоского конденсатора, площею пластин  $S = 20$  см<sup>2</sup>. Відстань між пластинами  $d = 1,0$  мм. Визначте діелектричну проникність середовища  $\epsilon$ , яке заповнює простір між пластинами, якщо максимальне значення напруги  $U_0 = 10$  В, а сили струму  $I_0 = 12$  мА.

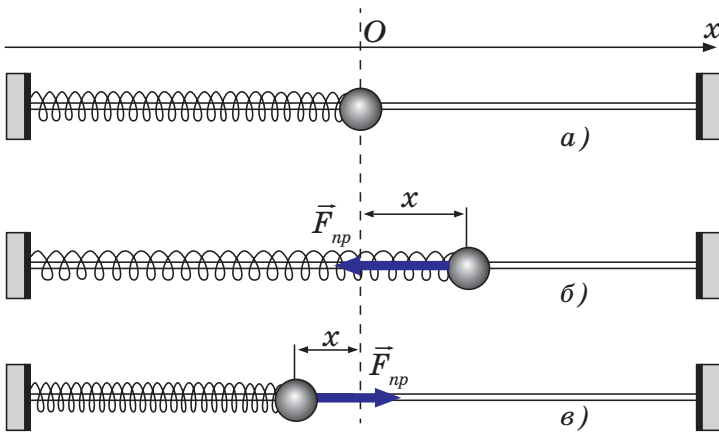
**Рис. 1**

## § 17. Перетворення енергії під час коливань

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтеся про перетворення енергії в коливальних системах та навчитесь їх пояснювати, зрозумієте аналогію механічних і електромагнітних коливань.*

**ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАННЯХ.** Резонанс. Розглянемо перетворення енергії, які відбуваються в процесі гармонічних коливань кульки, закріпленої на пружині (рис. 17.1, а). Під час зміщення кульки праворуч на відстань  $x_m$  коливальна система набуває потенціальної енергії (рис. 17.1, б):

$$W_{n_m} = \frac{kx_m^2}{2}.$$



**Рис. 17.1.** Перетворення енергії під час вільних коливань кульки на пружині

Після того як кульку відпустили, вона починає рухатися ліворуч і деформація пружини зменшується, а отже, зменшується і потенціальна енергія системи. Разом із тим швидкість кульки збільшується і, відповідно, збільшується її кінетична енергія. Під час проходження кулькою положення рівноваги потенціальна енергія коливальної системи дорівнює нулю

( $W_n = 0$ , коли  $x = 0$ ), а кінетична енергія досягає максимуму  $W_{k_m} = \frac{mv_m^2}{2}$ .

Після проходження положення рівноваги швидкість кульки починає зменшуватися. Відповідно зменшується її кінетична енергія, а потенціальна енергія знову збільшується (рис. 17.1.в). У крайньому лівому положенні потенціальна енергія досягає максимуму, а кінетична енергія стає рівною нулю. Отже, у процесі механічних коливань відбувається періодичне перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки. Подібні перетворення енергії відбуваються і під час коливань математичного маятника. Відповідно до закону збереження повної механічної енергії, енергія системи  $W$  під час коливань тіла може бути визначена залежно від моменту коливань як максимальна потенціальна енергія ( $W_{n_m}$ ), як максимальна кінетична енергія ( $W_{k_m}$ ), або сума кінетичної і потенціаль-

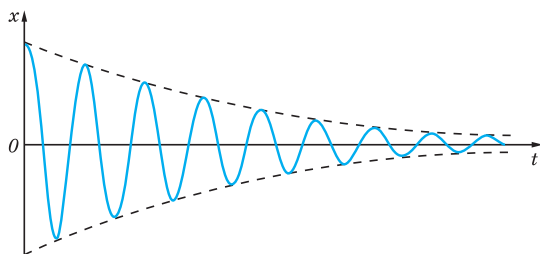
ної енергії в той момент, коли тіло перебуває між положенням рівноваги та максимальним зміщенням:

$$W = W_{\pi_m} = W_{\kappa_m} = W_{\pi} + W_{\kappa},$$

$$W = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}.$$

Вільні коливання кульки, прикріпленої до пружини або маятника, будуть гармонічними лише за відсутності сили тертя. Проте сили тертя, а точніше, сили опору навколишнього середовища завжди діють на тіло, що здійснює коливання. Сили опору виконують негативну роботу й тим самим зменшують механічну енергію системи. Тому з плином часу максимальне відхилення тіла від положення рівноваги зменшується і врешті-решт коливання припиняються (рис. 17.2). Коливання за наявності сил опору є *згасаючими*.

Хоча згасаючі коливання використовують у технічних засобах й інколи намагаються зменшити час їх згасання (наприклад, в автомобілях), проте значно важливішими є незгасаючі коливання, що можуть за потреби тривати необмежено довго. Найпростіший спосіб одержання незгасаючих коливань полягає в тому,

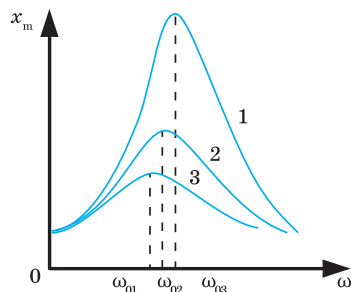


**Рис. 17.2.** Зменшення амплітуди під час згасаючих коливань

що коливальну систему підживлюють енергією, періодично впливаючи на неї з певною силою. Виявляється, що кожна коливальна система має свою **частоту вільних коливань**, її називають **власною частотою**  $\omega_0$ . Якщо частота, з якою впливає сила на систему, буде рівною власній частоті коливальної системи, амплітуда коливань буде збільшуватися. Наприклад, якщо розгойдаючи гойдалку ви будете докладати силу з такою ж частотою, як і власна частота коливань гойдалки, то вам вдасться її «розгойдати».

**Явище значного збільшення амплітуди коливань системи, здатної здійснювати вільні коливання, за умови збігу частоти впливу зовнішньої періодичної сили з власною частотою коливальної системи, називають резонансом.**

Під час резонансу робота зовнішньої сили повністю витрачається на поповнення втрат енергії, зумовлених силами тертя. Чим меншим є коефіцієнт тертя, тим більшою буде амплітуда коливань (рис. 17.3). Кривій 1 відповідає мінімальний коефіцієнт тертя, а кривій 3 — максимальний.

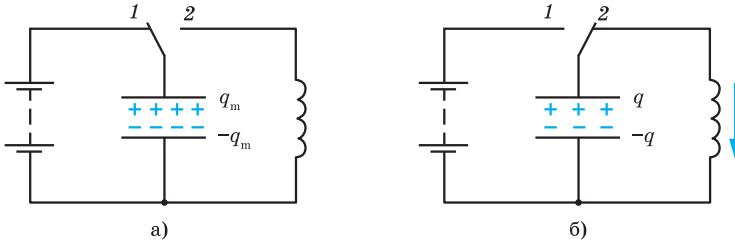


**Рис. 17.3.** Резонансні криві



**ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ.** Для з'ясування процесу перетворення енергії під час вільних електромагнітних коливань розглянемо систему, зображену на рис. 17.4.

Зарядження конденсатора відбувається, якщо перемикач перебуває в положенні 1 (рис. 17.4, а). При цьому конденсатор набуває енергії  $W_e = \frac{q_m^2}{2C}$ , а між пластинами конденсатора виникне різниця потенціалів  $U_m$ .



**Рис. 17.4.** Виникнення електромагнітних коливань в колиальному контурі

Після переведення перемикача в положення 2 конденсатор починає поступово розряджатися. Енергія електричного поля конденсатора зменшується. Проте в колі починає з'являтися електричний струм, і в міру розрядки конденсатора сила електричного струму поступово збільшується. Відповідно зростає й енергія магнітного поля котушки. Повна енергія коливальної системи  $W$  у цей момент часу визначається як сума енергії електричного поля  $W_e = \frac{q^2}{2C}$  та енергії магнітного поля  $W_m = \frac{Li^2}{2}$ :

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}.$$

У момент повного розрядження конденсатора ( $q = 0$ ) енергія його електричного поля стане рівною нулю. Енергія магнітного поля, відповідно до закону збереження енергії, буде максимальною. У цей момент сила струму в колі набуває максимального значення  $I_m$ . Повна енергія системи дорівнюватиме максимальному значенню енергії магнітного поля котушки  $W_m = \frac{LI_m^2}{2}$ . Як тільки сила струму і створене ним магнітне поле почнуть зменшуватися, виникає ЕРС самоіндукції, яка намагається підтримати струм.

У результаті конденсатор буде перезаряджатися доти, доки сила струму, поступово зменшуючись, стане рівною нулю. У цей момент енергія магнітного поля також буде дорівнювати нулю, енергія ж електричного поля конденсатора буде максимальною. Після цього конденсатор знову почне розряджатися.

Якби не було втрат енергії, такий процес повторювався б як завгодно довго і енергія системи зберігалась би незмінною. Залежно від моменту коливань повну енергію системи  $W$  можна було б визначити як максимальну енергію електричного поля, максимальну енергію магнітного поля або як суму проміжних значень енергії електричного поля конденсатора та магнітного поля котушки:

$$W = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}.$$

Насправді, унаслідок наявності електричного опору котушки і з'єднувальних провідників існують втрати енергії, пов'язані з нагріванням провідників. У подальшому ми будемо розглядати ідеальний коливальний контур, у якому втрати енергії настільки малі, що ними можна знехтувати.

За умови малого електричного опору власна частота коливань у контурі визначається формулою:

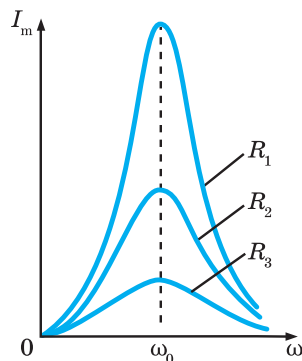
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Якщо періодично підживлювати коливальний контур енергією, то в контурі виникнуть вимушені коливання. Причому, коли частота змінної напруги дорівнюватиме власній частоті коливань контура  $\omega = \omega_0$ , у контурі спостерігатиметься явище електричного резонансу, під час якого амплітуда коливань різко зростає (рис. 17.5) і визначатиметься за формулою

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

Це означає, що чим менший елек-

тричний опір у контурі, тим більшим буде амплітудне значення сили струму ( $R_1 < R_2 < R_3$ ).



**Рис. 17.5.**  
Резонансні криві

**АНАЛОГІЯ МІЖ МЕХАНІЧНИМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ КОЛИВАННЯМИ.** Як впливає з викладеного, електромагнітні коливання в контурі мають схожість із вільними механічними коливаннями... [http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-16\\_physics11.pdf](http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-16_physics11.pdf)



### ! Головне в цьому параграфі

Механічні й електромагнітні коливання мають різну природу, але перебіг цих коливань описують подібні рівняння.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

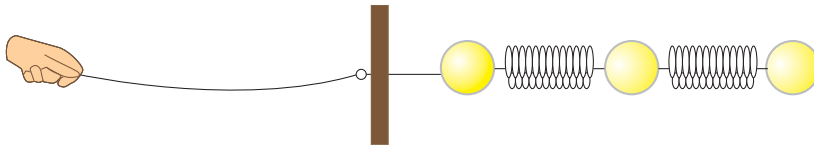
- Дві кульки однакового радіуса підвішені на двох нитках однакової довжини й мають різну масу. Коливання якого маятника припиняться швидше — важкого чи легкого?
- Як розподіляється енергія вільних коливань у моменти часу  $\frac{T}{4}$ ;  $\frac{T}{2}$ ;  $\frac{3T}{4}$ ;  $T$  під час: а) механічних коливань; б) електромагнітних коливань?
- Чому вільні електромагнітні коливання в реальному коливальному контурі є згасаючими?
- Чи залежить період вільних коливань від енергії, яка надана коливальній системі?

**Вправа до § 17**

1. Тіло масою 200 г, закріплене на пружині жорсткістю 16 Н/м, здійснює коливання з амплітудою 2 см у горизонтальній площині. Обчисліть циклічну частоту і повну енергію коливальної системи.
2. Автомобіль рухається по нерівній дорозі. Відстань між вибоїнами в середньому становить 8 м. Обчисліть швидкість, на якій коливання автомобіля будуть найбільш помітними, якщо власна частота коливань його на ресорах становить 1,5 с.
3. Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю 400 пФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Обчисліть максимальне значення сили струму в контурі, якщо максимальне значення напруги на конденсаторі 500 В.
4. У коливальному контурі індуктивність котушки 0,2 Гн, а максимальне значення сили струму 40 мА. Обчисліть енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму в два рази менше від його максимального значення.

**§ 18. Механічні хвилі та їхні властивості**

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтеся про утворення й поширення механічних хвиль, їх різновиди, характеристики та властивості.*



**Рис. 18.1.** Модель пружного середовища

**ПРУЖНІ ХВИЛІ.** Задамося запитанням: «Що відбуватиметься, якщо горизонтальні пружинні маятники з'єднати в ланцюжок (рис. 18.1) і подіяти на одну з кульок (наприклад, першу) періодичною зовнішньою силою вздовж ланцюжка?» Оскільки між кульками, закріпленими на пружинах, діють сили пружності, коливальний рух будуть здійснювати решта кульок. Тобто відбуватиметься процес поширення коливань, проте коливання кожної наступної кульки відбуватиметься із запізненням порівняно з попередньою. Це запізнення зумовлено інертністю кульок. Така система є моделлю пружного середовища. Досвід показує, що в пружному середовищі коливання, збуджені в будь-якій точці, з плином часу поширюються в інші його точки. Наприклад, від каменя, кинутого у воду, коливання розходяться по поверхні води.

**Поширення механічних коливань у просторі з плином часу називають механічною хвилею.**

*Під час поширення механічної хвилі частинки середовища здійснюють коливання відносно своїх положень рівноваги. При цьому відбувається поширення енергії від одних точок середовища до інших без перенесення речовини.*

Точки поверхні, які коливаються в однаковій фазі, називають *хвильовим фронтом*, тобто поверхнею однакових фаз. Якщо такою поверхнею є площина, то хвиля називається плоскою.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ХВИЛЬ.** Основними характеристиками хвиль є:

**амплітуда ( $x_m$ )** — модуль максимального зміщення точок середовища відносно положень рівноваги;

**період ( $T$ )** — час повного коливання точок відносно положень рівноваги (період коливань хвилі дорівнює періоду коливань джерела хвиль):

$T = \frac{t}{N}$ , де  $t$  — час, за який точка середовища здійснює  $N$  коливань;

**частота ( $\nu$ )** — кількість повних коливань, що здійснює точка середовища відносно положення рівноваги,  $\nu = \frac{1}{T}$ ,  $\nu = \frac{N}{t}$ ;

**швидкість поширення хвилі ( $v$ )** — швидкість поширення певного гребня чи западини (або точки з певною фазою) у просторі;

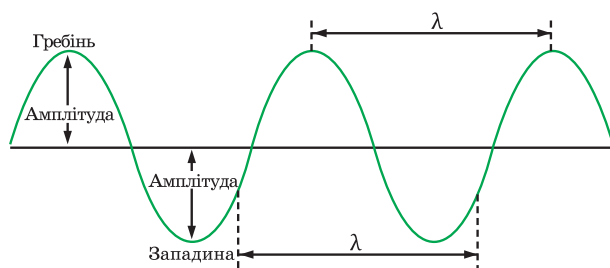


Рис. 18.2. Характеристики хвиль

**довжина хвилі ( $\lambda$ )** — найменша відстань між двома точками, коливання в яких відбуваються в однаковій фазі (рис. 18.2), тобто відстань, на яку поширюється хвиля за час, що дорівнює періоду коливань джерела,  $\lambda = vT$ .

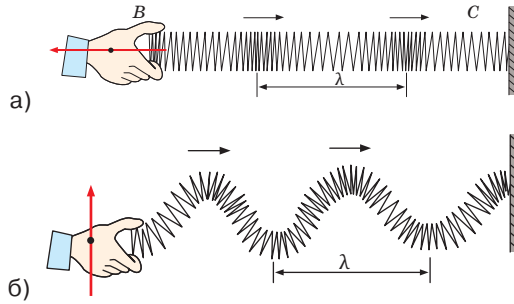
**РІЗНОВИДИ ХВИЛЬ.** За типом коливань точок середовища розрізняють поздовжні та поперечні хвилі.

**Поздовжньою називають хвилю, коли коливання частинок середовища відбувається вздовж напрямку поширення хвилі.**

Поздовжню хвилю можна одержати за допомогою довгої пружини, яка лежить на гладкій горизонтальній поверхні, й один її кінець закріплений (рис. 18.3, а). Внаслідок легкого поштовху по вільному кінцю в пружині виникає поздовжня хвиля.

**Поперечною називають хвилю, якщо частинки середовища коливаються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі.**

Використовуючи довгу пружину, можна одержати поперечні хвилі, якщо здійснювати коливання незакріпленого кінця перпендикулярно поздовжній осі пружини (рис. 18.3, б).



**Рис. 18.3.** Різновиди хвиль за характером коливань частинок середовища: а) поздовжні хвилі; б) поперечні хвилі

Як під час поширення і поздовжніх, і поперечних хвиль частинка середовища, що лежить на відстані  $x$  від місця початкового збурення, почне коливатися лише тоді, коли до неї дійде збурення, що поширюється в середовищі. Позначимо швидкість поширення коливального процесу (збурення) літерою  $v$ . До точки, що розташована на відстані  $x$  від джерела, хвиля дійде з запізненням  $\tau = \frac{x}{v}$ . Якщо коливання джерела хвиль відбуваються за законом ко-

синуся  $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ , то коливання певної частинки відбуватимуться за тим самим законом, але із запізненням на час  $\tau$ :

$$f(x, t) = x_m \cos\left(\omega \left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right).$$

Якщо ж джерело здійснює коливання за законом синуса  $x = x_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ , то точка середовища, розташована на відстані  $x$  від джерела, здійснюватиме коливання за законом:

$$f(x, t) = x_m \sin\left(\omega \left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right).$$

Ці рівняння, що визначають залежність зміщення  $f$  частинки середовища, яка міститься на лінії на відстані  $x$  у момент часу  $t$ , називають **рівнянням хвилі**.

У рідинах і газах пружні хвилі виникають внаслідок стискання та розрідження середовища й не можуть виникати внаслідок зсуву їх частинок. Тому в цих середовищах можливе поширення лише поздовжніх хвиль. На відміну від рідин і газів, у твердих тілах можливе поширення й поперечних хвиль, оскільки вони виникають внаслідок зміщення або зсуву одних шарів середовища відносно інших.

Внаслідок того, що поширення поздовжніх хвиль пов'язане з деформацією стиску, поперечних — з деформацією зсуву, швидкості їх поширення будуть відрізнятися. Наприклад, сталі поперечні хвилі поширюються зі швидкістю 3300 м/с, а поздовжні — 6100 м/с. Землетруси є джерелом сейсмічних хвиль, причому вони можуть бути як поздовжніми, так і поперечними. Оскільки швидкість поздовжніх хвиль більша, ніж поперечних, то за часом запізнення поперечної хвилі можна визначити відстань до епіцентру землетрусу.

**ЗВУК.** Особливо важливе місце серед усіх типів пружних хвиль посідають звукові хвилі (звуки). Світ навколишніх звуків різноманітний і складний, проте ми досить легко орієнтуємося в ньому й можемо безпомилково відрізнити спів птахів від шуму міської вулиці.

**Звуковими хвилями, або просто звуком, називають пружні хвилі, що викликають у людини слухові відчуття.**

Людське вухо сприймає коливання в частотному діапазоні від 16 до 20 000 Гц. Розділ фізики, в якому вивчають звукові явища, називається акустикою.

Пружні хвилі класифікують за частотою на такі діапазони: інфразвук (до 16 Гц); звук (16 Гц — 20 000 Гц); ультразвук (20 000 Гц —  $10^9$  Гц); гіперзвук ( $10^9$  Гц —  $10^{13}$  Гц).

Багато тварин можуть сприймати ультразвуки. Наприклад, собаки можуть чути звуки частотою до 50 000 Гц, а кажани — до 100 000 Гц.

Інфразвук, поширюючись по воді на сотні кілометрів, допомагає китам і багатьом іншим морським тваринам орієнтуватися в товщі води.

Розглянемо як приклад джерела звуку — радіодинамік (рис. 18.4). Мембрана динаміка стискає і розріджує повітря в ділянці, яка прилягає до неї. Отже, у процесі поширення звукової хвилі з плином часу змінюється густина середовища.

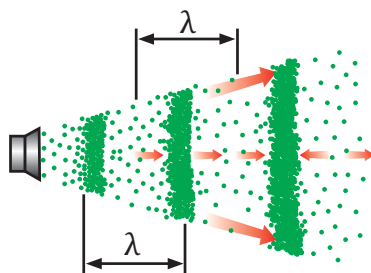
Для поширення звукових хвиль необхідні середовища з пружними властивостями. Якщо помістити джерело звуку (дзвінок) під купол повітряного насоса і поступово відкачувати повітря, то звук стає все слабшим, а потім зникає. Отже, звукові хвилі в безповітряному просторі не поширюються. Якщо оточити дзвінок шаром пористого матеріалу (поролону, вати тощо), то звукові хвилі в ньому швидко загасають. Тому такі матеріали широко використовують для звукоізоляції.

Ви вже знаєте, що механічні хвилі переносять енергію. Для характеристики енергії, яку переносять хвилі, використовують поняття інтенсивності хвилі ( $I$ ), яке визначається відношенням енергії  $W$ , що переноситься хвилею, до добутку часу  $t$  і площі поверхні  $S$ , через яку поширюється хвиля, й розташовану перпендикулярно до напрямку поширення хвилі:

$$I = \frac{W}{S \cdot t} = \frac{P}{S}.$$

Іншими словами, інтенсивність хвилі є потужністю ( $P$ ), яка переноситься хвилями через поверхню одиничної площі перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. Одиницею інтенсивності в СІ є 1 ват на метр у квадраті [ $I$ ] =  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Інтенсивність звуку, що сприймається вухом людини, перебуває у діапазоні: від  $1 \cdot 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> (поріг чутності) до 1 Вт/м<sup>2</sup> (поріг більшого відчуття).



**Рис. 18.4.** Створення звукових коливань мембраною

За набором компонентів різних частот звуки поділяються на шуми і музичні тони.

**Шум** — сукупність різноманітних короточасних звуків (хрускіт, шелест, стукіт тощо), є накладенням великої кількості коливань із близькими амплітудами, але різними частотами (має суцільний спектр).

**Музичний тон** створюється періодичними гармонічними коливаннями тіла (камертона, струни тощо) однієї частоти.

Фізичні характеристики звуку є до певної міри суб'єктивними, оскільки пов'язані зі сприйняттям його конкретною людиною. Це зумовлено тим, що сприйняття звуку — процес не тільки фізичний, а й фізіологічний. Основними фізіологічними характеристиками звуку є гучність, висота і тембр.

**Гучність** звуку визначається як інтенсивністю звуку (амплітудою коливань звукової хвилі), так і різною чутливістю людського вуха на різних частотах. Найбільшою чутливістю людське вухо має в діапазоні частот від 1000 до 5000 Гц. З віком людини поріг чутності збільшується.

**Висота** звуку визначається частотою звукових коливань, що мають найбільшу інтенсивність у спектрі.

**Тембр** (відтінок звуку) залежить від того, скільки обертонів приєднуються до основного тону і яка їхня інтенсивність і частота. За тембром ми легко відрізняємо звуки скрипки і рояля, флейти та гітари, голоси людей тощо.

**Швидкість звуку** залежить від пружних властивостей, густини і температури середовища. Чим більші сили пружності, тим швидше поширюється звукова хвиля. Тому модуль швидкості звуку в газах менший, ніж у рідинах, а в рідинах зазвичай менший, ніж у твердих тілах (табл. 18.1).

Спосіб орієнтації або дослідження навколишніх об'єктів, що ґрунтується на випромінюванні ультразвукових імпульсів з подальшим сприйманням відбитих імпульсів (луни) від різних об'єктів, називається *ехолокацією*, а відповідні прилади — ехолокаторами. Ехолокацію використовують наприклад, дельфіни й кажани. Хвилі ультразвукових частот широко використовуються в медицині з діагностичною метою. УЗД-сканери дають змогу досліджувати внутрішні органи людини.

Таблиця 18.1.

Швидкість звуку в різних середовищах

Тверде тіло	$v$ , м/с	Рідина	$v$ , м/с (20 °C)	Газ	$v$ , м/с (0 °C)
Алюміній	6260	Ацетон	1192	Азот	334
Залізо	5850	Бензин	1170	Водень	1284
Лід	3980	Вода	1460	Повітря	331
Гума	1040	Вода морська	1451	Гелій	955
Скло	5990	Гліцерин	1923	Кисень	316
Порцеляна	5340	Ртуть	1451	Метан	429
Ебоніт	2405	Спирт	1180	Вуглекислий газ	259

Важливе значення має ефект Доплера, який полягає у зміні частоти та довжини хвиль, що реєструються приймачем і зумовлюються рухом



їх джерела та/або рухом приймача. Довжину хвилі  $\lambda$ , що реєструється її приймачем, визначають за формулою:

$$\lambda = \frac{(v_1 - v_2)}{v_0},$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі;  $v_1$  — швидкість поширення хвиль, створених нерухомим джерелом;  $v_2$  — швидкість джерела хвиль відносно середовища (при наближенні до джерела — додатна, при видаленні — від’ємна);  $v_0$  — частота випромінюваних хвиль.

Отже, спостерігач сприйматиме хвилі меншої довжини. При цьому частота сприйнятих коливань збільшиться.

### ! Головне в цьому параграфі

Для виникнення звукових відчуттів необхідні: наявність джерела звуку; наявність пружного середовища між джерелом звуку і вухом; частота коливань джерела звуку має перебувати в межах 16—20 000 Гц; потужність звукових хвиль має бути достатньою для того, щоб викликати відчуття звуку.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що називають механічною хвилею? 2. Які фізичні величини характеризують хвилі? 3. Що називають хвильовим фронтом? 4. Що таке довжина хвилі? 5. Як пов’язані довжина хвилі та частота? 6. Яка хвиля називається поздовжньою? Поперечною? 7. Які хвилі можуть поширюватися в газах? Рідинах? Твердих тілах? 8. Поясніть природу звуку. Що є його джерелами? 9. Як класифікують звуки? 10. Який діапазон звукових частот сприймає вухо людини? 11. Назвіть межі частоти інфразвукових і ультразвукових хвиль.

### Вправа до § 18

- Визначте модуль швидкості  $v$  поширення хвилі, якщо її довжина 15 м, а період коливань 0,20 с.
- Нерухомий спостерігач за 20 с нарахував 8 гребенів хвиль, що пройшли повз нього. Визначте період коливань частинок середовища.
- Хвиля від катера, що проходить по озеру, дійшла до берега через проміжок часу 5,0 хв., причому відстань між сусідніми гребенями дорівнювала 1,5 м, а проміжок часу між двома послідовними ударами хвиль об берег 4 с. На якій відстані від берега проходив катер?
- Рибалка помітив, що за 20 с поплавок зробив 40 коливань на хвилях. При цьому відстань між берегом і рибалкою становила 12 м, і на цій відстані укладається 20 гребенів хвиль. Визначте модуль швидкості поширення хвилі.
- Людина бачить, як важкий камінь падає на бетонний тротуар, а через деякий час чує два звуки від удару каменю: один прийшовся по повітрю, а другий поширився в бетоні. Проміжок часу між ними 1,2 с. На якій відстані від людини впав камінь, якщо модуль швидкості поширення звуку в бетоні 4500 м/с? Температура повітря 20° С.
- При пострілі з гармати під кутом 60° до горизонту снаряд має початкову швидкість, модуль якої 500 м/с. Через який проміжок часу після пострілу артилерист почує звук від розриву снаряда на землі? Модуль швидкості поширення звуку в повітрі 340 м/с.

## § 19. Електромагнітні хвилі

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтеся про електромагнітне поле; утворення й поширення електромагнітних хвиль, їх властивості, діапазони та використання.*

**УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ.** Вивчення явища електромагнітної індукції показало, що зміна магнітного поля, в якому перебуває провідний контур, спричиняє появу в цьому контурі індукційного (вихрового) електричного поля. Дж. Максвелл дійшов висновку, що електромагнітне поле у вакуумі може існувати і за відсутності джерел струмів та зарядів. Згідно з теорією Максвелла будь-які зміни магнітного поля призводять до виникнення вихрового електричного поля. Будь-які зміни електричного поля супроводжуються виникненням вихрового магнітного поля. Отже, у всьому просторі, де змінюються поля, одночасно існують вихрові електричні й магнітні поля, які взаємно породжують і підтримують одне одного. У цьому випадку поле матиме вигляд хвилі, яка поширюється зі швидкістю  $3 \cdot 10^8$  м/с. При цьому вектор напруженості електричного поля та вектор індукції магнітного поля перпендикулярні один до одного та перпендикулярні до напрямку поширення хвилі (рис. 19.1). Отже, електромагнітні хвилі є поперечними.

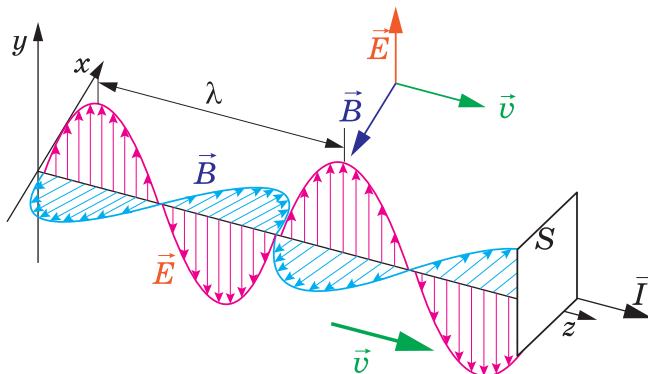


Рис. 19.1. Електромагнітна хвиля

Сукупність нерозривно взаємопов'язаних змінних електричного і магнітного полів називають електромагнітним полем.

**Електромагнітне поле** — особливий вид матерії, через який відбувається електромагнітна взаємодія.

Процес поширення змінного електромагнітного поля в просторі з плином часу називають електромагнітною хвилею.

Експериментально виявив електромагнітні хвилі німецький фізик Г. Герц. Для їх отримання вчений використав відкритий коливальний контур, який складався з двох мідних стрижнів, що закінчувались маленькими латунними кульками, між якими залишався незначний повітряний проміжок (рис. 19.2).

До стрижнів біля кульок було приєднано обмотки котушки, з'єднаної з джерелом живлення. На стрижні окремими імпульсами подавалась висока напруга. Електромагнітні хвилі виникали внаслідок коливання електричних зарядів у відкритому коливальному контурі й фіксувалися приймальним резонатором — коливальним контуром. У резонаторі під дією електромагнітної хвилі збуджувалися коливання струму. Герц виявив ці коливання, спостерігаючи іскорки в дуже малому проміжку між провідниками резонатора.

Досліди Герца блискуче підтвердили теоретичні передбачення Максвелла, який був глибоко переконаний у тому, що електромагнітні хвилі існують реально.

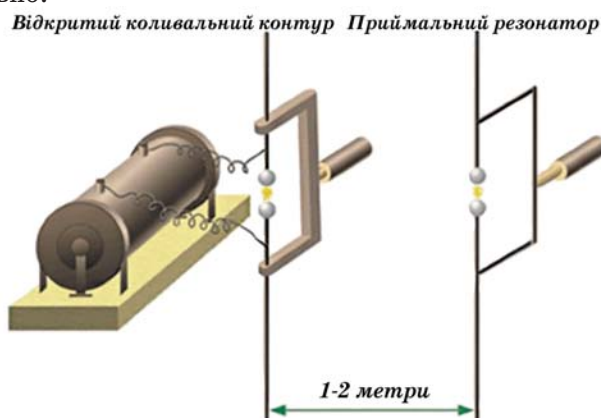


Рис. 19.2. Дослід Герца

Головною умовою випромінювання електромагнітної хвилі є наявність прискорення заряджених частинок.

Електромагнітні хвилі переносять енергію. Для характеристики енергії електромагнітної хвилі існує фізична величина — густина потоку електромагнітного випромінювання  $J$ . Вона показує, яка електромагнітна енергія  $W$  проходить за час  $t$  через перпендикулярну до променів поверхню площею  $S$  (див. рис. 19.1):

$$J = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Іноді величину  $J$  називають інтенсивністю хвилі. У СІ  $[J] = 1 \text{ Вт/м}^2$ .

Густина потоку електромагнітних хвиль дорівнює добутку густини електромагнітної енергії  $\omega_m$  на швидкість її поширення.

$$J = \omega_m c.$$

Для одержання електромагнітних хвиль із великою інтенсивністю необхідно в джерелі створити коливання досить великої частоти, оскільки густина потоку випромінювання пропорційна частоті в четвертій степені:  $J \sim \omega^4$ . Крім того, густина потоку випромінювання обернено пропорційна квадрату відстані між джерелом та приймачем електромагнітних

хвиль:  $J \sim \frac{1}{R^2}$ .

**ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ.** Результати дослідів з електромагнітними хвилями підтвердили, що їхні властивості схожі на властивості механічних хвиль: в однорідному середовищі вони поширюються рівномірно і прямолінійно; можуть відбиватися від поверхні твердих тіл (провідників та діелектриків) відповідно до законів відбивання; заломлюватися відповідно до законів заломлення; огинати перешкоди (дифракція), інтерферувати, поляризуватися й поглинатися. Проте, на відміну від механічних, електромагнітні хвилі можуть поширюватися у вакуумі.

Електромагнітні хвилі поділяють на декілька діапазонів за певними фізичними властивостями (табл. 19.1).

Таблиця 19.1

Класифікація електромагнітних хвиль

Види випромінювання	Інтервал частот, Гц	Інтервал довжин хвиль у вакуумі, м	Джерела випромінювання, галузь застосування
Низькочастотні хвилі	$< 3 \cdot 10^2$	$> 1 \cdot 10^6$	Високовольтні ЛЕП, генератори змінного струму, електричні машини
Радіохвилі (вбирає діапазони: довгі, середні, короткі, ультракороткі, мікрохвилі)	$3 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^{-3}$	Радіозв'язок, телебачення, радіолокація, мікрохвильові печі, медицина (магнетрон)
Інфрачервоне випромінювання	$1 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-6}$	Всі тіла, Сонце (52 % його випромінювання)
Видиме випромінювання	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-7}$	Сонце, лампи, лазери
Ультрафіолетове випромінювання	$3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	Сонце, електрична дуга, струм через пари ртуті
Рентгенівське випромінювання	$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-12}$	Рентгенівська трубка (гальмування швидких електронів), небесні тіла
Гамма-випромінювання	$3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{22}$	$1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-14}$	Космічне випромінювання, радіоактивний розпад

Спектр електромагнітного випромінювання зручно зображувати у вигляді шкали електромагнітних хвиль.

**ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ.** Електромагнітні хвилі широко застосовують у всіх галузях народного господарства. Наприклад, ультракороткі хвилі ( $10^{-4} \text{ м} \leq \lambda \leq 10 \text{ м}$ ) використовують у радіолокації для виявлення різних предметів і вимірювання відстані до них за допомогою радіохвиль. В основу радіолокації покладено властивість елек-

тромагнітних хвиль відбиватися від перешкод. Відстань  $l$  до предмета, що відбив радіохвилі, дорівнює:

$$l = \frac{ct}{2},$$

де  $c$  — швидкість поширення радіосигналу ( $3 \cdot 10^8$  м/с);  $t$  — час проходження електромагнітних хвиль у прямому і зворотному напрямках.

Електромагнітні хвилі широко використовують для здійснення радіотелефонного зв'язку — передавання розмови чи музики. **Принципи радіозв'язку** базується на тому, що для передачі звуку низькочастотні коливання **модують** (перетворюють) у високочастотні, тобто змінний електричний струм високої частоти. Змінний струм надходить до антени передавача й спричинює появу в просторі навколо антени електромагнітних хвиль високої частоти. Коли хвилі досягають антени приймача, вони індукують у ній змінний струм такої ж частоти, на якій працює передавач. Після цього відбувається **детектування** сигналу (виділення низькочастотних коливань з високочастотних). Після цього електромагнітні коливання підсилюються і подаються на гучномовець, який перетворює електромагнітні коливання в звукові.

Одним із видів радіотелефонного зв'язку є стільниковий. Особливість стільникового зв'язку полягає в тому, що зона покриття ділиться на «стільники», що визначаються зонами покриття окремих базових станцій. Стільники частково перекриваються й разом утворюють мережу. На ідеальній (рівній і без забудови) поверхні зона покриття однієї базової станції являє собою коло, а складена з таких зон мережа має вигляд шестикутників (бджолиних стільників).

Основні складові стільникової мережі — це стільникові телефони і базові станції. Базові станції зазвичай розташовують на дахах будинків і окремих вежах. Увімкнений стільниковий телефон прослуховує радіоефір, шукаючи сигнал базової станції. Після цього телефон посилає станції свій унікальний ідентифікаційний код. Телефон і станція підтримують постійний радіоконтакт, періодично обмінюючись пакетами даних.

Стільникові мережі різних операторів з'єднані одна з одною, а також зі стаціонарною телефонною мережею. Це дає змогу абонентам одного оператора робити дзвінки абонентам іншого оператора, з мобільних телефонів на стаціонарні й зі стаціонарних на мобільні.

За допомогою радіохвиль передають на відстань не тільки звукові сигнали, а й зображення предмета. Телевізійні передачі ведуть у діапазоні 50—230 МГц. У цьому діапазоні електромагнітні хвилі поширюються майже в межах прямої видимості. Тому для здійснення зв'язку будують високі антени, використовують антени-ретранслятори та штучні супутники Землі.

**Супутникове телебачення** — це система передачі телевізійного сигналу від передавального центру до споживача через штучний супутник Землі, розташований на геостаціонарній навколосемній орбіті над екватором.

Окрім Wi-Fi (рис. 19.3), існує швидка бездротова система комунікації Li-Fi за допомогою спеціальних світлодіодів, яка обіцяє стати дешевшим і енергоефективним методом передавання даних, оскільки світлодіоди спо-



**Рис. 19.3.** Бездротова система комунікації

живають малу кількість енергії. Крім того, спектр видимого світла, в 10 тисяч разів ширший, ніж спектр радіовипромінювання. Потенційно світло може забезпечити практично необмежену широту каналу передавання даних, а відповідно, і ємність мережі.

Недоліком традиційних Wi-Fi-роутерів є те, що сигнал слабшає з віддаленням від передавача, у приміщеннях з'являються зони, де зв'язок стає нестабільним або зовсім переривається. Крім того, для технології Li-Fi не характерні такі недоліки, як зниження надійності сигналу за вели-

кої кількості споживачів та значного обсягу трафіку. Найпростіше передавання даних у технології Li-Fi може здійснюватися вмиканням і вимиканням світлодіода. Оскільки зміна станів відбувається менше ніж за 1 мкс, то для людського ока світлодіод буде здаватися постійно увімкнутим. Отже, технологія Li-Fi передбачає одночасне використання оптичного носія для передавання даних та освітлення.

### **! Головне в цьому параграфі**

Навколо електричних зарядів утворюється особливий вид матерії, через який відбувається електромагнітна взаємодія, — електромагнітне поле. Поширення змінного електромагнітного поля в просторі з плином часу називають електромагнітною хвилею.

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Що називають електромагнітним полем? Чи можуть електричні й магнітні поля існувати відокремлено одне від одного? 2. Що називають електромагнітною хвилею? Що є джерелом електромагнітних хвиль? 3. Як орієнтовані вектори  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{v}$  один відносно одного в електромагнітній хвилі? 4. Яка швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі та повітрі? 5. Назвіть основні властивості електромагнітних хвиль? 6. Як залежить середня потужність випромінювання від частоти коливань заряду? 7. Що називають радіолокацією? 8. Порівняйте технології бездротового зв'язку Wi-Fi та Li-Fi.

### **Вправа до § 19**

1. Найменша відстань від Землі до Сатурна 1,2 Тм. Через який мінімальний інтервал часу можна одержати інформацію-відповідь з космічного корабля, що перебуває в районі Сатурна, на радіосигнал, надісланий із Землі?
2. На якій відстані від антени радіолокатора перебуває об'єкт, якщо відбитий від нього радіосигнал повернувся назад через 200 мкс?

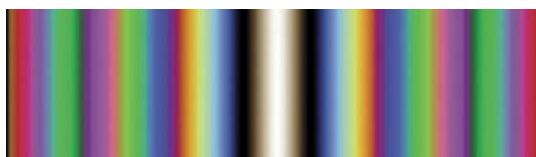
3. Висота випромінюючої антени телецентру 300 м над рівнем землі, а висота приймальної антени телевізійного приймача 10 м. На яку відстань можна віддалити телевізійний приймач від випромінюючої антени, щоб упевнено приймати телепередачі?
4. Якою може бути максимальна кількість імпульсів, що їх випускає радіолокатор за 1 с, під час розвідування цілі, яка перебуває на відстані 30 км від нього?

## § 20. Розвиток поглядів на природу світла. Основні фотометричні величини та їх вимірювання

*Опрацювавши цей параграф, ви ознайомитеся з основами електромагнітної теорії світла, дізнаєтеся про види його джерел та приймачів, основні фотометричні величини та їх вимірювання.*

Розвиток поглядів на природу світла. Над питаннями зорового сприйняття замислювалися люди з давніх-давен. Пропоновані давніми вченими пояснення були досить наївними. Наприклад, давні греки висували гіпотезу про особливий невидимий флюїд, що випускається очима і, ніби щупальцями, «обмацує» предмет, надаючи зорове відчуття про нього. Очі сліпого позбавлені можливості випускати такий флюїд, тому він не може бачити. Багато різних гіпотез та праць було присвячено поясненню природи, особливостям його поширення та сприйняття, наявності кольорів тощо.

**Пригадайте.** Кожен бачив, як світло від Сонця, проходячи крізь хмари, поширювалося вздовж прямих ліній. Лінію, вздовж якої поширюється світлова енергія називають променем.



**Рис. 20.1.** Дифракція світла на щілині

Проте в 1665 р. італійський священик Ф. Грімальді помітив, що з проходженням світла через невелику перешкоду, наприклад, екран з вузькою щілиною, світло відхиляється від прямолінійного напрямку поширення. Пізніше це явище назвали дифракцією світла (рис. 20.1).

У 1678 р. голландський астроном і фізик Християн Гюйгенс висунув хвильову теорію світла, відповідно до якої світло — це хвилі, що поширюються в особливому гіпотетичному середовищі — ефірі, який заповнює увесь простір і проникає всередину всіх тіл. Ця теорія добре пояснювала перетинання світлових потоків, коли вони вільно проходять один крізь одного, не здійснюючи взаємного впливу, так само, як будь-яка кількість звукових хвиль може одночасно поширюватися в повітрі, не перешкоджаючи одна одній. Музичні інструменти в оркестрі створюють звукові хвилі. Слухаючи музику, ми здатні не тільки сприймати їх, а й відрізнити один звук від іншого.

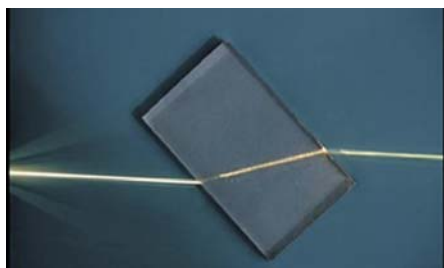


У 1704 р. одним із перших, хто висунув послідовну теорію світла, за-сновану на спостереженні та експерименті, був Ісак Ньютон. Відповідно до його теорії світло — це потік частинок, корпускул, що рухаються від джерела в усі боки прямолінійно у вільному просторі за інерцією з постійною швидкістю. Якщо ж на шляху світла трапляється перешкода, то під час взаємодії з нею світлові частинки змінюють свій імпульс.

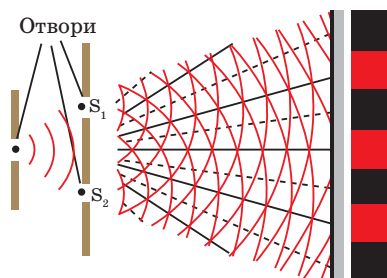
Теорія Ньютоні пояснювала прямолінійне поширення світла, утво-рення за предметами різких тіней. Але перетинання світлових потоків вона пояснити не могла. Адже ці світлові гіпотетичні частинки повинні зіштовхуватися. Крім того, з позицій корпускулярної теорії досить про-блематичним було пояснення явища заломлення світла (рис. 20.2). Разом з тим хвильова теорія пояснювала факт зменшення швидкості світла вна-слідок його переходу з вакууму в середовище.

Обидві теорії тривалий час існували паралельно. Незважаючи на ва-гомі успіхи механіки у вивченні багатьох фізичних явищ, за допомогою механічних уявлень не вдавалося підійти до розкриття таємниці природи світла. Крім того, відповідь на це питання ускладнювалася наявністю у світла властивостей, яких не мають інші фізичні об'єкти: світло не має розмірів, форми, якогось певного положення в просторі.

Така невизначеність у трактуванні природи світла тривала до другої половини XIX століття. За цей час було відкрито явище інтерференції світла, яке підтверджувало його хвильову природу. Під час інтерференції світла на екрані спостерігалася сукупність світлих і темних ліній, тобто ділянок, де відбувалося його посилення або послаблення (рис. 20.3).



**Рис. 20.2.**  
Заломлення світла



**Рис. 20.3.** Явище інтерференції червоного світла

Виявляється, що перебіг явища інтерференції світла подібний до того, як дві хвилі на поверхні води, зустрівшись в одному місці гребенями, посилюють збурення поверхні, а коли гребінь однієї хвилі стикається із западиною іншої, то поверхня води в цьому місці не збурюється.

У 1865 р. англійський фізик Джеймс Максвел опублікував теорію електромагнетизму. В одному з висновків цієї теорії на основі рівності швидкостей електромагнітних хвиль і світла *Максвел висловив припущення про електромагнітну природу світла і показав, що світло є окремим випадком електромагнітних хвиль.*

Але на початку XX ст. уявлення про природу світла почали докорінно змінюватися. Несподівано з'ясувалося, що корпускулярна теорія має певні підстави. У 1905 р. А. Ейнштейн припустив, що «однорідне світло

складається із зерен енергії — «світлових квантів», які поширюються в порожньому просторі зі швидкістю світла».

З'ясувалося, що під час випромінювання і поглинання світло поводитьсь подібно до потоку частинок, які дістали назву фотонів. У процесі ж поширення світла виявляються його хвильові властивості.

**Прояв у поведінці одного і того самого об'єкта залежно від умов експерименту як корпускулярних, так і хвильових властивостей називають корпускулярно-хвильовим дуалізмом.**

**ДЖЕРЕЛА СВІТЛА.** У курсі фізики основної школи ви вже ознайомилися з поняттями «джерела та приймач світла».

**Пригадайте.** Джерелами світла називають природні або штучні тіла, що перетворюють різні види енергії в світлову.

**Приймачами світла** називають тіла, в яких енергія оптичного випромінювання перетворюється на інші види енергії.

Електромагнітні хвилі виникають під час прискореного руху заряджених частинок. Елементарні частинки, що входять до складу атома, переходячи зі збудженого стану в основний, випромінюють світло. При випромінюванні атоми втрачають енергію, тому безперервне випромінювання можливе лише тоді, коли їхня енергія поповнюється ззовні. Залежно від того, як це відбувається, розрізняють: *теплове випромінювання* (Сонце, зірки, електрична лампочка), *електролюмінесценцію* (північне сяйво, свічення рекламних трубок), *катодолімінесценцію* (свічення екранів електронно-променевих трубок, рентгенівська лампа), *хемілюмінесценцію* (свічення шматочків трухлого дерева, комах (наприклад, світлячка), ділянок тіла глибинних риб тощо), *фотолімінесценцію* (тіла під дією опромінювання самі починають випромінювати, наприклад фосфор).

**ОСНОВНІ ФОТОМЕТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ВИМІРЮВАННЯ.** Світло, як і всі інші хвилі, переносить енергію. Розділ оптики, який вивчає енергетичні характеристики випромінювання та способи їх вимірювання, називають *фотометрією*. Енергетичними, або фотометричними, характеристиками світла є світловий потік, сила світла та освітленість.

**Світловий потік, або потужність видимого випромінювання, чисельно дорівнює енергії, яка переноситься світлом, що проходить через деяку поверхню за одиницю часу.**

Відповідно, світловий потік  $\Phi$ , визначається формулою:

$$\Phi = \frac{W}{t},$$

де  $W$  — оцінювана за зоровим відчуттям світлова енергія, що падає на певну поверхню;  $t$  — час падіння світлової енергії на ту поверхню.

Одиницею світлового потоку в СІ є *люмен* (лм),  $[\Phi] = \text{лм}$ .

Деякі джерела світла випромінюють світло рівномірно в усі боки, наприклад Сонце, а от прожектор чи ліхтарик випромінюють світло в певному напрямку. Для оцінки просторового розподілу світлового потоку, що випромінюється джерелом світла, застосовують таку фізичну величину, як сила світла. Її позначають літерою  $I$ .

**Сила світла — фізична величина, яка характеризує світловий потік у певному напрямку.**

Якщо джерело випромінює видиме світло рівномірно в усі боки, то сила світла обчислюється за формулою:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi},$$

де  $\Phi$  — світловий потік,  $\pi = 3,14$ .

Одиницею сили світла в СІ є *кандела* (1 кд).

Коли ми читаємо книгу, нас цікавить не вся енергія світла, що поширюється в певному напрямі, а тільки та його частина, що потрапляє на сторінку книги. Для кількісної оцінки освітлення поверхні, на яку потрапляє світловий потік, існує фізична величина — освітленість. Її позначають літерою  $E$ .

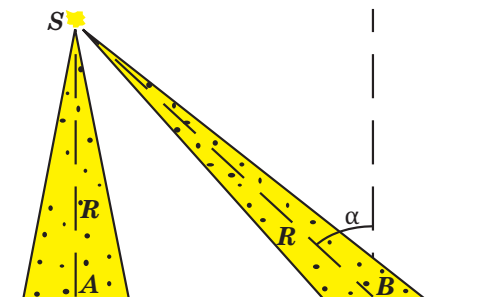
**Освітленість показує, яка енергія потрапляє за 1 с на поверхню площею  $1 \text{ м}^2$  й чисельно дорівнює відношенню світлового потоку до площі освітленої поверхні:**

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Одиницею освітленості в системі СІ є люкс (лк). Освітленість в один люкс — це освітленість, що створена світловим потоком в один люмен, який рівномірно розподілений на площі в один квадратний метр. Зазвичай у класі на шкільній парті й дошці освітленість має бути не менша за 75—100 лк. Під прямими променями Сонця в середніх широтах освітленість може досягати 100 000 лк, а в похмурий день на відкритому місці — 1000 лк. У приміщенні в похмурий день освітленість біля вікна дорівнює 60—100 лк. Повний Місяць створює освітленість на відкритому місці 0,2 лк, а зоряне небо (без Місяця) — 0,0003 лк.

Освітленість поверхні залежить від її відстані до джерела —  $R$ , кута падіння променя світла на поверхню —  $\alpha$ , сили світла —  $I$  (рис. 20.4):

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha.$$



**Рис. 20.4.** Освітленість поверхні, створювана точковим джерелом, коли світло падає перпендикулярно поверхні (точка А) та під кутом  $\alpha$  (точка В).

Якщо світло падає перпендикулярно до поверхні, то  $\alpha = 0$ , й освітленість поверхні визначається формулою:

$$E = \frac{I}{R^2}.$$

Отже, найбільшого значення освітленість набуває коли світло падає на неї перпендикулярно.

Якщо джерел декілька, то результуюча освітленість дорівнює сумі освітленостей, створюваних кожним окремим джерелом.

Вибір правильного освітлення дуже важливий для роботи, навчання й відпочинку. Для комфортного освітлення істотно не тільки значення освітленості, а й те, які лампи використовують, якого кольору стіни і стеля. Наприклад, очі дуже втомлюються від прямого світла, тому бажано використовувати абажури. Ідеальним варіантом освітлення приміщення вважають такий, коли прямого світла взагалі немає: світло ламп спрямовано на світлу стелю або стіни. Тоді світло, відбите від великої площі стелі, рівномірно й м'яко освітлює приміщення.

Освітленість книжкової сторінки повинна бути не менша 100 лк. Приблизно таку освітленість дає лампа розжарювання потужністю 60 Вт, розташована на відстані близько 70 см від книжки, коли промені світла перпендикулярні сторінці. Але якщо промінь падає на сторінку під кутом  $45^\circ$ , її освітленість зменшується майже в півтора рази. Тому для освітлення поверхні письмового стола треба використовувати або лампу розжарювання потужністю 75 Вт, або лампи інших типів, що дають таку саму освітленість.

### ! Головне в цьому параграфі

Світло є окремим випадком електромагнітних хвиль. Світлу властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм: під час випромінювання і поглинання світло поводить подібно до потоку частинок, у процесі ж поширення світла виявляються його хвильові властивості.

Світло має енергію. Енергетичними або фотометричними характеристиками світла є світловий потік, сила світла та освітленість.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що характеризує фізична величина «сила світла»: джерело світла чи освітлювальну поверхню? 2. Що характеризує фізична величина «освітленість»: джерело світла чи поверхню, яка освітлюється? 3. Як залежить освітленість від кута падіння світла? 4. Для чого використовують абажури? 5. Чому взимку Сонце світить, але не гріє?

### Вправа до § 20

1. Що називають фотометрією?
  - а) Розділ оптики, у якому розглядаються температурні властивості світла;
  - б) Розділ оптики, у якому розглядаються енергетичні характеристики світла в процесах його випромінювання, поширення та взаємодії із середовищем;
  - в) Розділ оптики, у якому розглядаються процеси взаємодії світла із середовищем.

2. Сила світла — це:  
**а)** фізична величина, яка характеризує світіння джерела світла в певному напрямку;  
**б)** фізична величина, що чисельно дорівнює потужності джерела світла;  
**в)** фізична величина, що визначається кількістю світлової енергії, що падає на поверхню тіла.
3. Освітленість — це:  
**а)** фізична величина, яка характеризує джерело світла;  
**б)** фізична величина, яка показує скільки світлової енергії падає на поверхню тіла;  
**в)** фізична величина, що характеризує світіння джерела світла в певному напрямку.
4. За якою формулою обчислюють освітленість поверхні тіла, якщо напрям поширення променів світла перпендикулярний до цієї поверхні?  
**а)**  $E = I \cdot R^2$    **б)**  $E = I / R$    **в)**  $E = I / R^2$
5. Одиниця сили світла у СІ  
**а)** кандела (кд)   **б)** люкс (лк)   **в)** люмен (лм)
6. Якщо збільшити у 3 рази відстань від точкового джерела світла до освітленої поверхні, то освітленість:  
**а)** збільшиться у 3 рази; **б)** збільшиться у 9 разів; **в)** зменшиться у 9 разів.
7. На кругле матове скло діаметром 0,45 м падає світловий потік 120 лм. Визначте, яка освітленість цього скла.
8. Обчисліть освітленість поверхні, що знаходиться на відстані 1 м від джерела, якщо сила світла джерела 1 кд і промені падають на поверхню перпендикулярно.
9. Яку максимальну освітленість дає лампа силою світла 100 кд на відстані 5 м?
10. На стовпі на висоті 3 м від лавки висить лампа розжарювання, потужність якої 500Вт. Вважаючи лампу точковим джерелом світла, визначте освітленість тієї частини лавки, яка розміщена безпосередньо під лампою. Що необхідно зробити, аби зменшити цю освітленість?
11. Під час друкування фотознімка негатив освітлюють впродовж 3 с лампочкою сила світла якої 15 кд з відстані 50 см. Визначте час, впродовж якого необхідно освітлювати негатив лампочкою з силою світла 60 кд з відстані 2 м, щоб одержати відбиток з таким же ступенем почорніння, як і в першому випадку.

## § 21. Світло як електромагнітна хвиля

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтесь про явища, пов'язані з хвильовою природою світла: накладання світлових хвиль, дисперсію, дифракцією та поляризацією світла й застосуванням цих явищ у науці й техніці.*

**ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА.** Світлові хвилі випромінюються атомом. Під час випромінювання світла електрон в атомі переходить з вищого на нижчий енергетичний рівень (рис. 21.1). Електромагнітна хвиля, яка випромінюється при цьому, є *монохроматичною*, тобто має певну сталу частоту.

У вакуумі світлові хвилі різних довжин хвиль (частот) поширюються з однаковою швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Під час проходження світлом границі розподілу середовищ швидкість світлової хвилі змінюється, внаслідок чого відбувається явище заломлення. *Виявляється, кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі ( $v$ ).*

Виходячи із закону заломлення світла ( $\sin \beta = v \frac{\sin \alpha}{c}$ ), кожній монохроматичній хвилі відповідає певний кут заломлення  $\beta$  (рис. 21.2), а відповідно, і свій показник заломлення.

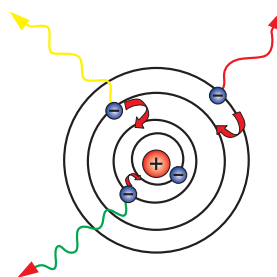
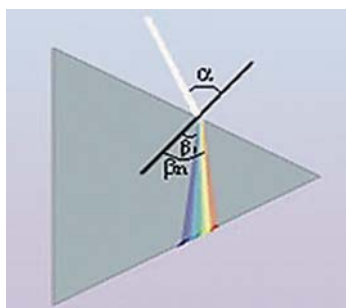


Рис. 21.1. Випромінювання світла атомом

**Пригадайте.** Подібні міркування вперше практично підтвердив у 1666 р. Ісаак Ньютон, досліджуючи проходження вузького пучка сонячного світла крізь скляну призму. В різнокольоровій смугі (спектрі) спостерігався поступовий перехід від червоного до фіолетового кольору. І. Ньютон виділив сім основних кольорів одержаного спектра: червоний, помаранчевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий.



$\alpha$  — кут падіння білого променя;  
 $\beta_1, \dots, \beta_n$  — кут заломлення монохроматичних променів

Рис. 21.2. Залежність кута заломлення монохроматичної хвилі від швидкості світла в середовищі

**Дисперсія світла** — залежність показника заломлення світла в середовищі від довжини або частоти світлової хвилі.

Під час переходу монохроматичної хвилі через межу розподілу середовищ частота цієї хвилі лишається сталою. Скориставшись зв'язком між швидкістю електромагнітної хвилі, її частотою і довжиною ( $c = \lambda \nu$ ), одержимо залежність між показником заломлення та довжиною хвилі:

$$n = \frac{\lambda_{\text{вакуум}}}{\lambda_{\text{речовина}}} = \frac{v}{v_{\text{речовина}}}.$$

Складною структурою білого світла можна пояснити велику різноманітність кольорів у природі. Якщо предмет, наприклад аркуш паперу, відбиває всі промені різних кольорів, то він здаватиметься білим. Трава і листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх компонентів падаючого білого світла вони відбивають лише зелені, поглинаючи решту. Якщо подивитись на траву крізь червоне скло, то трава здаватиметься майже чорною. Червоні промені мають більшу довжину хвилі й розсіюються в повітрі слабше, ніж промені іншого кольору, тому вони проходять на більші відстані, ніж інші. Як наслідок, сигнал небезпеки у світлофорі є червоним.

Відчуття того чи іншого кольору, яке виникає в очах спостерігача, залежить від частоти світлової хвилі, а не від її довжини. Оскільки 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.

Розглянемо ще одне явище, яке можна пояснити хвильовими властивостями.

**ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА.** Світлова хвиля є поперечною. У пучку природних світлових хвиль коливання вектора напруженості відбувається в усіх напрямках відносно напрямку поширення світлового пучка.

*Хвиля, в якій вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$  та, відповідно, вектор індукції магнітного поля  $\vec{B}$ , коливаються тільки в одній площині, перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, є плоскополяризованою.*

Природне світло є неполяризованим. Той факт, що в неполяризованому світлі коливання векторів напруженості електричного поля та індукції магнітного поля відбувається в різних площинах, можна пояснити і великою кількістю атомів у речовині, і тим, що кожен із них випромінює свою поляризовану хвилю.

Отримати плоскополяризовану світлову хвилю можна за допомогою поляроїда, наприклад, кристала турмаліну, що завдяки своїй внутрішній будові пропускає хвилі, в яких коливання вектора напруженості відбуваються тільки в одній певній площині (рис. 21.3).

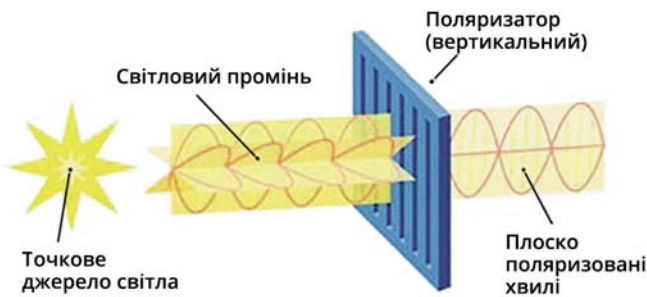


Рис. 21.3. Одержання плоскополяризованої хвилі



Розглянемо рис. 21.4. Якщо скористатися двома поляроїдами, то за умови паралельності їх площин поляризації яскравість свічки буде максимальною (рис. 21.4, а). Під час повороту одного поляроїда відносно іншого яскравість свічки зменшується (рис. 21.4, б). При розташуванні щілин (площин поляризації) взаємно перпендикулярно крізь другий поляроїд світло від свічки не проходить (рис. 21.4, в).

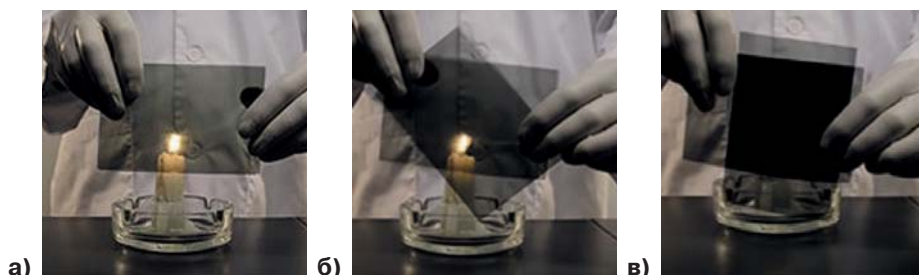


Рис. 21.4. Дослідження поляризації світла

Явище поляризації набуло широкого використання. Наприклад, поляризаційні окуляри, що стримують різкий спалах світла й можуть захистити очі під час зварювання металів. Поляризаційні окуляри, що створюють ілюзію об'ємності, використовують у стереокіно. Поляроїди також широко застосовують для зменшення відблиску від полірованих поверхонь та скла.

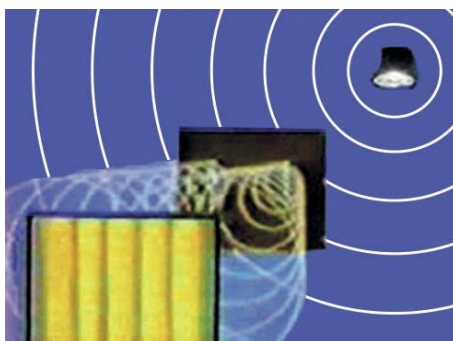


Рис. 21.5. Схема накладання світлових хвиль

**ИНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА.** Подібно до механічних хвиль світлові хвилі можуть взаємодіяти між собою. Взаємодія хвиль є загальною властивістю хвиль будь-якої природи. Доволі часто для характеристики явища інтерференції використовують таку парадоксальну фразу: світло плюс світло може давати темряву. Здавалося б, якщо до світла додати світло, то має бути ще світліше.

Звичайно, якщо посвітити спочатку одним світлодіодним ліхтариком на білий екран, а потім двома, то темряви ми не одержимо. Проте, якщо взяти аркуш цупкого картону, проколоти в ньому голкою два маленькі отвори на відстані до 1 мм і розташувати його на відстані 20—30 см перед екраном, то посвітивши на ці отвори одним із ліхтариків і трохи відрегулювавши відстань між ліхтариком та картоном, можна знайти положен-

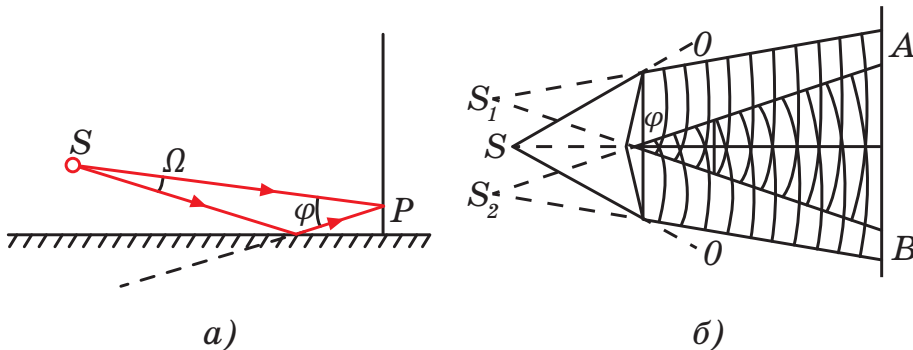
ня, коли на екрані світлі ділянки будуть межувати з темними (рис. 21.5). Отже, в одних ділянках простору світлові хвилі, накладаючись, підсилюють одна одну, в інших — послаблюють.

Явище накладання хвиль, внаслідок якого спостерігається стійке в часі підсилення або послаблення результируючих коливань у різних точках простору, називають *інтерференцією* (від лат. *inter* — взаємно та *ferio* — дію, ударяю). Стійка у часі інтерференційна картина може спостерігатися тільки під час накладання взаємопов'язаних хвильових коливань, які називають когерентними хвилями (від лат. *cohaerens* — той, що перебуває у зв'язку).

*Когерентні хвилі* — хвилі з однаковою частотою, поляризацією і сталою різницею фаз.

Світло випромінюється атомами речовини переривчасто, у вигляді окремих короткочасних імпульсів, які називають *цугами хвиль*. Тривалість випромінювання одного цуга  $10^{-8}$  с. За цей час світлова хвиля встигає поширитися на відстань 0,3—3 м. Переривчаста структура світлового випромінювання ускладнює спостереження явища інтерференції. Необхідно зробити так, щоб інтерферували хвилі одного й того ж цуга внаслідок розділення початкового променя світла на два.

З цією метою використовують спеціальні оптичні прилади, наприклад, дзеркала Ллойда, які розділяють світловий потік і спрямовують відбиті світлові промені в певну точку ( $P$ ) де вони інтерферують (рис. 21.6, а) та біпризму Френеля (рис. 21.6, б), в якій інтерферують промені, що заломлюються призмою.



**Рис. 21.6.** Способи розділення світлового потоку:  
а) дзеркала Ллойда; б) біпризма Френеля

Спробуємо з'ясувати умови, за яких у певних точках простору утворюється світла чи темна ділянка. Нехай світлові хвилі однаково поляризовані та мають амплітудні значення напруженості, відповідно,  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$ . Результируюче коливання має максимально можливе значення  $\vec{E}_m = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  у випадку запізнення хвилі з джерела  $S_2$  порівняно з хвилею від джерела  $S_1$  на час кратний періоду  $T$ . Це можливо за умови, коли різниця відстаней (різниця ходу хвиль  $\Delta d = d_2 - d_1$ ) від джерел  $S_1$  та  $S_2$  до точки  $M$  (рис. 21.7, а), буде дорівнювати:

$$\Delta d = m\lambda, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$$

Цю умову називають *умовою максимумів*.

Отже, *максимальна результуюча інтенсивність під час інтерференції когерентних хвиль у певній точці простору відбувається за умови запізнення хвиль одна відносно одної на час, кратний періоду цих коливань* (рис. 21.7, б):

$$\Delta t_{\max} = m \cdot T, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

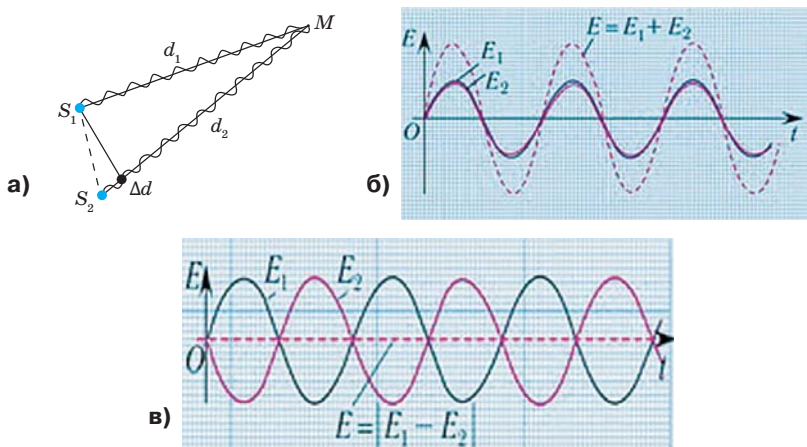


Рис. 21.7. Накладання світлових хвиль

Коли ж у точці  $M$  результат додавання векторів напруженості  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  дорівнює нулю, тобто світлові хвилі взаємознищуються, спостерігається мінімум освітленості — темна ділянка. Це можливо за умови, коли різниця відстаней від джерел світла до точки  $M$  буде:

$$\Delta d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Цю умову називають *умовою мінімумів*.

*Мінімальна результуюча інтенсивність під час інтерференції когерентних хвиль у певній точці простору відбувається під час запізнення хвиль одна відносно одної на час, що дорівнює непарному числу півперіодів цих коливань* (рис. 21.7, в):

$$\Delta t_{\min} = (2m + 1)T/2, \text{ де } m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Варто зазначити, що в усіх інших точках накладання хвиль амплітуда результуючих коливань має проміжне значення  $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$ . Повна енергія світлових хвиль, що потрапляють на екран, не залежить від того, чи є світлові хвилі когерентними. Якщо джерела світла є некогерентними, енергія світла розподіляється рівномірно по екрану. За умови їх когерентності енергія концентрується в місцях максимумів, при цьому вона не зникає, а лише перерозподіляється, не змінюючи свого середнього значення. Отже, суперечність із законом збереження енергії не виникає.



Вітчизняні вчені також зробили внесок у дослідження явища інтерференції світла. Один з найвидатніших українських фізиків ХХ століття Олександр Смакула, винахід якого під назвою «просвітлення оптики» — те, чим користується нині весь світ, — наука визнала епохальним відкриттям.

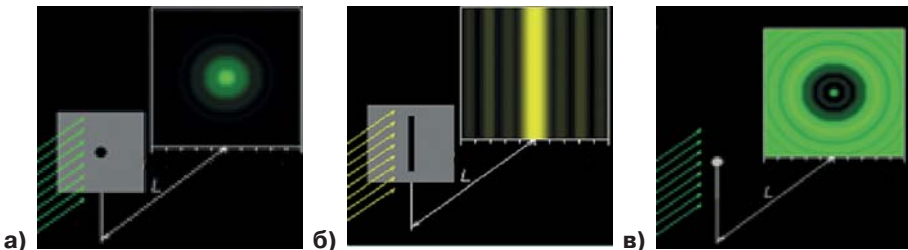
Українські науковці беруть активну участь у дослідженнях голографічних зображень. Американський проєкт Bleep, заснований українцями Богданом Шевчуком та Олегом Коханом, розробляє перший у світі гаджет для показу голограм, орієнтований на масовий ринок.

Явище інтерференції світла використовується під час створення голографічних зображень. Голографія — одержання об'ємних зображень предметів на фотопластинці за допомогою когерентного випромінювання лазера.

**ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА.** Ще одним явищем, яке доводить хвильові властивості світла, є його дифракція. *Дифракцією називають явище відхилення світла від прямолінійного напрямку поширення під час проходження поблизу перешкод.* Як показує досвід, світло може заходити в ділянку геометричної тіні. Якщо на шляху поширення паралельного світлового пучка розташувати непрозорий екран або кульку (диск) з отвором, то на другому екрані, що розміщений на досить великій відстані від перешкоди, з'являється дифракційна картина — система світлих і темних кілець, що по чергово змінюються (рис. 21.8, а, в). Якщо ж отвір лінійний, то на екрані утвориться система паралельних дифракційних смуг (рис. 21.8, б).

Спостерігати явище дифракції світла можна лише за певних умов. Теорія дифракції світла була розроблена в 1816 р. французьким вченим Огюстеном Френелем, який розвинув ідеї Гюйгенса.

Відповідно до принципу, сформульованого Френелем (принцип Гюйгенса — Френеля) *збудження в кожній точці простору є результатом інтерференції когерентних вторинних хвиль, які випромінює кожна точка середовища, до якої дісталася хвиля.*



**Рис. 21.8.** Дифракція світла: а) на отворі; б) на щілині; в) на кульці

Відповідно до принципу Гюйгенса — Френеля, хвиля довжиною  $\lambda$ , стикаючись з перешкодою (неоднорідностями) розміром  $d$ , що міститься на відстані  $L$  від джерела за умови  $d \leq \sqrt{L\lambda}$  «ділиться» на декілька когерент-

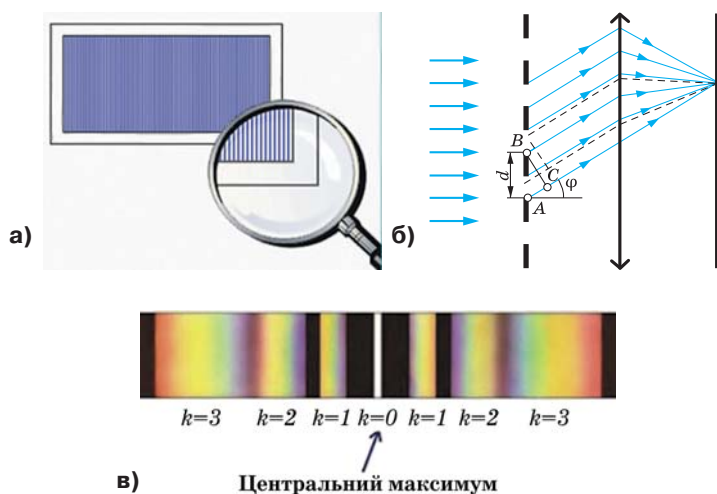
них хвиль, які в результаті накладання (інтерференції) утворюють стійку в часі картину розподілу максимумів і мінімумів коливань.

Під час спостереження явища дифракції білого світла його складові — монохроматичні хвилі, стикаючись із поверхнею перешкоди, відхиляються від початкового напрямку на певні кути і створюють у відповідних місцях ділянки максимумів і мінімумів результуючих коливань. Тому під час дифракції білого світла можна спостерігати сукупність різнокольорових зон.

Відповідно до принципу Гюйгенса — Френеля *кожна точка перешкоди, до якої дісталася хвиля, випромінює вторинні хвилі, які є когерентними, тому отримані внаслідок дифракції хвилі інтерферують між собою*. На явищі дифракції ґрунтується будова оптичного приладу — дифракційної ґратки, що є сукупністю прозорих і непрозорих проміжків, тобто сукупність щілин, розділених непрозорими проміжками (рис. 21.9, а). Кількість «штрихів» на 1 мм може становити 100 000. Величину, що дорівнює сумі ширини прозорого і непрозорого проміжку, називають періодом дифракційної ґратки  $d$ .

Нехай на дифракційну ґратку перпендикулярно до її площини падає монохроматичне світло (рис. 21.9, б). Кожна щілина є джерелом вторинних когерентних хвиль. У результаті накладання хвиль, створюваних щілинами, спостерігається інтерференційна картина. Головні максимуми будуть спостерігатися під кутами  $\phi$ , що задовольняють умову:

$$d \cdot \sin \phi = k\lambda, \text{ де } k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$



**Рис. 21.9.** Дифракційна ґратка:

- а) дифракційна ґратка є сукупністю прозорих і непрозорих проміжків;
- б) утворення дифракційного максимуму;
- в) дифракційний спектр

З рис. 21.9, в видно, що величина  $k$  визначає порядок спектра (номер спектральної лінії, починаючи від центрального максимуму). Виходячи зі сказаного, дифракційну ґратку можна використовувати для вимірювання довжини світлової хвилі.

**! Головне в цьому параграфі**

Підтвердженням хвильової природи світла є явища: інтерференції (накладання світлових хвиль), дисперсії (залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі), дифракції (відхилення світла від прямолінійного напрямку поширення під час проходження поблизу перешкод) та поляризації; ці явища мають широке застосування в науці й техніці.

**? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. У зошиті написано червоним кольором оцінку «12». Є два скельця — зелене і червоне. Крізь яке скельце треба дивитися, щоб побачити цю оцінку? 2. Чому тільки досить вузький світловий пучок після проходження крізь призму дає спектр, а в широкого пучка забарвленими виявляються лише краї? 3. Яке світло називають поляризованим? 4. Яке світло називають природним? 5. За допомогою якого досліду можна довести поперечність світлових хвиль? 6. Як довести, що світло, відбите від поверхні води, є частково поляризованим? 7. Чим пояснити розкладання світла на кольорові промені? 8. Чому ми бачимо предмети різнокольоровими?

**Вправа до § 21**

- Вкажіть означення дисперсії:  
**А.** Накладання когерентних хвиль.  
**Б.** Розкладання світла в спектр під час заломлення.  
**В.** Перетворення природного світла в плоскополяризоване.  
**Г.** Огинання хвилею перешкод.
- Яке явище безпосередньо пов'язане з поперечністю світлових хвиль?  
**А.** Дисперсія. **Б.** Інтерференція. **В.** Дифракція. **Г.** Поляризація.
- Дві світлові хвилі є когерентними, якщо...  
**А.**  $v_1 = v_2$ . **Б.**  $\Delta\varphi = 0$ . **В.**  $\Delta\varphi = \text{const}$ . **Г.**  $v_1 = v_2$ ,  $\Delta\varphi = \text{const}$ .
- Можливості оптичних мікроскопів обмежені, внаслідок явища...  
**А.** поляризації; **Б.** дифракції; **В.** інтерференції; **Г.** дисперсії.
- Якби випромінювання Сонця було монохроматичним, наприклад червоним, то якими б здавалися різнокольорові тіла на Землі?  
**А.** червоними; **Б.** сірими і червоними; **В.** різнокольоровими; **Г.** чорними і червоними.
- Через дифракційну ґратку, що має 200 штрихів на міліметр, проходить монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі 750 нм. Визначте кут, під яким видно максимум першого порядку цієї хвилі.
- На дифракційну ґратку нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 610 нм. На екрані, розташованому на відстані 2 м від ґратки, відстань між другим і третім максимумами становить 8,7 см. Знайдіть період дифракційної ґратки.
- Довжина хвилі когерентних світлових хвиль від джерел А і В дорівнює 500 нм. Яким є результат інтерференції світла в точці відрізка АВ, розташованій на відстані 0,125 мкм від середини цього відрізка?
- Частота світлових коливань дорівнює  $4 \cdot 10^{14}$  Гц. Визначте довжину хвилі цього випромінювання в алмазі. Абсолютний показник заломлення алмазу 2,42.



## § 22. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової

*Опрацювавши цей параграф, ви дізнаєтесь про явища відбивання й заломлення світла на межі поділу середовищ, повне відбивання; використання цих явищ у волоконній оптиці, тонких лінзах, оптичних системах та оптичних приладах.*

**ЗАКони ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ.** Витоки вчення про явища відбивання та заломлення світла беруть початок у глибокій давнині. Ще в античні часи люди мали уявлення про незалежне поширення світлових променів. Вважається, що закони прямолінійного поширення світла в однорідному прозорому середовищі та дзеркального відбивання намагався сформулювати ще Евклід. У XVII ст. були винайдені корисні оптичні прилади: зорова труба, телескоп, мікроскоп. Процес їх створення супроводжувався інтенсивними дослідженнями основоположних законів. Французький математик та філософ Р. Декарт і голландський математик В. Снелль експериментально і теоретично вивчили закони поведінки світлових променів на границі розподілу двох середовищ. Ще й досі закони заломлення світлових променів на межі розподілу двох середовищ інколи називають законами Снелля, що засвідчує великий внесок вченого в цей розділ науки.

До середини XVII ст. були сформульовані всі основні закони поширення, відбивання і заломлення світла для однорідних середовищ, а в 1660 р. французький вчений П. Ферма сформулював принцип найменшого оптичного шляху, який є загальним законом поширення світла. Всі закони геометричної оптики є наслідками принципу Ферма. Пізніше стало відомо, що і принцип Ферма є окремим випадком ще більш загального принципу найменшої дії.

Головним об'єктом вивчення явищ поширення, відбивання та заломлення світла є суто геометричний образ — світловий промінь. *Під світловим променем будемо розуміти лінію, вздовж якої поширюється енергія світла.* Наближеною моделлю світлового променя є вузький світловий пучок з дуже малою розбіжністю і довжиною, яка значно більша за діаметр поперечного перетину пучка. Наприклад, промінь від лазерної указки, промінь від прожектора в нічному небі тощо.

**Пригадайте.** З курсу фізики основної школи ви вже знаєте, що світло в прозорому однорідному середовищі поширюється прямолінійно, а траєкторія променя не залежить від того, у прямому (рис. 22.1, а) або зворотному (рис. 22.1, б) напрямку поширюється промінь. Рухаючись у зворотному напрямку, промінь піде точно по тій же траєкторії, що і в прямому напрямку.

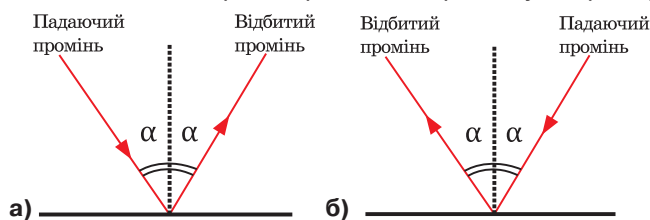


Рис. 22.1. Оборотність світлових променів

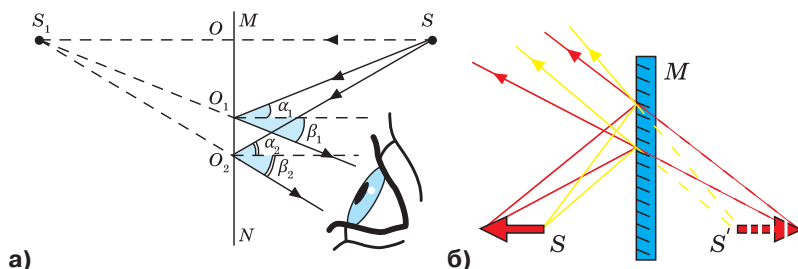


Ви також ознайомилися із законами відбивання світла:

- ▶ Кут падіння  $\alpha$  дорівнює куту відбивання  $\beta$ .
- ▶ Падаючий промінь, відбитий промінь та перпендикуляр, встановлений у точці падіння до поверхні відбивання, перебувають в одній площині.

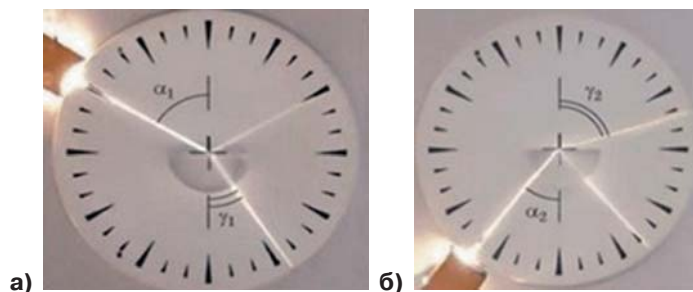
Для побудови зображення точки, одержаного за допомогою плоского дзеркала, обираємо два довільні промені. Зображення точки лежатиме в точці перетину продовжень відбитих променів (рис. 22.2, а).

Аналогічно будемо зображення предмета в плоскому дзеркалі. Для цього необхідно побудувати зображення декількох точок, наприклад, двох крайніх (рис. 22.2, б). Одержане зображення буде уявне (одержане перетином не променів, а їх продовжень), пряме, рівне за розмірами предмету та симетричне відносно площини дзеркала.



**Рис. 22.2.** Побудова зображення в дзеркалі:  
а) точкового джерела світла; б) предмета

На межі розподілу прозорих середовищ може спостерігатися явище не тільки відбивання, а й заломлення світла. Заломлення світла на межі розподілу середовищ відбувається тому, що швидкість світла при її перетині змінюється (рис. 22.3).



**Рис. 22.3.** Зв'язок між зміною швидкості світла ( $v$ ) та кутами падіння ( $\alpha$ ) і заломлення ( $\gamma$ ): а)  $v_1 > v_2$ ,  $\alpha_1 > \gamma_1$ ,  $n_2 > n_1$ ; б)  $v_1 < v_2$ ,  $\alpha_2 < \gamma_2$ ,  $n_1 > n_2$

Відповідно до законів заломлення:

1. Падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр, проведений до поверхні розподілу двох середовищ у точці падіння перебувають в одній площині.

2. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною сталою для двох даних середовищ, дорівнює відношенню швидкостей світла в цих середовищах і має назву «відносний показник заломлення світла»:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n.$$

*Абсолютний показник заломлення середовища — фізична величина, що показує, у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша, ніж у середовищі:*

$$n = \frac{c}{v}.$$

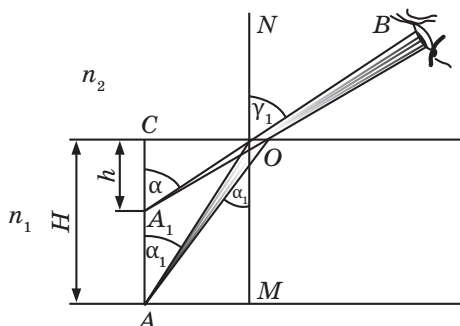
Це означає, що для будь-якого середовища  $n > 1$ .

Зведена формула закону заломлення світла

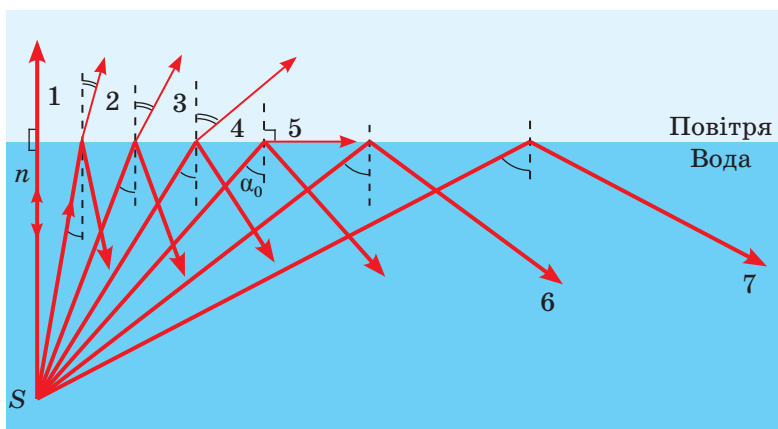
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Внаслідок явища заломлення світла уявна глибина водойми  $h$  здається нам у  $n$  разів меншою, ніж реальна  $H$  (рис. 22.4).

Під час переходу світлового променя з оптично більш густого середовища в оптично менш густе може відбуватися явище повного відбивання світла (рис. 22.5). Внаслідок збільшення кута падіння світлового променя збільшується і кут заломлення, разом із тим інтенсивність заломленого променя зменшується. З досягненням певного значення кута падіння  $\alpha_0$  промінь взагалі не перетинає границю розподілу середовищ, а кут заломлення становить  $90^\circ$ . Якщо кут падіння  $\alpha > \alpha_0$ , світло не переходить у друге середовище, тобто відбувається явище повного внутрішнього відбивання.



**Рис. 22.4.** Уявна глибина водойми менша, ніж справжня

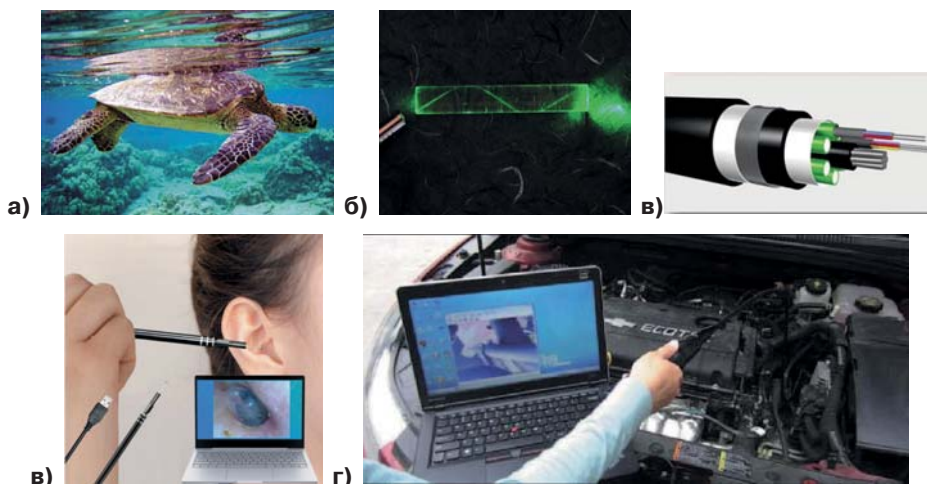


**Рис. 22.5.** Явище повного відбивання світла

*Явище, коли світло, поширюючись в більш густому середовищі, відбивається від границі розподілу з менш густим середовищем не заломлюється, а називають явищем повного відбивання.*

*Кутом повного внутрішнього відбивання називають кут падіння  $\alpha_0$ , при якому кут заломлення дорівнює  $90^\circ$ ,  $\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n}$ .*

Явище повного внутрішнього відбивання можна спостерігати в природі (рис. 22.6, а). Спостереження міражів також пояснюється явищем повного внутрішнього відбивання. Багаторазове відбивання від внутрішньої поверхні волокна (рис. 22.6, б) є основою принципу дії світловодів (рис. 22.6, в), які збільшують у мільйон разів обсяг переданої інформації. Передавання оптичної інформації на відстань за допомогою ендоскопів (рис. 22.6, г, д) використовують у техніці й медицині. Крім того, явище повного відбивання застосовується в біноклях, перископах, катафотах, засобах дорожнього руху тощо.



**Рис.22.6.** Явище повного відбивання в природі й техніці

**ЛІНЗИ.** Ви вже знаєте, що **лінза** — це прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, які заломлюють світлові промені. Існують два види лінз: опуклі та увігнуті.

Лінзу, в якій після заломлення паралельні промені збираються в одну точку, називають **збиральною** (рис. 22.7, а). Лінзу, що перетворює пучок паралельних променів на розбіжний, — **розсіювальною** (рис. 22.7, б).

**Пригадаймо** характерні промені лінзи (рис. 22.8): промінь, що проходить паралельно до головної оптичної осі лінзи (промінь 1 на рис. 22.8, а, 22.8, в); промінь, що проходить через головний фокус лінзи (промінь 2 на рис. 22.8, а, 22.8, в); промінь, який збігається з побічною віссю (промінь 3 на рис. 22.8, а, 22.8, в); промінь, що поширюється паралельно до побічної оптичної осі (рис. 22.8, б, 22.8, г).

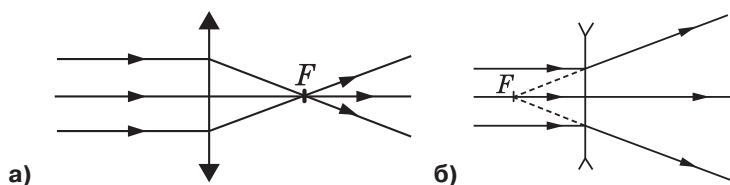


Рис. 22.7. Збиральна (а) і розсіювальна (б) лінзи

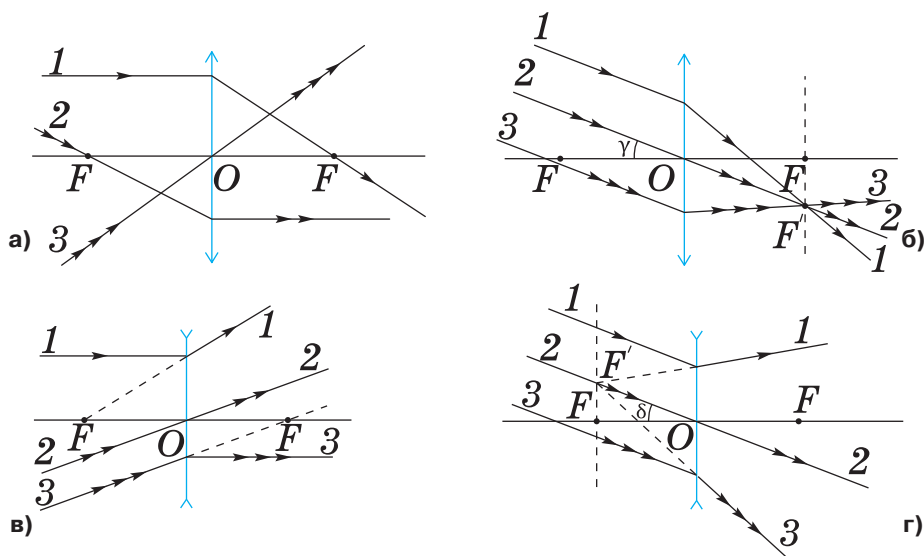
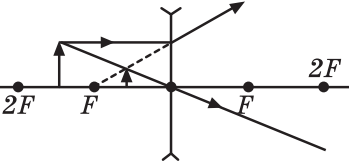


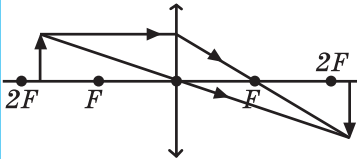
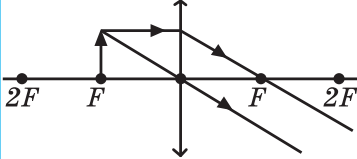
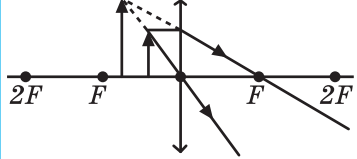
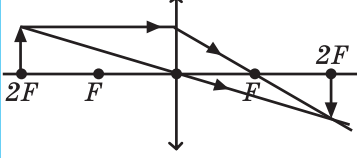
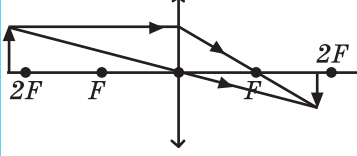
Рис. 22.8. Характерні промені лінзи

З допомогою характерних променів лінзи можна побудувати зображення предмета в ній. Розгляньте табл. 22.1 і пригадайте види зображень, які дають збиральна і розсіювальна лінзи.

Таблиця 22.1

## Види зображень у лінзах

№	Розміщення предмета	Побудова зображення розсіювальної лінзи	Характеристики зображення					
			Дійсне або уявне	Пряме або обернене	Збільшене або зменшене			
1	$F < d < 2F$		Уявне	Пряме	Зменшене			
2	$d = F$	Будується аналогічно						
3	$d < F$							
4	$d = 2F$							
5	$d > 2F$							

№	Розміщення предмета	Побудова зображення збиральної лінзи	Характеристики зображення		
			Дійсне або уявне	Пряме або обернене	Збільшене або зменшене
6	$F < d < 2F$		Дійсне	Обернене	Збільшене
7	$d = F$		Не існує		
8	$d < F$		Уявне	Пряме	Збільшене
9	$d = 2F$		Дійсне	Обернене	Рівне за розміром предмету
10	$d > 2F$		Дійсне	Обернене	Зменшене

Для розрахунків положення зображення предмета в лінзах та обчислень різних оптичних систем використовується формула тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

де  $F$  — фокусна відстань (відстань між оптичним центром та фокусом) лінзи;  $d$  — відстань від предмета до лінзи;  $f$  — відстань від зображення предмета до лінзи.

Величину, обернену фокусній відстані, називають оптичною силою лінзи:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Одиницею оптичної сили лінзи є діоптрія (дптр).

Діоптрія — оптична сила лінзи з фокусною відстанню 1 м.

При користуванні формулою тонкої лінзи слід пам'ятати, що для уявного зображення відстань  $f$  є від'ємною ( $f < 0$ ). Крім того, для розсіювальних лінз оптична сила  $D$  є також від'ємною величиною ( $D < 0$ ).

Ви вже знаєте, що людське око — це складна оптична система. Розмір зображення  $h$  предмета на сітківці визначається кутом зору, тобто кутом з вершиною в оптичному центрі ока, й утвореним променями, напрямленими на крайні точки предмета (рис. 22.9):

$$\varphi = \frac{H}{d} = \frac{h}{F}$$

де  $d$  — відстань від предмета до оптичного центра ока;  $H$  — розмір предмета.

Зі збільшенням кута зору розмір зображення на сітківці збільшується, тому збільшується кількість світлочутливих клітин сітківки, задіяних у створенні зображення, а відповідно, й обсяг зорової інформації про предмет.

Короткозора людина, розглядаючи предмет, наближає його до ока, збільшуючи кут зору, тому вона може розрізнити дрібні деталі навіть краще, ніж людина з нормальним зором. Далекозорій людині важко розрізнити дрібні деталі предмета, оскільки вона повинна віддаляти його від ока, а це зумовлює зменшення кута зору.

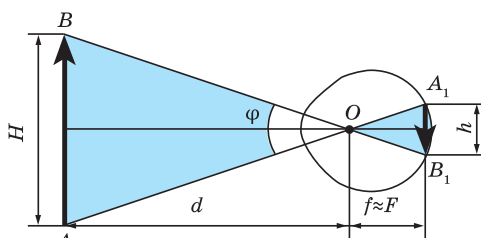


Рис. 22.9. Кут зору

### ! Головне в цьому параграфі

Геометрична оптика вивчає світлові явища, абстрагуючись від хвильової природи світла, оскільки довжина світлової хвилі значно менша, ніж тіла, що впливають на хід променів світла під час його прямолінійного поширення й утворення тіні та напівтіні, відбивання та заломлення. Тіла, які впливають на поширення променів, — це прозорі й непрозорі поверхні, дзеркала та лінзи. Основним поняттям геометричної оптики є світловий промінь. Поширення світлового променя відбувається відповідно до законів прямолінійного поширення, відбивання та заломлення світла. Геометрична оптика є науковою основою для побудови різноманітних оптичних приладів.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що називають світловим променем? 2. У чому полягає оборотність світлового променя? 3. Сформулюйте закони прямолінійного поширення світла; відбивання світла; заломлення світла. 4. Назвіть основні точки й лінії лінзи. 5. Які властивості променів, що проходять крізь збиральну й розсіювальну лінзи? 6. Дайте характеристику зображень у лінзах. 7. Запишіть формулу тонкої лінзи та поясніть величини, що входять в неї.

### Вправа до § 22

1. Першу згадку про заломлення світла можна знайти в працях давньогрецького філософа й вченого Арістотеля (384—322 р. до н. е.). Він ставив собі запитання: чому палиця у воді здається зламаною? А в одному з давньогрецьких трактатів описано такий дослід: «Потрібно стати так, щоб пласке кільце, покладене на дно посудини, сховалося за її кра-

ем. Потім, не змінюючи положення очей, налити в посудину воду. Промінь світла заломиться на поверхні води, і кільце стане видимим». Поясніть згадані явища.

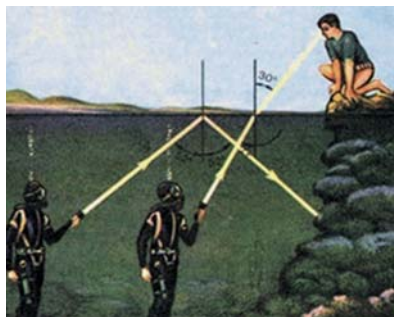


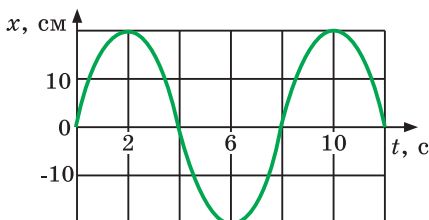
Рис. 1

2. Два аквалангіста намагаються подати світловий сигнал на берег (рис. 1). Поясніть, чому одному з них це не вдається зробити.
3. На який кут необхідно повернути дзеркало навколо осі, що проходить через точку падіння променя, щоб відбитий промінь повернувся на  $40^\circ$ ?
4. Промінь світла падає на поверхню води ( $n_v = 1,33$ ) під кутом  $45^\circ$ . Під яким кутом він має падати на поверхню скла ( $n_c = 1,5$ ), щоб кут заломлення був таким самим?
5. Хлопчик намагається влучити палицею у камінь, що лежить на дні струмка глибиною 50 см. Точно прицілившись, він кидає палицю під кутом  $45^\circ$  до поверхні води. На якій відстані від каменя вдариться об дно палиця?
6. Дівчинка стоїть на мосту й дивиться у воду. Їй здається, що глибина річки дорівнює 1,5 м. Визначте справжню глибину ріки в місті спостереження.
7. Людина стоїть на відстані 1 м від ліхтаря. На яку відстань вона відійшла від ліхтаря, якщо її тінь збільшилась удвічі?
8. Відстань між предметом та його зображенням 72 см. Збільшення лінзи дорівнює 3. Знайти фокусну відстань лінзи.
9. Короткозоре око людини розрізняє текст на відстані 10 см. Визначте оптичну силу окулярів, які необхідно носити людині з такою вадою зору. Вважайте, що для людини з нормальним зором відстань найкращого зору становить 25 см.

## ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ № 4

Розглянемо приклади задач на гармонічні коливання.

**Задача 1.** На рисунку подано залежність координати тіла, закріпленого на нитці, від часу. Визначте амплітуду, період і частоту коливань. Запишіть рівняння залежності координати тіла, проекції його швидкості та прискорення від часу. Чому дорівнюють амплітудні значення швидкості, прискорення та сили, що діє на тіло. Визначіть довжину нитки на якій закріплене тіло.



**Розв'язування:**

За допомогою графіка визначаємо, що амплітуда коливань  $x_m = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ . Проміжок часу, через який механічний рух повторюється, становить 8 с. Отже, період коливань  $T = 8 \text{ с}$ . Тоді частота коливань, яка є ве-



личиною, оберненою до періоду ( $\nu = \frac{1}{T}$ ) становить 0,128 Гц. Циклічна частота ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ) дорівнює  $\omega = 0,25\pi$  рад/с. Рівняння залежності координати від часу під час коливального руху має вигляд  $x = x_m \sin \omega t$  і в цьому випадку  $x = 0,2 \sin 0,25\pi t$ .

Для того, щоб одержати залежність швидкості від часу, потрібно взяти першу похідну від координати, тобто  $v_x = 0,05\pi \cos 0,25\pi t$ . Залежність проекції прискорення тіла від часу є першою похідною від швидкості  $a_x = -0,0125\pi^2 \sin 0,25\pi t$ . Амплітудні значення проекції швидкості та прискорення дорівнюють:

$$v_{x_m} = 0,05\pi \text{ м/с} = 0,16 \text{ м/с}; \quad a_{x_m} = 0,0125\pi^2 \text{ м/с}^2 = 0,125 \text{ м/с}^2.$$

Виходячи з другого закону Ньютона  $F_x = ma_x$ :

$$F_{x_m} = 0,1 \cdot 0,125 \text{ Н} = 12,5 \text{ мН}.$$

Скориставшись формулою періоду коливань математичного маятника  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ , визначимо довжину підвісу,  $l = \frac{T^2}{4\pi^2} g$ . Підставивши числові значення, одержимо, що якби тіло мало період коливань 8 с, то його довжина була б  $l = 16$  м.

**Відповідь:**  $x_m = 0,2$  м,  $T = 8$  с,  $\nu = 0,128$  Гц,  $x = 0,2 \sin 0,25\pi t$ ,  $v_x = 0,05\pi \cos 0,25\pi t$ ,  $a_x = -0,0125\pi^2 \sin 0,25\pi t$ ,  $v_{x_m} = 0,16$  м/с,  $a_{x_m} = 0,125$  м/с<sup>2</sup>,  $F_{x_m} = 0,1 \cdot 0,125 = 12,5$  мН,  $l = 16$  м.

**Задача 2.** Визначте, в який момент часу після виведення тіла з положення рівноваги, його потенціальна енергія втричі більша за кінетичну?

**Дано:**

$$W_n = 3W_k$$

$t = ?$

**Розв'язування**

За умовою задачі тіло починає коливатися з положення рівноваги. Отже, його координата змінюється за законом  $x = x_m \sin \omega t$ . Тоді швидкість тіла змінюється за законом  $v_x = v_{x_m} \cos \omega t$ . Повну механічну енергію тіла можна записати:  $W = W_{k_m} = W_n + W_k$ , де

$$W_{k_m} = \frac{mv_{x_m}^2}{2}, \quad W_k = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{m(v_{x_m} \cos \omega t)^2}{2}.$$

Виходячи з умови задачі, закон збереження повної механічної енергії можна записати:

$$\frac{mv_{x_m}^2}{2} = 4 \frac{m(v_{x_m} \cos \omega t)^2}{2}, \quad \text{звідки } \cos \omega t = \frac{1}{2}, \quad \text{а } \omega t = \frac{\pi}{3},$$

або  $\frac{2\pi t}{T} = \frac{\pi}{3}$ . Отже  $t = \frac{T}{6}$ .

**Відповідь:**  $t = \frac{T}{6}$ .

**Задача 3.** Конденсатор ємністю 10 мкФ зарядили до напруги 400 В і під'єднали до котушки. Після цього в коливальному контурі виникли електромагнітні коливання. Визначте кількість теплоти, що виділиться в контурі за час, упродовж якого амплітуда напруги зменшиться у 2 рази.

**Дано:**

$$C = 10 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$U_{m_1} = 400 \text{ Дж}$$

$$U_{m_2} = 200 \text{ Дж}$$

$Q = ?$

**Розв'язування**

Кількість теплоти, що виділилася в контурі, є втратами енергії електромагнітного поля:

$$Q = W_1 - W_2, \text{ де } W = \frac{CU^2}{2}. \text{ Отже, } Q = \frac{CU_{m_1}^2}{2} - \frac{CU_{m_2}^2}{2}.$$

Підставивши числові значення в отриману формулу, одержимо, що  $Q = 0,6 \text{ Дж}$ .

**Відповідь:**  $Q = 0,6 \text{ Дж}$ .

**Задача 4.** Скільки коливань відбувається в електромагнітній хвилі з довжиною хвилі 30 м впродовж одного періоду звукових хвиль з частотою 200 Гц?

**Дано:**

$$\lambda_1 = 30 \text{ м}$$

$$\nu_2 = 200 \text{ Гц}$$

$N = ?$

**Розв'язування**

Кількість електромагнітних коливань, що відбуваються впродовж одного періоду звукових коливань, можна визначити як відношення їх періодів:

$$N = \frac{T_2}{T_1}. \text{ Визначимо періоди коливань звукової } T_2 \text{ та електромагнітної } T_1 \text{ хвилі.}$$

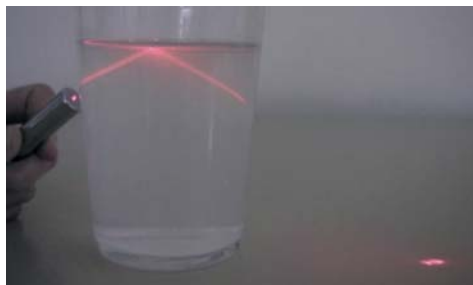
$$T_1 = \frac{\lambda_1}{c}, \quad T_2 = \frac{1}{\nu_2}. \text{ Отже, } N = \frac{c}{\nu_2 \lambda_1}. \text{ Підставивши}$$

числові значення в одержану формулу, отримаємо, що  $N = 5 \cdot 10^4$ .

**Відповідь:**  $5 \cdot 10^4$  коливань.

### *Набуваємо досвіду застосовування фізичних знань*

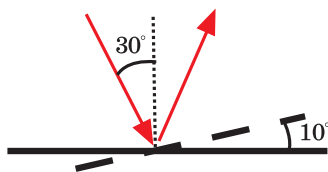
Спробуйте переконатися в тому, що явище повного відбивання існує. Візьміть склянку з водою і додайте в неї, наприклад, трохи молока для того, щоб бачити хід світлового променя від лазерної указки. Спрямуйте промінь, як показано на рис. 2, змінюючи кут падіння на границю розподілу середовищ. Спробуйте повторити дослід, розташувавши указку над поверхнею води. Поясніть результати досліду.



**Рис. 2**

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ № 4**

- 1(с).** Скільки коливань здійснить матеріальна точка за 5 с, якщо частота коливань становить 440 Гц?  
**А** 220;                      **Б** 88;                      **В** 2200;                      **Г** 0,011
- 2(с).** Напишіть рівняння гармонічного коливання, якщо його амплітуда 0,5 м, а частота 25 Гц.  
**А**  $x = 50 \cos 0,5\pi t$                       **Б**  $x = 25 \cos 0,5\pi t$   
**В**  $x = 0,5 \cos 25\pi t$                       **Г**  $x = 0,5 \cos 50\pi t$
- 3(с).** Звукова хвиля переходить із води в металевий борт судна. Визначте, як змінюються характеристики хвилі.  
**А** Частота хвилі збільшується, швидкість поширення не змінюється.  
**Б** Частота хвилі не змінюється, швидкість поширення збільшується.  
**В** Частота хвилі зменшується, довжина хвилі збільшується.  
**Г** Частота хвилі не змінюється, довжина хвилі зменшується.
- 4(с).** Які з наведених прикладів підтверджують прямолінійність поширення світла?  
**А** Проходження променя світла крізь склянку з водою.  
**Б** Проходження променя світла крізь скляну лінзу.  
**В** Утворення зображення предмета в плоскому дзеркалі.  
**Г** Утворення тіні від предмета при освітлені ліхтарем.
- 5(с).** Кут між поверхнею дзеркала та падаючим променем дорівнює  $40^\circ$ . Чому дорівнює кут між променем, що падає на плоске дзеркало, та відбитим променем.  
**А**  $40^\circ$ .                      **Б**  $50^\circ$ .                      **В**  $80^\circ$ .                      **Г**  $100^\circ$ .
- 6(с).** Перед вертикально поставленим плоским дзеркалом стоїть людина. Людина наблизилась до площини дзеркала на 1 м. При цьому відстань між людиною та її зображенням:  
**А** збільшиться на 1 м.                      **В** не зміниться.  
**Б** зменшиться на 2 м.                      **Г** зменшиться на 0,5 м.
- 7(д).** Людина зростом 1,6 м стоїть на відстані 5 м від основи ліхтарного стовпа. Довжина тіні від людини дорівнює 2 м. На якій висоті закріплено ліхтар?  
**А** 4 м.                      **Б** 5,6 м.                      **В** 6,4 м.                      **Г** 7,2 м.
- 8(д).** Кут падіння світлового променя на горизонтально розташоване плоске дзеркало дорівнює  $30^\circ$ . Яким буде кут між променем, що падає на поверхню дзеркала, та відбитим променем, якщо повернути дзеркало на  $10^\circ$  так, як показано на рисунку?



- А**  $20^\circ$     **Б**  $40^\circ$ .    **В**  $60^\circ$ .    **Г**  $80^\circ$ .

- 9(д).** На озері з човна в безвітряну погоду скинули якір. Дослідник, який стояв на березі, визначив, що хвиля досягла берегу за 1 хв, а за 10 с відбувся 21 сплеск, рахуючи з першого. Відстань між сусідніми

гребенями хвиль становила 0,7 м. Визначте відстань від човна до берега.

- 10(д).** До спіральної пружини підвісили тягарець, внаслідок чого пружина розтягнулася на 9 см. Який буде період коливань тягарця, якщо, тримаючи його, трохи розтягнути пружину донизу й потім відпустити?
- 11(д).** Визначте період коливань математичного маятника, якщо модуль його максимального відхилення 18 см і максимальна швидкість 16 см/с.
- 12(д).** Математичний маятник довжиною 1 м встановлений у ліфті. Ліфт підіймається з прискоренням  $2,5 \text{ м/с}^2$ . Визначте період коливань маятника.
- 13(д).** Залежність електричного заряду конденсатора від часу має вигляд  $q = 3,5 \cdot 10^{-5} \cos 4\pi t$ . Визначте, чому дорівнюють амплітуда, частота, період і фаза коливань.
- 14(д).** Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 6 мкФ і котушки індуктивністю 0,24 Гн. Визначте максимальну силу струму в контурі, якщо максимальна напруга на обкладках конденсатора дорівнює 400 В. Опір контуру прийняти рівним нулю.
- 15(в).** Скласти рівняння гармонічного коливання сили струму в коливальному контурі, якщо амплітудне значення сили струму дорівнює 0,35 А і період коливання 0,0005 с. Початкова фаза коливання дорівнює нулю.
- 16(в).** Визначте силу струму в коливальному контурі в момент повної розрядки конденсатора, якщо енергія електричного струму в котушці 4,8 мДж, а індуктивність котушки 0,24 Гн.
- 17(в).** Необхідно виготовити коливальний контур, власна частота якого повинна бути 15 кГц. Конденсатор якої ємності необхідно дібрати, якщо є котушка індуктивністю 1 мГн?
- 18(в).** Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10 мГн і конденсатора ємністю 1 мкФ. Конденсатор заряджений при максимальній напрузі 200 В. Визначте максимальний заряд конденсатора і максимальну силу струму в контурі.

## Розділ 3

# Квантова фізика

### § 23. Квантові властивості світла

*Опрацювавши параграф ви навчитесь оперувати поняттями і термінами: стала Планка та її значення, фотон.*

*Зможете пояснити: сутність квантових постулатів Бора, корпускулярно-хвильовий дуалізм.*

**ГІПОТЕЗА ПЛАНКА. МОДЕЛЬ АТОМА БОРА.** Вивчення явищ дифракції, інтерференції та поляризації світла привело до утвердження наприкінці XIX ст. електромагнітної теорії світла. Випромінювання електромагнітних хвиль відбувається під час прискореного руху електронів, наприклад, при коливаннях електронів у антені радіопередавача.

Електрон у запропонованій Ернестом Резерфордом у 1911 р. ядерній планетарній моделі (рис. 23.1) обертається навколо важкого позитивного ядра, а такий рух є прискореним. Тож електрон мав би випромінювати під час свого руху хвилю, проте цього не відбувається.

Німецький фізик Макс Планк у 1900 р. висловив таку гіпотезу: запас енергії коливальної системи, яка перебуває в рівновазі з електромагнітним випромінюванням, не може набувати довільних значень. Мінімальна кількість енергії, яку система може поглинати або випромінювати (квант енергії), пропорційна частоті коливань  $\nu$ :

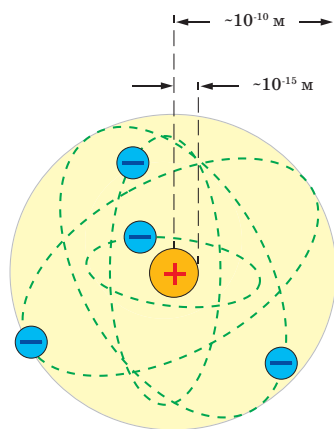
$$E = h\nu,$$

де  $\nu$  — частота коливань електромагнітного випромінювання;  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — стала Планка, її ще називають квантом дії.

Нільс Бор (рис. 23.2) у 1913 р. запропонував удосконалений варіант планетарної моделі атома, що усувала суперечність із класичною фізикою і враховувала експериментальні факти й припущення, викладені у працях М. Планка та А. Ейнштейна (який у 1905 р. передбачив, що будь-яке випромінювання є потоком енергії, що випромінюється порціями енергії — фотонами).

В основу своєї теорії Бор поклав квантові постулати:

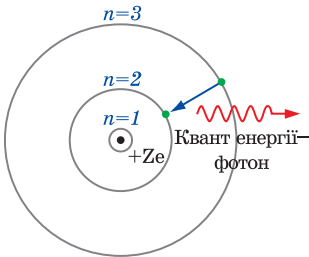
1. Електрон в атомі може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових, станах, кожному з яких відповідає певна енергія  $E_n$ . У стаціонарному стані електрон рухається по орбіті радіусом  $r$  і енергію не випромінює.



**Рис. 23.1.** Ядерна модель атома Е. Резерфорда



**Рис. 23.2 Нільс Бор**  
(1885—1962),  
данський фізик-теоретик,  
лауреат Нобелівської премії з фізики  
(1922)



**Рис. 23.3.** Ядерна  
планетарна модель  
атома Бора

2. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням чи поглинанням фотонів (рис. 23.3), енергію яких визначають за формулою  $h\nu_{kn} = E_k - E_n$ , де  $k$  і  $n$  — цілі числа (номери стаціонарних станів), якщо  $E_k > E_n$  фотон випромінюється, якщо  $E_k < E_n$  — поглинається.

3. Радіуси  $r_n$  стаціонарних станів задовольняють умову:  $m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$ ,

де  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $m$  — маса електрона;  $v_n$  — швидкість електрона на  $n$ -й стаціонарній орбіті.

Слід зазначити, що постулати Бора і його модель атома вважають правильними і сьогодні, попри великий поступ науки, оскільки вони є прямим вираженням експериментальних фактів.

**ЕНЕРГІЯ ТА ІМПУЛЬС ФОТОНА.** Випромінюючи і поглинаючи енергію, світло поводить себе, як потік частинок з енергією. Властивості світла, які виявляються під час поглинання і випромінювання, називають корпускулярними, а саму світлову частинку — **фотоном** чи **квантом електромагнітного випромінювання**.

У сучасній фізиці фотон розглядають як одну з елементарних частинок.

Відповідно до теорії відносності енергія завжди пов'язана з масою відношенням  $E = mc^2$ . Прирівнявши обидва рівняння для енергії фотона, отримаємо  $h\nu = mc^2 \rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2}$  — маса фотона.

Однак фотон не має маси спокою. Фотон має масу доти, доки рухається зі швидкістю світла. За відомою масою і швидкістю можна визначити імпульс фотона:  $p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ .

Імпульс фотона напрямлений уздовж променя світла, і якщо на шляху фотона виникає перешкода, він передає цей імпульс їй, здійснює поштовх, тобто діє як частинка.

**КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ.** У 1924 р. Луї де Бройль висунув теорію, згідно з якою електрон виявляє властивості, притаманні частинці та хвилі (цю властивість у науці називають корпускулярно-хвильовим дуалізмом)... Детальніше: <http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-Phys11-183.pdf>



**! Головне в цьому параграфі**

Мінімальна кількість енергії, яку система може поглинати або випромінювати (квант енергії), пропорційна частоті коливань  $E = h\nu$ . Випромінюючи і поглинаючи енергію, світло поводить, як потік частинок з енергією — фотонів. Однак фотон має масу доти, доки він рухається зі швидкістю світла.

**?Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. У чому полягає сутність гіпотези М. Планка? 2. Наведіть формулу енергії фотона. 3. Як визначити масу та імпульс фотона? 4. Сформулюйте перший постулат Бора — постулат стаціонарних станів. 5. Запишіть і сформулюйте другий постулат Бора. 6. Запишіть і сформулюйте правило квантування колових орбіт — третій постулат Бора.

**§ 24. Фотоефект**

Опрацювавши параграф, ви навчитесь оперувати поняттям і терміном «фотоефект». Зможете пояснити: досліди О. Столетова, рівняння А. Ейнштейна для фотоефекту. Ознайомитесь із застосуванням фотоефекту в техніці.

**ДОСЛІДИ О. СТОЛЕТОВА.** У розвитку уявлень про природу світла важливий крок зроблено під час вивчення явища фотоефекту, відкритого Г. Герцем і ґрунтовно дослідженого О. Столетовим.

**Фотоефектом** називають явище вивільнення електронів речовини під дією світла.

Розрізняють: *зовнішній фотоефект* — явище вибивання електронів із поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання; *внутрішній фотоефект* — явище збільшення електропровідності напівпровідника або діелектрика за рахунок електронів, вирваних із молекул, чи атомів під дією світла.

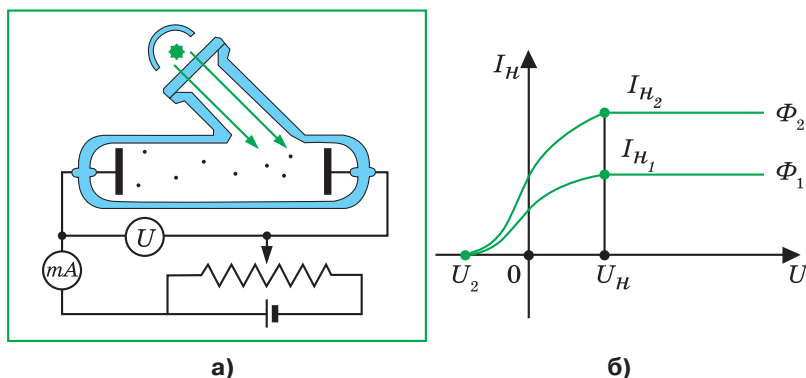


Рис. 24.1. Дослідження фотоефекту



Використовуючи вакуумний скляний балон з двома електродами (рис. 24.1, а), Столетов дослідив кількісні закономірності зовнішнього фотоефекту. Результати проведених дослідів показали, що фотоефект є безінерційним, оскільки фотострум (струм, який виникає в колі внаслідок явища фотоефекту) з'являється одночасно з освітленням фотокатода.

У період проведення Столетовим досліджень явища фотоефекту ще не було відкрито електрон, не існувало гіпотези Планка, тому тогочасна фізика не могла пояснити результати його дослідів.

Аналізуючи вольт-амперні характеристики для фотоефекту, отримані за різних значень світлового потоку (рис 24.1, б), можна дійти висновку:

а) за відсутності напруги між електродами значення фотоструму відмінне від нуля (це означає, що фотоелектрони мають під час вильоту кінетичну енергію);

б) у разі досягнення між електродами певної напруги  $U_H$  значення фотоструму не змінюється навіть при збільшенні напруги, тобто його значення досягає насичення  $I_{H_1}$ ,  $I_{H_2}$ ;

в) за деякої гальмівної напруги (якщо електрод А приєднати до від'ємного полюса джерела струму) фотострум припиняється;

г) значення гальмівної напруги не залежить від світлового потоку  $\Phi$ .

Коли енергія фотоелектронів є такою ж, як і енергія поля, що повертає

їх назад до електрода, справедливим є вираз:  $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU$ .

Вимірявши гальмівну напругу, можна знайти максимальне значення кінетичної енергії електронів, які вириваються світлом із катода.

У результаті дослідів було виявлено, що червоне світло з великою довжиною хвилі не виривало електрони з цинкової пластини, тоді як фіолетове світло за будь-якого малого світлового потоку їх легко виривало.

## ЗАКОНИ ЗОВНІШНЬОГО ФОТОЕФЕКТУ. РІВНЯННЯ ФОТОЕФЕКТУ.

На основі дослідів сформульовано закони зовнішнього фотоефекту:

- ▶ кількість електронів, вирваних світлом з поверхні металу за 1 с, є прямо пропорційною поглинутій енергії світлової хвилі;
- ▶ максимальна кінетична енергія фотоелектронів зростає лінійно з частотою світла і не залежить від його інтенсивності;
- ▶ для кожної речовини існує «червона межа» фотоефекту (поріг фотоефекту) — така найменша частота (чи найбільша довжина світлової хвилі), за якої ще можливий фотоефект.

Якщо  $\nu \leq \nu_{\min}$  чи  $\lambda \geq \lambda_{\max}$ , то фотоефекту не існує. Крім того, фотоефект є безінерційним і вилітання фотоелектронів починається з моменту освітлення катода.

Енергія порції світла  $h\nu$  витрачається на виконання роботи виходу  $A_{\text{вих}}$ , тобто роботи, яку треба виконати для виривання електрона з поверхні металу і на надання електрону кінетичної енергії:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Цей вираз називають *рівнянням Ейнштейна для фотоефекту*. Він пояснює основні закономірності фотоефекту.

Енергія кванта має бути більшою ніж  $A_{\text{вих}}$ , тоді мінімальна частота, за якої починається фотоелектр. ефект (червона межа фотоелектр. ефекту):  $\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$ .

**ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТР. ЕФЕКТУ.** Відкриття явища фотоелектр. ефекту мало велике значення для розуміння природи світла. Завдяки відкриттю фотоелектр. ефекту стало можливим:

- ▶ звукове кіно;
- ▶ створення різноманітних апаратів, які «стежать» за освітленістю вулиць, своєчасно «запалюють» і «гасять» бакени на річках, працюють «контролерами» в метро, «рахують» готову продукцію, «контролюють» якість обробки деталей;
- ▶ перетворення світлової енергії в електричну за допомогою фотоелементів.

Як зазначалося, крім зовнішнього, існує і внутрішній фотоелектр. ефект, який полягає в тому, що в результаті бомбардування атома фотоном атом втрачає електрон і стає йоном. Внутрішній фотоелектр. ефект виявляється в зміні електропровідності середовища, діелектричної проникності або виникненні електрорушійної сили.

Напівпровідники з внутрішнім фотоелементом (фотоопори, фотодіоди, сонячні батареї та ін.) — це напівпровідники із власною чи домішковою провідністю.

У сонячних батареях створюють *p-n*-перехід. Під час освітлення фотоелемента сонячним світлом змінюється концентрація вільних носіїв зарядів, що призводить до виникнення напруги між *p* і *n* ділянками *p-n* переходу і відповідно до появи електричного струму.

Відкриття і дослідження явища фотоелектр. ефекту стали експериментальною основою квантової теорії. Саме за створення теорії фотоелектр. ефекту і пояснення його на основі квантової теорії А. Ейнштейну було присуджено Нобелівську премію.

### ! Головне в цьому параграфі

Фотоелектр. ефектом називають явище виривання електронів із речовини під дією світла. Розрізняють: *зовнішній фотоелектр. ефект* — явище вибивання електронів із поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання; *внутрішній фотоелектр. ефект* — явище збільшення електропровідності напівпровідника або діелектрика за рахунок електронів, вирваних із молекул або атомів під дією світла.

### ?Знаю, розумію, вмію пояснити

1. У чому полягає явище фотоелектр. ефекту? 2. Поясніть закони фотоелектр. ефекту з позицій квантової теорії світла. 3. Зобразіть вольт-амперну характеристику фотоелектр. ефекту й поясніть її особливості. 4. Напишіть рівняння Ейнштейна для фотоелектр. ефекту і поясніть його фізичну суть. 5. За яких умов виникає явище фотоелектр. ефекту? Що називають «червоною межею» фотоелектр. ефекту? 6. Що називають внутрішнім фотоелектр. ефектом? 7. У чому полягає принципова відмінність між зовнішнім і внутрішнім фотоелектр. ефектами?

**ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ № 5**

*Опрацювавши цей практикум, ви навчитесь розв'язувати задачі на розрахунок енергії та імпульсу фотона, застосовувати формулу Планка та рівняння Ейнштейна для фотоефекту.*

Розв'язування типових задач із квантової фізики полягає переважно в тому, щоб на основі рівняння Ейнштейна для фотоефекту  $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}$  обчислити енергію фотона  $h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ ; роботу виходу  $A$ , яка витрачається на виривання електрона з речовини; максимальну кінетичну енергію фотоелектрона —  $W_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$ .

Надаємо орієнтовний алгоритм розв'язування задач на фотоефект:

- 1) записати рівняння Ейнштейна у загальному вигляді  $h\nu = A + W_{\max}$ ;
- 2) за потреби використовувати додаткові формули:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}; A = eU_s; A = h\nu_{\min};$$

3) якщо за умовою задачі відомо матеріал опромінюваної речовини, то за таблицею визначити роботу виходу електрона з неї;

4) обчислити невідому величину.

Зазвичай у таблицях робота виходу виражається в еВ, тому потрібно застосовувати зв'язок між еВ і Дж ( $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

У процесі розв'язування задач розділу «Квантова фізика» використовують наступну інтерпретацію експериментальних закономірностей фотоефекту:

1) сила струму насичення прямо пропорційна інтенсивності падаючого світла і не залежить від його частоти;

2) величина гальмівної напруги прямо пропорційна частоті світла і не залежить від його інтенсивності;

3) для кожної речовини характерна власна найменша частота  $\nu_{\min}$  (відповідно, найбільша довжина  $\lambda_{\max}$ ) хвилі, що називається червоною межею фотоефекту, за якої він вже (ще) можливий:  $h\nu_{\min} = h\frac{c}{\lambda_{\max}} = A$ ;

4) фотоефект безінерційний;

5) маса спокою фотона дорівнює нулю, оскільки він існує лише в русі зі швидкістю світла в будь-яких системах відліку.

**Приклади розв'язування задач**

**Задача 1.** Найбільша довжина хвилі, за якої можливий фотоефект для вольфраму, становить 0,275 мкм. Знайдіть роботу виходу з металу; максимальну швидкість електронів, що вилітають з нього під дією світла з довжиною хвилі 0,18 мкм; їх енергію.

**Дано:**

$$\lambda_{\max} = 0,275 \text{ мкм} = 2,75 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda = 0,18 \text{ мкм} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A - ?; v_{\max} - ?; W_{\max} - ?$$

**Розв'язування**

Робота виходу електронів із металу

обчислюється за формулою  $A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$ ;

$$A = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,75 \cdot 10^{-7}} \approx 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

Із рівняння Ейнштейна для фотоефекту, враховуючи що  $v = \frac{c}{\lambda}$ , маємо

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \text{ Звідси максимальна кінетична енергія: } W_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2};$$

$$W_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - A; W_{\max} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^{-7}} - 7,2 \cdot 10^{-19} \approx 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}.$$

Знаючи максимальну енергію електронів, знаходимо їх швидкість:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2W_{\max}}{m}}; v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 9,1 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}.$$

**Відповідь:**  $v_{\max} \approx 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ ;  $W_{\max} = 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ;  $A = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

**Задача 2.** Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що має початкову швидкість  $10^6 \text{ м/с}$  і прискорена різницею потенціалів  $4 \text{ В}$ . Знайдіть довжину його хвилі.

**Дано:**

$$E = W_k;$$

$$v_0 = 10^6 \text{ м/с}$$

$$U = 4 \text{ В}$$

$$\lambda - ?$$

**Розв'язування**Енергія фотона рівна  $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ , звідси  $\lambda = \frac{hc}{E}$ .За умовою  $E = W_k = \frac{mv^2}{2}$ , де  $m$  — маса електрона; $v$  — його кінцева швидкість.

Робота електричного поля дорівнює зміні кінетичної енергії електрона,

тобто  $\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = A$ , звідси маємо:  $\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + A$ , оскільки  $A = eU$ , то:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + eU. \text{ Оскільки } \frac{mv_0^2}{2} \text{ — початкова кінетична енергія електрона.}$$

$$E = \frac{mv_0^2}{2} + eU; \lambda = \frac{hc}{\frac{mv_0^2}{2} + eU}.$$

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4} \approx 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

**Відповідь:**  $\lambda \approx 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

**Задача 3.** У процесі фотоефекту електрони, що вириваються із поверхні металу під дією випромінювання частотою  $2 \cdot 10^{15}$  Гц, повністю затримуються гальмівним електричним полем із різницею потенціалів 7 В та частотою  $4 \cdot 10^{15}$  Гц із різницею потенціалів 15 В. Обчислити постійну Планка.

**Дано:**

$$\nu_1 = 2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$\nu_2 = 4 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$U_1 = 7 \text{ В}$$

$$U_2 = 15 \text{ В}$$

$$h - ?$$

**Розв'язування**

Запишемо рівняння Ейнштейна для розглянутих в умові випадків фотоефекту  $h\nu_1 = A + \frac{mv_1^2}{2} : h\nu_2 = A + \frac{mv_2^2}{2}$  (1).

Оскільки електрони, що вилетіли з поверхні металу, повністю затримуються гальмівним електричним полем,

то зміна їх кінетичної енергії дорівнює роботі цього поля  $\frac{mv^2}{2} = eU$  (2).

Враховуючи вираз (2), перепишемо (1) у вигляді  $h\nu_1 = A + eU_1$  і  $h\nu_2 = A + eU_2$ . Розв'язуючи отриману систему рівнянь, знаходимо

$$h = \frac{e(U_2 - U_1)}{\nu_2 - \nu_1}. \text{ Отже, } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (15 - 7)}{4 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{15}} = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж} \cdot \text{с)}.$$

**Відповідь:**  $h = 6,4 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

**Задача 4.** Внаслідок переходу атома Гідрогену з одного стаціонарного стану в інший випромінюється фотон з довжиною хвилі 0,486 мкм. Визначити, на скільки зменшиться енергія атома.

**Дано:**

$$\lambda = 0,486 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\Delta E - ?$$

**Розв'язування**

Зміна енергії атома дорівнює енергії випромінювання фотона:  $\Delta E = h\nu$ . Визначимо частоту через довжину хвилі:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \text{ Тоді кінцевий результат: } \Delta E = \frac{hc}{\lambda}.$$

**Відповідь:**  $\Delta E = 4,096 \cdot 10^{-19}$  Дж.

### Задачі для самостійного розв'язування

- 1(п).** Чому проявлення фотографічних знімків здійснюється за червоного освітлення?
- 2(п).** На яку поверхню, чорну чи білу, світло чинить більший тиск?
- 3(с).** Скільки фотонів потрапляє за 1 с в око людини, якщо воно сприймає світло з довжиною хвилі 0,5 мкм при потужності світлового потоку  $2 \cdot 10^{-17}$  Вт?
- 4(с).** Визначте найбільшу довжину хвилі, за якої можливий фотоефект для платини.
- 5(с).** Визначте найбільшу швидкість електрона, що вилетів із Цезію під дією світла з довжиною хвилі 400 нм.  $A_{\text{вих}} = 1,94$  еВ.
- 6(с).** Найбільша довжина хвилі, за якої можливий фотоефект для Калію, становить  $6,2 \cdot 10^{-5}$  см. Знайдіть роботу виходу електронів.

- 7(с).** Визначте енергію фотона, якщо довжина хвилі, що відповідає йому, дорівнює  $17 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .
- 8(с)** Визначте роботу виходу електронів із поверхні Цинку, якщо довжина хвилі, що відповідає його червоній межі, становить 300 нм.
- 9(с).** Знайдіть червону межу фотоефекту для Літію.  $A_{\text{вих}} = 2,4 \text{ еВ}$
- 10(с).** Знайдіть гальмівну різницю потенціалів електронів, що вириваються під час освітлення Калію світлом з довжиною хвилі 330 нм.  $A_{\text{вих}} = 2,2 \text{ еВ}$
- 11(д).** Червона межа фотоефекту для Калію відповідає довжині хвилі 0,577 мкм. За якої різниці потенціалів між електродами припиняється емісія електронів, якщо калієвий катод освітлювати випромінюванням з довжиною хвилі 0,4 мкм?
- 12(д).** Визначте червону межу фотоефекту Цезію, якщо під час його освітлення випромінюванням з довжиною хвилі 0,35 мкм, гальмівний потенціал дорівнює 1,47 В.
- 13(д).** Знайдіть масу фотона: а) червоної частини спектра видимого світла ( $\lambda = 700 \text{ нм}$ ); б) рентгенівських променів ( $\lambda = 25 \text{ пм}$ ); в) гамма-променів ( $\lambda = 1,24 \text{ пм}$ ).
- 14(д).** Знайдіть енергію, масу й імпульс фотона, якщо довжина хвилі, що йому відповідає, дорівнює 1,6 пм.
- 15(д).** З якою швидкістю повинен рухатися електрон, щоб його кінетична енергія дорівнювала енергії фотона з довжиною хвилі 520 нм?
- 16(д).** Яку енергію повинен мати фотон, щоб його маса дорівнювала масі спокою електрона?
- 17(д).** Імпульс, який переносить монохроматичний пучок фотонів через площину  $2 \text{ см}^2$  за 0,5 хв, дорівнює  $3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$ . Знайдіть енергію, що падає на одиницю площі за одиницю часу.
- 18(д).** У роботі О. Столетова «Активно-електричні дослідження» (1888 р.) уперше було встановлено основні закони фотоефекту. Один із результатів його дослідів сформульовано так: «Розряджаючу дію мають промені найвищого заломлення із довжиною хвилі менше 295 нм». Знайдіть роботу виходу електрона із металу, з яким працював учений.
- 19(д).** Знайдіть довжину хвилі світла, що відповідає червоній межі фотоефекту для Літію, Натрію, Калію і Цезію.
- 20(д).** Довжина хвилі світла, що відповідає червоній межі фотоефекту для певного металу рівна 275 нм. Знайдіть максимальну енергію фотона, що його викликає.
- 21(д).** Знайдіть частоту світла, що вириває з металу електрони, які повністю затримуються різницею потенціалів 3 В. Фотоефект стискається за частоти світла  $6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . Знайдіть роботу виходу електрона.
- 22(д).** Фотони енергією 4,9 еВ виривають електрони з металу з роботою виходу 4,5 еВ. Знайдіть максимальний імпульс, що передається поверхні металу під час вильоту кожного електрона.
- 23(д).** У процесі фотоефекту з платинової поверхні електрони повністю затримуються різницею потенціалів 0,8 В. Знайдіть довжину хвилі опромінення і граничну довжину хвилі, за якої ще можливий фотоефект.
- 24(в).** Вакуумний фотоелемент складається з центрального катода (вольфрамової кульки) і анода (внутрішній поверхні посрібленої зсередини колби). Контактна різниця потенціалів між електродами 0,6 В прискорює електрони, що вилітають. Фотоелемент освітлюється світлом з довжиною хвилі 230 нм. Яку гальмівну різницю потенціалів потріб-

но прикласти між електродами, щоб фотострум впав до нуля? Яку швидкість отримають електрони, коли долетять до анода, якщо не прикладати між катодом і анодом різницю потенціалів?

- 25(в).** Між електродами фотоелемента з попередньої задачі прикладена гальмівна різниця потенціалів 1 В. За якою граничною довжиною хвилі світла, що падає на катод, розпочинається фотоефект?
- 26(в).** Крапля води об'ємом 0,2 мл нагрівається світлом з довжиною хвилі 0,75 мкм, поглинаючи щосекунди  $10^{10}$  фотонів. Визначте швидкість нагрівання води.
- 27(в).** Яка частина енергії фотона, що викликає фотоефект, витрачається на роботу виходу, якщо максимальна швидкість електронів, вирваних із поверхні Цинку, становить  $10^6$  м/с? Червона межа фотоефекту для Цинку відповідає довжині хвилі 290 нм.
- 28(в).** На поверхню металу падає потік випромінювання з довжиною хвилі 0,36 мкм потужністю 5 мВт. Визначте силу фотоструму насичення, якщо лише 5 % падаючих фотонів вибивають електрони.
- 29(в).** Паралельні промені з довжиною хвилі 0,5 мкм падають нормально на зачорнену поверхню, здійснюючи тиск  $10^{-9}$  Н/см<sup>2</sup>. Визначте число фотонів, що містяться в 1 м<sup>3</sup> падаючого світлового потоку.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ № 5

- 1(п).** Поверхню тіла із роботою виходу електронів  $A$  освітлює монохроматичне світло частотою  $\nu$ . Що визначають різницю  $h\nu - A$  ?
- А** Червону межу фотоефекту.  
**Б** Максимальну швидкість руху фотоелектронів.  
**В** Максимальну кінетичну енергію фотоелектронів.  
**Г** Середню кінетичну енергію фотоелектронів.
- 2(с).** Світло, яке проходило через жовтий світлофільтр, падало на поверхню металу та виривало з неї електрони. Після заміни світлофільтра максимальна швидкість фотоелектронів зменшилася. Визначте, якого кольору міг бути новий світлофільтр.
- А** Червоний      **Б** Синій      **В** Зелений      **Г** Фіолетовий
- 3(с).** Атом випустив фотон із енергією  $6 \cdot 10^{18}$  Дж. Якого імпульсу набув атом?
- А**  $2 \cdot 10^{-26} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$     **Б**  $6 \cdot 10^{-17} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$     **В**  $1,2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$     **Г**  $3,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$
- 4(с).** Атом, який перебуває в спокої, поглинув фотон енергією  $1,2 \cdot 10^{-17}$  Дж. Імпульс атома:
- А** Не змінився.      **В** Став рівним  $4 \cdot 10^{-26} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$ .  
**Б** Став рівним  $1,2 \cdot 10^{-17} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$ .    **Г** Став рівним  $6,2 \cdot 10^{-28} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$ .
- 5(с).** Енергія фотона, яка відповідає червоній межі фотоефекту для Калію, становить  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, якщо на метал падає світло, енергія фотонів якого дорівнює  $10^{-18}$  Дж.
- А**  $1,72 \cdot 10^{-18}$  Дж    **Б**  $2,8 \cdot 10^{-19}$  Дж    **В**  $7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж    **Г** 0



- 6(с).** Визначте червону межу фотоефекту  $\lambda_{\max}$  для Цинку.  
**А** 300 нм      **Б** 600 нм      **В** 780 нм      **Г** 960 нм
- 7(д).** Під якою напругою перебуває рентгенівська трубка, якщо максимальна частота рентгенівського випромінювання становить  $7 \cdot 10^{18}$  Гц ?  
**А** 1 кВ      **Б** 12 кВ      **В** 29 кВ      **Г** 1 В
- 8(д).** Яка максимальна швидкість фотоелектронів, якщо на Цинк діє ультрафіолетове випромінювання довжиною хвилі 150 нм?  
**А** 1200 км/с      **Б** 800 км/с      **В** 200 км/с      **Г** 120 км/с
- 9(д).** Гелієво-неоновий лазер працює в безперервному режимі, розвиваючи потужність 2 мВт. Його випромінювання має довжину хвилі 630 нм. Скільки фотонів випромінює лазер за одну секунду?  
**А**  $2 \cdot 10^{14}$       **Б**  $6,3 \cdot 10^{15}$       **В**  $1,2 \cdot 10^{16}$       **Г**  $3,8 \cdot 10^{18}$
- 10(д).** Для Калію червона межа фотоефекту дорівнює 620 нм. Яку максимальну швидкість можуть мати фотоелектрони, що вилітають під час опромінення його фіолетовим світлом з довжиною хвилі 420 нм?  
**А** 25 км/с      **Б** 125 км/с      **В** 250 км/с      **Г** 580 км/с
- 11(д).** Яка робота виходу електронів із поверхні металу, якщо під час опромінення його світлом частотою  $7,8 \cdot 10^{14}$  Гц максимальна швидкість фотоелектронів становить  $6,0 \cdot 10^5$  м/с ? Маса електрона дорівнює  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, стала Планка має величину  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.  
**А**  $3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж      **Б**  $1,9 \cdot 10^{-19}$  Дж      **В**  $1,8 \cdot 10^{-18}$  Дж      **Г**  $3,3 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 12(д).** Унаслідок взаємодії із електроном модуль імпульсу фотона зменшився на  $1,5 \cdot 10^{-25} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{с}}$ . Визначте, на скільки збільшилася кінетична енергія електрона. Швидкість світла у вакуумі становить  $3 \cdot 10^8$  м/с.  
**А**  $4,5 \cdot 10^{-17}$  Дж      **Б**  $5 \cdot 10^{-34}$  Дж      **В**  $9,9 \cdot 10^{-59}$  Дж      **Г**  $3,3 \cdot 10^{-67}$  Дж
- 13(д).** Яку довжину хвилі повинне мати світло, спрямоване на Цезій, щоб максимальна швидкість руху фотоелектронів дорівнювала 2 Мм/с? Відповідь наведіть у нанометрах.
- 14(д).** Визначте найбільшу швидкість електрона, що вилетів із Цезію, коли його освітили світлом із довжиною хвилі 400 нм. Відповідь наведіть у кілометрах на секунду.
- 15(в).** Найбільша довжина хвилі світла, за якої відбувається фотоефект для вольфраму, становить 0,275 мкм. Знайдіть найбільшу швидкість електронів, що їх вибиває світло з довжиною хвилі 0,18 мкм. Відповідь наведіть у кілометрах на секунду.
- 16(в).** На металеву пластину падає монохроматичне світло з довжиною хвилі  $\lambda = 0,42$  мкм. Фотострум припиняється, коли гальмівна напруга становить 0,95 В. Визначте роботу виходу електронів із поверхні пластини. Відповідь наведіть в електрон-вольтах.

## § 25. Випромінювання та поглинання світла

*Опрацювавши параграф, ви навчитесь оперувати поняттями і термінами «поглинання» та «випромінювання світла».*

*Зможете пояснити атомні та молекулярні спектри.*

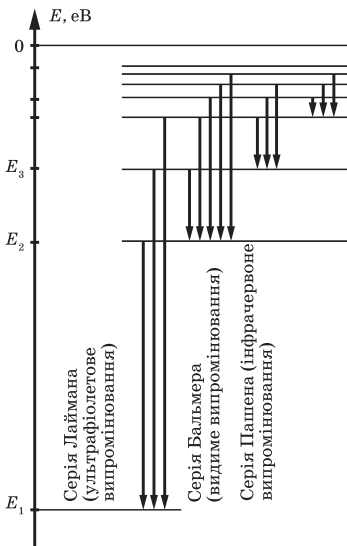
*Ознайомитесь із застосуванням спектрального аналізу.*

**ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА АТОМАМИ.** Згідно з теорією Бора, поглинаючи світло, атом переходить із стаціонарного стану з меншою енергією в стаціонарний стан з більшою енергією. Усі стаціонарні стани, крім одного, є умовно стаціонарними. Нескінченно довго кожен атом може перебувати лише в стаціонарному стані з мінімальним запасом енергії. Цей стан атома називається основним, усі інші — збудженими.

Найбільш точно теорія Бора описує властивості найпростішого атома — Гідрогену. Енергію електрона, що покинув атом (міститься на нескінченній відстані від ядра), приймають за нуль. Зрозуміло, що енергія будь-якого електрона, який знаходиться ближче до ядра, буде меншою від  $i$ , отже, від'ємною. У нормальному (не збудженому) стані енергія атома буде мінімальною і для атома Гідрогену її значення  $E_1 = -13,55$  еВ. У першому збудженому стані (другий енергетичний рівень) атом Гідрогену матиме енергію  $E_2 = -3,38$  еВ, у третьому —  $E_3 = -1,5$  еВ.

Постулати Бора дають змогу визначити частоти випромінювання атомів гідрогену під час переходу між різними станами.

Усі частоти випромінювань атома Гідрогену складають низку серій, кожна з яких виникає під час переходу атома з одного енергетичного стану в інший.



**Рис. 25.1.** Схема отримання спектра Гідрогену

Під час переходів на перший рівень ( $n = 1$ ) з другого, третього тощо. виникає ультрафіолетове випромінювання (серія Лаймана), під час переходів на другий рівень з вищих рівнів — випромінювання оптичного діапазону (серія Бальмера) і під час переходів на третій рівень — інфрачервоне випромінювання (серія Пашена) (рис. 25.1).

Поглинання світла — процес, зворотний випромінюванню. Атом, поглинаючи світло, переходить із нижчих енергетичних станів до вищих. При цьому він поглинає випромінювання з такою самою частотою, що й випромінює.

На основі постулатів Бора можна визначити частоти електромагнітних хвиль атомів, що випромінюють:

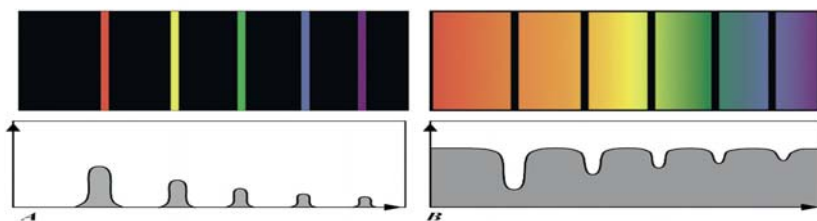
$$\nu_{nk} = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

де  $R = 3,27 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  — стала Рідберга.

**АТОМНІ ТА МОЛЕКУЛЯРНІ СПЕКТРИ.** Якщо світло випромінюють розріджені гази, то атоми газу знаходяться так далеко один від одного, що не справляють жодного впливу на випромінювання сусідніх атомів, і у спектрі такого джерела будуть спостерігатись лише певні лінії. Цей спектр називають *лінійчатим спектром*. Наприклад, розглянутий нами спектр випромінювання атома Гідрогену — лінійчатий.

*Лінійчатий спектр* — це оптичне випромінювання збуджених атомів, яке виникає завдяки квантовим переходам між електронними рівнями енергії (атомні спектри). Такі спектри дають світні гази або пара. Світіння газу можна викликати, пропускаючи через газ електричний струм.

Існують два основних типи лінійчатих спектрів: спектр випускання і спектр поглинання (рис. 25.2).



**Рис. 25.2.** Лінійчаті спектри: випускання і поглинання

Випускання (A) є результатом збудження речовини, що змушує її електрони займати вищий енергетичний рівень. Фотони випускаються тоді, коли електрони повертаються до свого початкового стану. І навпаки, поглинання спектра (B) виникає, коли фотони поглинаються, піднімаючи електрони атома на вищий енергетичний рівень. Речовина, що випускає світло на певній частоті, поглинає його на тій же частоті. Коли біле світло проходить через речовину, можна побачити спектр поглинання — це неперервний спектр (крім темних ліній) з довжинами хвиль, які речовина випускала б, світячись сама.

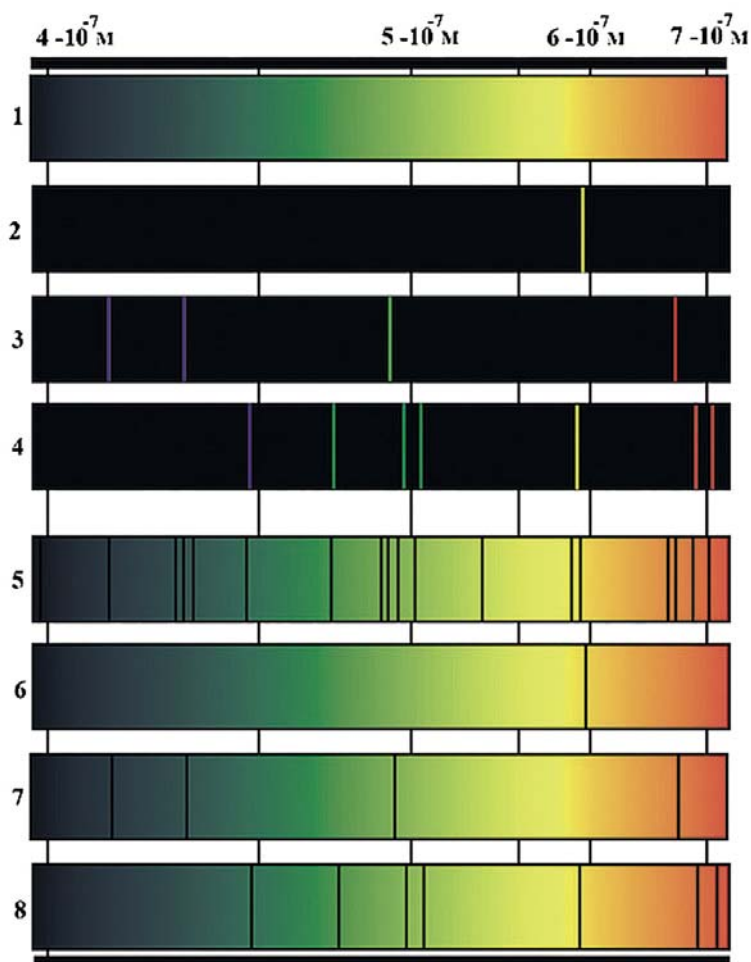
*Смугастиий спектр* — це дискретні групи численних спектральних ліній, що складаються з безлічі тісно розташованих монохроматичних випромінювань (молекулярні спектри) (рис. 25.3).



**Рис. 25.3.** Смугастиий спектр видимого випромінювання азоту

Якщо світло випромінюють тверді тіла, рідини чи дуже сильно стиснені гази, то на випромінювання кожного з атомів істотно впливають сусідні атоми. Унаслідок цього можна спостерігати розмивання ліній у спектрі випромінювання і плавний перехід від одного кольору до іншого. Так виглядає суцільний спектр.

*Суцільний спектр* випромінюють розжарені тверді тіла й розігріті рідини, які перебувають при певній температурі у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням (рис. 25.4.1)



**Рис. 25.4.** Спектри випромінювання:  
 1 — суцільний; 2 — Натрію; 3 — Гідрогену; 4 — Гелію.  
 Спектри поглинання:  
 5 — сонячний; 6 — Натрію; 7 — Гідрогену; 8 — Гелію

**СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ.** Лінійчатий спектр кожного хімічного елемента є індивідуальним (рис. 25.4).

Цю властивість використовують для спектрального аналізу сполук, оскільки кожний атом елемента в її складі випромінює свої лінії, які не зливаються з лініями інших елементів. Отже, дослідження лінійчатих спектрів речовин дає змогу визначити, з яких хімічних елементів вони складаються і в якій кількості міститься кожен елемент у певній речовині.

Кількісний вміст елемента в досліджуваному зразку визначають шляхом порівняння інтенсивності окремих ліній спектра цього елемента з інтенсивністю ліній іншого хімічного елемента, кількісний вміст якого в зразку відомий.

Метод визначення якісного і кількісного складу речовини з допомогою спектра називають *спектральним аналізом*.

Спектральний аналіз використовують у пошуках корисних копалин для визначення хімічного складу зразків руди. У промисловості спектральний аналіз дає змогу контролювати склад сплавів, домішок, що вводяться в метали для отримання матеріалів із заданими властивостями. З допомогою спектрального аналізу можна виявити в пробі масою  $6 \cdot 10^{-7}$  г присутність золота при його масі  $10^{-8}$  г. Визначення марки сталі методом спектрального аналізу може бути виконаним за декілька десятків секунд.

Спектральний аналіз допомагає визначити хімічний склад небесних тіл, віддалених від Землі на відстань у мільярд світлових років. Хімічний склад атмосфер планет і скупчень холодного газу в міжзоряному просторі визначається за спектрами поглинання.

Вивчаючи спектри небесних тіл, учені змогли визначити не лише їх хімічний склад, а й температуру. По зміщенню ліній у спектрах небесних тіл визначають також швидкість їх руху відносно Землі.

Для отримання (характеристичних для певного елемента) лінійчатих спектрів випромінювання досліджувану речовину треба перевести в газо-подібний стан і нагріти до високої температури. Найчастіше з цією метою використовують дуговий або іскровий розряди. Спостерігають спектри з допомогою спектроскопа (рис. 25.5).



**Рис. 25.6.** Спектроскоп

Якщо необхідно отримати фотографію спектра, фотоплівку або фотопластинку розміщують у тому місці, де отримується дійсне зображення спектра. Прилад для фотографування спектрів називають спектрографом.

### **! Головне в цьому параграфі**

*Лінійчатий спектр* — це оптичне випромінювання збуджених атомів, яке виникає завдяки квантовим переходам між електронними рівнями енергії (атомні спектри). *Смугастих спектр* — це дискретні групи численних спектральних ліній, що складаються з безлічі тісно розташованих монохроматичних випромінювань (молекулярні спектри). *Суцільний спектр* випромінюють розжарені тверді тіла й розігріті рідини, які перебувають при певній температурі у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням

**? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. Які утруднення викликала планетарна модель Е. Резерфорда для пояснення процесів випромінювання енергії атомами? Як Н. Бор подолав їх? 2. Запишіть формулу, що дає змогу обчислити частоту будь-якої спектральної лінії в спектрі випромінювання атома Гідрогену. 3. Що називають спектром випромінювання? 4. Які види спектрів випромінювання ви знаєте? 5. Які речовини дають суцільний спектр? Які — лінійчатий? Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пари? 6. Що називають спектральним аналізом? На чому він ґрунтується?

**§ 26. Атомне ядро. Радіоактивність**

*Опрацювавши параграф, ви навчитесь оперувати поняттями і термінами: радіоактивність, види радіоактивного випромінювання.*

*Зможете пояснити протонно-нейтронну модель атомного ядра, стійкість ядер, альфа- і бета-розпади, дефект мас.*

*Ознайомитесь із дозиметрією.*

**ПРОТОННО-НЕЙТРОННА МОДЕЛЬ ЯДРА АТОМА.** Провівши серію дослідів, Дж. Чедвік виявив потік електрично нейтральних частинок із масою, близькою до маси протона, які дістали назву «нейтрони». У 1932 р. український фізик Д. Іваненко (рис. 26.1) першим запропонував протонно-нейтронну модель атомного ядра: на основі аналізу експериментальних даних він припустив, що ядро складається лише з протонів і нейтронів.



**Рис. 26.1. Дмитро Дмитрович Іваненко** (1904—1994), український фізик-теоретик, автор протон-нейтронної моделі атомного ядра

Ідея про будову ядер тільки з важких частинок не сприймалася фізиками. Думка про те, що електронів усередині ядра немає, була висловлена Діраком ще в 1930 р. Відкриття нейтрона багатьма розглядалося, як несуттєве. Просту картину світу, в якій фундаментальними «цеглинками світобудови» були протон і електрон, ніхто не хотів ускладнювати введенням нових частинок.

Д. Іваненко вважав, що нейтрон і протон є елементарними частинками, можуть переходити один в одного, випускаючи електрон або позитрон. Надалі протон і нейтрон почали розглядати як два стани однієї частинки — нуклона, й ідея Іваненко стала загальноприйнятою.

Отже, у природничих науках використовується планетарна модель атома з протонно-нейтронною моделлю ядра (рис. 26.2).

Згідно з цією моделлю кількість нуклонів, тобто сума протонів і нейтронів у ядрі атома, дорівнює нуклонному числу атома  $A$ ; кіль-



кість протонів дорівнює заряду ядра атома  $Z$ ; кількість нейтронів визначається їх різницею  $N = A - Z$ .

Ядра більшості хімічних елементів стійкі. Це свідчить про те, що протони та нейтрони утримуються в ядрі певними силами. Що ж це за сили? Ці сили не можуть бути силами електростатичної взаємодії, оскільки до складу атомних ядер входять протони й сила електростатичного відштовхування, навпаки, прагнула б розщепити ядро. Гравітаційне притягання між протонами в  $10^{36}$  разів є меншими, ніж електростатичне відштовхування. Отже, в ядрі між нуклонами існує особливий тип взаємодії, яку називають сильною, а сили, які їй відповідають, називають ядерними. Ядерні сили приблизно в 100 разів перевищують значення кулонівських сил, що діють в ядрі між протонами.

Ядерні сили є короткодійними. На відстанях більших за  $3 \cdot 10^{-15}$  м вони практично не діють і різко збільшуються на відстані  $2,2 \cdot 10^{-15}$  м. Коли ж нуклони, зіткнувшись, зближаються на відстані  $0,5 \cdot 10^{-15}$  м, ядерні сили виявляють себе як сили відштовхування.

У сучасній фізиці загальноприйнятою є теорія, згідно з якою ядерні сили мають обмінний характер. У 1935 р. японський фізик Х. Юкава висунув гіпотезу про те, що в природі існують частинки масою в 200–300 разів більшою від маси електрона, і саме через них здійснюється взаємодія нуклонів. Такі частинки були виявлені експериментально у 1947 р. Вони одержали назву пі-мезонів.

Пі-мезони не входять до складу протонів і нейтронів, а випромінюються і поглинаються ними.

**ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ АТОМНОГО ЯДРА.** Якщо порівняти масу атомного ядра із сумою мас відокремлених нуклонів, які його утворюють, то з'ясується, що вони не збігаються: маса ядра завжди менша за суму мас його складових на величину  $\Delta m$ . Цю величину називають дефектом мас.

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

Причина виникнення дефекту мас полягає в тому, що для утворення ядра з вільних протонів і нейтронів потрібно виконати роботу, яка дорівнює **енергії зв'язку**. Згідно із законом взаємозв'язку маси та енергії, зміна енергії на  $\Delta E$  супроводжується пропорційною зміною маси системи на  $\Delta m$ :

$$\Delta E = \Delta mc^2, \text{ де } c \text{ — швидкість світла у вакуумі.}$$

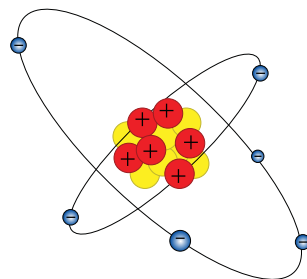


Рис. 26.2 Модель атома Нітрогену



**Хідекі Юкава**  
(1907—1981),  
японський фізик-теоретик, лауреат Нобелівської премії з фізики (1949)



Як одиниця маси в атомній та ядерній фізиці використовується атомна одиниця маси ( $1,66057 \cdot 10^{-27}$  кг), а як одиниця енергії — 1 МеВ ( $1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж).

Тому енергію зв'язку атомного ядра зазвичай розраховують у МеВ за формулою  $E_{\text{зв}} = 931,5 \Delta m$ , де маса подана у атомних одиницях маси.

**Питомою енергією зв'язку називають енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон.**

Для різних хімічних елементів енергія зв'язку, що припадає на один нуклон, різна. При збільшенні масового числа елемента вона змінюється, причому від Гідрогену до Феруму енергія зв'язку зростає, потім, приблизно від Феруму до Криптону, залишається майже сталою, а далі зменшується. Отже, найбільшу енергію зв'язку на один нуклон мають ядра елементів, що стоять на початку або наприкінці таблиці Менделєєва, тобто при утворенні легких і важких ядер. Тому, якщо здійснити такі ядерні реакції, за яких утворюватимуться ядра середньої маси з легких ядер завдяки їх синтезу або з важких ядер способом їх поділу на два легші ядра, виділятиметься величезна кількість ядерної енергії.

Таблиця 26.1

Маси деяких ізотопів

Ізотоп	${}^2_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^7_3\text{Li}$	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	${}^{226}_{88}\text{Ra}$
Маса, а.о.м.	2,014102	4,002603	7,016004	13,00335	19,99244	226,02541

**РАДІОАКТИВНІСТЬ.** У 1896 р. професор фізики Паризької політехнічної школи А. Беккерель досліджував здатність різних кристалів випускати під дією сонячного світла промені, подібні до рентгенівських. Беккерель вважав, що кристали під дією світла будуть викривляти промені, які можуть діяти на фотографічні плівки, загорнуті в чорний папір. Між кристалом та фотоплівкою містився екран, зроблений з мідних дротинок. Тому після проявлення фотоплівка виявилась засвіченою скрізь, крім ділянок, які були закриті мідними дротинками.

Серед кристалів, з якими працював Беккерель була сіль Урану  $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Погода в ці дні була хмарною. Тому Беккерель заховав фотоплівку в шухляду разом із кристалом уранової солі. Коли минуло кілька днів, фотоплівку проявили. При цьому з'ясувалося, що вона потемніла та містить чітке зображення мідного екрана, хоч сіль Урану й не опромінювали сонячним світлом. Беккерель дійшов висновку, що промені, які діяли на фотоплівку, випускає Уран.

У 1898 р. Марія Склодовська-Кюрі виявила, що подібні промені випускає Торій, а потім вона разом зі своїм чоловіком П'єром Кюрі відкрила Радій. Подружжя Кюрі назвали це явище радіоактивністю, а речовини, здатні випускати таке випромінювання, — радіоактивними.

**Радіоактивність — явище спонтанного перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента в ізономи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.**



**Антуан Анрі Беккерель**  
(1852—1908),  
французький фізик,  
лауреат Нобелівської  
премії з фізики (1903),  
один із першовідкривачів  
радіоактивності



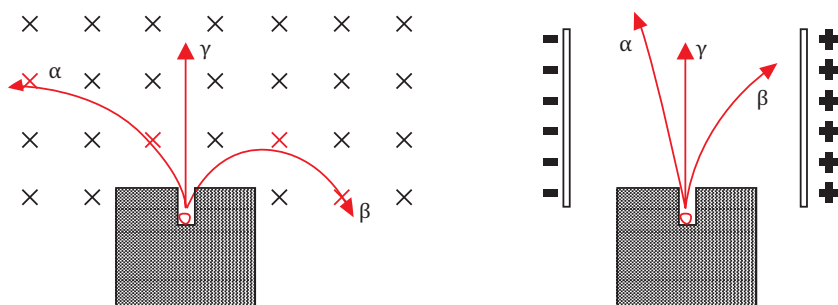
**Марія Склодовська-Кюрі**  
(1867—1934)  
французький фізик,  
лауреат Нобелівської  
премії з фізики (1903)  
та хімії (1911)



**П'єр Кюрі**  
(1859—1906),  
французький фізик,  
один із перших  
дослідників радіоактивності,  
лауреат Нобелівської  
премії з фізики (1903)

У 1903 р. Беккерель одержав Нобелівську премію з фізики за відкриття спонтанної радіоактивності, а разом з ним цієї премії біло удостоєне й подружжя Кюрі за дослідження радіоактивного випромінювання. Марія Склодовська-Кюрі була також нагороджена Нобелівською премією з хімії в 1911 р. за відкриття Радію та Полонію, вивчення властивостей Радію.

**ВИДИ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.** Вивчаючи фізичну природу радіоактивного випромінювання, було з'ясовано, що воно не є однорідним. У 1899 р. Резерфорд відкрив  $\alpha$ - та  $\beta$ -промені, а в 1900 р. французький фізик Пол Вілард відкрив  $\gamma$ -промені, що відрізнялися від  $\alpha$ - та  $\beta$ -променів, оскільки не відхилялися в магнітному та електричному полях (рис. 26.3). Детальні дослідження радіоактивного випромінювання дали змогу з'ясувати його природу.



**Рис. 26.3.** Відхилення радіоактивних променів у магнітному та електричному полях

**$\alpha$ -промені** — потік ядер атомів Гелію  ${}^4_2\text{He}$  — важких позитивно заряджених частинок масою 4 а.о.м. (1 а. о. м. =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг) та зарядом  $q = 2e$ , швидкість яких 10 000 км/с. Пролітаючи крізь речовину,  $\alpha$ -частинки поступово втрачають енергію, іонізуючи молекули речовини, і врешті зупиняються. За час свого руху одна  $\alpha$ -частинка здатна йонізувати сотні тисяч пар йонів. У повітрі довжина вільного пробігу  $\alpha$ -частинок від 2 до 12 см, а у твердих речовинах — менше міліметра. Тому їх легко зупинити аркушем паперу.

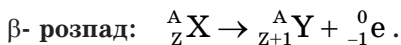
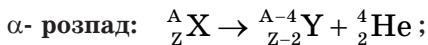
**$\beta$ -промені** — потік швидких електронів. Швидкості електронів можуть наближатися до швидкості світла. Внаслідок малої маси  $\beta$ -частинки активно розсіюються у речовині, іонізуючи її. Щоб затримати  $\beta$ -частинку, досить листа металу товщиною 3 мм.

Особливо небезпечними  $\alpha$ - та  $\beta$ -частинки є при потраплянні в організм людини чи тварини — у легені, шлунок та шкіру.

**$\gamma$ -промені** — високоенергетичне електромагнітне випромінювання. Взаємодіючи з електронними оболонками атомів, сприяють утворенню швидких електронів, які йонізують середовище. Для їх поглинання потрібен шар свинцю товщиною 20 см.

Саме ці промені в побуті називають «радіація». Радіоактивні речовини й ділянки території, де є небезпека потрапити під вплив радіоактивного випромінювання, позначають спеціальним знаком безпеки (рис. 26.4). Радіоактивне випромінювання не фіксується органами чуття людини, проте відомо, що воно може призвести до згубних наслідків.

Радіоактивні перетворення ядер підкорюються правилам зміщення:



Наприклад, при  $\alpha$ -розпаді Урану-238 утворюється елемент, протонне число якого  $92 - 2 = 90$ , а нуклонне  $238 - 4 = 234$ .

Отже, в результаті утвориться Торій-234. Рівняння реакції  $\alpha$ -розпаду Урану-238 можна записати Отже:  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ . Торій-234 також радіоактивний й зазнає  $\beta$ -розпаду  ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e}$ .

**Дозиметрія** — розділ технічної фізики, завданням якої є вимірювання і розрахунки дози в полях джерел випромінювання та вимірювання активності радіоактивних препаратів.

Методи вимірювання дози ґрунтуються на застосуванні йонізаційних камер, лічильних трубок, фотоплівки, сцинтиляційних або хімічних дозиметрів. На рис. 26.5 зображено побутові дозиметри. Під час використання дозиметрів слід чітко дотримуватись інструкцій виробника.



**Рис. 26.4** Знак безпеки. Небезпечно. Радіоактивні матеріали.



Рис. 26.5. Дозиметри-радіометри РК-01, «СТОРА», МК-05 та «ТЕРРА-П»

**Дозиметр** — прилад, призначений для вимірювання потужності дози іонізуючого випромінювання довкілля, яке реєструється за певний проміжок часу.

Сучасні дозиметри використовують для екологічних досліджень довкілля, радіометричного контролю на підприємствах, для контролю радіаційного стану житла, будівель і споруд, прилеглих до них територій, предметів побуту, одягу, транспорту, поверхні ґрунту.

**ДОЗИ ВИПРОМІНЮВАННЯ.** Випромінювання радіоактивних речовин справляє дуже активний вплив на живі організми. Рухаючись у живому організмі, уламок ядра руйнує частинки живих клітин, у результаті клітина гине чи порушується її генетичний код. Найбільш чутливими до випромінювання частинок є ядра клітин, особливо тих, які швидко поділяються. Тому передусім випромінювання вражають кістковий мозок, через що порушується кровообіг. Далі вражаються клітини шлункового тракту та інших органів. Сильний вплив справляє випромінювання на спадковість, вражаючи гени в хромосомах.

Іноколи випромінювання може бути корисним:  $\gamma$ -випромінюванням пригнічують ракові пухлини.

Вплив радіоактивного випромінювання на живі організми характеризується **дозою опромінювання** — відношенням поглинутої енергії йонізованого випромінювання до маси речовини, яка опромінюється:

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

У СІ одиницею дози опромінювання є грей  $[D] = 1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

1 Гр дорівнює поглинутій дозі випромінювання, за якої опромінюваної речовини масою 1 кг, передається енергія йонізуючого випромінювання 1 Дж.

Використовують також позасистемну одиницю 1 рад (*rad* — за першими літерами англійського словосполучення *radation absorbed dose* — поглинута доза випромінювання).

1 рад — це доза, за якої опромінений речовини масою 1 кг передається енергія  $10^{-2}$  Дж.

**Експозиційна доза випромінювання** — доза рентгенівського і гамма-випромінювання, яка визначається за йонізацією повітря.

Одиницею експозиційної дози є кулон на кілограм (Кл/кг). Якщо експозиційна доза 1 Кл/кг, то це означає, що сумарний заряд усіх йонів одного знака, утворених в 1 кг повітря, дорівнює 1 Кл.

Позасистемна одиниця експозиційної дози — рентген (Р). 1 Р означає, що в 1 см<sup>3</sup> повітря за нормальних умов утворюється йонів із загальним зарядом кожного знаку  $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$  Кл.

**Еквівалентна доза випромінювання** — міра біологічного впливу йонізуючого випромінювання на живий організм. При опроміненні живих організмів, зокрема людини, виникають біологічні ефекти, які однієї і тій самої поглинутої дози різні для різних видів випромінювання. Прийнято порівнювати біологічні ефекти, які зумовлюються будь-якими йонізуючими випромінюваннями, з ефектами від рентгенівського й гамма-випромінювань. У процесі короткочасного опромінення людини доза в 20–50 Р призводить до змін у крові, доза в 100–250 Р спричиняє променеву хворобу, а доза в 600 Р — смертельна. Природний фон радіації дорівнює річній дозі 0,2 Р, гранично допустима доза — 5 Р за рік.

**БЕР** (біологічний еквівалент рентгена) — позасистемна одиниця еквівалентної дози йонізуючого випромінювання 1 Б = 0,01 Дж/кг.

**ЗАХИСТ ВІД ЙОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.** Можна використовувати захисні стіни, для цього з матеріалів з великою атомною масою, наприклад, свинцю. На практиці широко використовують залізобетон. Для захисту від потоку нейтронів потрібно спочатку уповільнити їх водою, а потім використати стінку з берилію.

Товщина шару заданого матеріалу, що зменшує рівень радіації у два рази, називається *шаром половинного ослаблення*. Співвідношення рівня радіації до і після захисту називається коефіцієнтом захисту. Зі збільшенням товщини шару протирадіаційного захисту кількість пропущеної радіації спадає експоненціально. Так, якщо шар половинного ослаблення злежалого ґрунту становить 9,1 см, то насип товщиною 91 см (типовий насип над протирадіаційним сховищем) зменшить кількість радіації в 2<sup>10</sup>, або у 1024 рази.

### **! Головне в цьому параграфі**

Радіоактивність — явище спонтанного перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента в ізономи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.  $\alpha$ -промені — потік ядер атомів Гелію;  $\beta$ -промені — потік швидких електронів;  $\gamma$ -промені — високоенергетичне електромагнітне випромінювання. Випромінювання радіоактивних речовин справляє дуже активний вплив на живі організми. Рухаючись у живому організмі, уламок ядра руйнує частинки живих клітин, у результаті клітина гине чи порушується її генетичний код.

### **? Знаю, розумію, вмію пояснити**

1. З яких частинок складається атом? Атомне ядро? 2. Як визначити кількість протонів у ядрі? кількість нейтронів? 3. Який тип взаємодії забезпечує утримання електронів у ядрі атома? 4. Чому виникає дефект

мас? Чим це можна пояснити? 5. Що є причиною радіоактивного випромінювання? Яка природа  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -випромінювання? 6. Поясніть, чому радіоактивне випромінювання у електростатичному та магнітному полях розкладається на складові (рис. 26.4) 7. Навіщо радіоактивні речовини маркують спеціальним знаком безпеки?

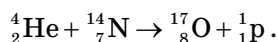
## § 27. Ядерні реакції. Ядерна енергетика

*Опрацювавши параграф, ви навчитесь оперувати поняттями і термінами: ядерна реакція, ядерний реактор.*

*Зможете пояснити: закон радіоактивного розпаду, принцип роботи АЕС.*

*Ознайомитесь із внеском ядерної енергетики в екологічну, економічну та енергетичну безпеку України.*

**ЯДЕРНА РЕАКЦІЯ.** Внаслідок ядерних реакцій можуть утворюватись нові радіоактивні ізотопи, яких немає на Землі у природних умовах. Перша ядерна реакція була здійснена Е. Резерфордом у 1919 р. бомбардуванням атомів Нітрогену  $\alpha$ -частинками. При зіткненні частинок відбувалася ядерна реакція за схемою:

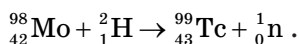


**Ядерна реакція — це процес перебудови атомного ядра під впливом  $\gamma$ -кванта або зарядженої чи нейтральної частинки, що супроводжується утворенням нового ядра і нової частинки чи  $\gamma$ -кванта.**

В основі ядерних реакцій, як і в основі хімічних перетворень, перебувають закони збереження маси та енергії. Тому при записі ядерних реакцій треба стежити, щоб сума зарядів (нижні індекси) реагентів та продуктів реакції і сумарна маса частинок (верхні індекси) до і після реакції були однакові.

Ядерні реакції можуть відбуватися спонтанно або при бомбардуванні речовини швидкими частинками. Спонтанні ядерні перетворення є причиною природної радіоактивності. Як і хімічні реакції, ядерні реакції можуть бути ендотермічними (супроводжуються поглинанням тепла) й екзотермічними (супроводжуються виділенням тепла).

За допомогою реакцій ядерного синтезу одержано елементи, які не зустрічаються в природі, наприклад:

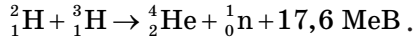


**Ядерні реакції синтезу — взаємодія ядер атомів хімічних елементів з елементарними частинками або з ядрами інших елементів, внаслідок якої ядра об'єднуються, утворюючи ядро іншого хімічного елемента.**

Ядерні сили проявляються лише на відстанях, менших за величиною діаметра ядра ( $10^{-15}$  м). Для того, щоб подолати кулонівське відштовхуван-



ня протонів у однойменно позитивно заряджених ядрах, треба передати ядрам, що будуть зливатися, енергію, необхідну для такого злиття. При злитті легких ядер виділяється енергія, яку називають *термоядерною*, вона більша за енергію, що виділяється при поділі важких ядер:



Загалом у цій реакції виділяється 17,6 Мев. Це одна з найбільш перспективних термоядерних реакцій. Термоядерні реакції ефективно відбуваються за температур понад  $10^7$  К. Це надзвичайно висока температура. При такій температурі речовина перебуває в повністю йонізованому стані, який називається плазмою. Здійснення термоядерних реакцій у земних умовах дає людству можливість отримати екологічно чисту і практично невичерпну енергію (на відміну від реакцій поділу важких ядер, у результаті термоядерного синтезу не утворюються радіоактивні відходи).

**ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ.** Кількість речовини, ядра атомів якої розпадаються, весь час змінюється. Цю кількість характеризує **період піврозпаду ( $T$ )** речовини.

**Період піврозпаду** — фізична величина, що характеризує швидкість розпаду радіонукліда й чисельно дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер цього радіонукліда.

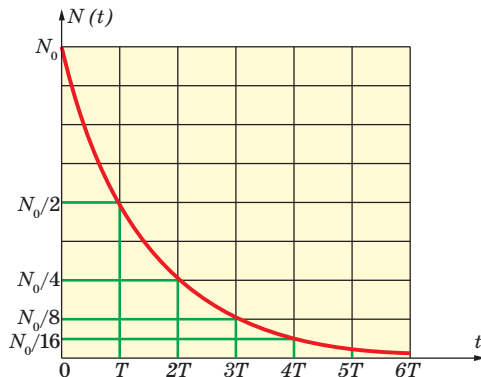
Якщо в початковий момент часу ( $t = 0$ ) було  $N_0$  радіоактивних ядер (рис. 27.1), то за період піврозпаду  $T$  кількість їх стане вдвічі меншою  $N_0/2$ , ще через такий самий час  $T$  їх уже буде  $N_0/4$  тощо.

Через час  $t = nT$ , тобто через  $n$  періодів напіврозпаду  $T$ , радіоактивних атомів залишиться:  $N = N_0 \frac{1}{2^n}$ . Оскільки  $n = t/T$ , то

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

Це і є **основний закон радіоактивного розпаду**.

З практичного погляду важливою характеристикою процесу радіоактивного розпаду є швидкість, з якою розпадається та чи інша радіоактивна речовина. Наявність радіоактивних речовин у середовищі часто буває дуже малою. Оскільки швидкість розпаду радіоактивних ізотопів різна, то однакові за масою радіонукліди мають різну активність. Чим більше ядер розпадається в одиницю часу, тим більша активність.



**Рис. 27.1.** Графічне відображення закону радіоактивного розпаду



**Активність радіоактивної речовини** — фізична величина, яка характеризує інтенсивність радіоактивного розпаду й чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певній радіоактивній речовині за одиницю часу.

Активність позначають латинською літерою  $A$ . Одиницею активності в СІ є бекерель (Бк):  $[A] = 1 \text{ Бк}$ .

**1 Бк** — активність радіонукліда, в якому за одну секунду відбувається один розпад.

Оскільки бекерель дуже мала величина, то в ядерній фізиці часто використовують позасистемну одиницю активності **кюри (Ки)**. 1 Ки відповідає активності 1 г Радію ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Розпад того чи іншого ядра в певний момент часу є випадковою подією. Ми не можемо сказати, що станеться саме з цим ядром. Явище радіоактивного розпаду має ймовірнісний характер, і який саме атом розпадеться в той чи інший момент часу — невідомо. Але для великої кількості атомів статистично розпадається половина за час періоду піврозпаду.

Для кожної радіоактивної речовини період піврозпаду є сталою величиною. За одиницю часу з наявної кількості атомів завжди розпадається певна їх частина, яку називають сталою радіоактивного розпаду цього радіоактивного елемента (табл. 27.1).

**Стала радіоактивного розпаду радіонукліда** — фізична величина, що характеризує середній час життя атома радіонукліда й чисельно дорівнює частині атомів, що розпадаються за одиницю часу із загальної кількості атомів.

Сталу радіоактивного розпаду позначають малою грецькою літерою  $\lambda$ .

Ці фізичні величини пов'язані співвідношеннями:

$$A = \lambda N; \lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0,69}{T}.$$

Основний закон радіоактивного розпаду записаний з використанням сталої радіоактивного розпаду має вигляд:

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

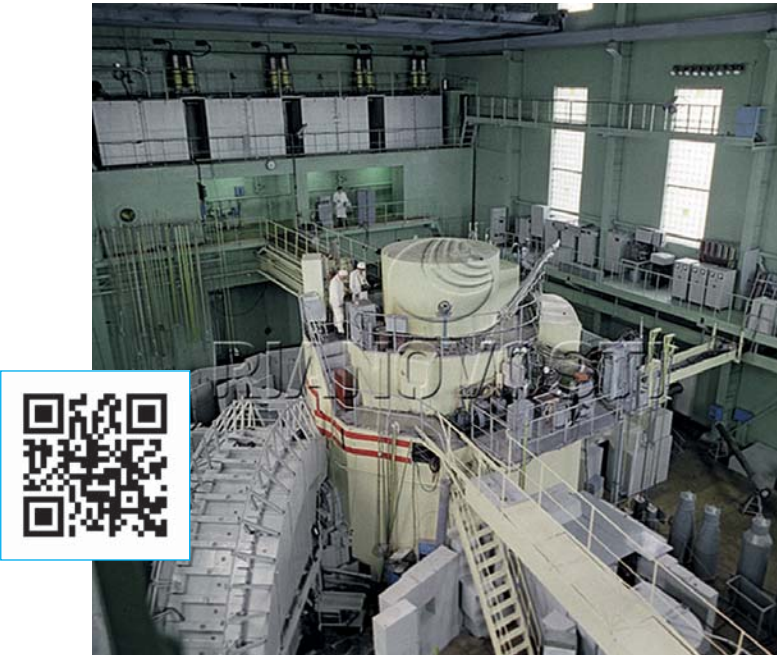
Таблиця 27.1

**Сталі радіоактивного розпаду деяких радіонуклідів**

Радіонуклід	$\lambda, \frac{1}{\text{с}}$
Йод-131	$9,98 \cdot 10^{-7}$
Кобальт-60	$4,15 \cdot 10^{-9}$
Плутоній-239	$9,01 \cdot 10^{-13}$
Радій-226	$1,37 \cdot 10^{-11}$
Радон-220	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Уран-235	$3,14 \cdot 10^{-17}$
Цезій-137	$7,28 \cdot 10^{-10}$

**ЯДЕРНИЙ РЕАКТОР.** Запаси палива на Землі є обмеженими. За прогнозами спеціалістів запаси нафти та газу будуть вичерпані приблизно через століття, а запаси вугілля — через 300–500 років. Тому зрозуміло, що без ядерної енергії та створення ядерної енергетики людству не розв'язати енергетичну проблему.

Перший ядерний реактор на теренах України ВВР-М (рис. 27.2) став до ладу 12 лютого 1960 р. в Інституті ядерних досліджень НАН України. Інститут ядерних досліджень має широкі наукові зв'язки. Проводяться спільні дослідження з науковцями Росії, США, Франції, Німеччини, Італії, Австрії, Польщі, Швеції, Нідерландів, Японії та інших країн.



**Рис. 27.2.** Дослідницький ядерний реактор ВВР-М в Інституті ядерних досліджень НАН України (<http://www.kinr.kiev.ua/>)

**Ядерний реактор** — пристрій, в якому підтримується керована реакція ділення ядер.

У ядерному реакторі використовують ядерне паливо, наприклад, Уран. Як уповільнювач нейтронів використовують важку чи звичайну воду, графіт. У сповільнювачі розміщені стрижні з ядерним паливом (тепловидільні елементи — ТВЕЛі). Нейтрони, стикаючись із ядрами уповільнювача, втрачають свою швидкість, від чого зростає ймовірність їх захоплення. У результаті поділу Урану виділяється теплова енергія, яка розігріває теплоносії. Як теплоносії використовують воду під тиском чи рідкий Натрій, Літій. Теплоносії утворює первинний контур, який відводить теплову енергію безпосередньо із зони реактора і передає її теплоносію другого контура (вода), яка перетворюється в пару, що потім і обертає турбіни електрогенератора.

Стінки активної зони реактора вкриваються речовиною (наприклад берилієм), яка, немов дзеркало сонячні промені, відбиває швидкі нейтрони від стінок в активну зону реактора, де розміщено ТВЕЛі. Як біологічний захист зазвичай використовують залізобетонну стіну завтовшки в декілька метрів.

Схему будови ядерного реактора наведено на рис. 27.3.

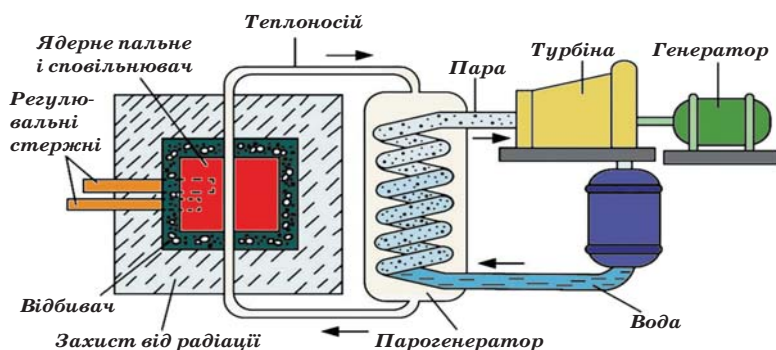


Рис. 27.3. Схема ядерного реактора

**ВНЕСОК АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ УКРАЇНИ.** За останні роки в багатьох країнах світу спостерігається зростання атомної енергетики в галузі енергозабезпечення. Якщо в 1960 р. атомна енергетика забезпечувала менше 1 % потреб людства в електроенергії, то на сьогодні — близько 15 %.

Для науково-технічної співпраці в галузі мирного використання ядерної технології 29 липня 1957 р. було створено Міжнародну агенцію з атомної енергії (рис. 27.4), або МАГАТЕ (англ. *International Atomic Energy Agency*). МАГАТЕ встановлює стандарти ядерної безпеки і захисту довкілля, надає країнам-членам технічну допомогу, а також заохочує обмін науковою і технічною інформацією щодо ядерної енергії.



Рис. 27.4. Головний офіс МАГАТЕ у Відні (Австрія)

Після Чорнобильської аварії з'явилося поняття «культура безпеки», сформульоване міжнародною консультативною групою при МАГАТЕ. Питанням безпеки атомних електростанцій надається найвищий пріоритет. Культура безпеки має бути основою стратегії розвитку атомної енергетики України. У ідеалі в галузі атомної енергетики як технології вищого порядку, повинні бути створені умови, що вунеможливають будь-яку аварію.

Детальніше про найбільші техногенні аварії в атомній енергетиці, що сталися на Чорнобильській АЕС та японський АЕС Фукусіма, ви вивчали в 9 класі.

У енергозабезпеченні України частка ядерної енергії — понад 55 %, а у вихідні дні, коли промислові підприємства здебільшого не працюють, ця частка становить понад 70 %. Це четверте місце в світі за забезпеченням енергією країни з АЕС, після таких європейських країн, як Франція, Словаччина, Угорщина.

Важливо, що вартість електроенергії, виробленої на АЕС, є найнижчою порівняно з іншими типами електростанцій. У вартості електричної енергії лише 32,77 % становить енергія АЕС.



Підручник «Фізика-9»



Запорізька АЕС



Рівненська АЕС



Південно-Українська АЕС



Хмельницька АЕС

**Рис. 27.5.** Атомні електростанції України

У жовтні 1996 р. для ефективного й безпечного управління діючими атомними електростанціями України було створено Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», яка є оператором чотирьох діючих атомних електростанцій України (рис. 27.5), на яких експлуатується 15 атомних енергоблоків, з яких 13 типу ВВЕР-1000 і два — ВВЕР-440, загальною встановленою потужністю 13 835 МВт. Дванадцять енергоблоків Україна успадкувала від СРСР, ще три були запуснені після його розпаду, у 1995 і 2004 р.

Для ядерних джерел енергії характерна компактна форма відходів і технічно обґрунтована можливість їх концентрації та локалізації. До



певного часу всі екологічні проблеми ядерної енергетики зводилися до складнощів в утилізації відходів виробництва станцій.

В Україні над вирішенням цієї проблеми працюють вчені Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка Національної академії наук України. Однією з найважливіших проблем, що постають перед вченими, є захоронення відпрацьованого ядерного палива.

Неухильний контроль за роботою АЕС із боку держави й міжнародної спільноти дає змогу мінімізувати негативний вплив АЕС на довкілля й запобігти аваріям.

### ! Головне в цьому параграфі

В основі ядерних реакцій, як і в основі хімічних перетворень, перебувають закони збереження маси та енергії. Тому при записі ядерних реакцій треба стежити, щоб сума зарядів (нижні індекси) реагентів та продуктів реакції і сумарна маса частинок (верхні індекси) до і після реакції були однаковими.

Явище радіоактивного розпаду має ймовірнісний характер, і який саме атом розпадеться в той чи інший момент часу — невідомо. Але для великої кількості атомів статистично розпадається половина за час періоду піврозпаду.

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. У чому відмінність між хімічною та ядерною реакціями? 2. Які види ядерних реакцій ви знаєте? 3. Які перетворення енергії відбуваються в ядерних реакторах? 4. Чому для здійснення ланцюгової реакції поділу ядер атомів Урану треба мати певну кількість Урану? 5. Чому реакція синтезу легких ядер відбувається тільки за дуже високих температур? 6. Допишіть рівняння ядерних реакцій:  ${}^7_3\text{Li} + ? \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ ;  ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + ?$

### Домашній експеримент «Моделювання радіоактивного розпаду»

Оскільки природна радіоактивність — це самовільний процес, розпад кожного ядра є випадковою подією, що має певну ймовірність. Закон радіоактивного розпаду є статистичним законом; точно виконується лише у випадку величезної кількості ядер.

Ймовірність розпаду кожного з радіоактивних ядер за час  $T$  дорівнює  $1/2$ . Процес радіоактивного розпаду можна моделювати підкиданням монет, за якого з ймовірністю  $1/2$  випадає герб чи цифра («орел» чи «решка»). Нехай, якщо випаде «орел», то ядро вціліло, а якщо «решка» — то розпалось. Кожне підкидання монет відповідає для ядра проміжку часу, що дорівнює періоду піврозпаду. Для виконання дослідження вам знадобляться монети, дві пластикові банки, піднос.

#### Вказівки до виконання експерименту

1. Відрахуйте 128 монет ( $N_0 = 128$ ), перемішайте їх у банці й висипте на піднос.
2. Підрахуйте число монет, що «не розпались» («орел»), і складіть їх в одну банку. В другу банку складіть монети, що «розпалися».
3. Перемішайте монети, що «не розпалися», і висипте на піднос. Повторіть п. 2.
4. Пункт 3 повторюйте доти, поки всі монети «розпадуться».

5. Кількість монет, що «не розпались» під час чергового підкидання, і кількість монет, що «розпались» за  $n$  підкидань, занесіть до таблиці та побудуйте графік залежності  $N(n)$ .

Кількість підкидань $n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість монет, що «не розпались», $N$	128										
Кількість монет, що «розпались», $N'$	0										

## § 28. Елементарні частинки

*Опрацювавши параграф, ви навчитесь оперувати поняттями і термінами: елементарна частинка, кварки.*

*Зможете пояснити сутність понять «частинка» і «античастинка», «взаємне перетворення елементарних частинок».*

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК.** Фізика елементарних частинок є одним із найважливіших розділів сучасної фізики.

Явища, що відбуваються у світі елементарних частинок, закономірності, яким підпорядковані ці явища, багато в чому відмінні від явищ і закономірностей макросвіту. Вивчення цих закономірностей має велике наукове і пізнавальне значення; воно дає можливість глибше проникнути в таємницю будови матерії, пояснити багато явищ, пов'язаних із внутрішньоядерними процесами, з процесами взаємодії елементарних частинок, пізнати природу речовини і поля.

Під елементарними частинками розуміють найпростіші частинки, які не складаються з будь-яких інших частинок. Але поняття «елементарна частинка» є умовним. Виявляється, що певні частинки, які вважаються найпростішими, можуть мати складну будову.

Які ж нам відомі частинки можна віднести до елементарних? Однією з основних їхніх характеристик є їх маса. У таблиці поміщено маси спокою частинок, тобто маси частинок, виміряні в тій системі координат, де вони нерухомі. Ці маси визначені в одиницях маси електрона (<http://peddumka.edukit.kiev.ua/Files/downloadcenter/QR-Phys11-210.pdf>).

Елементарні частинки характеризуються електричним зарядом, значення якого кратне заряду електрона і тому набуває значень  $+1, -1$  або  $0$ .



Детальніше...

**ЧАСТИНКИ ТА АНТИЧАСТИНКИ.** У природі, крім розглянутих нами елементарних частинок, існують так звані античастинки. Причому, як показали дослідження, кожному родові частинок відповідає античастинка. Як бачимо з таблиці, маса, спін і час життя античастинок дорівнюють масі, спінові та часу життя відповідної частинки, а електричний заряд

античастинки за абсолютним значенням дорівнює заряду частинки, а за знаком протилежний йому. Існування ряду античастинок фізики завбачили спочатку теоретично, а вже потім виявили на досліді. До таких частинок, зокрема, належать: позитрон, антипротон, антинейтрон. Антипротон має масу, що дорівнює масі протона, і заряд, який за абсолютною величиною дорівнює заряду протона, а за знаком протилежний йому.



Детальніше...

**КВАРКИ.** Кількість відкритих частинок є настільки великою, що виникли сумніви у їх елементарності. У 1964 р. американський фізик М. Гелл-Манн і незалежно від нього Дж. Цвейг висунули гіпотезу про те, що частинки, які беруть участь у сильній взаємодії (протони і нейтрони), складаються із трьох частинок — кварків: **u**-кварк, **d**-кварк та **s**-кварк (названі від англійських слів **up** — верхній, **down** — нижній і **strange** — дивний).



Детальніше...

### ? Знаю, розумію, вмію пояснити

1. Що таке елементарні частинки? 2. Який головний факт існування елементарних частинок? 3. Назвіть всі стабільні елементарні частинки. 4. Чи всі елементарні частинки мають античастинку? Чим відрізняється античастинка від частинки? 5. Що таке кварки?

### ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ № 6

*Опрацювавши цей практикум, ви навчитесь розв'язувати задачі на енергію зв'язку атомного ядра, закони радіоактивного розпаду, взаємозв'язок маси та енергії, випромінювання та поглинання світла атомами.*

Наведемо алгоритм й окремі методичні поради щодо розв'язування задач.

1. Під час розв'язування задач із розділу «електрон в атомі» приймають за класичну частинку, оскільки його кінетична енергія має величину порядку кількох електрон-вольт.

2. Енергетичний спектр атома складається із набору дискретних значень енергій  $W_k$  ( $k=1$  — основний стан,  $k>1$  — збуджений). Щоб перевести атом у збуджений стан, йому потрібно надати певну енергію, яку можна отримати, наприклад, під час захоплення фотона. Поглинаються лише ті фотони, енергія яких відповідає різниці енергій двох дискретних рівнів  $h\nu = W_2 - W_1$ .

3. У задачах довжина хвилі, що випромінюється атомом Гідрогену під час переходу з однієї орбіти на іншу, визначається за формулою

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ де } R \text{ — постійна Рідберга. Для видимого світла } n_1 = 2 \text{ —}$$



номер орбіти, на яку переходить, а  $n_2 = 3, 4, 5, 6$  — з якої переходить електрон.

4. Зазначена в таблиці Д. Менделєєва атомна маса хімічного елемента — це середньозважена величина від усіх ізотопів елемента, що трапляються в природі. Тому під час розрахунку дефекту маси, енергії зв'язку, маси ізотопів її потрібно визначати з відповідних довідкових таблиць.

5. У скороченому запису реакції спочатку записують хімічний символ вихідного ядра. Далі наводять позначення частинок, які бомбардують і вилітають із нього. Потім — хімічний символ продукту реакції. Елементарні частинки позначають такими символами:  $p$  — протон,  $n$  — нейтрон,  $d$  — дейтон ( ${}^2_1\text{H}$ ),  $\alpha$  — частинка ( ${}^4_2\text{He}$ ),  $\gamma$  — випромінювання (фотон).

6. Задачі, пов'язані з ядерними реакціями, розв'язують із застосуванням законів збереження: знаходження невідомої частинки або ізотопу, які беруть участь у реакції, перевірка вірогідності її запису — закони збереження електричного заряду й сумарної кількості нуклонів; знаходження кінетичної енергії частинок (продуктів реакції), напрямку їх руху — закони збереження імпульсу та енергії. Під час розрахунку енергії виходу ядерної реакції (її теплового ефекту) маси спокою ядер заміняють масами атомів. Різниця сум мас частинок, що вступають у реакцію й утворюються в її результаті, не змінюється, тому що кожна сума зростає на одну й ту ж величину  $m_e \cdot \sum Z$ , де  $m_e$  — маса електрона,  $\sum Z$  — сумарне зарядове число всіх частинок.

7. Щоб знайти кількість атомів, що містяться у відомій масі  $m$  радіоактивного ізотопу, використовують співвідношення:  $N = \nu \cdot N_A = \frac{m}{M} N_A$ , де  $\nu$  — кількість речовини,  $N_A$  — стала Авогадро,  $M$  — молярна маса ізотопу, яка виражається числом, близьким до масового:

$$M = A \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

8. Під час розв'язування задач із використанням закону радіоактивного розпаду враховують таке: якщо проміжок часу  $\Delta t$ , впродовж якого здійснюється розпад, набагато менше періоду напіврозпаду  $T$  ізотопу ( $\Delta t \ll T$ ), то кількість ядер, що не розпалися, практично залишається незмінною величиною, яка дорівнює їх початковому значенню  $N_0$ . З метою знаходження кількості ядер  $\Delta N$ , що розпалися, закон радіоактивного розпаду можна записати так:  $\Delta N = \lambda N_0 \Delta t$ ; якщо цей проміжок часу  $\Delta t$  і період напіврозпаду  $T$  є величинами одного порядку, то закон радіоактивного розпаду має вигляд:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ або } N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

### Приклади розв'язування задач

**Задача 1.** Знайти радіуси трьох перших Боровських електронних орбіт в атомі Гідрогену і швидкості електрона на них.

**Дано:**

$$k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 3$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$r_k - ?; v_k - ?$$

**Розв'язування**

На електрон, що рухається в атомі водню  $k$ -ю Боровською орбітою, діє кулонівська сила  $F = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_k^2}$  (1), де  $e$  — заряд електрона. Вона спрямована до центру і надає електрону нормального (доцентрового) прискорення  $a_n = \frac{v_k^2}{r_k}$  (2), де  $v_k$  — швидкість електрона на  $r_k$ -ій орбіті. За другим законом Ньютона  $F = ma_n$  (3), підставляючи формули (1) і (2) в (3), отримаємо

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_k^2} = \frac{mv_k^2}{r_k}$$
. Звідси маємо  $r_k = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mv_k^2}$  (4). Згідно з першим постулатом Бора рух електрона навколо ядра здійснюється лише за певними орбітами, радіуси яких можна визначити із співвідношення  $mv_k r_k = k \frac{h}{2\pi}$  (5). Розв'язуючи систему рівнянь (4) і (5), знайдемо:  $v_k = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 kh}$  і

$r_k = \frac{\varepsilon_0 k^2 h^2}{\pi m e^2}$ . За результатами обчислень складемо таблицю:

$k$	1	2	3
$v, 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	2,18	1,08	0,73
$r, \text{ пм}$	52,9	211,6	476,1

**Задача 2.** Знайти період обертання електрона на першій Боровській орбіті атома Гідрогену і його кутову швидкість.

**Дано:**

$$k = 1$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$T_1 - ?; \omega_1 - ?$$

**Розв'язування**

Радіус  $k$ -ї Боровської орбіти електрона в атомі Гідрогену і швидкість його руху на ній відповідно дорівнюють  $r_k = \frac{\varepsilon_0 k^2 h^2}{\pi m e^2}$  (1) і  $v_k = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 kh}$  (2) (див. задачу 1). Період обертання електрона становить  $T_k = \frac{2\pi r_k}{v_k}$  (3). Підставляючи (1) і (2) в (3), отримаємо:

$$T_k = \frac{4\varepsilon_0^2 k^3 h^3}{\pi m e^4} \quad (4). \text{ Якщо } k=1, \text{ то } T_1 = 1,52 \cdot 10^{-16} \text{ с.}$$

Кутова швидкість електрона на  $k$ -й орбіті дорівнює  $\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}$  (5).

Підставляючи формулу (4) в (5), отримаємо:  $\omega_k = \frac{\pi m e^4}{2 \varepsilon_0^2 k^3 h^3}$ .

Якщо  $k = 1$ , то  $\omega_1 = 4,13 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Відповідь:  $T_1 = 1,52 \cdot 10^{-16} \text{ с}$ ;  $\omega_1 = 4,13 \cdot 10^{16} \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

**Задача 3.** Знайти найбільшу і найменшу довжини хвиль у видимій частині спектра випромінювання атома Гідрогену.

Дано:	Розв'язування
$n_2 = 2$	Довжина хвилі світла, що випромінюється атомом Гідрогену під час переходу електрона із однієї орбіти на іншу, визначається за формулою $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_3^2} \right)$ (1).
$\lambda_{\max} - ?; \lambda_{\min} - ?$	

Найменша енергія вивільняється під час переходу електрона на другу орбіту з найближчої до неї третьої ( $n_3 = 3$ ), що відповідає випромінюванню світла з найбільшою довжиною хвилі  $\lambda_{\max}$ . Отже:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{1,097 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Найбільша енергія вивільняється під час переходу електрона на другу орбіту з нескінченно віддаленої ( $n_\infty = \infty$ ), що відповідає випромінюванню світла з найменшою довжиною хвилі  $\lambda_{\min}$ . Отже:

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{1,097 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty} \right)} = 3,65 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Проте ця довжина не потрапляє в частину спектра видимого світла ( $\lambda_{\min} < 400 \text{ нм}$ ). Тому з умови  $\lambda_{\min} \geq 400 \text{ нм}$  і формули (1), добираючи  $n$ , знаходимо, що  $\lambda_{\min} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  при  $n = 6$ . Отже, у видимій частині спостерігаються всього чотири лінії спектра випромінювання атома Гідрогену

Відповідь:  $\lambda_{\max} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $\lambda_{\min} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

**Задача 4.** Знайти енергію зв'язку ядра ізотопу Літію  ${}^7_3\text{Li}$ .

Дано:	Розв'язування
$m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	Енергія зв'язку ядра $W_{\text{зв}} = \Delta m c^2$ (1). Оскільки $\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M$ , то рівняння (1)
$m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	можна записати у вигляді:
$M_{\text{я}} = 11,6475 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$W_{\text{зв}} = [Z m_p + (A - Z) m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2$ .
$W_{\text{зв}} - ?$	

Із символічного запису ізотопу Літію  ${}^7_3\text{Li}$  маємо, що  $A = 7$  і  $Z = 3$ . Підставивши значення  $A$  і  $Z$  у вираз (1), отримаємо  $W_{\text{зв}} = [3m_p + 4m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2$ . Обчислюємо:

$$W_{\text{зв}} = [3 \cdot 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ кг} + 4 \cdot 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ кг} - 11,6475 \cdot 10^{-27} \text{ кг}] \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 6,201 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$$

**Відповідь:**  $W_{\text{зв}} = 6,201 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$ .

**Задача 5.** Радіоактивний Натрій  ${}^{24}_{11}\text{Na}$  розпадається, випускаючи  $\beta$ -частинки. Період його напіврозпаду становить 14,8 год. Обчислити кількість атомів, що розпалися в 1 мг радіоактивного препарату за 10 год.

**Дано:**

$$T = 14,8 \text{ год} \approx 5,33 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$t = 10 \text{ год} = 3,6 \cdot 10^4 \text{ с}$$

$$m = 1 \text{ мг} = 10^{-6} \text{ кг}$$

$$\Delta N - ?$$

**Розв'язування**

Кількість атомів, що розпалися за час  $t$ , дорівнює  $\Delta N = N_0 - N$ , де  $N_0$  — кількість атомів, що не розпалися в початковий момент часу, яка дорівнює кількості всіх атомів в 1 мг  ${}^{24}_{11}\text{Na}$ ;

$N$  — кількість атомів, що не розпалися через час  $t$ . Оскільки  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$ , то формулу можна записати так:

$$\Delta N = N_0 - N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right).$$

Оскільки в одному молі  ${}^{24}_{11}\text{Na}$  міститься кількість атомів, дорівнює постійній Авогадро  $N_A$ , то в масі  $m$  міститься  $N_0 = \frac{mN_A}{M}$  атомів, де  $M$  — молярна маса Натрію. Підставивши формулу (4) в (3), отримаємо  $\Delta N = \frac{mN_A}{M} \cdot (1 - 2^{-\frac{t}{T}})$ ;  $\Delta N = \frac{10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{24 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 - 2^{-\frac{3,6 \cdot 10^4}{5,33 \cdot 10^4}}) \approx 9,3 \cdot 10^{18}$ .

**Відповідь:**  $\Delta N \approx 9,3 \cdot 10^{18}$ .

### Задачі для самостійного розв'язування

- 1(п).** Будова атома (ядро — електрони) нагадує будову Сонячної системи (Сонце — планети). У чому відмінність між ними?
- 2(п).** Чим відрізняється атом, що перебуває в основному стані, від того, що перебуває у збудженому?
- 3(п).** Чому  $\alpha$ -частинки, що випромінюються радіоактивними препаратами, не викликають ядерних реакцій у важких елементах?
- 4(п).** Чим відрізняються за будовою ядра атомів радіоактивних елементів від звичайних?
- 5(с).** Визначте енергію, що вивільняється під час переходу електрона у атома Гідрогену із третьої орбіти на першу.

- 6(с). Наскільки зміниться енергія електрона в атомі Гідрогену під час випромінювання фотона з довжиною хвилі  $4,86 \cdot 10^{-7}$  м?
- 7(с). Обчисліть повну енергію електрона, що перебуває на другій орбіті атома Гідрогену.
- 8(с). Обчисліть повну енергію електрона, що перебуває на третій орбіті атома Гідрогену.
- 9(с). Яка будова ядра ізоотопу Літію  ${}^7_3\text{Li}$ ?
- 10(с). Чим відрізняються ядра ізоотопів Азоту  ${}^{14}_7\text{N}$  і  ${}^{15}_7\text{N}$ ?
- 11(с). Яка будова ядра ізоотопу Калію  ${}^{39}_{19}\text{K}$ ?
- 12(с). Чим відрізняються ядра ізоотопів Оксигену  ${}^{16}_8\text{O}$ ;  ${}^{17}_8\text{O}$ ;  ${}^{18}_8\text{O}$ ?
- 13(с). Внаслідок захоплення  $\alpha$ -частинки ядром ізоотопу Азоту  ${}^{14}_7\text{N}$  утворюється невідомий елемент і протон. Запишіть реакцію і визначте невідомий елемент.
- 14(с). Як змінюються масове число і номер елемента під час протонного радіоактивного розпаду?
- 15(с). Знайдіть продукт реакції під час бомбардування ядер ізоотопу Магнію  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$   $\alpha$ -частинками, якщо в ній виділяються нейтрони.
- 16(с). Запишіть схему ядерної реакції і визначте невідомий елемент, що утворюється під час бомбардування ядер ізоотопів Алюмінію  ${}^{17}_{13}\text{Al}$   $\alpha$ -частинками, один з продуктів реакції — нейтрон.
- 17(д). Під час переходу електрона з невідомої орбіти на другу атом Гідрогену випромінює світло із довжиною хвилі  $4,34 \cdot 10^{-7}$  м. Знайдіть її номер.
- 18(д). Під час випромінювання атомом Гідрогену фотона його повна енергія змінюється на 2,56 еВ. Знайдіть довжину хвилі випромінюваного світла.
- 19(д). Радіус орбіти електрона в атомі Гідрогену становить  $2 \cdot 10^{-10}$  м. Фотони якої довжини хвилі можуть викликати його іонізацію?
- 20(д). З якою частотою обертається електрон в атомі Гідрогену, перебуваючи на коловій орбіті радіусом  $5 \cdot 10^{-11}$  м?
- 21(д). Знайдіть кінетичну, потенціальну і повну енергії електрона на першій Боровській орбіті.
- 22(д). Знайдіть кінетичну енергію електрона, що перебуває на  $k$ -й орбіті атома Гідрогену, для  $k = 1, 2, 3$  та  $\infty$ .
- 23(д). Обчисліть дефект маси ядра ізоотопу  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ .
- 24(д). Визначте період напіврозпаду Радону, якщо за 1 добу з 1 млн атомів розпадається 175 000.
- 25(д). Яку мінімальну енергію необхідно витратити, щоб зруйнувати ядро ізоотопу Гелію  ${}^4_2\text{He}$ ?
- 26(д). Визначте дефект маси ядра ізоотопу Гідрогену  ${}^2_1\text{H}$ .
- 27(в). Електрон в атомі Гідрогену може перебувати на колових орбітах радіусами  $0,5 \cdot 10^{-8}$  м і  $2 \cdot 10^{-10}$  м. Як відносяться кутові швидкості обертання електрона на них?
- 28(в). Під час опромінення парів ртуті електронами енергія її атома збільшилася на 4,9 еВ. Яку довжину хвилі він випромінюватиме під час переходу в основний стан?

**29(в).** Скільки ядер розпадається за 1 с із кожного мільярда ядер ізоотопу Йоду  $^{131}_{53}\text{I}$ ?

**30(в).** За 8 год початкова маса радіоактивного ізоотопу зменшилася в три рази. У скільки разів вона зменшиться за добу?

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ № 6

**1(п).** У ядрі атома Цинку 30 протонів і 35 нейтронів. Скільки в ньому електронів?

**A** 5

**Б** 30

**В** 35

**Г** 65

**2(п).** У ядрі атома хімічного елемента 10 протонів і 11 нейтронів. Що це за елемент?

**A** Неон

**Б** Натрій

**В** Скандій

**Г** Рутеній

**3(п).** Відбулося спонтанне перетворення радіоактивного ізоотопу Плюмбуму:  $^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}e$ . Який це вид радіоактивного розпаду?

**A**  $\gamma$

**Б**  $\alpha$

**В**  $\beta$

**Г** протонний розпад

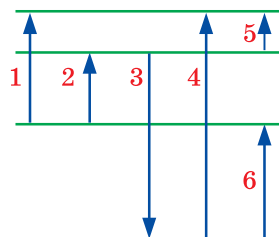
**4(с).** На рисунку показано чотири нижні енергетичні рівні атома. Стрілки відповідають переходам між ними;  $\nu_i$  — частота фотона, який випромінюється або поглинається під час переходу. Якому переходу відповідає найбільша частота  $\nu_i$ ?

**A** 1

**Б** 3

**В** 4

**Г** 6



**5(с).** Відбувся  $\alpha$ -розпад Радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Як змінився його атомний номер  $Z$  та масове число  $A$ ?

**A**  $Z$  зменшився на 4,  $A$  зменшилося на 2.

**Б**  $Z$  зменшився на 4,  $A$  зменшилося на 4.

**В**  $Z$  зменшився на 2,  $A$  зменшилося на 2.

**Г**  $Z$  зменшився на 2,  $A$  зменшилося на 4.

**6(с).** Відбувся  $\beta$ -розпад ізоотопу Гідрогену  $^3_1\text{H}$ . Яке ядро утворилося?

**A**  $^2_1\text{H}$

**Б**  $^1_1\text{H}$

**В**  $^2_2\text{He}$

**Г**  $^3_2\text{He}$

**7(с).** Знайдіть дефект мас ядра Літію  $^7_3\text{Li}$ .

**A** Менший за 0,06 а.о.м.

**В** Між 0,2 а.о.м. і 0,5 а.о.м.

**Б** Між 0,08 а.о.м. і 0,1 а.о.м.

**Г** Більший за 0,6 а.о.м.

**8(с).** Якою є енергія зв'язку ядра Карбону  $^{13}_6\text{C}$ ?

**A** Менша за 100 MeV.

**В** Між 120 MeV і 180 MeV.

**Б** Між 200 MeV і 230 MeV.

**Г** Більша за 250 MeV.

- 9(с).** Якою є питома енергія зв'язку ядра Радію  $^{226}_{88}\text{Ra}$  ?  
**А** Менша за 8 МеВ/нуклон.  
**Б** Між 9 МеВ/нуклон і 10 МеВ/нуклон.  
**В** Між 11 МеВ/нуклон і 12 МеВ/нуклон.  
**Г** Більша за 14 МеВ/нуклон.
- 10(д).** Яким є період піврозпаду радіоактивного ізотопу, якщо за 12 год у середньому розпадається 7500 із 8000 атомів?  
**А** 1,5 год      **Б** 2 год      **В** 3 год      **Г** 6 год
- 11(д).** Унаслідок бомбардування Алюмінію  $^{27}_{13}\text{Al}$   $\alpha$  -частинками відбувається ядерна реакція, під час якої його ядро захоплює  $\alpha$  -частинку і випускає протон. Ядро якого елемента утворюється внаслідок реакції?  
**А**  $^{27}_{13}\text{Al}$       **Б**  $^{30}_{14}\text{Si}$       **В**  $^{31}_{15}\text{P}$       **Г**  $^{32}_{16}\text{S}$
- 12(д).** Період напіврозпаду Цезію-137 становить 30 років. Визначте, скільки відсотків атомів цього ізотопу розпадеться за 180 років.  
**А** 93,75      **Б** 96,9      **В** 98,4      **Г** 99,2
- 13(д).** Активність радіоактивного елемента зменшилась у 4 рази за 8 діб. Знайдіть період напіврозпаду. Відповідь наведіть у добах.
- 14(д).** Коли атом Гідрогену переходить із четвертого енергетичного стану у другий, випромінюються фотони з енергією 2,55 еВ (зелена лінія спектра Гідрогену). Визначте довжину хвилі цієї лінії. Відповідь наведіть у нанометрах.
- 15(в).** Визначте енергію зв'язку ядра атома Карбону  $^{12}_6\text{C}$ , відносна атомна маса якого становить 12,00000 а.о.м. Маса нейтрону дорівнює 1,00866 а.о.м., відносна атомна маса Гідрогену  $^1_1\text{H}$  — 1,00783 а.о.м. (1 а.о.м. відповідає енергії 931,5 МеВ).
- 16(в).** Користуючись законом взаємозв'язку маси і енергії, обчисліть енергію зв'язку між нуклонами в ядрі Гелію. Відповідь наведіть у пікоджоулях.
- 17(в).** Визначте масу Урану-235, яку щодоби витрачає атомна електростанція потужністю 1000 МВт із ККД 20 %. Вважайте, що під час кожного поділу ядра Урану виділяється енергія 200 МеВ. Відповідь наведіть у кілограмах.





## АСТРОНОМІЧНИЙ СКЛАДНИК

Під терміном Всесвіт в астрономії розуміють частину матеріального світу, доступну нашим спостереженням. Його природу і природу тіл, що перебувають за межами Землі, вивчає наука *астрономія* (від грец. *астрон* — зоря, *номос* — закон).

***Астрономія* — наука про небесні тіла, закони їхнього руху, будови і розвитку, а також про будову і розвиток Всесвіту в цілому.**

Головною причиною появи астрономії були практичні потреби людини визначати час, завбачати зміну сезонів року, орієнтуватися на місцевості. Водночас допитливість і нестримне прагнення людської думки усвідомити місце Землі й людини у Всесвіті, пізнати закони, за якими «живуть» небесні світила, — це ще одна причина виникнення астрономії.

Нині астрономія належить до фундаментальних наук, які вивчають основоположні (фундаментальні) питання світобудови і формують світогляд людини. І як будь-яка фундаментальна наука вона здобуває нові знання, що допомагають на них відповісти.

Як свого часу наголошував астрофізик І. С. Шкловський, «астрономія завжди посідала абсолютно особливе місце в «інтелектуальній історії» людства. Хоча значення астрономічних знань для суспільної практики за всіх часів було дуже велике (згадаймо всі світові календарі, способи навігації тощо), головне значення астрономії полягало в тому, що вона насамперед визначала основи світогляду різних епох і народів».



Астрономія  
культури

# Розділ 1

## Основи практичної астрономії

### § 29. Небесні світила, небесна сфера, сузір'я

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити принцип визначення відстаней до небесних світил*

**НЕБЕСНІ СВІТИЛА І НЕБЕСНА СФЕРА, СУЗІР'Я.** Без допомоги оптичних приладів око людини може бачити на небі до 6000 зір. Окрім них регулярно можна спостерігати Місяць, планети й часу до часу інші об'єкти. Усі вони в астрономії для зручності позначені одним поняттям: *небесні світила*. Спостерігаючи небесні світила, ми бачимо їх так, наче вони лежать на внутрішній поверхні певної сфери. Цю уявну сферу називають *небесною сферою*.

*Небесна сфера* — це уявна сфера довільного радіуса, у центрі якої перебуває спостерігач і на яку спроектовано всі світила так, як він бачить їх у певний момент часу з певної точки простору.

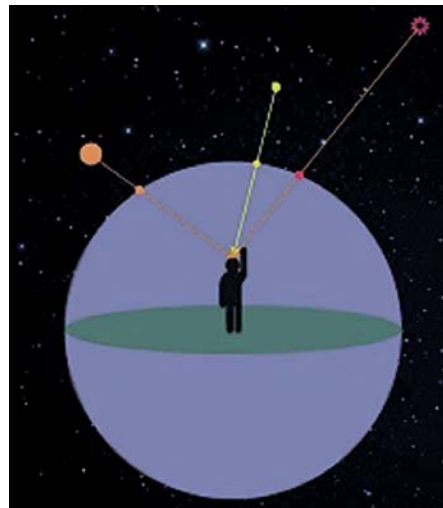
Поняття небесної сфери використовують під час вивчення видимих рухів світил і визначення їх взаємних положень, а також для побудови систем небесних координат.

Взаємне розташування зір на небі змінюється дуже повільно. Тому ще в давнину по найяскравіших зорях «намалювали» перші «зоряні візерунки» — *сузір'я*.

Нині все зоряне небо поділене на 88 сузір'їв.

*Сузір'я* — ділянка небесної сфери з чітко окресленими межами, що охоплює всі належні їй світила і має власну назву.

Найвідомішими сузір'ями Північної півкулі небесної сфери є *Мала Ведмедиця, Велика Ведмедиця, Андромеда, Візничий, Волопас, Діва, Кассіопея, Лебідь, Лев, Ліра, Пегас, Оріон, Орел, Телець*.

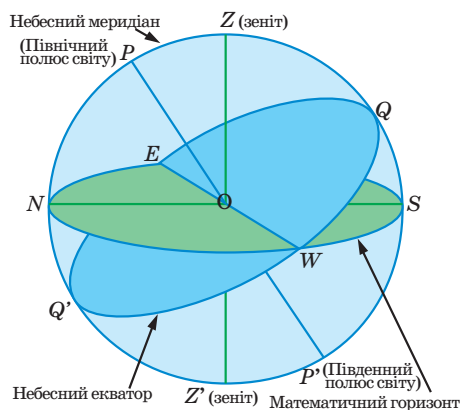


**Рис. 29.1.** Перше враження, що виникає під час спостереження зоряного неба — небесні світила лежать на поверхні певної сфери, у центрі якої перебуває око спостерігача

Здавна найяскравіші зорі мають власні назви. У XVII ст. астроном Й. Байєр запровадив позначення зір у сузір'ях літерами грецької абетки. Та оскільки зір у будь-якому сузір'ї набагато більше, ніж літер в алфавіті, згодом їх стали позначати цифрами (наприклад, 61 Лебеда, 70 Змієносця тощо).

**НЕБЕСНІ КООРДИНАТИ.** Щоб виконувати астрономічні спостереження, треба знати положення світил на небі — їхні координати. Для запровадження системи небесних координат так, як це зроблено на поверхні Землі, потрібно встановити на небесній сфері лінії й точки, від яких ведеться відлік.

Проведемо через центр небесної сфери прямовисну лінію (лінію виска). Ця лінія перетне небесну сферу у двох точках: точці *зеніту* ( $Z$ ) — найвищій точці над головою спостерігача і точці *надиру* ( $Z'$ ) — у протилежній півкулі під його ногами. Якщо через центр небесної сфери провести площину, перпендикулярну до прямовисної лінії, ця площина перетне небесну сферу по великому колу, яке називають *математичним*, або *істинним*, *горизонтом* ( $SWNE$ ). Математичний горизонт практично ніколи не збігається з видимим горизонтом. Видимий горизонт на суші — це зазвичай неправильна лінія, точки якої лежить вище або нижче за істинний горизонт. У відкритому морі видимий горизонт є завжди малим колом, площина якого паралельна до площини математичного горизонту (рис. 29.3).



**Рис. 29.3.** Основні точки й лінії на небесній сфері



**Рис. 29.2.** Сучасне сузір'я Скорпіона на небесній сфері з межами

Вигляд нічного неба протягом ночі змінюється: на заході світила опускаються до горизонту й деякі з них заходять, а на сході — піднімаються над горизонтом і на їх місці з'являються нові, яких раніше не було видно. Це є наслідком обертання небесної сфери.

Вісь обертання небесної сфери (вона паралельна осі обертання Землі, адже насправді обертається Земля, а не зоряне небо), називають *віссю світу*. Вісь світу перетинає небесну сферу у двох точках, які називають *полюсами світу*. Північним полюсом світу є той, дивлячись на який з центру небесної сфери спостерігач бачить її обертання проти годинникової стрілки. У нашу епоху Північ-

ний полюс світу міститься поблизу зорі  $\alpha$  Малої Ведмедиці, яку називають Полярною зорею.

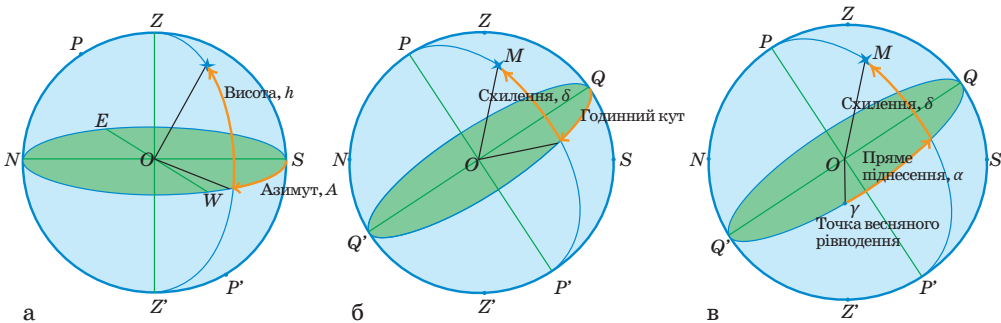
Зауважимо, що велике коло, проведене через зеніт, надир і полюси світу, називають небесним меридіаном. Кожне світило двічі на добу перетинає меридіан: найвище та найнижче над горизонтом або під горизонтом. Моменти перетину небесним світилом меридіана називають верхньою та нижньою кульмінаціями світила.

Велике коло, утворене перетином з небесною сферою площини, перпендикулярної до осі світу, називають *небесним екватором*.

**Площина небесного меридіана перпендикулярна до площини горизонту. Діаметр  $SN$ , по якому вони перетинаються, називають *полуденною лінією*. Полуденна лінія перетинається з горизонтом у двох точках: точці півночі  $N$  (над нею лежить Північний полюс світу) і точці півдня  $S$  (діаметрально протилежній до точки півночі).**

Ще одне велике коло, по якому Сонце здійснює свій річний рух небесною сферою, має назву *екліптики* (про це йтиметься далі). Екліптика і небесний екватор перетинаються в точках *весняного* ( $\Upsilon$ ) й *осіннього рівнодення* ( $\Omega$ ).

На небесній сфері є кілька точок відліку для небесних координат, тому й систем координат є кілька. Це, наприклад, горизонтальна та перша екваторіальна системи координат (рис. 29.4 а, б).



**Рис. 29.4.** Горизонтальна (а), перша (б) та друга (в) екваторіальна системи небесних координат

В астрономії найчастіше використовують другу екваторіальну систему координат (рис. 29.4 в). У ній положення світила  $M$  на небесній сфері задають пряме піднесення  $\alpha$  і схилення  $\delta$ . Значення  $\alpha$  від  $0^\circ$  до  $24^\circ$  відлічують від точки весняного рівнодення  $\Upsilon$  вздовж небесного екватора із заходу на схід до кола схилень світила. Коло схилень — це велике коло, проведене через обидва полюси  $PP'$  і світило  $M$ . Значення  $\delta$  відлічують від небесного екватора до світила вздовж кола схилень від  $0^\circ$  до  $+90^\circ$  на північ і від  $0^\circ$  до  $-90^\circ$  на південь.

Координати  $\alpha$  і  $\delta$  змінюються з плином часу повільно (причиною є власний рух світила та інші обставини), тому їх використовують для складання каталогів небесних об'єктів і карт зоряного неба.

**ВИДИМІ ЗОРЯНІ ВЕЛИЧИНИ, ОДИНИЦІ ВІДСТАНЕЙ В АСТРОНОМІЇ.**

З метою класифікації зір за їхнім блиском ще в II ст. до н. е. давньогрецький астроном Гіппарх запровадив поняття *видимої зоряної величини*. Найяскравіші зорі він виокремив у групу зір 1-ї величини, трохи слабкіші — 2-ї, а ледве помітні — 6-ї величини. Видимі зоряні величини позначають літерою  $m$ , яку проставляють як показник степеня справа вгорі біля цифри, що показує її числове значення (наприклад,  $1^m$ ). По суті, видима зоряна величина — це позасистемна одиниця вимірювання освітленості, яку створює астрономічний об'єкт у пункті спостереження на площині, перпендикулярній до його променів. Зазвичай в астрономії замість терміна «освітленість» використовують поняття «блиск». Тому замість слів «освітленість від зорі» говорять «блиск зорі дорівнює стільком-то зоряним величинам».

Видима зоряна величина  $m$  не дає інформації про потужність джерела світла, бо не враховує відстань до небесного світила. Тому було введено поняття абсолютної зоряної величини  $M$ . Детальніше про це йтиметься у параграфі 35.

**Абсолютна зоряна величина  $M$  — це видима зоряна величина, яку б мала зоря, перебуваючи від нас на відстані 10 пк (32,6 св. р.).**

Для визначення абсолютної зоряної величини  $M$  потрібно знати відстань до зорі. Першим небесним світилом, до якого її встановили, став Місяць (Гіппарх, бл. 150 р. до н. е.). Відстані до планет Сонячної системи визначили в XVII ст. шляхом вимірювання їхнього *горизонтального паралакса*  $p$ . Суть вимірювання полягає в застосуванні відомого з географії методу триангуляції.

Кут між напрямком на світило  $M$  з будь-якої точки  $T$  земної поверхні й напрямком із центра Землі  $O$  називають добовим паралаксом або просто паралаксом  $p$ . Найбільшу величину добовий паралакс має тоді, коли світило перебуває на горизонті. У цьому разі паралакс називають горизонтальним (рис. 29.5).



**Рис. 29.5.** Кут між напрямком на світило  $M$  (що перебуває на горизонті) з якої-небудь точки  $T$  земної поверхні і напрямком із центра Землі  $O$  називають горизонтальним паралаксом  $p$  світила



**Горизонтальний паралакс  $p$  — це кут між напрямком на світило (що перебуває на горизонті) з певної точки земної поверхні й напрямком з центра Землі.**

Іншими словами, горизонтальний паралакс — це кут, під яким зі світила можна бачити радіус Землі за умови, що він перпендикулярний до напрямку на світило. Оскільки Земля не є сферою, зазвичай під горизонтальним паралаксом розуміють екваторіальний горизонтальний паралакс, тобто кут, під яким зі світила можна бачити екваторіальний радіус Землі.

Відстані до близьких зір визначають, вимірюючи їх *річні паралакси*  $\pi$ . Спостерігаючи одну й ту саму зорю з інтервалом у півроку, визначають її зміщення на тлі далеких «нерухомих» зір (рис. 29.6). Далі діють так само, як і в разі вимірювання відстаней методом горизонтального паралакса.

**Річний паралакс  $\pi$  — кут, під яким із зорі можна бачити середній радіус земної орбіти.**

Інакше кажучи, річний паралакс — це малий кут (при світілі) у прямокутному трикутнику, в якому гіпотенузою є відстань від Землі до зорі, а малим катетом — середній радіус земної орбіти. Метод річного паралакса можна застосувати до відносно близьких до Землі зір. Здебільшого паралактичні зміщення зір на небесній сфері не помітні.

Відстані між небесними об'єктами такі великі, що для їх вимірювання в астрономії запроваджено власні одиниці: астрономічна одиниця (а. о.), яка дорівнює середній відстані Землі від Сонця, і парсек (пк), від слів «паралакс» і «секунда» — відстань, з якої середній радіус земної орбіти видно під кутом  $1''$  (секунда дуги). Часто використовують похідні одиниці: кілопарсек (1 кпк = 1000.pk) і мегапарсек (1 Мпк = 1 000 000.pk). У науково-популярній літературі застосовують одиницю довжини «світловий рік» (св. р.) — відстань, яку зі швидкістю майже 300 000 км/с світло проходить за один рік.

Між одиницями довжини, які використовують в астрономії, існують взаємозалежності: 1.pk = 3,26 св. р. = 206 265 а. о.; 1 св. р. = 0,3066.pk = 63240 а. о.

Перше успішне вимірювання відстані до зорі виконав 1838 р. німецький вчений Фрідріх Бессель. Він визначив паралакс подвійної зорі *Лебідь 61*. Її зсув на небесній сфері становив  $0,29''$  (секунди дуги), а відстань — 3,4.pk (11,1 св. р.).



**Рис. 29.6.**

Зміщення зорі на тлі віддалених світил, визначене зі спостережень за нею з інтервалом у шість місяців (з протилежних точок земної орбіти), називають паралактичним і вимірюють у кутових одиницях

Явище річного паралакса є головним доказом обертання Землі навколо Сонця й основним методом вимірювання відстаней до зір, на який спираються всі інші методи (про це йтиметься далі).

Нині наземними оптичними засобами можна виміряти відстані до 200 пк. Виміряти більші відстані — до 5 клк — вдалося за допомогою космічних телескопів «Гіппаркос» і «Гайя». Дотепер відомі точні величини річних паралаксів для понад 1 000 000 зір.

### **! Головне в цьому параграфі**

Небесна сфера дає змогу вивчати взаємні положення світил на небі, вводити системи небесних координат. Нині під сузір'ям розуміють ділянку небесної сфери з чітко окресленими межами, що охоплює всі належні їй світила і має власну назву. Відстані до відносно близьких небесних тіл вимірюють методом паралаксів. З метою класифікації зір за їхнім блиском запроваджено поняття видимої зоряної величини  $m$ , яка, однак, не дає інформації про справжню потужність джерела світла. Тому для характеристики блиску зір та інших небесних тіл введено абсолютну зоряну величину  $M$ .

### **? Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть, чому під час спостереження зоряного неба здається, що всі зорі розміщені на поверхні небесної сфери.
2. Назвіть точки й лінії небесної сфери.
3. Який спостережний факт дав змогу ще у стародавні часи виокремити на небі сузір'я?
4. Поясніть термін «видима зоряна величина».
5. Які методи вимірювання відстаней до небесних тіл ви знаєте?

## **§ 30. Видимі рухи світил, визначення часу, календарі**

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити причини видимих рухів світил по небесній сфері; визначати тривалість доби та календарного року за астрономічними спостереженнями й розрізняти місцевий, поясний і всесвітній час, а також типи календарів.*

**ВИДИМІ РУХИ НЕБЕСНИХ СВІТИЛ.** Залежно від кутових відстаней світил від полюсів світу в певній точці земної кулі вони можуть сходити й заходити, або ніколи не заходити, або ніколи не сходити.

Для спостерігача на Північному полюсі Землі всі зорі Північної небесної півкулі не заходять, а зорі Південної небесної півкулі не сходять і навпаки. Для спостерігача на екваторі всі зорі обох небесних півкуль сходять і заходять.



Важливий момент видимого добового руху Сонця по небесній сфері людина зафіксувала ще здавна — найвище положення світила над горизонтом, коли центр сонячного диска перебуває у верхній кульмінації. У цей момент настає астрономічний полудень. У момент нижньої кульмінації центра сонячного диска, що відбувається під горизонтом, настає астрономічна північ.

Здавна було зафіксовано явище зміни вигляду зоряного неба впродовж року, що свідчить про рух Сонця серед зір. За 365,24 доби (рік) Сонце описує серед зір на небі повне коло.

**Велике коло, по якому центр диска Сонця здійснює свій видимий річний рух на небесній сфері, називають *екліптикою*.**

Екліптика проходить через 13 сузір'їв, яким у давнину надали назви переважно тварин. Тому і весь пояс сузір'їв уздовж екліптики назвали Зодіаком (від грец. *зоо* — тварина). Для зручності відліку положення Сонця, Місяця і планет на екліптиці астрономи Стародавнього Вавилону поділили екліптику на 12 рівних відрізків по 30°. Кожний із цих відрізків називають знаком Зодіаку і позначають назвою того зодіакального сузір'я, в межах якого він на той час перебував. До Зодіаку не потрапило лише сузір'я Змієносія.

**Отже, знак Зодіаку — це дуга екліптики протяжністю в 30°, позначена назвою відповідного зодіакального сузір'я.**

Знаки Зодіаку відлічують уздовж екліптики на схід від точки весняного рівнодення  $\Upsilon$  так, що першим є знак Овна. У кожному знаку Зодіаку Сонце перебуває місяць. Та через різні причини точка весняного рівнодення зміщується по небесній сфері назустріч річному руху Сонця. Тому відбувається зміщення зодіакальних сузір'їв відносно знаків Зодіаку, і тепер, наприклад, знак Зодіаку Скорпіон міститься в сузір'ї Терези.

Понад 4000 років тому зародилася астрологія — необґрунтоване з погляду сучасної науки намагання за положенням планет і Сонця в тому чи іншому знаку Зодіаку передбачити перебіг подій у житті людини чи суспільства. Від часу зародження й дотепер астрологія — псевдонаука, оскільки спирається на бездоказові факти й не застосовує наукових методів пізнання природи і людини.

Місяць, як і Сонце, рухається проти обертання небесної сфери по великому колу, але швидше за нього. Проміжок часу в 27,3 доби, за який Місяць описує повне коло серед зір і повертається в ту саму точку небесної сфери, називають сидеричним місяцем.

Описуючи на небесній сфері коло, Місяць змінює видиму форму — фази. Це є наслідком просторової зміни положення Місяця відносно Землі і Сонця. Проміжок часу, впродовж якого Місяць змінює всі фази, називають синодичним місяцем. Він триває близько 29,53 доби.

Рухаючись по орбіті, Місяць опиняється між Землею і Сонцем, а тому може закрити собою Сонце, спричинивши сонячне затемнення. А коли Земля опиняється між Місяцем і Сонцем, Місяць може потрапити в тінь Землі, наслідком чого є місячне затемнення.

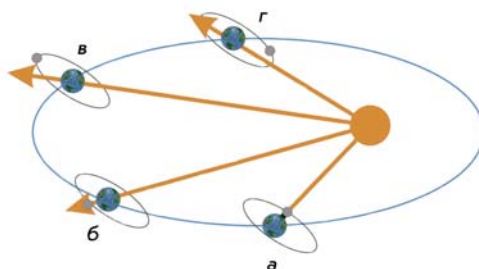
Орбіта Місяця нахилена до екліптики на кут майже  $6^\circ$ , тому затемнення можливе тільки тоді, коли Місяць перебуває в точці перетину своєї орбіти з орбітою Землі або близько до неї. Таких точок є дві, їх називають вузлами місячної орбіти.

На Землі сонячне затемнення спостерігають, коли тінь від Місяця потрапляє на її поверхню. Диск Сонця повністю закритий для спостерігача, що перебуває всередині місячної тіні. Там, куди падає півтінь від Місяця, спостерігають часткове сонячне затемнення.

У різних точках нашої планети сонячне затемнення настає в різний час, оскільки тінь від Місяця зміщується по земній поверхні приблизно із заходу на схід, утворюючи смугу в кілька тисяч кілометрів завдовжки й до 270 км завширшки. Повна фаза затемнення, коли все Сонце закрите диском Місяця, триває на Землі не більше 7,5 хв.

Щороку на земній кулі може відбутися від двох (обидва сонячні) до семи затемнень (п'ять сонячних і два місячних або чотири сонячних і три місячних). У конкретній місцевості повне сонячне затемнення в середньому трапляється один раз на 300 років.

Видимі рухи планет складніші за рухи Сонця та Місяця. Меркурій і Венеру можна спостерігати тільки вранці перед сходом Сонця у східній ділянці неба або увечері — в західній. Їх називають *нижніми планетами*. Як і Місяць, вони змінюють свої фази. *Верхні планети* — Марс, Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун — найкраще спостерігати під час найбільшого кутового віддалення від Сонця, коли вони всю ніч перебувають над обрієм. На небесній сфері ці планети рухаються чи то проти добового обертання, чи то за ним, описуючи на небі петлі. Рух проти добового обертання називають *прямим*, рух у напрямку добового обертання — *зворотним*. Змінюючи прямий рух на зворотний і навпаки, планета наче зупиняється — таке її положення називають *стоянням*.



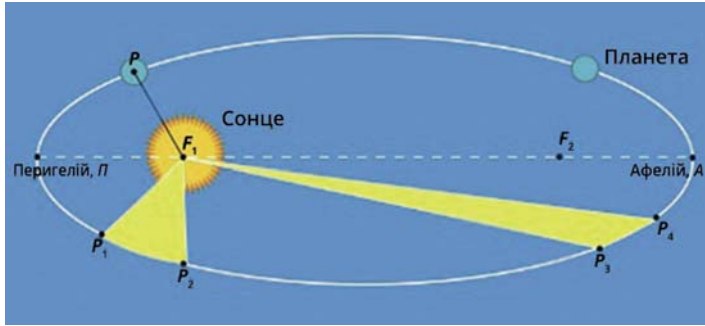
**Рис. 30.1.** Схема орбіт Землі та Місяця. Затемнення Сонця (а), затемнення Місяця (б), варіанти (в) і (г) — затемнення неможливі.

**ЗАКОНИ КЕПЛЕРА.** На підставі результатів спостережень планети Марс, які впродовж багатьох років виконував відомий данський астроном Тіхо Браге, Йоганн Кеплер встановив три закони руху планет.

**Перший закон Кеплера.** Кожна з планет рухається навколо Сонця по еліпсу, в одному з фокусів якого міститься Сонце.

Еліпс — це замкнена крива, сума відстаней до кожної точки якої від фокусів  $F_1$  і  $F_2$  дорівнює його великій осі, тобто  $2a$ , де  $a$  — велика піввісь еліпса.

Якщо Сонце перебуває у фокусі  $F_1$ , а планета у точці  $P$ , то відрізок прямої  $F_1P$  називають радіус-вектором планети.



**Рис. 30.2.** Еліпс — форма орбіти планети в Сонячній системі

Найближчу до Сонця точку планетної орбіти *П* називають *перигелієм*, найдальшу точку орбіти *А* — *афелієм*.

**Другий закон Кеплера.** Радіус-вектор планети за однакові інтервали часу описує рівновеликі площі.

З цього закону випливає важливий висновок: оскільки площі, показані на рис. 30.2, рівні, то по дузі  $P_1P_2$  планета рухається з більшою швидкістю, ніж по дузі  $P_3P_4$ , тобто швидкість планети найбільша в перигелії *П* і найменша в афелії *А*.

**Третій закон Кеплера.** Квадрати сидеричних періодів обертання планет відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт.

Якщо сидеричні періоди обертання двох планет позначити  $T_1$  і  $T_2$ , а великі півосі еліпсів — відповідно  $a_1$  і  $a_2$ , то третій закон Кеплера має вигляд:

$$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}. \quad (30.1)$$

Закони Кеплера справедливі не тільки для планет, а й для їхніх супутників, як природних, так і штучних.

На підставі закону всесвітнього тяжіння Ньютон узагальнив третій закон Кеплера. Він встановив, що точний вираз для нього такий:

$$\frac{(M + m_1)T_1^2}{(M + m_2)T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (30.2),$$

де  $M$  — маса Сонця, а  $m_1$  та  $m_2$  маси планет.

Уточнений третій закон Кеплера дає змогу визначати маси небесних тіл, що мають природні чи штучні супутники.

**ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ З АСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.** Періодичне обертання небесної сфери дало людям природну одиницю лічби часу — добу. Залежно від того, що взято за точку відліку на небі, вирізняють *зоряну* і *сонячну* добу. Зоряна доба — це проміжок часу між двома однойменними кульмінаціями точки весняного рівнодення. Її тривалість, виміряна в одиницях сонячної доби, становить 23 год 56 хв 4 с. Під час астроно-

мічних спостережень використовують *зоряний час*  $s$  — *годинний кут* точки весняного рівнодення:  $s = t_{\gamma}$ .

Проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра диска Сонця на одному й тому самому географічному меридіані називають *справжньою сонячною добою*. Її початок на певному меридіані відлічують від моменту нижньої кульмінації Сонця. Через низку причин тривалість справжньої сонячної доби не є сталою величиною, і користуватися справжнім сонячним часом  $T_{\odot}$  незручно. Тому було введено поняття середнього сонця. *Середнє сонце* — це фіктивна точка, що рівномірно рухається вздовж небесного екватора, і за той самий проміжок часу (рік), що й Сонце, повертається до точки весняного рівнодення  $\Upsilon$ . Час, визначений за середнім сонцем і за яким ми живемо, називають середнім сонячним часом.

**Середня сонячна доба — це проміжок часу між двома послідовними нижніми кульмінаціями середнього сонця.**

Середнє сонце спостерігати прямо на небі не можна. Тому було введено поняття *рівняння часу*. *Рівняння часу* — це різниця між середнім сонячним часом  $T_{\lambda}$  на певний момент і справжнім сонячним часом  $T_{\odot}$  на той самий момент:  $\eta = T_{\lambda} - T_{\odot}$ . Упродовж року величина  $\eta$  змінюється від  $-16$  хв до  $+14$  хв, а її значення наводять в астрономічних щорічниках.

Середній сонячний час, виміряний на певному географічному меридіані, називають *місцевим часом* (позначають  $T_{\lambda}$ ). У 1884 р. земну кулю було умовно поділено меридіанами на 24 часових пояси з нумерацією від 0-го до 23-го так, що ширина поясу за довготою дорівнює  $15^{\circ}$ . Через середину кожного часового поясу проходить центральний меридіан цього поясу.

Місцевий час центрального меридіана поясу  $T_n$  називають *поясним часом*. Гринвіцький меридіан, що проходить через Гринвіч (Лондон), є центральним для нульового годинного поясу. Місцевий середній час Гринвіцького меридіана  $T_0$  називають *всесвітнім часом* і позначають  $UT$  (від англ. *Universal Time*).

Для лічби більших проміжків часу використовують ще один природний періодичний процес — обертання Землі навколо Сонця. Проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра Сонця через точку весняного рівнодення називають *тропічним роком*. Його тривалість —  $365^d 5^h 48^m 46^s$ .

**КАЛЕНДАР.** Систему лічби великих проміжків часу з поділом на окремі періоди (роки, місяці, дні) називають календарем. Усі календарі поділяють на три головні типи: *сонячні*, *місячні* й *місячно-сонячні*. В основі сонячного календаря перебуває тривалість тропічного року, в основі місячного — тривалість місячного місяця, а місячно-сонячний календар поєднує й те, й інше.

Сучасний календар у більшості країн світу є сонячним. Але в тропічному році не вміщається ціле число діб. Тому ще в Стародавньому Римі в 46 р. до н. е. запровадили *юліанський* календар — три роки в ньому мають по 365 діб, а кожний четвертий — високосний — 366 діб. Неточність року в цьому календарі становить 11 хв 14 с — настільки він довший за тропічний рік. З них за 400 років набігає майже 3 доби, і календар починає відставати від подій у природі.

Тому в 1582 р. з ініціативи Папи Римського Григорія XIII було здійснено реформу юліанського календаря. Для зменшення похибки роки, що завершують століття й не діляться на 400, стали простими, а не високосними. Новий календар назвали *григоріанським*. В Україні його запровадили з 1918 р. (після 1 лютого настало 14 лютого).

Різниця між тропічним і григоріанським роками становить 26 секунд, тому похибка в одну добу накопичується в ньому приблизно за 3300 років.



Календар 3-го тисячоліття: яким йому бути?

### ! Головне в цьому параграфі

Кожне світило двічі на добу перетинає небесний меридіан і в певній точці земної кулі може сходити й заходити, або ніколи не заходити, або ніколи не сходити. Періодичне обертання небесної сфери дає змогу запровадити одиницю лічби часу — добу, а обертання Землі навколо Сонця — тропічний рік. Календарем називають систему лічби значних проміжків часу з поділом на окремі періоди (роки, місяці, дні). Їх можна поділити на три головні типи: сонячні, місячні й місячно-сонячні. Закони Кеплера — три закони руху планет, що справедливі також для їхніх супутників.

### ? Запитання для самоперевірки

1. В якому місці на Землі можна бачити схід і захід усіх небесних світил? Поясніть свою відповідь.
2. Поясніть малюнком, чому Місяць у фазі 1-ї чверті видно увечері.
3. Якщо тінь від Місяця на поверхні Землі під час повного сонячного затемнення має форму круга, то діаметр такого круга більший чи менший за діаметр Місяця? Поясніть свою відповідь.
4. Намалюйте дві орбіти, на одній з яких тіло має більший період обертання навколо Сонця, але може ближче підходити до нього, ніж на іншій.
5. Вважаючи орбіту Землі круговою, визначте середню швидкість Землі по орбіті (в км/с).

## § 31. Спостереження зоряного неба й орієнтування по небесних світилах. Практична робота

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете використовувати карту зоряного неба для розв'язування практичних завдань; орієнтуватися на місцевості по Сонцю і Полярною зорею.*

**ЗМІНА ВИГЛЯДУ ЗОРЯНОГО НЕБА В РІЗНІ ПОРИ РОКУ.** Якщо зафіксувати розміщення сузір'їв у певний час доби й повторити спостереження в той самий час через 1—2 місяці, то легко помітити, що сузір'я, які лежали високо в південній частині неба поблизу меридіана, опинилися на заході, а зорі, які були в західній ділянці неба, стали невидимі: вони разом із Сон-

цем зайшли за горизонт. Отже, Сонце за цей відтинок часу пересунулось назустріч добовому обертанню небесної сфери із заходу на схід.

Така зміна вигляду зоряного неба щороку повторюється, кожний порі року притаманна своя картина, наприклад, вечірніх сузір'їв.

У Північній півкулі Землі, зокрема і в Україні, найкраще споглядати зоряне небо у південній його частині: саме тут небесні світила перебувають найвище над горизонтом (кульмінують). У різні пори року після заходу Сонця тут можна бачити різні сузір'я. Восени — Лебідь, Орел, Пегас, Андромеда; взимку — Оріон, Телець, Близнята, Великий Пес, Малий Пес; навесні — Лев, Діва, Терези; влітку — Волопас, Геркулес, Скорпіон, Стрілець.

Зорі, Місяць і Сонце — це чудові дороговкази для орієнтування на місцевості. Щоб їх використовувати на практиці, треба вміти знаходити на небі найвідоміші сузір'я та найяскравіші зорі.

Знайдімо на небі семизоряний ківш сузір'я Великої Ведмедиці і проведемо через дві його крайні зорі пряму лінію. Продовжимо пряму на п'ять віддалей між цими зорями в напрямку від отвору ковша і знайдемо зорю альфа ( $\alpha$ ) Малої Ведмедиці — Полярну — найяскравішу в цій ділянці неба. Основна частина сузір'я Малої Ведмедиці, як і Великої, також має вигляд ковша, але менших розмірів. Полярна зоря вкаже нам напрямок на північ.

З іншого боку від Полярної, протилежно до Великої Ведмедиці, лежить сузір'я Кассіопеї. Його п'ять досить яскравих зір, з'єднаних ламаною лінією, нагадують літеру W. Взавши на небі напрямок, перпендикулярний до напрямку Велика Ведмедиця — Кассіопея, праворуч від Полярної знайдемо Капеллу — одну з найяскравіших зір північного неба із сузір'я Візничого, а ліворуч — Вегу — найяскравішу зорю із сузір'я Ліри (рис. 31.1).

У полудень напрямком на південь нам вкаже Сонце, бо його верхня кульмінація відбувається якраз над точкою півдня. І тоді північ лежати-ме за вашою спиною, праворуч — захід, а ліворуч — схід.

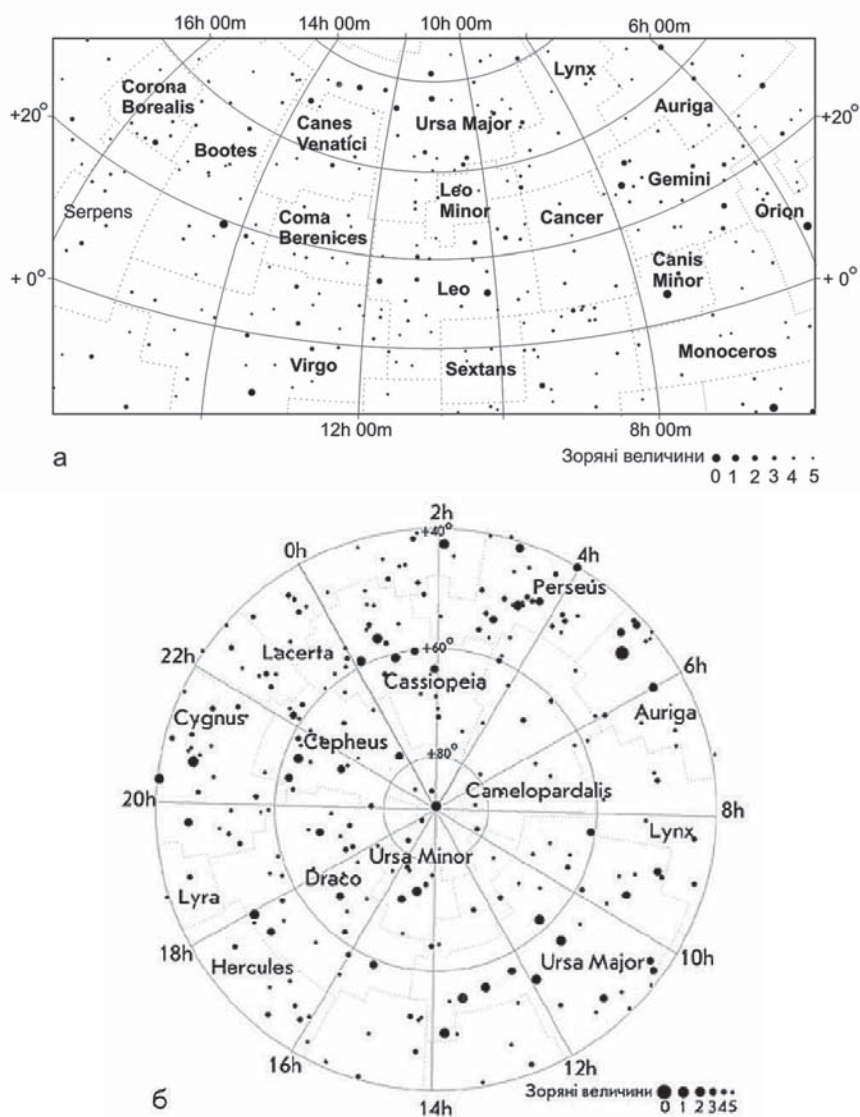


Рис. 31.1. Навколополярні сузір'я



**КАРТИ ЗОРЯНОГО НЕБА.** Для практичної роботи нам потрібно докладніше ознайомитися з будовою карти зоряного неба. *Карта зоряного неба* — це зображення (проекція) небесної сфери на плоску поверхню.

Навчальні карти зоряного неба мають форму прямокутника або круга (рис. 31.2, а та 31, 2, б). На них зазначають небесні координати  $\alpha$  і  $\delta$ . На прямокутній карті по горизонталі відкладене пряме піднесення  $\alpha$ , по вертикалі — схилення  $\delta$  світил. На карті, яка має вигляд круга, Північний полюс світу міститься в центрі. Пряме піднесення  $\alpha$  зір проставлене на обводі карти. Радіальні лінії, що сходяться до центра карти, — це проекції кіл схилень. Принаймні вздовж чотирьох із них проставляють схилення світил  $\delta$ .



**Рис. 31.2.** Карта зоряного неба прямокутна (а) та у вигляді круга (б)



*Робота з картами зоряного неба*

1. На «німій» карті (рис. 31.4.а) подано відому вам ділянку зоряного неба. Позначте сузір'я, що є на цій карті: а) Велика Ведмедиця; б) Мала Ведмедиця; в) Кассіопея; г) Персей; д) Візничий.

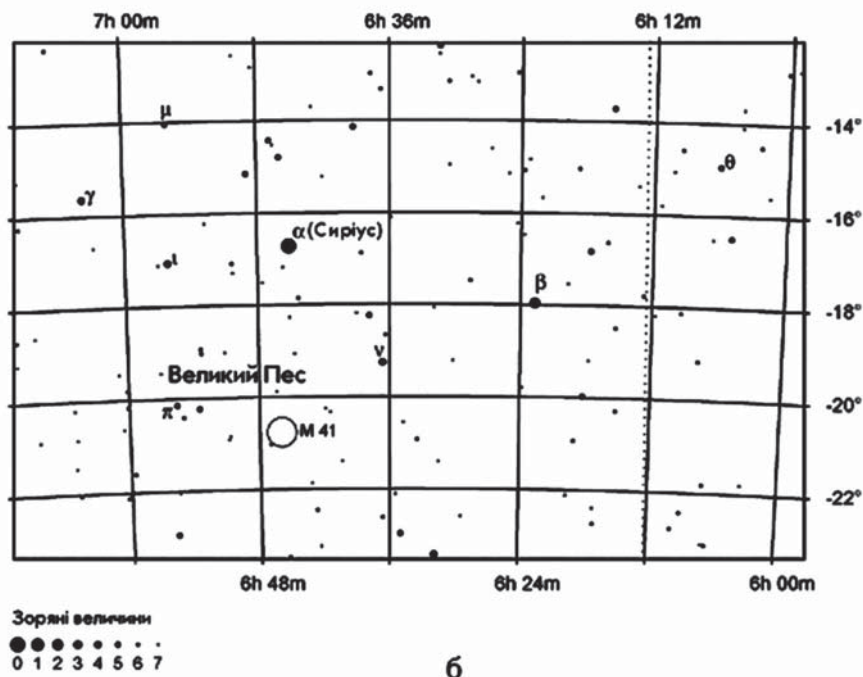
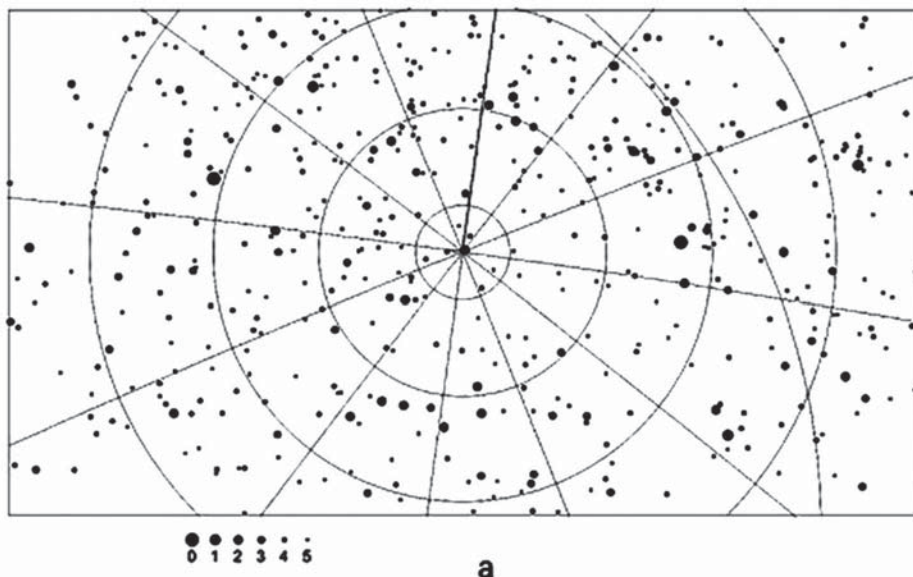


Рис. 31.4. Карты зоряного неба: а — «німа»; б — із зорею Сиріус

2. Користуючись координатними шкалами, зазначеними на карті зоряного неба на рис. 31.4, б, визначте пряме піднесення  $\alpha$  і схилення  $\delta$  зорі Сиріус і внесіть його до таблиці.

Назва зорі	Пряме піднесення, $\alpha$		Схилення, $\delta$	
	h	m	°	'
Сиріус				

3. На рис. 31.5. подано карту зоряного неба, на якій найяскравішим світилом є планета Марс. Що можна сказати про сузір'я, в якому перебуває планета: а) це сузір'я належить до тих, що ніколи не заходять за горизонт на нашій широті; б) це найбільше за площею сузір'я на зоряному небі; в) це сузір'я належить до зодіакальних?

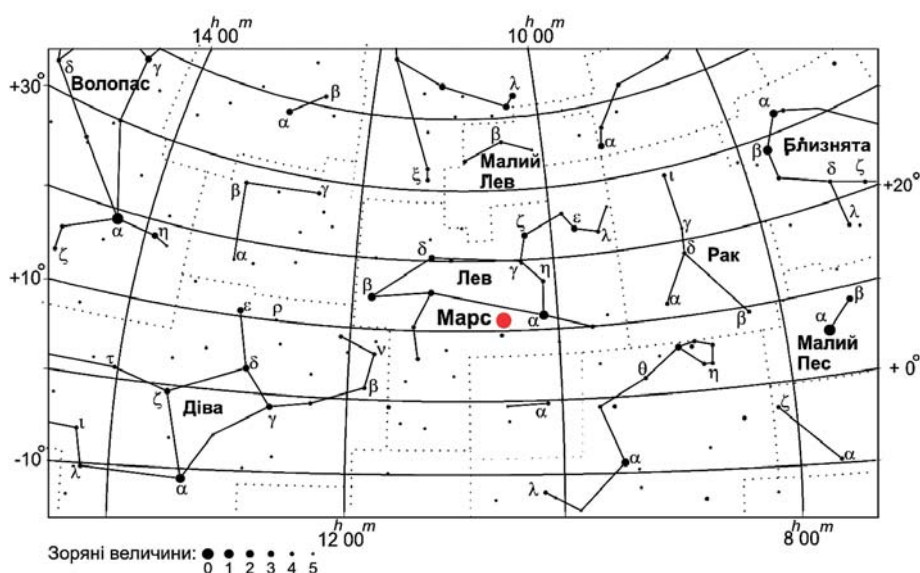


Рис. 31.5. Карта зоряного неба з планетою Марс

## Практична робота № 1

### Вивчення зоряного неба з допомогою комп'ютерної програми «Stellarium»

**Мета роботи:** Розглянути можливість модельних спостережень зоряного неба з допомогою комп'ютерної програми «Stellarium». Навчитися визначати видимі на заданий момент часу сузір'я. Вміти знаходити найвідоміші сузір'я, найяскравіші зорі та планети Сонячної системи і знати їх назви.

**Потрібне обладнання:** Комп'ютерна програма «Stellarium», олівець, папір. Опис програми, а також рекомендації щодо моделювання навчальних астрономічних спостережень подано в статті «Як працювати з електронним планетарієм «Stellarium»» (<http://www.astroosvita.kiev.ua/infoteka/articles/Yak-pratsiuvaty-z-Stellarium-1.php>).



**Методичні вказівки:** Програму «Stellarium» треба встановити на комп'ютері, який буде використано для виконання практичної роботи. Учень мусить заздалегідь (до початку виконання роботи) ознайомитися з основними функціями цієї програми. Для цього можна використати статтю, про яку йшлося вище. Як варіант — учитель на початку виконання практичної роботи ознайомлює увесь клас з особливостями роботи програми «Stellarium».

*Хід виконання роботи:*

- Перед виконанням роботи дайте відповідь на такі запитання:
  - ▶ Що таке сузір'я?
  - ▶ Що таке Зодіак?
  - ▶ Що таке сузір'я Зодіаку?
  - ▶ Чи всі сузір'я можна спостерігати протягом року в нашій місцевості?
  - ▶ Назвіть сузір'я осіннього (зимового, весняного, літнього) неба.
  - ▶ Назвіть кілька (3—5) найяскравіших зір на небі на задану дату, тобто на час виконання практичної роботи.
  - ▶ Що таке видима зоряна величина небесного об'єкта?
  - ▶ У чому для спостерігача полягає особливість Полярної зорі?
  - ▶ Що таке полюс світу?
  - ▶ Що таке небесний екватор?
  - ▶ Що таке точка весняного рівнодення?
- Уважно ознайомтесь зі змістом § 29—31 підручника, а також рисунками зорного неба й картами зоряного неба, що наведені в цих параграфах.
- Заповніть таблицю 1.

Таблиця 1

№ п/п	Запитання	Відповідь
1	Назвіть 5 сузір'їв, які можна бачити на небосхилі на час виконання практичної роботи	1
		2
		3
		4
		5
2	Назвіть три найяскравіші зорі, які можна спостерігати на небосхилі на час виконання практичної роботи.	1
		2
		3
3	За допомогою «Астрономічного календаря» або іншого визначте, які планети на час виконання роботи можна візуально бачити на небосхилі.	1
		2
		3
		4
		5

3. Встановіть у програмі «Stellarium» дату ваших спостережень (рекомендуємо встановити реальну дату, тобто ту, яка є на час виконання практичної роботи), а також час, наприклад, 21.00.

4. Уважно роздивіться зображення зоряного неба, зверніть увагу на яскраві зорі (не забувайте, що серед них можуть бути і планети). Перенесіть фігуру, яку можна зобразити на небі по яскравих зорях, на папір.

5. Намалюйте по найяскравіших зорях відомі вам з підручника фігури сузір'їв. Пригадайте назви яскравих зір та назви сузір'їв.

6. Установіть назви планет, які на момент спостережень на зоряному небі (для цього можна скористатись «Астрономічним календарем» — розділ «Планети», в якому описано їх видимість упродовж календарного року).

*Висновки:* У результаті практичної роботи на зоряному небі ототожнено такі зорі (запишіть їхні назви) \_\_\_\_\_, що входять до сузір'їв (запишіть назви) \_\_\_\_\_.

### **! Головне в цьому параграфі**

Сузір'я — хороші орієнтири, бо впродовж тривалого часу зорі майже не зміщуються одна відносно одної. Знайти напрямок на Північ дає змогу Полярна зоря, найяскравіша в сузір'ї Малої Ведмедиці. У Північній півкулі Землі найкраще споглядати зоряне небо у південній його частині, де зорі бувають найвище над горизонтом (кульмінують). У різні пори року після заходу Сонця тут можна бачити різні сузір'я. Зміна вигляду зоряного неба в різні пори року зумовлена тим, що Земля рухається навколо Сонця.

### **? Запитання для самоперевірки**

1. Чому фігури сузір'їв не змінюються впродовж тривалого часу?
2. Що можна сказати про час найсприятливіших умов для спостережень зір, зоряних скупчень, туманностей і галактик?
3. Назвіть сузір'я, які можна спостерігати в різні пори року.
4. Чим відрізняються карти зоряного неба, виконані у вигляді прямокутника і круга? Які координати наносять зазвичай на карти зоряного неба?
5. Вам пропонують взяти участь у спостереженні планети Марс, що перебуває в сузір'ї Кассіопеї. Оцініть можливість таких спостережень.

### **ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ З ОСНОВ ПРАКТИЧНОЇ АСТРОНОМІЇ**

1. Чи правильною є фраза: «Прибульці прилетіли із сузір'я Пегаса»? Відповідь обґрунтуйте.
2. Чому метод річного паралакса можна застосувати тільки до відносно близьких до Землі зір?
3. Що є причиною зміщення зодіакальних сузір'їв відносно знаків Зодіаку?
4. Чому місячні та сонячні затемнення не відбуваються кожного календарного місяця?
5. Користуючись третім законом Кеплера, визначте сидеричний період обертання тіла з великою піввіссю орбіти 4 а. о.
6. Поясніть, з якою метою запроваджено поняття середнє сонце.
7. Чим зумовлена зміна картини зоряного неба упродовж року?

## Розділ 2

# Фізика Сонячної системи

### § 32. Планети і їхні супутники

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити причини парникового ефекту та причини виникнення припливів і відпливів; наводити приклади дослідження тіл Сонячної системи з допомогою космічних апаратів.*

Планети Сонячної системи, зважаючи на їхні основні параметри (розмір, маса, хімічний склад), поділяють на дві групи. До однієї групи, крім Землі, належать також Меркурій, Венера і Марс. За ними закріпилася назва: *планети земної групи*. Ще чотири планети — Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун — розмірами значно більші, тому їх об'єднують у *групу планет-гігантів*.

**ЗЕМЛЯ І МІСЯЦЬ.** У багатьох аспектах Земля — звичайна планета Сонячної системи. Водночас вона є унікальною, бо на ній існує життя.

Земля утримує повітряну оболонку — атмосферу. Атмосфера відбиває у простір 40—50 % сонячних променів, що на неї падають, і з космосу Земля має вигляд яскравого світила блакитного кольору.

Атмосфера Землі складається з різних газів, серед яких є вуглекислий газ і водяна пара. Хоча їхня кількість мала (вуглекислого газу лише 0,03 %, водяної пари до 4 %), вони затримують у нижніх шарах атмосфери значну кількість тепла, випромінюваного Землею. Водночас до поверхні Землі відносно вільно проникають світлові сонячні промені. Отже, атмосфера діє подібно до скла в парниках та оранжереях, створюючи явище, яке називають *парниковим ефектом*.

Парниковий ефект має виняткове значення для існування життя на Землі. Зникнення водяної пари та вуглекислого газу з атмосфери призвело б до катастрофічного зниження температури на планеті майже на 40 °С, що негативно позначилося б на існуванні живих істот. Згідно з оцінками вчених, за останні 100 років через техногенну діяльність людства обсяг вуглекислого газу в атмосфері зріс майже на 10 %, що призвело до підсилення парникового ефекту і глобального потепління.



**Рис. 32.1.** Вигляд Землі з борта космічного корабля «Аполлон-8», який під час зйомки (грудень 1968 р.) перебував на орбіті Місяця

Окремо в атмосфері виділяють дуже важливий прошарок — озоновий, що складається з триатомних молекул кисню ( $O_3$ ). Цей шар з максимальною концентрацією на висоті 25—35 км повністю поглинає жорстке ультрафіолетове випромінювання Сонця, захищаючи все живе від його смертоносної дії.

Земля має стале магнітне поле, що простягається від поверхні в космос на відстань у кілька її радіусів. Воно захоплює й утримує поблизу Землі безліч заряджених частинок, що надходять від Сонця. Тому навколо Землі існують радіаційні пояси. Навколоземний простір, фізичні властивості якого визначає взаємодія магнітного поля планети з потоками заряджених частинок, називають *магнітосферою*. Магнітосфера, як і атмосфера, захищає біосферу від шкідливого випромінювання з космосу.

Навколо Землі обертається природний супутник — Місяць. Він має кулясту форму і світить відбитим сонячним світлом. Г. Галілей був першим, хто виділив у рельєфі Місяця гори і кратери.

Місяць має надзвичайно розріджену атмосферу з Гідрогену, Гелію, Неону й Аргону в сильно іонізованому стані. На його поверхні є два види ландшафтів — сліди давньої активності місячних надр. Їх називають морями й океанами та материками. Моря мають вигляд темних плям на диску Місяця. Вони утворені породами, що погано відбивають сонячне світло. Материки відбивають сонячного світла значно більше. На відміну від морів, де кратерів відносно мало, материки майже суцільно вкриті кратерами різних розмірів.

Поверхневий шар Місяця утворює пухка речовина до 2–3 м завтовшки — реголіт. Структурою й хімічним складом він близький до земних вулканічних порід.

Сила тяжіння Місяця спричиняє припливні деформації в літосфері, гідросфері й атмосфері Землі. Явище *припливів і відпливів* виникає тому, що Місяць із неоднаковою силою притягає до себе по-різному віддалені від нього частини Землі (рис. 32.2). Як наслідок, літосфера, гідросфера й атмосфера Землі деформуються й витягаються вздовж прямої, направленої в бік Місяця. Наприклад, у Світовому океані утворюються припливні горби, витягнуті вздовж лінії Земля — Місяць, що пересуваються услід за Місяцем. Спричиняючи на нашій планеті припливи, Місяць гальмує обертання Землі навколо осі. Розрахунки показують, що на початку історії Землі доба тривала не 24 години, як нині, а лише 6 годин.

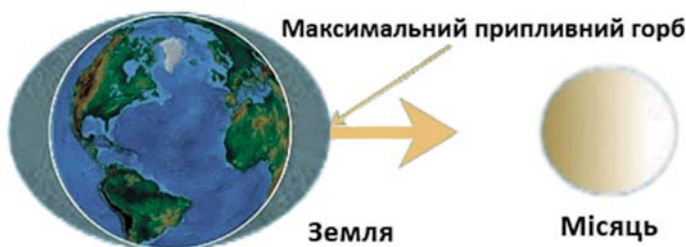
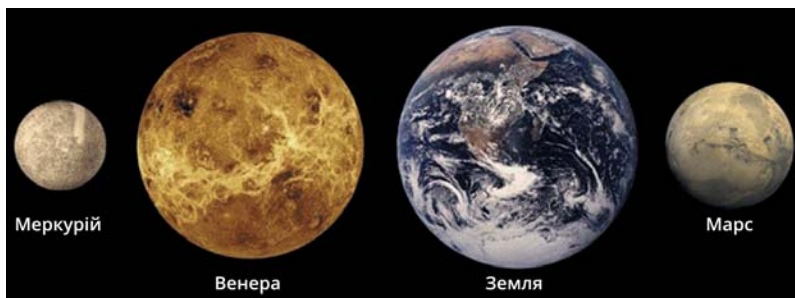


Рис. 32.2. Схема виникнення припливів



Водночас за 4,5 млрд років Земля так загальмувала осьове обертання Місяця, що його період став майже рівним періоду обертання навколо Землі, і тепер він завжди повернутий до Землі одним боком.

**ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ.** Як і Земля, Меркурій, Венера і Марс — це планети відносно невеликих розмірів і мас, з твердими поверхнями, рельєф яких має спільні риси. Середнє значення густин речовини цих планет у кілька разів більше за густину води. Те, що густини мають близькі значення, вказує на схожість хімічного складу їхніх надр. Планети земної групи складаються переважно із силікатних порід і металів.



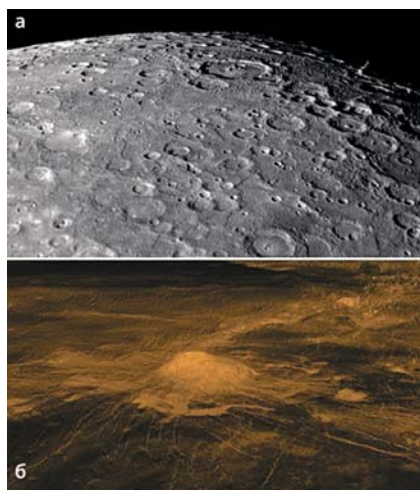
**Рис 32.3.** Порівняльні розміри планет земної групи

Поверхня Меркурія дуже нагадує місячну (рис. 32.4, а). Докладні карти планети створено завдяки фотографіям, переданим американськими автоматичними міжпланетними станціями, що вивчали її в 1974—1975 рр. та протягом 2011—2015 рр.

Доба на Меркурії найтриваліша в Сонячній системі — 176 земних діб. Атмосфера планети надзвичайно розріджена. Її утворюють елементи, які полишають поверхню під дією нагріву, жорсткої радіації та сонячного вітру, Меркурій обертається найближче до Сонця, тому такий великий перепад температур на його поверхні — від понад 720 К (+450 °С) удень до майже 100 К (–170 °С) уночі.

Венера — найближча до Землі планета в Сонячній системі. Вона огорнута суцільним хмаровим покривом, але з допомогою радіохвиль вдалося дослідити поверхню планети і скласти її перші карти. Як і на Землі, головну роль у формуванні рельєфу Венери відіграла активність надр (рис. 32.4, б). На її поверхні є також метеоритні кратери.

Серед усіх планет у Сонячній системі Венера найповільніше обертається навколо осі (243 земних доби) та ще й у протилежному напрямку, порівнюючи з іншими планетами. Велика кіль-



**Рис. 32.4.** Поверхні Меркурія (а) та Венери (б)



кість вуглекислого газу (97 %) в атмосфері Венери спричиняє потужний парниковий ефект. Унаслідок цього її поверхня розжарена до температури понад 750 К (+480 °С), майже не зазнаючи добових коливань: уночі поверхня через щільну атмосферу не охолоджується.

Поверхня Марса в чомусь нагадує місячну, а деінде земну; на ньому майже повсюдно панують низькі температури. Тільки на екваторі вдень температура підвищується приблизно до 288 К (+15 °С), але вночі вона швидко спадає до 170 К (–100 °С).

Полюси Марса вкриті полярними шапками з твердої вуглекислоти та водяного льоду. На поверхні Марса є найбільші в Сонячній системі гігантські згаслі вулкани. Найвищий з них — гора Олімпік віком у кілька мільйонів років, височіє над поверхнею планети майже на 27 км.

Ще одна особливість марсіанського рельєфу — русла висохлих річок (рис. 32.5). Ці річища свідчать: колись на планеті були повноводні ріки. Нині великі запаси води містяться під марсіанською поверхнею у вигляді вічної мерзлоти.

Марс утримує дуже розріджену атмосферу переважно з вуглекислого газу. У нього, на відміну від Меркурія й Венери, є два невеликих супутники неправильної форми — Фобос і Деймос.



**Рис. 32.5.** Русла річок на поверхні Марса

**ПЛАНЕТИ-ГІГАНТИ ТА ЇХНІ СУПУТНИКИ.** Окрім великих розмірів, цим планетам властиві й великі маси. У кожній з них є сімейство супутників і система кілець. Але головна відмінність планет-гігантів від планет земної групи — цілком інший склад речовини. Вони складаються переважно з водню та гелію.

Планети-гіганти швидко обертаються навколо осей, але не як тверді тіла — приполярні зони обертаються повільніше за екваторіальні, тому доба на екваторі коротша, ніж на полюсах. Унаслідок швидкого обертання планети-гіганти помітно сплюснуті до полюсів і опуклі біля екватора.

У планет-гігантів потужні воднево-гелієві атмосфери з домішками метану й аміаку та немає твердих поверхонь. Речовина атмосфери з глибиною плавно переходить у суміш газу й рідини, а потім — у рідину. Під атмосферами, товщина яких зменшується зі збільшенням відстані планети від Сонця, кожна з них має тверде ядро.

Групу планет-гігантів можна чітко поділити на дві пари: Юпітер і Сатурн мають більші розміри, менші густини і менші періоди обертання, ніж Уран і Нептун (рис. 32.7).



**Рис. 32.6.** Порівняльні розміри Юпітера та Землі



Рис. 32.7. Порівняльні розміри планет-гігантів

Юпітер — найбільша й масивніша за всі інші планети разом узяті планета Сонячної системи. На його диску добре помітні яскраві кольорові світлі й темні смуги хмар, витягнуті через швидке обертання планети паралельно до екватора. Атмосферне утворення — Велику Червону Пляму — вперше помітили в XVII ст. Коли отримали космічні знімки Юпітера з близької відстані, зрозуміли: це великий і дуже стійкий атмосферний вихор. Утворення такого типу виявлені й в атмосферах інших планет-гігантів.

Атмосфері Юпітера властиві бурхливі турбулентні процеси. Це зумовлено тим, що планета випромінює енергії вдвічі більше, ніж отримує від Сонця. Тобто в її надрах є джерело власної енергії.

Юпітер має тонке кільце, утворене пиловими частинками й льодом. На його існування ще до початку космічної ери вказував відомий український астроном, професор С. К. Всехсвятський. Але відкрили кільце тільки в 1979 р. після прольотів повз Юпітер міжпланетних зондів «Вояджер-1» і «Вояджер-2».

Сатурн — друга за розмірами й масою планета Сонячної системи. Він схожий на Юпітер, але смуги на його диску не такі яскраві й набагато «спокійніші», ніж на диску Юпітера. Ще донедавна характерною ознакою тільки Сатурна вважали великі яскраві кільця, що оперізують планету. Нині відомо, що кільця є у всіх планет-гігантів, але розмірами та яскравістю кільця Сатурна вражають найбільше (рис. 32.8).

Уран і Нептун теж дуже схожі між собою (рис. 32.9, а і б). У цій парі масивніший Нептун має трохи менші розміри, ніж Уран. Середня густина речовини Нептуна найбільша серед планет-гігантів. Хімічним складом Уран і Нептун дещо відмінні від Юпітера й Сатурна: вони вміщують більше важких хімічних елементів.

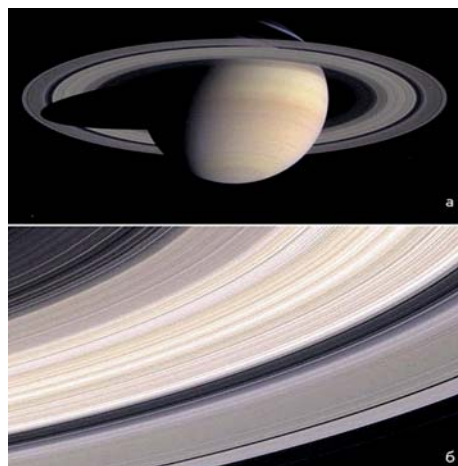
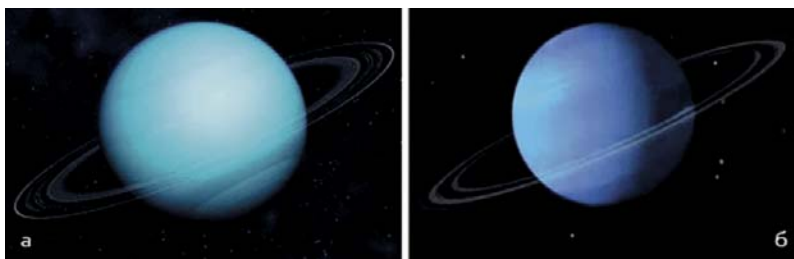


Рис. 32.8. Сатурн (а) та його кільця з близької відстані (б)



**Рис. 32.9.** Уран (а) та Нептун (б)

Уран і Нептун оточені тонкими темними кільцями з дуже дрібних пилинок, що погано відбивають світло. Космічний апарат «Вояджер-2» у 1989 р. виявив на диску Нептуна темні плями такої самої природи, що й Велика Червона Пляма на Юпітері.

Уран рухається навколо Сонця, наче лежачи на боці, — кут між площиною орбіти і віссю його обертання становить лише  $8^\circ$ . Так само, як і Венера, Уран обертається навколо осі у зворотному напрямку.

Станом на 2019 р. відомо майже дві сотні супутників планет-гігантів. Малі супутники — це кам'яністі брили неправильної форми, розмірами переважно від десятків до двох сотень кілометрів. А от природа великих супутників дуже строката.

Чотири найбільші супутники Юпітера (Іо, Європа, Ганімед і Калісто) називають галілеєвими, бо їх відкрив Г. Галілей, коли розпочав спостерігати зоряне небо в телескоп.

Ганімед — найбільший супутник у Сонячній системі (рис. 32.10). Менший розміром за Марс, але більший за Меркурій, він має темну поверхню, вкриту забрудненням льодом і в багатьох місцях поцятковану світлими плямами. Плями утворені речовиною, викинутою з глибин під час падіння метеоритів.



**Рис. 32.10.** Ганімед — супутник Юпітера

**Іо** — ще один унікальний за властивостями супутник Юпітера, на якому було виявлено активні вулкани. Ідею про вулканічні викиди на інших, окрім Землі, тілах Сонячної системи висловлював вже згадуваний професор С. К. Всехсвятський. Космічні світлини з борта автоматичних міжпланетних станцій, на яких зафіксовано вивержені струмені газів до трьохсот кілометрів заввишки, стали ще одним підтвердженням його наукової далекоглядності.

Найбільший супутник Сатурна — Титан — єдиний супутник у Сонячній системі, що має щільну атмосферу з вуглеводнів майже в 400 км завтовшки. Він поступається Ганімеду розміром, але також більший за Меркурій. 2005 р. зонд «Гюйгенс», відокремившись від безпілотної апарату «Кассіні», здійснив м'яку посадку на поверхню Титана. Зонд передав на

Землю світлини поверхні та запис шуму вітру. З'ясувалося, що на Титані є річки й озера, наповнені рідким етаном і метаном, а також ідуть металеві дощі.

Супутник Урана Міранда цікавий тим, що має дуже нерівну поверхню. На небесному тілі з поперечником близько 480 км є гори до 20 км заввишки й западини до 16 км завглибшки.

Найбільший супутник Нептуна — Тритон. На його поверхні добре помітні численні кратери метеоритного походження. Темними «морями» і світлими «материками», великою кількістю кратерів Тритон нагадує Місяць.

### ! Головне в цьому параграфі

До планет земної групи, окрім Землі, належать Меркурій, Венера і Марс. Ці планети мають тверді поверхні. Планети-гіганти відмінні від планет земної групи істотно більшими розмірами й масами, малими періодами обертання, хімічним складом, будовою, а також системами супутників і кілець. У них немає твердих поверхонь. Природа великих супутників планет-гігантів дуже строката.

### ? Запитання для самоперевірки

1. Поясніть суть парникового ефекту.
2. Чому під час припливів Світовий океан витягується не тільки в бік Місяця, а й у протилежному напрямку?
3. Якого найменшого розміру деталі на поверхні Венери можна роздивитися із Землі в найпотужніший на сьогодні оптичний телескоп?
4. Підкинутий угору камінь на Марсі буде довше чи швидше опускати-ся на поверхню, ніж на Землі з такої самої висоти? А пилінка? Поясніть свою відповідь.
5. Про що свідчить той факт, що температури атмосфер планет-гігантів вищі, ніж мають бути з урахуванням енергії, яка надходить до них від Сонця?

## § 33. Карликові планети і малі тіла

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити суть астероїдної небезпеки для Землі та наводити приклади дослідження тіл Сонячної системи з допомогою космічних апаратів.*

**КАРЛИКОВІ ПЛАНЕТИ.** Наприкінці ХХ ст. за орбітою Плутона — дев'ятої планети Сонячної системи, яку в 1930 р. відкрив Клайд Томбо, — астрономи почали знаходити об'єкт за об'єктом. Стало зрозумілим, що дев'ята планета — тільки одне з великих відомих тіл у цій ділянці космосу, але не найбільше. Тому виникла ідея позбавити Плутона статусу планети й заснувати в Сонячній системі нове сімейство об'єктів — карликові планети. Для цього довелося сформулювати визначення понять *планета* і *карликова планета*.

**Планета** — небесне тіло, що обертається навколо Сонця, доволі велике й масивне, щоб мати кулясту форму, і яке очищає околиці своєї орбіти (тобто поряд з планетою немає інших співмірних з нею тіл).

**Карликова планета** — це небесне тіло, яке обертається навколо Сонця, доволі велике й масивне, щоб мати кулясту форму, не є супутником (планети) і не очищає околиці своєї орбіти.

Отже, планети і карликові планети — два різних класи об'єктів Сонячної системи. Першою карликовою планетою став Плутон. До цього сімейства віднесли також Ериду, відкрити з допомогою Космічного телескопа імені Габбла, і Цереру — найбільше тіло з внутрішнього поясу астероїдів. На 2019 р. відомо про 10 карликових планет. Але, напевне, згодом їх буде відкрито більше.

Плутон — найкраще вивчена карликова планета (рис. 33.1). Він майже за 250 земних років обертається навколо Сонця по такій витягнутій орбіті, що в деякі епохи опиняється до нього ближче, ніж Нептун. Наприкінці 70-х років XX ст. біля Плутона відкрито супутник, названий Хароном.

Окрім карликових планет, є інші тіла, що обертаються навколо Сонця і не є супутниками планет. Їх називають *малими тілами* Сонячної системи.



**Рис. 33.1.** Плутон — найвідоміша карликова планета. Зображення отримав космічний зонд «Нові Горизонти», який в 2015 р. пройшов повз неї на відстані 12 500 км

**МАЛІ ТІЛА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ.** Між орбітами Марса й Юпітера є кілька сотень тисяч *астероїдів* — кам'янистих тіл, що обертаються навколо Сонця з періодами в 3—6 років. Вони переважно мають розміри від кількох метрів до 100 км і неправильну форму. Водночас найбільші з них мають майже кулясту форму і в поперечнику досягають сотень кілометрів. Сімейство цих тіл називають внутрішнім, або головним, поясом астероїдів (рис. 33.2), на відміну від інших сімейств схожих об'єктів.

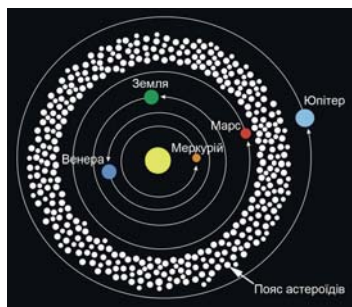
Походження поясу астероїдів пояснюють дією потужного гравітаційного поля Юпітера, який згрупував ці малі тіла. Їх вважають найдавнішими об'єктами Сонячної системи. Тому вивчення астероїдів допомагає розкрити таємницю походження нашої планетної системи.

На початку 50-х років XX ст. астроном Дж. Койпер висловив припущення про існування малих і середніх за розмірами твердих тіл, що заповнюють в Сонячній системі ділянку космічного простору за орбітою Нептуна (рис. 33.3). У наступні роки ця гіпотеза блискуче підтвердилася.

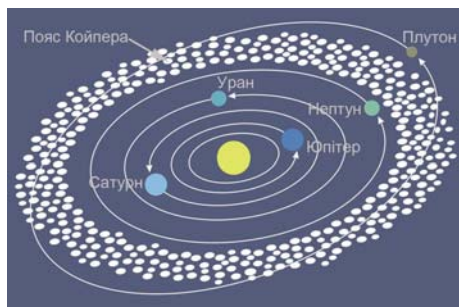
Пояс Койпера складається зі щонайменше 100 000 льодяних тіл розмірами понад 10 км. Основна їх маса зосереджена переважно в смузі 30—50 а. о. від Сонця. Припускають, що тіл з розміром понад 1 км у поясі Койпера є майже 10 млрд. Як і астероїди, об'єкти поясу Койпера — це залишки речовини, з якої утворилася Сонячна система.



Ще один різновид малих тіл — комети — льодяні брили з поперечником максимум у десятки кілометрів, забруднені твердими частинками. Ті з них, що входять до складу Сонячної системи, рухаються навколо Сонця по витягнутих еліптичних орбітах (рис. 33.4, а). З наближенням до Сонця лід починає сублімувати (переходити в газоподібний стан, оминаючи рідку фазу), тягнучи за собою пилінки. Яскравість комети на зоряному небі зростає, і вона може перетворитися на дивовижне видовище. Нову, раніше невідому, комету називають прізвиськом її першовідкривача (наприклад, комета Гейла — Боппа).

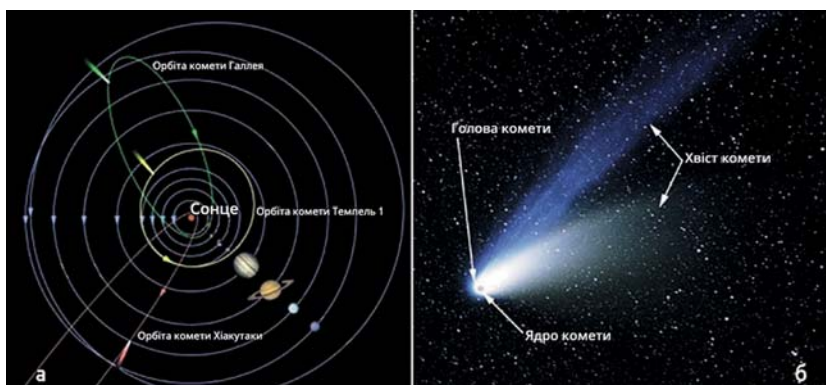


**Рис. 33.2.** Схема розміщення внутрішнього поясу астероїдів у Сонячній системі



**Рис. 33.3.** Схема розміщення поясу Койпера в Сонячній системі

У кометах розрізняють *голову* й характерний *хвіст* (рис. 33.4, б). Голова комети складається з невеликого ядра і світної газової оболонки навколо нього — *коми*. Оболонка світить відбитим сонячним світлом, й інколи її поперечник досягає діаметра Сонця (майже 1400 тис. км), а протяжність хвоста — сотень мільйонів кілометрів. Водночас речовина, з якої складаються голова (за винятком ядра) і хвіст комети, надзвичайно розріджена.



**Рис. 33.4.** Орбіта (а) та будова комети (б)

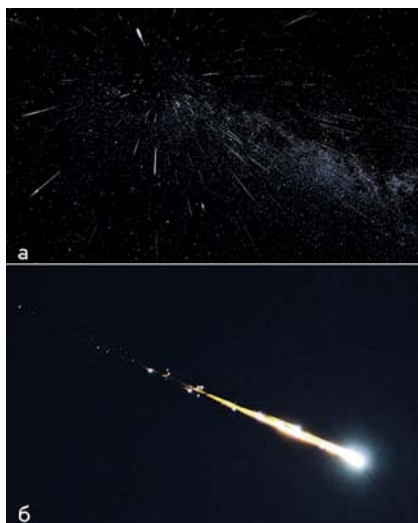
Після кількох сотень обертів навколо Сонця комета втрачає леткі (схильні до випаровування) речовини й перетворюється на темне тіло, схоже на астероїд. Частинки, викинуті з ядра у хвіст комети, утворюють *метеорний потік*, який ще довго рухається тією самою орбітою, що й

вона. Перетинаючи орбіту Землі, частинки потрапляють у земну атмосферу й утворюють у небі *явище метеорів*. Якщо кількість метеорів унаслідок зустрічі Землі з орбітою метеорного потоку істотно збільшується, говорять про *метеорний дощ* (рис. 33.5, а).

Часом метеор може бути таким яскравим, що затьмарює найяскравіші зорі й навіть планети. Його називають болідом (рис. 33.5, б).

Космічне тіло, що досягло поверхні Землі, називають *метеоритом*. Залежно від маси тіла та швидкості, з якою воно входить в атмосферу, внаслідок його падіння може утворитися кратер. На Землі є такі кратери різних розмірів — до сотень кілометрів у діаметрі. Але вони руйнуються впродовж геологічних проміжків часу. До найвідоміших земних метеоритних кратерів належить Аризонський кратер діаметром 1200 м (рис. 33.6).

Давні структури, що утворилися внаслідок падіння космічних об'єктів на поверхню Землі, називають *астро-блемами*. В Україні виявлено 7 астро-блем, найбільша з яких Бовтиська западина поперечником 25 км у Кіровоградській області. Всі вони, крім Іллінецької у Вінницькій області з поперечником 4,5 км і віком 400 млн років, поховані під товщею осадових порід.



**Рис. 33.5.** Метеорний дощ (а) та болід (б) на небі Землі



**Рис. 33.6.** Аризонський кратер

**ПРОБЛЕМА АСТЕРОЇДНОЇ НЕБЕЗПЕКИ.** Ймовірність падіння космічного тіла на поверхню Землі хоч і мала, але існує. У зв'язку з цим нині розвиваються системи спостереження за потенційно небезпечними космічними об'єктами. Найвідоміші з них, наприклад, автоматизовані — LINEAR, Space Watch, LONEOS. Кілька обсерваторій з телескопами діаметром від одного до чотирьох метрів повсякчас сканують зоряне небо. Телескопи обладнано чутливими цифровими ПЗЗ-матрицями. З допомогою комп'ютера отримані знімки відразу порівнюють зі зробленими раніше, і якщо в тій чи іншій ділянці з'являється нова зірочка, що зміщується відносно інших зір, то, ймовірно, це і є астероїд або інше невелике небесне тіло.

Останнім часом науковці різних країн стали розробляти методи захисту Землі від загрози можливого астероїдного бомбардування. Ці методи переважно зводяться до різних вибухових впливів на небесне тіло з тим, щоб зруйнувати його або змінити орбіту.



**! Головне в цьому параграфі**

Окрім планет, до складу Сонячної системи належать карликові планети і малі тіла (астероїди, комети, розсіяні метеорні тіла, або метеороїди, і міжпланетний пил). У Сонячній системі є два пояси малих тіл: внутрішній (головний) пояс астероїдів між орбітою Марса і Юпітера та пояс Койпера за орбітою Нептуна. Ядра комет — це крижані брили неправильної форми з домішками частинок твердих речовин, максимальним розміром у кілька десятків кілометрів. Комети рухаються навколо Сонця по еліптичних орбітах різного ступеня витягнутості. Світні явища метеорів у земній атмосфері породжують дрібні метеорні тіла з масами до кількох грамів, утворені переважно внаслідок розпаду комет. Метеорні тіла великої маси, що падають на Землю у вигляді метеоритів, — це уламки твердих тіл, утворені внаслідок зіткнення астероїдів.

**? Запитання для самоперевірки**

1. Чому виникла потреба запровадити новий клас об'єктів — карликові планети?
2. Що таке метеорний дощ?
3. На Землі метеори світяться на висотах 80—120 км. А на Меркурії?
4. Чим відрізняється форма більшості кометних орбіт порівняно з орбітами планет?
5. Опишіть процес утворення голови і хвоста комети.

## § 34. Внесок космонавтики в астрономію. Космогонія Сонячної системи

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити використання законів руху небесних тіл для практичних потреб космонавтики; особливості рухів штучних супутників та автоматичних міжпланетних станцій, а також наводити приклади дослідження тіл Сонячної системи з допомогою космічних апаратів.*

Космонавтика для астрономії дала змогу винести телескопи за межі Землі й позбутися впливу атмосфери, яка є суттєвою завадою для астрономічних спостережень з поверхні нашої планети. Крім того, космічні польоти до інших тіл Сонячної системи зробили врешті-решт астрономію експериментальною наукою.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ.** Майже відразу після початку ери космонавтики розпочалися космічні дослідження найближчих до Землі небесних тіл (Місяця, планет земної групи).

Місяць, як найближче до Землі небесне тіло, став першим, до якого людство спрямувало космічні апарати (1958 р.). Згодом космічні зонди доставили на Землю зразки місячних порід, а на поверхню супутника Землі

ступили 12 астронавтів. Першими людьми на Місяці були астронавти Нейл Армстронг (рис. 34.1) та Едвін Олдрін, які висадилися в море Спокою 20 липня 1969 р.

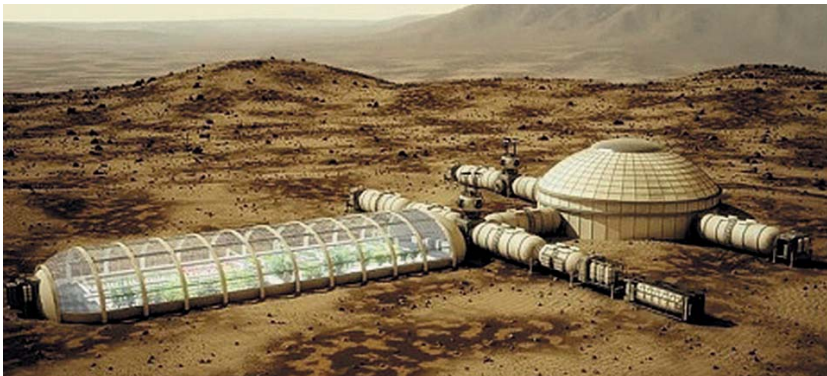
У ХХІ ст. до Місяця спрямовували автоматичні космічні апарати США, Китай, Індія, Японія. Китай, окрім доставки місяцеходу й відправки ґрунту на Землю, навіть планує будівництво населених місячних баз. А США оголосили про плани створення космічної станції на орбіті Місяця.

На Марс земляни спрямовували десятки космічних апаратів з метою докладного вивчення планети — її поверхні, атмосфери, пошуків води і навіть ознак життя. Космічні апарати на Марсі працюють майже безперервно. Вже повністю здійснено детальне картографування поверхні планети, вивчено хімічний склад атмосфери і ґрунту, досліджено погодні умови, знайдено великі запаси водяного льоду тощо.

Марс привертає увагу не тільки астрономів та аерокосмічних агенцій провідних країн світу, а й приватних фірм, які працюють у галузі космонавтики. Наприклад, Ілон Маск, засновник компанії SpaceX (Space Exploration Technologies Corporation), виношує плани про колонізацію Марса землянами.



**Рис. 34.1.** Нейл Армстронг, командир космічного корабля «Аполлон-11» — перший землянин, який ступив на поверхню Місяця



**Рис. 34.2.** Марсіанська база землян в уявленні художника-фантаста

Космічна техніка допомогла астрономам побачити зблизька поверхню Меркурія і скласти майже повну карту планети. Таку саму роботу виконано і для Венери. У дослідженні цієї планети космічні апарати відіграли вирішальну роль, адже щільна атмосфера не дає змоги бачити поверхню Венери навіть з її орбіти. Тому тільки спускні АМС «Венера-9» (1975 р.), а далі «Венера-13 і -14» (1982 р.), вперше показали землянам краєвиди цього небесного тіла (рис. 34.3).



**Рис. 34.3.** Поверхня Венери в місці посадки АМС «Венера-13»

Американські АМС «Піонер-10» і «Піонер-11» (запущені в 1972 і 1973 рр.), що мали на меті вивчення поясу астероїдів і Юпітера, були першими дослідниками планет-гігантів. Після них до планет-гігантів були спрямовані «Вояджер-1», «Вояджер-2», «Галілео», «Кассіні» та «Юнона». Особливо важливими для астрономії стали два останніх космічних апарати, адже «Юнона» є штучним супутником Юпітера, а «Кассіні» протягом 2004—2017 р. був супутником Сатурна. Вони, на відміну від попередників, вивчали планети тривалий час. Понад те, космічний зонд «Гюйгенс», що відокремився від «Кассіні», здійснив посадку на Титан, супутник Сатурна, й докладно дослідив його атмосферу та поверхню.

Автоматична міжпланетна станція «Нові Горизонти» (англ. *New Horizons*), пролітаючи повз Плутон, виконала в 2015 р. дослідження його системи (карликової планети та її супутників). На початку 2019 р. космічний зонд пройшов на відстані приблизно 3500 км від поверхні Ultima Thule — одного з об'єктів поясу Койпера. Уперше отримано докладну інформацію про небесний об'єкт, який лежить на відстані 6,5 млрд км від Сонця. Цікаво, що на борту космічного апарата встановлено капсулу з частиною праху астронома Клайда Томбо, першовідкривача Плутона.

Космічні апарати дали змогу доставити на Землю зразки астероїдної та кометної речовини, побачити з близької відстані ядра комет і поверхні астероїдів. У 2014 р. космічний зонд «Розетта» вивчав комету Чурюмова — Герасименко (названа іменами її першовідкривачів — українських астрономів) і став першим космічним апаратом, що вийшов на її орбіту. Зонд спрямував на поверхню ядра комети спускний апарат «Філі» для вивчення хімічного складу небесного тіла.

Нині в космічному просторі працює багато автоматичних апаратів, які вивчають Всесвіт у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

Рух штучних небесних тіл-супутників по орбіті й космічних апаратів у просторі описують ті самі закони небесної механіки, що й рух природних небесних тіл. Не вдаючись до формул, наведемо деякі особливості руху штучних супутників Землі. Коли супутник рухається на висоті 35 800 км, період його обертання становить 23 год 56 хв 4 с. Це час, за який Земля здійснює оберт навколо власної осі відносно зір. Тому, якщо орбіта такого супутника лежить у площині земного екватора і він рухається в напрямку обертання Землі, то весь час перебуває «нерухомо» над певною точкою земного екватора. Таку орбіту називають геостационарною.

Найбільша відстань, на якій супутник все ще буде обертатися навколо Землі, — 1,5 млн км. Опинившись на більшій відстані, він через збурен-

ня з боку Сонця або повернеться на менші висоти, або перетвориться на штучну планету.

Траєкторії і тривалість польоту космічних апаратів до інших тіл Сонячної системи визначають за законами небесної механіки. Її основою є закон всесвітнього тяжіння і закони Кеплера. Розрахунки показують, що, наприклад, політ до Венери триває 146 діб, до Марса — 259 діб. Для міжпланетних польотів використовують сприятливі періоди у взаємному розміщенні Землі та планети в космічному просторі. Тобто існують як «вікна» старту космічного апарата, так і «вікна» його повернення на Землю. Очікування сприятливого положення планет Венери і Землі триває 480 діб, Марса і Землі — 438 діб. Це означає, що загалом експедиція до Венери триватиме 772 доби, а до Марса — 956 діб.

**ПОХОДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ.** Нині більшість науковців, які досліджують це питання, дотримуються теорії, створеної в 1950-х роках О. Ю. Шмідтом і модифікованої його послідовниками.

Згідно із сучасними уявленнями, вісім планет та майже всі інші тіла утворилися навколо молодого Сонця внаслідок фрагментації газопилової хмари (з її центральної частини 5 млрд років тому утворилося саме Сонце), що мала форму диска. Фрагментація диска відбувалася поступово. При цьому в центральних частинах диска внаслідок високої температури та видування летких елементів збереглися важкі тугоплавкі частинки, з яких сформувалися планети земної групи, а у віддаленіших зонах, де залишалось багато газів і води, утворилися планети-гіганти та їхні супутники (рис. 34.4).



Як формувалася Сонячна система?



Рис. 34.4. Формування Сонячної системи (схема)

Загальний вік нашої планетної сім'ї, визначений за метеоритами та зразками місячного ґрунту, становить близько 4,6 млрд років.

Якщо за часів Шмідта існування газопилового диска було тільки припущенням, то в останні десятиріччя XX ст. такі диски відкрито біля багатьох молодих зір, а тепер відкрито і планети біля інших зір.

Астероїди внутрішнього поясу та об'єкти поясу Койпера також утворені з первинної речовини газопилової хмари, що через різні обставини не була увібрана великими планетами під час їх формування. Причому тверді кам'яністі тіла поясу астероїдів, що формувалися за орбітою Марса, густинами ближчі до планет земної групи. А об'єкти поясу Койпера з великим вмістом

різних льодів формувались у віддаленій зоні Сонячної системи і споріднені з карликовою планетою Плутон.

### **! Головне в цьому параграфі**

Без космічних досліджень нині годі уявити вивчення тіл Сонячної системи. Згідно із сучасними уявленнями, всі тіла нашої планетної системи, серед них і Сонце, утворилися з велетенської газопилової хмари приблизно 4,6 млрд років тому.

### **? Запитання для самоперевірки**

1. У чому полягає перевага космічних досліджень тіл Сонячної системи над телескопічними.
2. Запропонуйте метод картографування поверхні Венери з її орбіти за допомогою космічного апарата.
3. Як ви гадаєте, чому Марс є найцікавішим об'єктом космічних досліджень?
4. Поясніть якісно процес утворення планет земної групи.
5. Поясніть якісно процес утворення планет-гігантів.

### **ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ З ФІЗИКИ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

1. Поясніть малюнком, чому кільце Сатурна із Землі може бути практично невидимим?
2. Уявіть, що кільце Сатурна миттєво розрізали по радіусу від краю до краю. Що з ним відбуватиметься після цього?
3. Астероїди — це зореподібні об'єкти. Яким чином на фотографіях зображення астероїдів відрізняють від зображень зір?
4. Запропонуйте свій варіант убезпечення Землі від астероїдів.
5. О котрій годині за місцевим часом комета буде найвище над горизонтом, якщо у просторі хвіст комети напрямлений точно на Землю?
6. Опишіть відмінності космічних досліджень Венери і Марса.
7. Назвіть кілька характерних особливостей будови Сонячної системи, які має пояснювати теорія її походження.



## Розділ 3

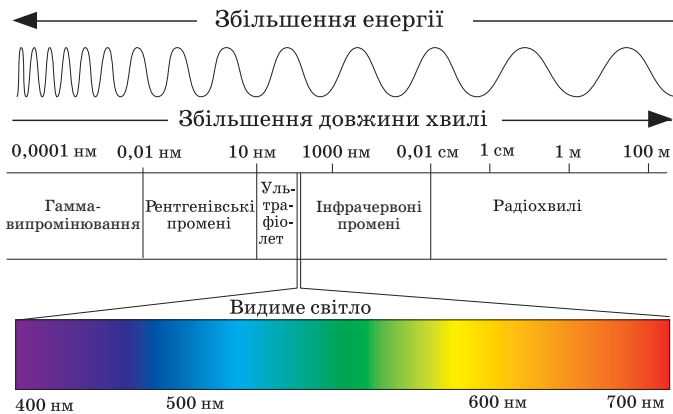
# Методи та засоби астрономічних досліджень

### § 35. Методи і засоби досліджень в астрономії

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити принцип дії оптичного телескопа та радіотелескопа, особливості реєстрації випромінювання небесних світил; обґрунтовувати важливість спостережень у всьому діапазоні електромагнітного спектра.*

**ДІАПАЗОНИ ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕБЕСНИХ ТІЛ.** Майже всю інформацію про небесні тіла отримують шляхом аналізу електромагнітного випромінювання та потоків космічних частинок, тому зареєструвати їх — найперше завдання в астрономії.

Видиме світло можна розкласти у спектр багатьох кольорів: від фіолетового на одному кінці до червоного на іншому. Але воно є малою частиною *електромагнітного спектра*, до якого ще належать радіохвилі, мікрохвильове, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське й гамма-випромінювання.



**Рис. 35.1.** Електромагнітний спектр — упорядкована за довжиною сукупність монохроматичних електромагнітних хвиль

Радіовипромінювання має найбільший діапазон довжини хвиль: від кількох десятків часток міліметра до багатьох кілометрів. Найменшу довжину хвилі має гамма-випромінювання — менше за одну десятимільйонну частку міліметра.

Для більшості електромагнітних хвиль атмосфера Землі непрозора. Крізь вікна прозорості до поверхні нашої планети проникають тільки видиме світло (те, що сприймає людське око, з довжиною хвиль 380—750 нм), інфрачервоні промені й радіохвилі.

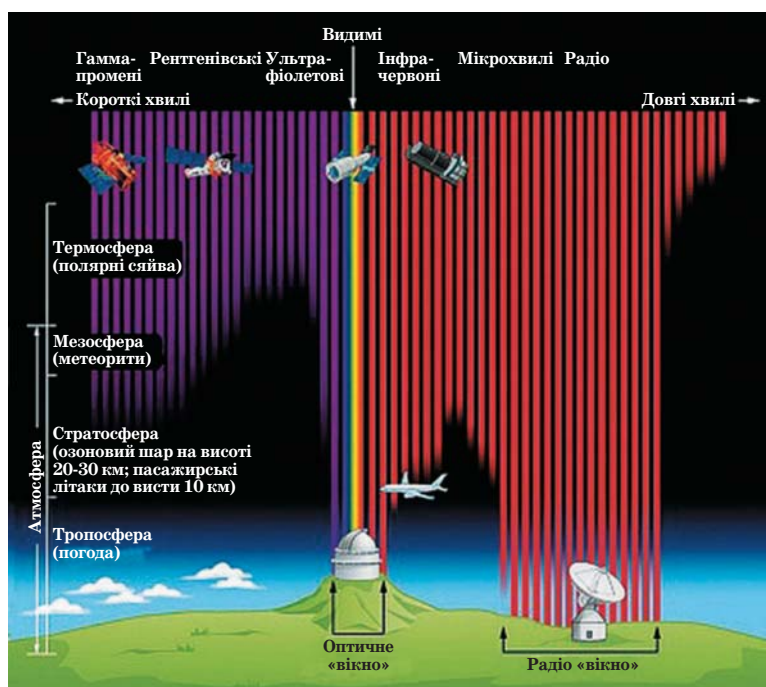


Рис. 35.2. Вікна прозорості земної атмосфери

Вивчення Всесвіту почалося зі спостереження тих небесних об'єктів, які людина могла бачити. З XIX ст. з'явилася можливість вивчати небо в інфрачервоних променях, а з 40-х років XX ст. з появою радіоастрономії — і в радіодіапазоні крізь ще одне вікно прозорості — «радіовікно», яке в 10 млн разів ширше, ніж оптичне.

Від початку космічної ери (1957 р.), коли почали відправляти за межі атмосфери Землі наукові прилади, астрономи отримали змогу виконувати спостереження небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра, й астрономія стала всехвильовою наукою.

Ми бачимо небесні світила, бо вони або самі випромінюють, або світять відбитим світлом. Метод визначення величин, що характеризують випромінювання за зоровим відчуттям, називають *фотометрією*. Фотометричні величини вимірюють з допомогою фотометра. Цей прилад дає змогу порівнювати фотометричну величину досліджуваного джерела з лабораторним стандартом.

У фотометрії для спрощення означень ряду величин користуються поняттям *точкового джерела світла*. Під точковим розуміють таке джерело світла, розмірами якого можна знехтувати, порівнюючи з відстанню до місця спостереження. Зорі, що перебувають від нас на величезних відстанях, вважають точковими джерелами.

До найважливіших фотометричних величин, крім світлового потоку, сили світла, освітленості (параграф 20), в астрономії відносять *світність*.

*Світність* — фотометрична величина, що в астрономії вказує на кількість світлової енергії, яку астрономічний об'єкт (наприклад, зоря) випромінює з усієї своєї поверхні за одиницю часу. Зазвичай одиницею ви-



мірювання світності зір  $L$  є світність Сонця  $L_{\odot}$ . Світність зорі  $L$  пов'язана з її радіусом  $R$  та ефективною температурою  $T_{\text{eff}}$  залежністю:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (35.1),$$

де  $T_{\text{eff}}$  — ефективна температура — це температура абсолютно чорного тіла, тобто тіла, яке повністю поглинає все випромінювання, що на нього падає, і яке створює потік випромінювання на різних довжинах хвиль такої ж потужності, що й реальне тіло;  $\sigma$  — стала Стефана — Больцмана, що визначає зв'язок між потоком випромінювання та ефективною температурою тіла, яке випромінює як абсолютно чорне тіло.

Водночас, світність  $L$  пов'язана з абсолютною зоряною величиною  $M$  зорі. Знаючи  $M$ , можна обчислити  $L$ , і навпаки, наприклад, з діаграми Герцшпрунга — Рассела (параграф 36, п. 2).

У 1865 р. англійський астроном Норман Погосон встановив, що різниця блиску двох зір  $1^m$  і  $6^m$  становить  $E_1/E_2 = 2,5^{6-1} = 2,5^5 = 97,66$ . Він запропонував вважати, що різниця в п'ять зоряних величин ( $\Delta m = 5^m$ ) означає різницю блиску рівно у 100 разів. Тобто освітленість  $E$ , яку створює світловий потік від зорі  $1^m$ , у 2,512 раза більша, ніж від зорі  $2^m$ , у  $(2,512)^2$  раза більша, ніж від зорі  $3^m$  і т. д.

І справді: із залежності  $100 = x^5$ , знайдемо  $\lg 100 = 2 = 5 \lg x$ , звідки  $\lg x = 0,4$  і  $x = 2,512$ . Отже, блиск двох об'єктів з довільними зоряними величинами  $m_1$  і  $m_2$  відрізняється в  $E_1/E_2 = 2,512^{m_2-m_1}$  раза.

Цю закономірність узагальнює формула Погосона:

$$\lg(E_1/E_2) = 0,4 (m_2 - m_1). \quad (35.2)$$

Звідси після перетворень, якщо відома відстань до світила  $r$ , впливає зв'язок видимої зоряної величини  $m$  з абсолютною зоряною величиною  $M$ :

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (35.3)$$

За цією формулою можна знайти відстань до світила  $r$  у парсеках. А порівнюючи абсолютні зоряні величини  $M$  різних об'єктів, можна судити про те, які зорі насправді випромінюють більше чи менше світлової енергії, а отже, мають більшу чи меншу світність  $L$ .

З параграфа 25 відомо, що є три основні види електромагнітного спектра — 1) *неперервний*, або *суцільний*, 2) *лінійчастий* і 3) *смугастий*. Від накладання останніх двох спектрів на неперервний утворюється *спектр поглинання*.

Процеси й об'єкти Всесвіту дають різні види спектрів з максимумом випромінювання в різних його діапазонах. Сонце і зорі зазвичай дають спектри поглинання. На тлі неперервних спектрів їхніх видимих поверхонь є багато темних ліній. Вони виникають, коли світло з розжарених глибин проходить крізь холодніші атмосфери цих тіл. Завдяки розробленій теорії спектрів і накопиченню емпіричних даних астрофізики змогли створити метод спектрального аналізу, який дає змогу дізнатися про багато важливих властивостей небесних об'єктів. Наприклад: про хімічний склад, температуру поверхні, густину, рух тіла вздовж променя зору спостерігача тощо. Нині годі уявити астрофізику без методу спектрального аналізу.

Для отримання спектрів застосовують спеціальні прилади — *спектроскопи*, *спектрометри*, *спектрографи* та ін. Головною складовою будь-яких спектральних приладів є призма або дифракційна ґратка, що роз-

кладає промінь світла у спектр. Найчастіше спектральні прилади розміщують за фокусом об'єктива телескопа. Щоб отримати одночасно спектри небесних тіл, які є в полі зору телескопа, призму ставлять перед його об'єктивом.

Телескоп — головний астрономічний інструмент. Серед засобів, що покращують можливості ока людини спостерігати небесні тіла, першим є телескоп. Він виконує три основні функції: збирати випромінювання від небесних світил на приймальний пристрій (око, фотоприймач, спектрограф тощо); будувати у своїй фокальній площині зображення об'єкта чи певної ділянки неба; збільшувати кут зору, під яким спостерігають небесні тіла, тобто розділяти об'єкти, що лежать на близькій кутовій відстані й тому нероздільні неозброєним оком.

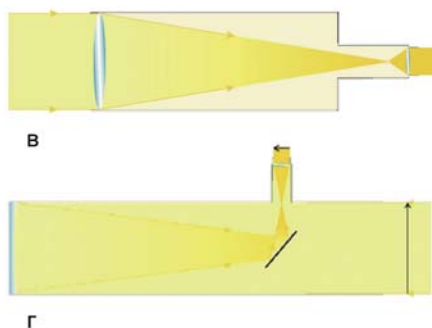
Обов'язковими частинами конструкції візуальних оптичних телескопів є *об'єктив*, *труба* (тубус), *монтування* і *окуляр* (рис. 35.3). Під час фо-



**Рис. 35.3.** Будова оптичного телескопа для візуальних спостережень: об'єктив, труба, монтування, окуляр

тографічних, фотоелектричних, спектральних спостережень окуляр не потрібний, бо відповідні приймачі встановлюють прямо у фокальній площині телескопа. Об'єктивом оптичного телескопа може бути лінза (кілька лінз) чи дзеркало, що має певну кривизну поверхні (наприклад, сферичне).

Перші спостереження небесних тіл за допомогою власноруч збудованого лінзового телескопа (рефрактора, від лат. *refringo* — заломлюю) у 1610 р. виконав відомий вчений Г. Галілей (рис. 35.4, а). Телескоп іншого типу, дзеркальний, або рефлектор (від лат. *reflectere* — відбиваю), першим побудував у 1668 р. І. Ньютон (рис. 35.4, б). Невдовзі було з'ясовано, що дзеркальні телескопи мають суттєві переваги над лінзовими, тому всі сучасні великі телескопи мають дзеркальні об'єктиви.



**Рис. 35.4.** Телескопи Г. Галілея (а) та І. Ньютона (б), а також хід променів (оптична схема) у телескопі-рефракторі (в) та телескопі-рефлекторі (г)

Принципова схема будови *радіотелескопа* (далі РТ) не відрізняється від будови телескопа-рефлектора: космічне радіовипромінювання збирає металева антена у вигляді дзеркала параболічної форми (для радіохвиль з великою довжиною хвилі застосовують дипольні антени), а приймачем є високочутливий радіоприймач.

Нині найбільшим інструментом цього класу є радіотелескоп FAST із поперечником антени 500 м, встановлений на південному заході Китаю, у провінції Гуйчжоу, в 2016 р (рис. 35.6, б). В Україні під Харковом працює найбільший у світі РТ декаметрового діапазону — УТР-2 (діапазон довжин хвиль 12—30 м). Його ефективна площа (площа, якою він сприймає випромінювання) становить 150 тис. кв. м (рис. 35.5, а).

Окрім оптичних і радіотелескопів, є телескопи для інших діапазонів електромагнітного спектра. Їх виносять за межі земної атмосфери. До таких належать ультрафіолетові й рентгенівські телескопи (космічна обсерваторія «Чандра», 1999 р.) і гамма-телескопи — космічна обсерваторія «Комптон» (1991—2000 рр.), космічний телескоп «Фермі» (працює з 2008 р.) та ін.

Другим після людського ока приймачем випромінювання в астрономії після винаходу фотографії в 1880 р. стала фотоплівка. Фотографічна емульсія, на відміну від ока людини, здатна накопичувати кванти світла, що дає змогу реєструвати небесні об'єкти, недоступні для візуальних спостережень. Фотографічні зображення певної ділянки неба чи об'єкта зберігаються багато років, що дає змогу порівнювати їх із такими самими зображеннями, але зробленими пізніше.



**Рис. 35.5.** Радіотелескоп УТР-2 (а) та FAST (б)

Із середини ХХ ст. в астрономії як приймачі застосовують фотоелектронні помножувачі (ФЕП), що дають змогу реєструвати слабкі випромінювання. Із 70-х років ХХ ст. в астрономії стали застосовувати приймачі, дія яких ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекту, зокрема прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). ПЗЗ-матриці — значно чутливіші приймачі випромінювання, ніж фотоплівки. Це дало змогу зменшити час експозиції, уможливило виконання спостережень швидких (тривалістю кілька секунд чи хвилин) небесних явищ і космічних процесів. Окрім того, цифрова форма запису сигналу дає змогу дуже швидко передавати його до комп'ютерів для опрацювання. Це суттєво скоротило обсяги часу, потрібного для обробки результатів спостережень. Тому нині в астрономії ПЗЗ-матриці практично повсюдно замінили фотоплівки.

Важливу інформацію про небесні тіла нам доносять не тільки електромагнітні хвилі, а й потоки космічних променів і нейтрино. Космічні

промені — це протони, тобто ядра Гідрогену, а також електрони, ядра Гелію й важчих хімічних елементів. Нейтрино — це частинка, що народжується в зорях під час перебігу термоядерних реакцій і майже не взаємодіє з речовиною. Вона несе інформацію про умови в ядрі зорі, тому методи нейтринної астрономії дуже важливі для вивчення процесів, що відбуваються, наприклад, у надрах Сонця.

Нейтринні телескопи (детектори) — розміщують на великій глибині під поверхнею Землі. Одним з найвідоміших нейтринних детекторів є японський детектор Супер-Каміоканде, що став до ладу 1996 р. Він розміщений на глибині в 1000 м у цинковій шахті Каміока в Японських Альпах. Є нейтринний детектор на Південному полюсі під кригою на глибині 2000 м і в Південно-Африканській Республіці на глибині в 3000 м.

Перспективними для астрономії є реєстрація гравітаційних хвиль і дослідження Всесвіту з їх допомогою. Нині діє кілька детекторів гравітаційних хвиль у різних країнах світу. Про першу реєстрацію гравітаційних хвиль було оголошено в 2016 р. У вересні 2015 р. на установках LIGO (США) виявили сигнал, що надійшов від злиття двох чорних дір з масами 36 і 29 сонячних на відстані близько 400 млн пк від Землі.

Нині астрономи працюють над створенням орбітальних приймачів гравітаційних хвиль.

**АСТРОНОМІЧНІ ОБСЕРВАТОРІЇ.** Дуже давно людина почала облаштовувати й будувати пункти спостережень за небесними світилами. За цими пунктами спостережень закріпилась назва обсерваторія (від. *лат. observo* — спостерігаю).

Першу державну астрономічну обсерваторію в Європі — Паризьку — відкрито 1671 р., а обсерваторію в Гринвічі — 1675 р. У другій половині XIX ст. з'явилися обсерваторії сучасного типу, де телескопи встановлюють у спеціальних вежах — круглих будинках з банею, що обертається.

Нині *астрономічною обсерваторією* називають наукову установу, в якій виконують астрономічні спостереження та наукові дослідження з усіх галузей астрономії. Для одержання високоякісного зображення обсерваторії розміщують у гірській місцевості з чистим повітрям і слабкою турбулентністю атмосфери. Унікальною є обсерваторія на горі Мауна-Кеа (висота над рівнем моря становить 4215 м) на острові Гавайї (рис. 35.8, а). За дивовижний астроклімат це місце оголошене науковим заповідником. Тут встановлено телескопи «Кек-1» та «Кек-2», а також «Джеміні» і «Субару».



**Рис. 35.8.** Астрономічна обсерваторія на горі Мауна-Кеа (а), Космічний телескоп імені Габбла (б)

Щоб позбутися впливу атмосфери нашої планети, встановлюють спеціально сконструйовані телескопи на штучних супутниках Землі або стратосферних зондах. Їх також вважають обсерваторіями. Наприклад, унікальною астрономічною обсерваторією є Космічний телескоп імені Габбла (рис. 35.8, б).

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України (ГАО НАН України) — найбільша астрономічна установа нашої держави. Основні напрями досліджень ГАО: визначення положень небесних тіл; вивчення обертання Землі; дослідження фігури й рельєфу Місяця; фізика планет, Сонця і зір; будова Галактики; нестаціонарні процеси в надрах зір; вивчення комет. Також в Україні нині діють знані у світі астрономічні обсерваторії в Миколаєві, Львові, Одесі та Харкові.

### **! Головне в цьому параграфі**

Основну інформацію про Всесвіт отримують, аналізуючи електромагнітне випромінювання та вивчаючи космічні частинки. Завдяки виходу за межі Землі астрономія розширила традиційні вікна прозорості й стала всесильною наукою. Призначення телескопа — головного інструмента в астрономії — зібрати якомога більше світла (випромінювання) від небесних світил, а також розділити об'єкти, що лежать близько один до одного. Уся історія розвитку астрономії — це, по суті, пошуки і знахідки засобів, що покращують людський зір. До таких засобів належать приймачі випромінювання та детектори космічних частинок.

### **? Запитання для самоперевірки**

1. Класифікуйте випромінювання щодо його здатності проникати крізь атмосферу Землі.
2. Назвіть основні функції телескопа.
3. Об'єктиви (головні дзеркала) рефлекторів мають сферичну або параболічну форму. А чи можливі плоскі об'єктиви? Відповідь поясніть.
4. Під час фотографічних, фотоелектричних, спектральних спостережень окуляр у телескопі не використовують, а приймач встановлюють прямо у фокальній площині. Чому?
5. Чому сучасні наземні астрономічні обсерваторії зазвичай розміщують високо в горах?

### **ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ**

#### **З ПИТАНЬ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

1. Як змінилося б видиме розміщення зір на небесній сфері, якби раптом зникла земна атмосфера?
2. Поясніть, чому максимум чутливості ока людини припадає на електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі 550 нм (0,55 мкм).
3. Обчисліть абсолютну зоряну величину Сонця  $M_{\odot}$ , якщо його видима зоряна величина  $m_{\odot}$  становить — 26,8<sup>m</sup>, а відстань  $r$  від Землі до Сонця дорівнює 1 а. о.
4. Обчисліть, у скільки разів Сонце (видима зоряна величина  $m_{\odot} = -26,8^m$ ) сильніше освітлює Землю, ніж повний Місяць ( $m_{\text{л}} = -12,7^m$ ).
5. Проаналізуйте функції телескопа і виберіть ту з них, що є визначальною під час спостережень зір.
6. Поясніть, наскільки успішно можна проводити оптичні та радіоастрономічні спостереження вдень.
7. Поясніть переваги фотографії чи ПЗЗ-приймача над оком людини в астрономічних спостереженнях.



## Розділ 4

# Зорі та галактики

### § 36. Сонце та інші зорі

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити будову Сонця; походження плям, протуберанців, спалахів; циклічність сонячної активності; вплив сонячної активності на життя і здоров'я людей та біосферу Землі; різницю між типами зір, а також описати спектральну класифікацію зір.*

**СОНЦЕ.** Самосвітна масивна газова куля, утримувана в стані рівноваги силами власної гравітації і внутрішнім тиском, у надрах якої відбуваються (або колись відбувались) реакції термоядерного синтезу — ось що таке зоря.

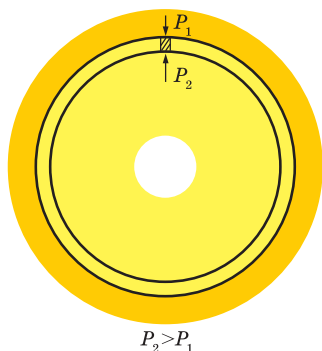
Найближча до Землі зоря — Сонце — перебуває в стані *гідростатичної рівноваги*, суть якої полягає в тому, що вагу кожного шару зорі в стані рівноваги точно компенсує різниця тиску між шарами, які лежать вище й нижче (рис. 36.1).

До Землі видимі промені світла надходять з дуже тонкого шару Сонця — *фотосфери* — у 300 км завтовшки. Оскільки 300 км майже «ніщо» у порівнянні з розмірами Сонця, ми бачимо його край дуже чітким. Фотосфера відіграє роль «поверхні» Сонця з температурою в середньому майже 6000 К, що зростає з глибиною.

Фотосфера Сонця неоднорідна і має зернисту структуру (рис. 36.2, б). Ці «зерна» — гранули розмірами близько 1000 км — упродовж кількох хвилин виникають і розпадаються. Поверхня Сонця весь час наче «кипить», що є наслідком конвекції сонячної речовини, а гранули — це вершини конвективних потоків.

Над фотосферою лежить *хромосфера* (рис. 36.2, а), яку можна спостерігати на початку й наприкінці повного сонячного затемнення, коли місячний диск на мить обрамляє сяюче червоно-оранжеве кільце. Вона безупинно рухається: окремі струмені розжареного газу, спікули, піднімаються на висоту до 10 тис. км, згинаються й нахилиються, наче язички полум'я над вогнищем.

Під час повних сонячних затемнень можна бачити сонячну корону — найпротяжніший шар атмосфери Сонця (рис. 36.3). З допомогою спеціального телескопа — коронографа, у фокусі об'єктива якого розміщено диск («штучний місяць»), корону можна спостерігати з поверхні Землі не тільки під час затемнення.



**Рис. 36.1.** Схема гідростатичної рівноваги Сонця

У короні є промені, дуги, окремі згущення речовини. Її зовнішній край є джерелом безупинного плазмового потоку, 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*.

Сонце обертається навколо осі не як тверде тіло: кутова швидкість обертання зменшується від екватора до полюсів.

Завдяки побудові теоретичних моделей внутрішня будова Сонця й фізичні умови в його ядрі визначені досить точно (рис. 36.4). У центрі міститься ядро радіусом до 0,3 радіуса Сонця. На відстань до 0,7—0,8 радіуса Сонця від центра ядро оточене зоною променистого переносу енергії і далі — конвективною зоною. Над ними лежить атмосфера Сонця.

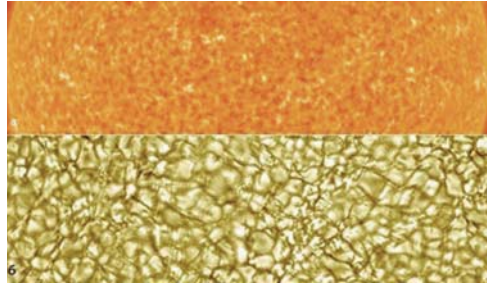
Всередині ядра температура становить 15 000 000 К, а густина — майже 100 г/см<sup>3</sup>.

Сонце складається з Гідрогену (майже 71 % усієї маси світила), Гелію (27 %) та інших елементів (2 %), серед яких Карбон, Нітроген, Оксиген, метали.

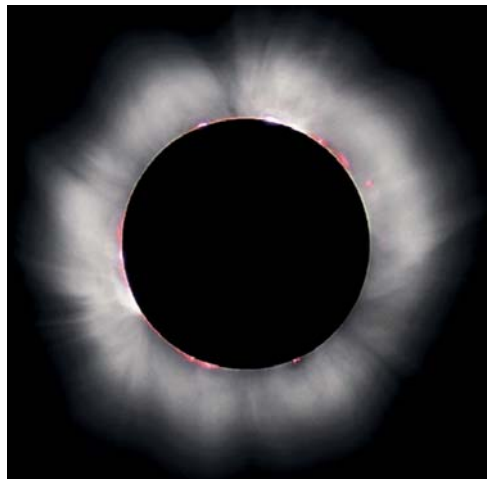
**Рис. 36.4.** Внутрішня будова Сонця: ядро, зона променистого переносу енергії та конвективна зона

Джерелом енергії Сонця є реакція термоядерного синтезу, що має назву протон-протонної. Народжені в процесі реакції позитрони й гамма-кванти передають енергію навколишньому газу, тоді як нейтрино вільно покидають Сонце.

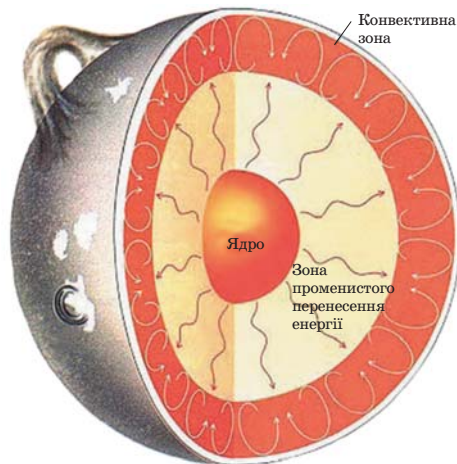
У зоні променистого переносу енергія, утворена в ядрі Сонця, пе-



**Рис. 36.2.** Структура хромосфери (а) та фотосфери (б) Сонця



**Рис. 36.3.** Сонячна корона — верхній шар атмосфери Сонця

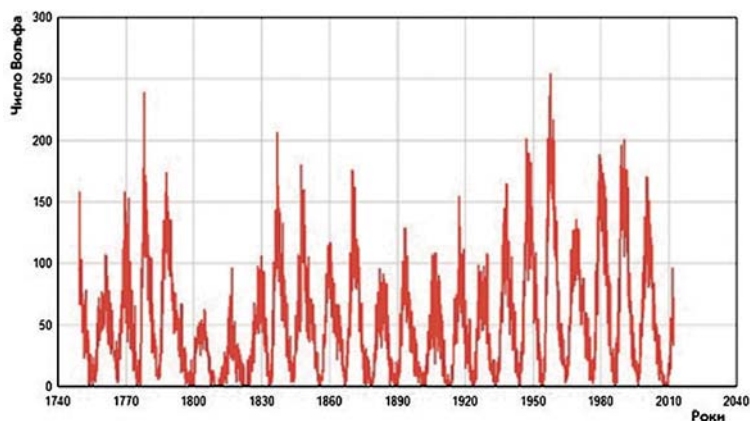




редається через поглинання жорстких гамма-квантів з наступним випромінюванням квантів менших енергій аж до видимих і теплових променів. У підсумку найбільше енергії Сонце випромінює у видимому світлі, до якого наше око найчутливіше. Щоб дістатися від сонячного ядра до поверхні, кванту енергії потрібно близько мільйона років.

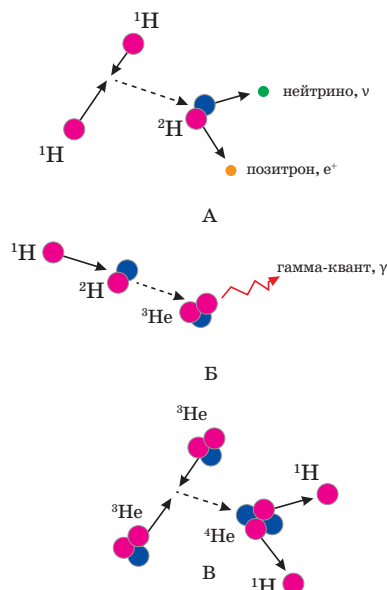
Давно з'ясовано, що від часу до часу в атмосфері Сонця виникають активні утворення, які контрастують із загальним виглядом його поверхні: *плями й факели* у фотосфері, *протуберанці* в короні, а також найграндіозніші явища, що зароджуються в хромосфері, а потім охоплюють усі шари сонячної атмосфери — *сонячні спалахи*. Виникнення й розвиток активних утворень називають проявами *сонячної активності*. Причиною їх появи є різка зміна в деяких ділянках поверхні Сонця напруженості магнітного поля.

Кількість усіх проявів сонячної активності поступово збільшується, а потім поступово спадає з періодом у середньому 11 років. Астроном Р. Вольф запропонував для кількісної оцінки активності Сонця використовувати умовну величину, названу пізніше *числом Вольфа*: це сума двох доданків — загальної кількості плям та їх груп ( $W = 10g + f$ , де  $g$  — число груп плям,  $f$  — повна кількість плям на видимій півкулі Сонця).



**Рис. 36.6.** Графік чисел Вольфа — наочне відображення циклічності сонячної активності

Найпотужнішим проявом сонячної активності є спалахи — нестационарні процеси, спричинені швидкими змінами в сильних магнітних полях



**Рис. 36.5.** Схема перебігу протон-протонної реакції в ядрі Сонця

активних зон на поверхні Сонця. Найслабкіші спалахи тривають 5—10 хв, а найпотужніші — упродовж кількох годин.

Сонячний спалах призводить до викиду в міжпланетний простір підсиленого потоку заряджених частинок, які через 10—12 год досягають орбіти Землі, спричиняючи *магнітну бурю*, яка може тривати від кількох годин до кількох діб.

Під час магнітної бурі зазнають змін параметри шарів іоносфери. В околі магнітних полюсів планети заряджені частинки проникають на малі висоти, збуджують атоми й молекули повітряної оболонки, спричиняючи появу полярних сьйв. Світяться переважно атомарний Оксиген і молекулярний Нітроген, створюючи на висоті близько 100 км червоно-зелену гаму (рис. 36.7).



**Рис. 36.7.** Структура магнітосфери Землі (а) та полярне сьйво (б) — свідчення взаємодій Сонця та атмосфери Землі

Негативного впливу часом зазнають техносфера й біосфера планети. Трапляються аварії космічних апаратів, перегорають електротрансформатори тощо. Медична статистика показує, що в дні, коли відбуваються потужні спалахи, збільшується кількість загострень в осіб із хворобами серцево-судинної системи та розладами нервової системи. Відомо також про кореляцію між появою спалахів і зростанням кількості транспортних пригод тощо.

**ДІАГРАМА СПЕКТР — СВІТНІСТЬ.** До головних параметрів зір належать їхня маса, радіус і світність. Мasi відомих нині зір лежать у межах від 0,01—0,03 до 60—70, а то й 100 чи 200 сонячних мас. Наше Сонце — це звичайна зоря середніх розмірів і маси.

Запам'ятаймо: маса зорі визначає усі інші її параметри — від температури на поверхні й у надрах до часу життя. Маса визначає й те, як зоря завершить своє існування.

Поперечники зір різноманітніші, ніж маса: від 20 км (нейтронні зорі) до кількох тисяч радіусів Сонця (зорі червоні надгіганти) (рис. 36.9).

Ще більшу розбіжність мають світності зір  $L$ . Для нормальних зір вони лежать у межах від 0,00001 до 1 000 000 світностей Сонця  $L_{\odot}$ .

За фізичними властивостями речовини в надрах всі відомі зорі поділяють на три основні групи: *нормальні зорі*, *білі карлики* й *нейтронні зорі*. Разом з тим нормальні зорі можуть бути й червоними карликами, і такими, як наше Сонце, і блакитними гігантами й надгігантами.

До нормальних належить абсолютна більшість усіх зір у Всесвіті. Речовина нормальних зір — це іонізований газ (плазма), який підкоряється відомим з курсу фізики законам ідеального газу. Тиск такого газу тим більший, що вища його температура і менший об'єм, в якому він міститься. Середня густина нормальних зір порівнянна з густиною води.

У 1814 р. Й. Фраунгофер спостерігав спектр Сонця і звернув увагу на темні лінії в ньому. Пізніше відомий фізик Г. Кірхгоф встановив, що темні лінії (лінії поглинання, або фраунгоферові лінії) у спектрі Сонця пов'язані з атомами хімічних елементів, які є в його атмосфері. З допомогою фотографії в другій половині XIX ст. і на початку XX ст. було отримано кілька сотень тисяч таких спектрів інших зір. Як і спектр Сонця, майже всі вони були спектрами поглинання. Саме тоді в Гарвардській обсерваторії (США) всі спектри розмістили в один ряд Отже, що два сусідні спектри були мало відмінні між собою, проте на кінцях ряду вони були різко не схожими (рис. 36.8). Цей ряд поділили на сім окремих класів, і кожен з них позначили літерою в послідовності: О—В—А—F—G—K—М. Такий поділ спектрів на класи з невеликими змінами й доповненнями використовують дотепер і називають *гарвардською класифікацією* зоряних спектрів. Пізніше запровадили додаткові класи R, N і S, які відображають особливості хімічного складу червоних зір-гігантів. А з відкриттям *коричневих карликів* з температурами поверхонь до 2500 К, що випромінюють переважно в інфрачервоному діапазоні, довелося ввести спектральні класи L, T, Y.

Зовнішній вигляд спектра зорі залежить від температури на її поверхні. Тому послідовність спектральних класів Гарвардської класифікації відображає перебіг температур зоряних фотосфер.

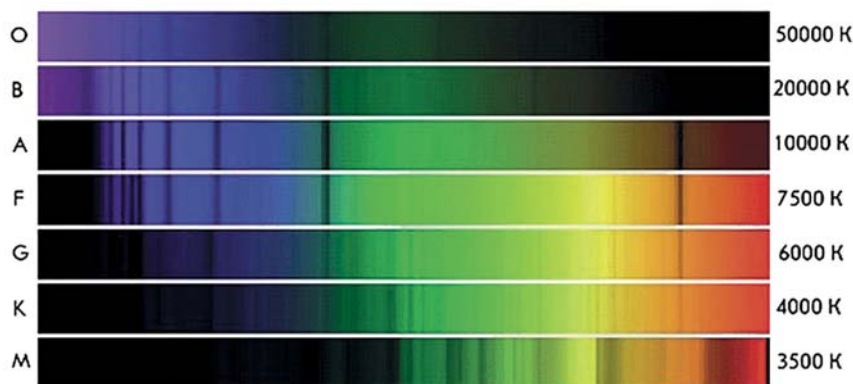


Рис. 36.8. Типи зоряних спектрів із зазначенням температури зір

На початку XX ст. Е. Герцшпрунг і дещо пізніше Г. Рассел виявили залежність між виглядом спектра і світністю зір. Цю залежність вони проілюстрували графіком (рис. 36.9), на якому вздовж однієї осі відкладено світність зорі (абсолютну зоряну величину), а вздовж другої — спектральний клас (температуру).

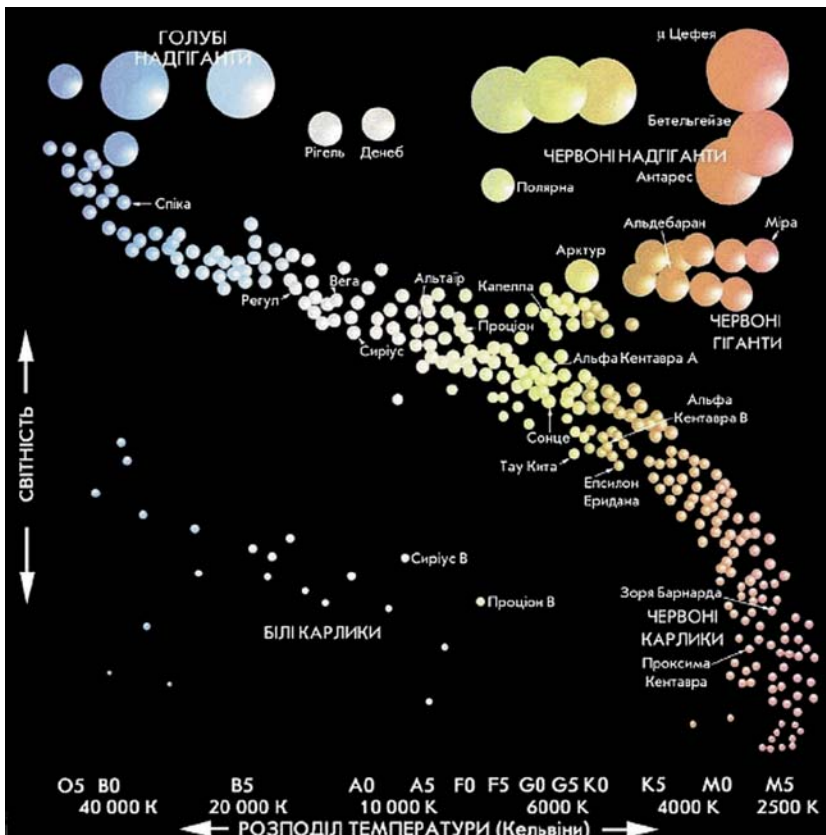
Графік, що показує зв'язок двох зоряних параметрів — спектрального класу і світності, або інакше — температури й абсолютної зоряної вели-

чини — називають *діаграмою спектр — світність*, або (на честь обох учених) діаграмою Герцшпрунга — Рассела (Г — Р).

Місце зорі на діаграмі Г — Р залежить від її фізичних параметрів та стадії еволюції. Зорі головної послідовності — це зорі, що перебувають у найстабільнішій фазі свого життя, коли в їхніх ядрах відбувається синтез ядер Гелію з протонів. Ця фаза становить майже 90 % життя будь-якої зорі. Саме тому більшість зір належать до головної послідовності.

Дуже важливим у діаграмі Г — Р є те, що вона відображає й унаочнює еволюційний шлях зір, протягом якого вони повсякчас змінюються й інше дуже суттєво.

Оскільки ми згадали про абсолютну зоряну величину, знову постає питання визначення відстаней до зір. Спектральні дослідження дають змогу визначати відстані до зір, але вже методом спектральних паралаксів. Особливості спектрів, що покладені в основі поділу зір на класи світності, використовують для визначення абсолютних зоряних величин, а отже, й відстаней до цих об'єктів.



**Рис. 36.9.** Діаграма спектр — світність. Значна частина зір на ній розміщена вздовж діагональної смуги, що простягається з верхнього лівого кута в нижній правий. Її названо «головною послідовністю», а зорі, що лежать на цій смугі, — зорями головної послідовності. Сонце є зорею головної послідовності й міститься в тій її частині, що відповідає жовтим зорям

**! Головне в цьому параграфі**

Сонце — найближча зоря до Землі — самосвітна газова куля, що перебуває у стані *гідростатичної рівноваги*, суть якої полягає в тому, що в кожному його прошарку внутрішній тиск газу врівноважений силами тяжіння. Головним «паливом» на Сонці є Гідроген, з якого в результаті перебігу термоядерних реакцій у ядрі утворюється Гелій. З періодом близько 11 років на поверхні Сонця змінюється кількість плям, сонячних спалахів, а також інших активних утворень, що дає змогу говорити про максимуми й мінімуми його активності. Сонячна активність, зокрема сонячні спалахи, впливає й на живу, і неживу природу нашої планети.

До головних параметрів зір належать їхні маса, радіус і світність. За фізичними властивостями речовини в надрах усі відомі зорі поділяють на три основні групи: нормальні зорі, білі карлики й нейтронні зорі. Тільки аналізуючи спектри, можна дізнатися про хімічний склад та фізичні властивості речовини зір, дослідити їхні рухи у просторі тощо.

**? Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть, чому диск Сонця має чітко окреслений край.
2. Поясніть, як забезпечується стан гідростатичної рівноваги Сонця.
3. Що спричиняє виділення великої кількості енергії в надрах Сонця?
4. Як сонячна активність впливає на біосферу? Наведіть приклади.
5. Дві зорі мають однакову абсолютну зоряну величину, але різні температури поверхонь. Зробіть якісне порівняння розмірів цих зір.

**§ 37. Подвійні та змінні зорі. Походження й еволюція зір**

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити різницю між тинами зір; описати еволюцію зір та природу чорної діри.*

**ПОДВІЙНІ ТА ЗМІННІ ЗОРІ.** Зорі, що під дією взаємних сил тяжіння обертаються навколо спільного центра мас, утворюючи єдину динамічну систему, називають *фізичними подвійними*. Спостереження вказують на те, що фізичні подвійні зорі — поширене явище у Всесвіті. До них, згідно з теоретичними моделями, може належати до 70 % усього зоряного населення.

Залежно від засобів, якими була виявлена подвійність, фізичні подвійні зорі поділяють на три основні класи: візуально-подвійні, затемнювано-змінні та спектрально-подвійні.

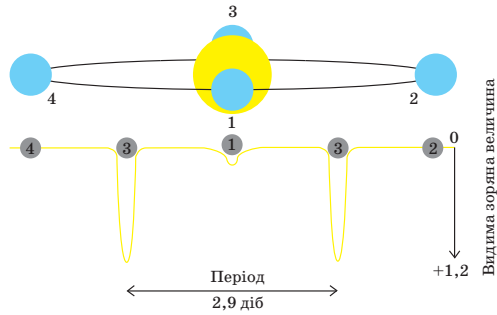
*Візуально-подвійними* зорями є зорі, подвійність яких можна виявити візуально. Якщо у візуально-подвійній системі можна визначити параметри руху (період обертання, великі півосі), то за третім законом Кеплера можна визначити елементи орбіти системи й найважливішу фізичну характеристику — масу кожної зорі.

Якщо подвійність виявлено в результаті фотометричних досліджень періодичних змін блиску системи, такі подвійні зорі називають *затемнювано-змінними*, бо ці зміни виникають, коли компоненти тісної системи

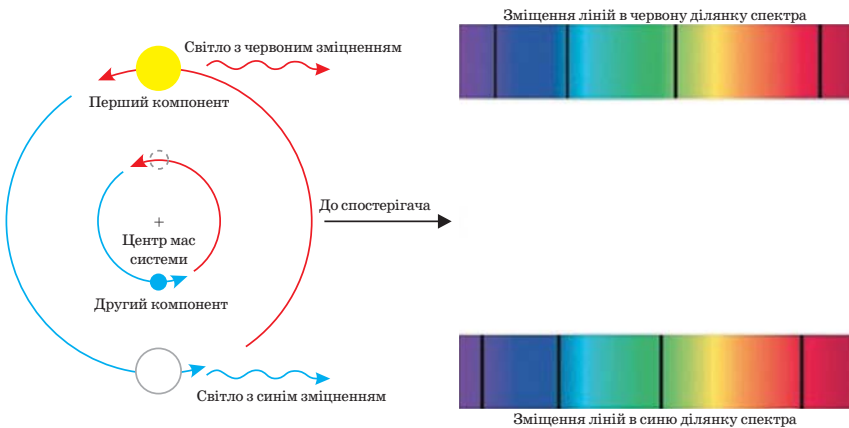
затемнюють одна одну. На рис. 37.1 показано схему і криву блиску затемнювано-змінної зорі Алголь у сузір'ї Персея.

*Спектрально-подвійними* зорями називають системи, у спектрі яких лінії зазнають періодичних роздвоєнь. При цьому внаслідок ефекта Доплера найбільшої величини роздвоєння ліній, спільних для спектрів обох зір, досягає, коли один із компонентів рухається в напрямку до спостерігача, а другий — від нього (рис. 37.2).

Часто один із компонентів спектрально-подвійної системи є таким слабким, що його спектральні лінії не помітні. Тоді замість роздвоєння ліній спостерігають періодичне зміщення ліній яскравого компонента чи то в синій, чи то в червоний бік спектра. Нині, коли створено точні вимірювальні прилади з високою роздільною здатністю, стало можливим вимірювати коливання ліній у спектрах, навіть якщо воно зумовлене невидимим компонентом дуже малої, як порівняти з видимою зорею, маси. Саме в такий спосіб було відкрито екзопланети біля інших зір, і їх відомо вже кілька тисяч.



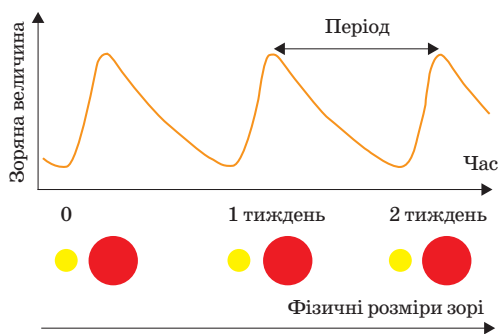
**Рис. 37.1.** Схема затемнення й крива блиску затемнювано-змінної зорі Алголь у сузір'ї Персея



**Рис. 37.2.** Ефект Доплера і спектрально-подвійна зоря

Зорі, блиск яких періодично змінюється, називають *змінними*. Їх поділяють на кілька великих груп. Одні з них — пульсуючі зорі, яскравість яких змінюється внаслідок коливання розмірів. Серед них цікавим є клас цефеїд, що отримав назву від однієї з перших відкритих змінних цього типу —  $\delta$  Цефея. До цефеїд належать багато типів змінних зір — надгігантів високої світності, переважно спектральних класів А, F і G, з періодичною зміною блиску в межах 0,5—2 зоряних величини. Коливання блиску цефеїд зумовлене пульсаціями зовнішніх шарів зір, наслідком чого є періодичні





**Рис. 37.3.** Головна особливість цефеїд — залежність період–світність, відкрита 1908 р. Г. Лівітт (США)

зміни їхніх радіусів (приблизно на 10 %) і температур.

Головною особливістю цефеїд є залежність період — світність, відкрита в 1908 р. Генріеттою Лівітт (США) (рис. 37.3). Ця залежність дає змогу за виявленим зі спостережень періодом змінності обчислити світність цефеїди, а отже, й абсолютну зоряну величину, а потім і відстань до неї.

Завдяки залежності період — світність цефеїди стали головними «маяками» Всесвіту, Визначивши відстань до цефеїди в

іншій галактиці, легко встановити відстань і до самої галактики.

Пильну увагу астрофізиків привертають не тільки пульсуючі змінні, а й ті, що спалахують, або вибухові зорі. Ці зорі мають найрізноманітнішу природу і вік: від дуже молодих, що тільки-но народилися, до старих, існування яких вже завершується.

**ПОХОДЖЕННЯ Й ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР.** Наявність у нашій галактиці зір різного віку — від дуже старих (10–12 млрд років) до дуже молодих (кілька сотень тисяч років) переконливо свідчить про те, що процес утворення зір триває і досі.

Зорі утворюються в масивних (до 10 млн сонячних мас), протяжних (до 100 пк, це — понад 300 св. р.) молекулярних хмарах, яких багато в Галактиці (рис. 37.4). Через *гравітаційну нестійкість* (утворення в будь-якому, навіть однорідному, середовищі за наявності сил тяжіння невеликих відхилень від середніх значень щільності й швидкості руху частинок, що спричиняють появу окремих згустків) галактичні хмари діляться на менші фрагменти. Якщо маса фрагмента перевищить деяку критичну масу, сили гравітації в ньому переважають сили газового тиску, і він почне стискатися. Ця подія і є початком зореутворення.

Досягнувши певної щільності, центральна частина втрачає прозорість, всередині фрагмента виникає щільне й гаряче, гідростатично рівноважне зореподібне ядро. У такому ядрі гравітація врівноважена внутрішнім тиском — це і є протозоря.

Коли температура ядра молодшої зорі досягає 3–4 млн К, у ньому «запускається» термоядерна реакція — починає горіти Гідроґен. Температура в ядрі продовжує зростати, згодом процес ущільнення закінчується, зоря стабілізується і, залежно від своєї маси та світності, посідає цілком певне місце на головній послідовності діаграми Герцшпрунга — Рассела. Зоря сонячної маси перебуває на ній приблизно 10 млрд років, зоря на порядок більшої маси — тільки 300 млн років. Після вичерпання запасів водневого палива стаціонарний період у житті зорі закінчується, і вона



Навчальний фільм  
«Утворення та еволюція зір»



покидає головну послідовність. Далі з зорею відбуваються кардинальні зміни, які залежать від її початкової маси.

Питання утворення зір пов'язане ще з одним важливим процесом — утворенням планет і планетних систем. Як з'ясувалося, виявлені екзопланетні системи здебільшого не схожі на нашу. У них, наприклад, планети-гіганти на взірєць Юпітера обертаються на дуже близьких відстанях від материнської зорі. Чому це так — астрономія ще має з'ясувати. Але, напевне, в нашій зоряній системі є планетні системи, схожі на нашу. Принаймні планети з твердими поверхнями вже виявлено.

На головній послідовності діаграми Г — Р зорі дуже повільно змінюють свої параметри. Проте зміни відбуваються, і що масивніша зоря, то швидше.

Зорі малої маси (до двох сонячних) по завершенні життя спочатку стають червоними гігантами й опиняються на діаграмі Г — Р у правому верхньому куті в зоні червоних гігантів. Урешті-решт зоря поступово чи всю одразу скидає в міжзоряний простір непрозору, слабо пов'язану з ядром силою тяжіння, холодну оболонку. Оболонка, розширюючись від оголеного ядра, утворює планетарну туманність (рис. 37.5). За кілька десятків тисяч років ця туманність розсіюється у просторі, а колишнє ядро зорі — *білий карлик* — поступово охолоджується.

Маси білих карликів співмірні з масою Сонця, але їхні радіуси порівнянні з радіусами планет земного типу. Тому білі карлики мають дуже великі густини — від сотень кілограмів до сотень тонн речовини в  $1 \text{ см}^3$ . Середня температура їхніх поверхонь становить

20 000—30 000 К, хоча в щойно народжених карликах вона може бути значно вищою. Через малі розміри білі карлики мають дуже малі світності й на діаграмі Г — Р посідають місце в лівому нижньому куті.

Наше Сонце закінчить свій життєвий шлях як білий карлик.

Масивні зорі (понад вісім мас Сонця) закінчують своє існування інакше. Переживши кілька розширень і стискань, вони вибухають як Наднові, коли за дуже короткий час виділяється стільки енергії, скільки зоря



**Рис. 37.4.**

Газопилова хмара — місце і джерело зореутворення



**Рис. 37.5.** Планетарна туманність є залишком зовнішньої оболонки зорі — червоного гіганта

випроменила за весь час існування. Типова крива блиску Наднової має характерний крутий підйом, що доходить до максимального значення за 15—20 діб. Наднова перебуває в максимумі блиску протягом приблизно 10 діб, після чого блиск спочатку переривчасто, потім майже рівномірно спадає. Часто світність Наднової, що з'явилася в іншій галактиці, буває співмірною зі світністю всієї зоряної системи, в якій вона вибухнула.

Роль вибухів Наднових в еволюції Всесвіту важко переоцінити. Під час вибуху Наднової утворюються всі елементи таблиці Менделєєва, і ними поповнюється міжзоряний простір. Без цих елементів було б неможливим утворення складних структур, наприклад, планет земного типу і життя на них.

Якщо маса ядра зорі, що вибухнула, становила від 1,4 до 3 сонячних, то після вибуху залишається нейтронна зоря, навколо якої утворюється волокниста туманність, що розширюється, — залишок Наднової (рис. 37.6).

Нейтронні зорі складаються переважно з електрично нейтральних елементарних частинок — нейтронів. Розміри цих зір становлять 20–40 км, а значення їхніх густин порівнянні з густиною атомного ядра і більші за  $1\,000\,000\,000\text{ кг/см}^3$ .

Нейтронні зорі зі швидким обертанням спричиняють явище пульсара. Їхня головна особливість — регулярні, з короткою тривалістю (від кількох десятих мілісекунди до декількох десятих або сотих секунди) сплески радіохвиль (рис. 37.7). За цими сплесками радіовипромінювання їх і відкрили наприкінці 60-х років XX ст. Деякі пульсари, наприклад у Крабоподібній туманності, випромінюють не тільки в радіо-, але й у гамма-, рентгенівському, УФ- та оптичному діапазонах. Згодом пульсари, сповільнюючи обертання, «завмирають». Тривалість їхнього життя становить кілька мільйонів років.

*Чорні діри*, названі так у 1967 р. астрофізиком Дж. Вілером, утворюються на завершальному етапі еволюції масивних зір, маса ядер яких перевищує сонячну втричі й більше. У цьому разі ядро зорі зазнає необмеженого гравітаційного колапсу з утворенням чорної діри — ділянки простору, в якій поле тяжіння таке велике, що друга космічна швидкість для тіл, які там перебувають, є більшою за швидкість світла.

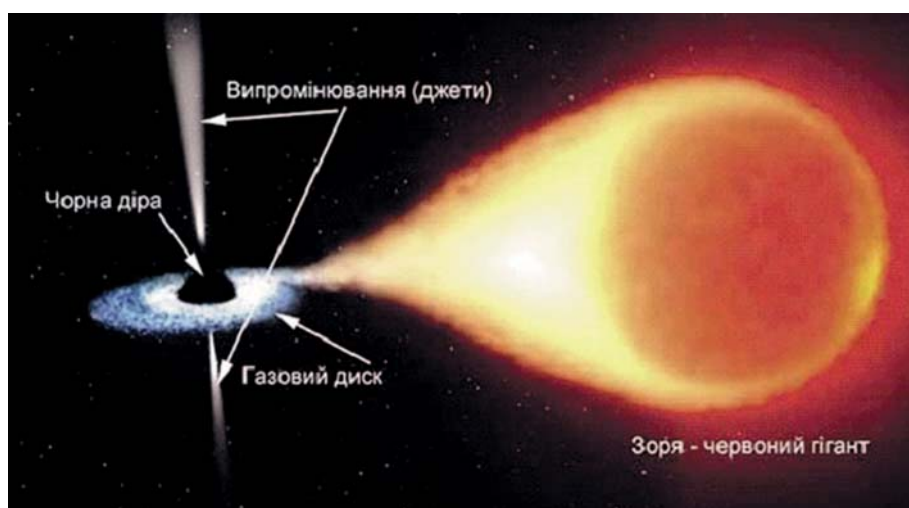
Окрім чорних дір, сформованих внаслідок гравітаційного колапсу масивних зір, є чорні діри набагато більших розмірів, що містяться в ядрах галактик. Їхні маси становлять сотні мільйонів сонячних мас — до 1 % загальної маси Галактики. Імовірно, могли існувати й первісні дуже маленькі чорні діри, що утворилися на початку народження Всесвіту.

Чорні діри не можна спостерігати прямо, тому для їх вивчення й пошуку застосовують непрямі методи. Зокрема, якщо чорна діра входить



**Рис. 37.6.** Крабоподібна туманність — залишок Наднової, яка вибухнула в 1054 р.

до складу тісної подвійної системи, а видима сусідка — це зоря-гігант, то під дією сили тяжіння її речовина перетікатиме на чорну діру (рис. 37.7). Падаючи в полі тяжіння діри, газ нагрівається до температури в мільйони кельвінів і випромінює рентгенівські промені. Одне з джерел такого випромінювання, Лебідь X-1, виявили в сузір'ї Лебедя ще на початку 70-х років XX ст. З появою рентгенівської астрономії з'явилася можливість реєструвати ці джерела за допомогою приймачів, винесених за межі земної атмосфери.



**Рис. 37.7.** Чорна діра в подвійній зоряній системі  
(фрагмент малюнка художника-фантаста)

### **! Головне в цьому параграфі**

Зорі зазвичай утворюють різні системи, найпростішою з яких є подвійна зоря. Народжуються зорі в газопилових хмарах шляхом їх гравітаційного стиснення. Цей процес відбувається й нині. В останнє десятиліття XX ст. астрономи відкрили екзопланети — планети біля інших зір. Час існування зорі на головній послідовності діаграми Герцшпрунга — Рассела визначає її маса. Що масивніша зоря, то менше часу вона існує у стабільному стані. Зорі, схожі на Сонце, врешті-решт перетворюються на білі карлики, масивніші, часто вибухаючи як Наднові, стають нейтронними зорями, а наймасивніші закінчують своє існування як чорні діри.

### **? Запитання для самоперевірки**

1. Які зорі називають фізичними подвійними та на які основні класи їх поділяють?
2. Які зміни геометричного характеру відбуваються з цефеїдами?
3. Якою буде кінцева стадія еволюції Сонця: білий карлик, нейтронна зоря, чорна діра?
4. Зоря якої маси (більшої чи меншої за сонячну) наприкінці свого існування спалахує як Наднова?
5. Поясніть, чому не можна прямо спостерігати чорні діри.

## § 38. Молочний Шлях та інші галактики

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити причину існування Молочного Шляху на зоряному небі Землі; місце Сонячної системи в Галактиці; природу галактик і квазарів; природу активності ядер галактик.*

**БУДОВА ГАЛАКТИКИ.** Нині ми знаємо, що Сонячна система лежить усередині велетенського зоряного утворення — *Галактики* (наша галактика, або *Молочний Шлях*), яка вміщує до 400 млрд зір. Загальну її будову встановили тільки у XX ст. Зовні Галактика нагадує плоский диск, в якому є чітко виражені спіральні рукави (рис. 38.1).

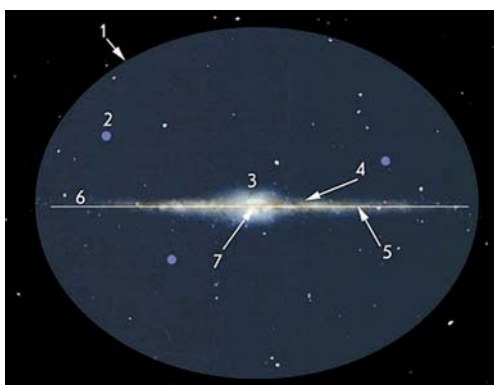
Диск Галактики з поперечником понад 30 кпк огортає гало — хмара розрідженої речовини радіусом до 46 кпк. Гало складається з газу, поодиноких окремих зір і темної матерії (детальніше про неї далі). Навколо ядра й центрального потовщення (балдж) є велика кількість кулястих зоряних скупчень, утворених старими холодними червоними зорями. У зв'язку з цим астрономи говорять про підсистеми Галактики — плоску і сферичну. Крім того, кожна з підсистем також поділяється на окремі підсистеми.

Астрономічні спостереження показують, що Галактика має чотири спіральні рукави, два з яких чітко виражені. Їх наявність вчені пояснюють гігантськими хвилями стиснення й розрідження міжзоряного газу, що поширюються галактичним диском.

Наша планетна система лежить в одному з «тихих закутків» Галактики на відстані майже 9 кпк від центра. Перебуваючи на такій відстані, Сонце зі швидкістю 220 км/с здійснює один оберт навколо центра Галактики за майже 230 млн років. Цей період називають галактичним роком. За час свого існування Сонячна система обійшла навколо центра Галактики приблизно 30 разів.

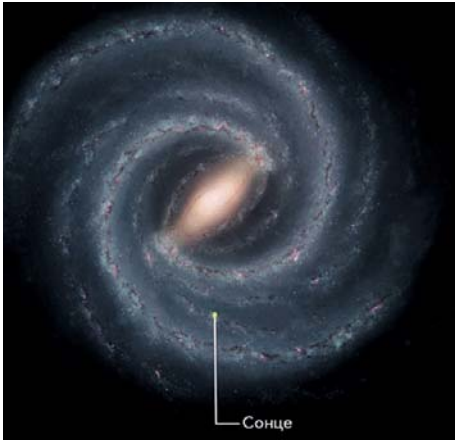


**Рис. 38.1.** Приблизно такий вигляд має наша галактика, якщо її розглядати «згори» чи «знизу»



**Рис. 38.2.** Вигляд нашої галактики збоку: 1 — гало; 2 — кулясте скупчення; 3 — балдж; 4 — товстий диск; 5 — тонкий диск; 6 — галактичний екватор; 7 — галактичний центр





**Рис. 38.3.** Приблизне місце перебування Сонця в Галактиці

кулясті та розсіяні зоряні скупчення — пов'язані взаємним тяжінням групи зір спільного походження.

Кулясті зоряні скупчення — це щільні системи, утворені сотнями тисяч чи кількома мільйонами зір, що мають правильну, майже сферичну форму (рис. 38.4). Концентруючись навколо ядра Галактики, вони лежать на значних відстанях від її диска. Зорі кулястих скупчень віком від 5—6 млрд до понад 12 млрд років — найстаріші в Галактиці.

Розсіяні зоряні скупчення об'єднують від кількох десятків до кількох тисяч зір і містяться в диску Галактики (поблизу галактичної площини). Вони не мають чіткої зовнішньої форми, але виявляють себе як ділянки, де зір більше, ніж у середньому на небі (рис. 38.5). Зорі розсіяних скупчень зазвичай молоді віком — приблизно десятки чи сотні мільйонів років і мають приблизно однаковий хімічний склад, що свідчить про їх спільне походження.



**Рис. 38.4.** Кулясті скупчення зір лежать дуже далеко від Землі. Найвідоміші з них: M13 у сузір'ї Геркулеса (а) і M3 у сузір'ї Гончих Псів (б). Тут літера М у позначенні скупчення означає, що цей об'єкт занесено до каталогу Мессьє

Важливо те, що орбітальна швидкість Сонця в Галактиці майже збіглася зі швидкістю руху хвиль стиснення. Тому наша планетна система залишається попереду фронту хвилі вже кілька мільярдів років, фактично між двома спіральними рукавами, в яких відбувається активне зоре утворення (рис. 38.3). Ця обставина, імовірно, мала велике значення для виникнення життя на Землі, адже забезпечувала відносно спокійні для цього умови.

На зоряному небі можна спостерігати не тільки зорі, а й слабкі туманні плями. Деякі з туманностей насправді є групами слабких зір. Це

На зоряному небі можна бачити небесні об'єкти різної форми, утворені великими хмарами розрідженого газу і пилу. Їх називають *туманностями* і, відповідно до зовнішнього вигляду, поділяють на планетарні й дифузні (рис. 38.6 а), а за фізичною природою — на газові, пилові та газопилові. Усі планетарні туманності й частина дифузних є газовими. Пилові туманності є і світлі, і темні (рис. 38.6, б).



**Рис. 38.5.** Одне з найвідоміших розсіяних зоряних скупчень Плеяди (сузір'я Тельця)



**Рис. 38.6.** Світла туманність Оріона — найяскравіша на небі дифузна світла туманність, яку можна бачити неозброєним оком (а), та одна з найвідоміших у Північній півкулі неба темних туманностей — Кінська Голова в сузір'ї Оріона (б)

Крім туманностей і зоряних скупчень, у Галактиці є *міжзоряна речовина* — надзвичайно розріджений газ і пил. Деяка частина цієї речовини нагріта до температур майже в мільйон кельвінів, тому її можна спостерігати в ультрафіолетових і рентгенівських променях. Інша її складова — холодний газ, про який дізналися, реєструючи радіохвилі довжиною 21 см, що їх випромінюють атоми Гідрогену. Так відкрили хмари атомарного нейтрального Гідрогену і ще холодніші й щільніші хмари молекулярного Гідрогену, маса речовини яких досягає сотень тисяч і навіть мільйонів мас Сонця. У молекулярних хмарах, окрім молекул Гідрогену ( $H_2$ ), є й складніші молекули (наприклад, вода ( $H_2O$ ), аміак ( $NH_3$ ), етиловий спирт ( $CH_3CH_2OH$ ) тощо), серед них і найпростіші органічні сполуки.

Окрім того, міжзоряну речовину пронизують швидкі елементарні частинки — *космічні промені*, електромагнітне випромінювання і дуже слабкі магнітні поля, пов'язані з хмарами міжзоряного газу. Магнітні поля сприяють утворенню найщільніших холодних хмар, де формуються зорі.



**Рис. 38.7.** Роздвоєння Молочного Шляху від сузір'я Оріона до сузір'я Скорпіона є наслідком ослаблення випромінювання зір, що відбувається в результаті взаємодії електромагнітних хвиль (фотонів) з частинками речовини (пилу) в міжзоряному середовищі



**Рис. 38.8.** Галактика в сузір'ї Андромеди — доступна для спостережень в Україні (а), Велика і Мала Магелланові Хмари, названі на честь мореплавця Фернана Магеллана, містяться у Південній півкулі небесної сфери (б)

**ГАЛАКТИКИ І КВАЗАРИ.** 1923 р. американський астроном Е. Габбл виявив на околицях Туманності Андромеди цефеїди. Визначивши відстань до них, Габбл зрозумів — Туманність Андромеди перебуває від нас на значно більшій відстані, ніж поперечник Молочного Шляху. Нині цю відстань оцінюють у 705,5 кпк (2,3 млн св. р.). Згодом з'ясувалося, що Всесвіт заповнений такими зоряними системами — галактиками.

На небі Землі є тільки три галактики, які можна бачити неозброєним оком. Одна з них — Туманність Андромеди (рис. 38.8, а). Дві інші галактики — Велика та Мала Магелланові Хмари — містяться в Південній півкулі зоряного неба (рис. 38.8. б). Вони є супутниками Молочного Шляху й віддалені від нього відповідно на 58 і 49 кпк (190 тис. і 160 тис. св. р.).

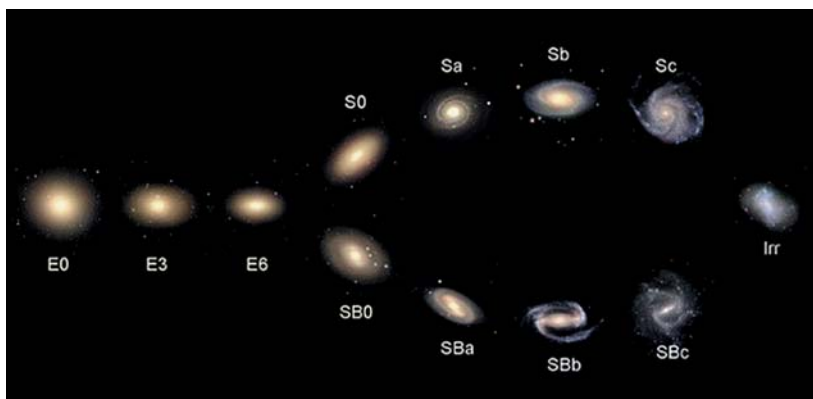
Світ галактик різноманітний. Першим у 1925 р. галактики за їхнім зовнішнім виглядом класифікував Е. Габбл. Він виокремив три типи галактик: еліптичні, спіральні й неправильні (рис. 38.9).

Еліптичні галактики складаються переважно зі старих зір, серед яких найяскравіші — червоні гіганти. У таких галактиках немає міжзоряної матерії, і процеси зореутворення в них не відбуваються. Маса еліптичних галактик лежить у межах від одного мільйона сонячних мас (карликові еліптичні галактики) до кількох тисяч мільярдів сонячних мас (гігантські еліптичні галактики).

Спіральні галактики з гладкими, туго закрученими рукавами відносять до типу Sa. Вони мають яскравий і протяжний балдж, а рукави — нечіткі й розмиті. Як-



що спіралі потужніші й чіткіші, а центральна зона виокремлюється менше, то такі галактики зараховують до типу Sb. За наявності клоччастої спіральної структури й балджа, що виокремлений слабо, галактики відносять до типу Sc.



**Рис. 38.9.** Класифікація галактик, виконана Е. Габблом за зовнішнім виглядом

До окремої групи належать спіральні галактики з перемичкою (SB): ядро галактики перетинає пряма зоряна смуга — перемичка, або бар, з якої й «ростуть» спіралі. Ці галактики також поділяються на три типи (SBa, SBb і SBc). У цілому звичайних спіральних галактик і галактик з перемичками більше половини від загальної їх кількості.

Галактики, в яких неможливо визначити форму, класифікують як неправильні (Ir). Маса цих галактик дуже малі (соті частки маси Молочного Шляху), і зазвичай вони є супутниками більших галактик (приклад таких зоряних систем — Магелланові Хмари).

У середині 20-х рр. XX століття бельгійський католицький священник, астроном і математик Жорж Леметр, розробляючи космологічну модель (§ 39) Всесвіту, згідно з якою наш світ виник унаслідок вибуху надщільної матерії («первинного атома»), сформулював залежність між швидкістю руху галактик і відстанями до них. Спостереження Е. Габбла підтвердили цю закономірність. На підставі вимірів зміщення спектральних ліній галактик у червону ділянку спектра (ефект Доплера, рис. 38.10) Габбл зробив висновок: що далі галактика від Землі, то з більшою швидкістю вона рухається.

Так було відкрите явище розбігання галактик. Тепер залежність між відстанню до галактики



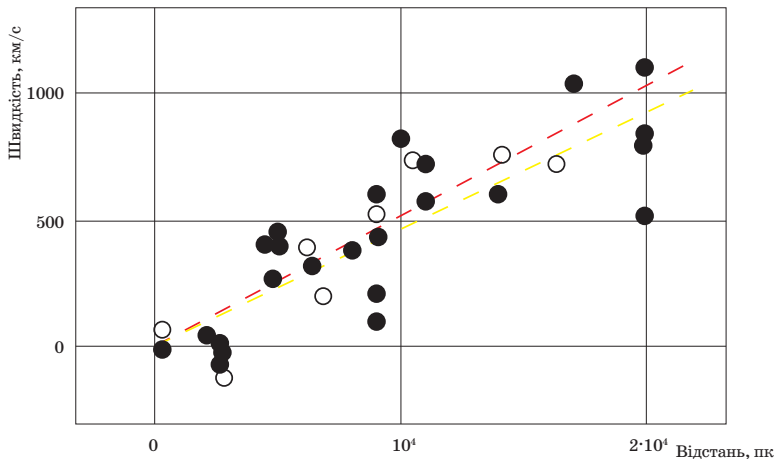
**Рис. 38.10.** Зміщення спектральних ліній далекої галактики в червону ділянку спектра порівняно з еталонним спектром

та швидкістю її віддалення називають *законом Габбла — Леметра* (рис. 38.11). Цей закон має вигляд:

$$v = Hr,$$

де  $v$  — швидкість руху галактики;  $r$  — відстань до неї;  $H$  — стала Габбла.

Сталу Габбла  $H$  визначають зі спостережень і нині оцінюють в  $71 \pm 2,7$  км/(с · Мпк). Тобто на кожний мегапарсек швидкість руху галактики зростає на  $71 \pm 2,7$  км/с.



**Рис. 38.11.** Графік, що ілюструє закон Габбла — Леметра (з оригінальної роботи Е. Габбла)

Із закону Габбла — Леметра випливає принаймні два важливих висновки. Перший — Всесвіт розширюється, наслідком чого і є розбігання галактик. Причому, як показали спостереження, розсувається простір між галактиками. Другий висновок — Всесвіт колись мав початок.

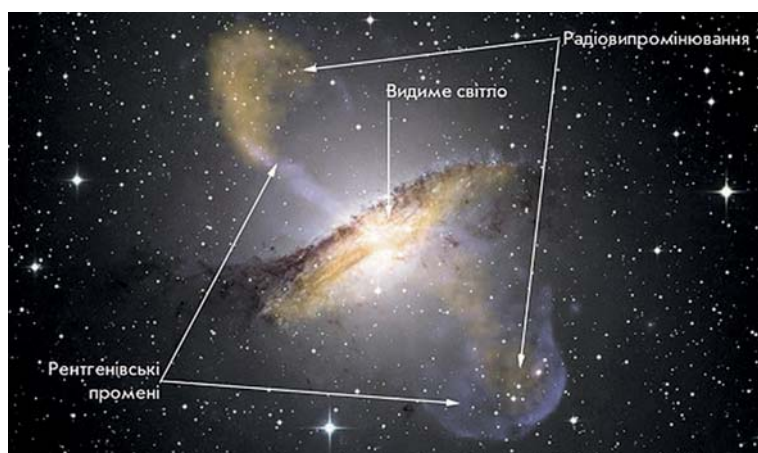
У 40-х роках ХХ ст. відкрили галактики з активними ядрами, що не відповідали класифікації Габбла. До них відносять галактики Сейферта, галактики Маркаряна, радіогалактики, квазари та деякі інші. Усім цим об'єктам, як порівняти зі звичайними галактиками, властива дуже інтенсивна енергетична діяльність у центральних зонах, зокрема в ядрі.

Радіогалактиками вважають галактики, випромінювання яких у радіодіапазоні в тисячі й десятки тисяч разів потужніше, ніж у Молочного Шляху чи схожих на нього зоряних систем (рис. 38.12).

У 60-ті роки ХХ ст. астрономи відкрили надзвичайно потужні віддалені радіоджерела, які за спостереженнями в оптичному діапазоні зовнішнім виглядом більше нагадували зорі, ніж галактики. Їх виокремили в особливий клас і назвали *квазарами* (квазізоряними радіоджерелами). Водночас з'ясували, що оптичні спектри квазарів дуже схожі на спектри галактик Сейферта.

Після вимірювання в спектрах квазарів червоного зміщення з'ясувалося, що ці об'єкти перебувають від нас на відстані від 0,46 до понад 3 Мпк. Згідно із сучасними уявленнями квазари — це дуже компактні й активні ядра деяких галактик, де в об'ємах, як об'єм Сонячної системи, відбувається

таке колосальне виділення енергії, що слабкі спіральні рукави самих галактик важко побачити. Спричиняють це явище надмасивні (від 100 млн до 1 млрд сонячних мас) чорні діри в ядрах квазарів. Речовина, що падає в чорну діру, формує навколо неї в екваторіальній площині кільцеву структуру, яку називають *акреційним диском*. Падаючи в діру вздовж спіралі, газ унаслідок внутрішнього тертя істотно нагрівається й випромінює інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові, рентгенівські промені, а іноді й гамма-кванти, які можна зареєструвати.

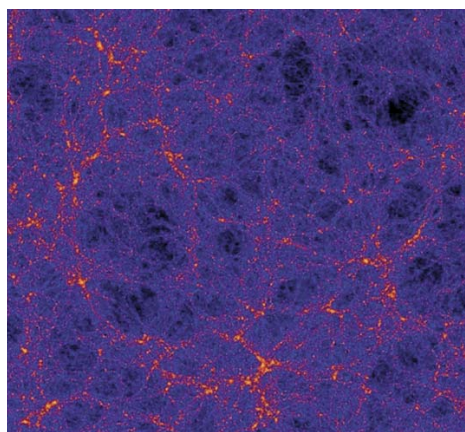


**Рис. 38.12.** Еліптична галактика із сузір'я Кентавра — приклад радіогалактики

Нині встановлено, що галактики, як і зорі, утворюють скупчення. Наша галактика і ще майже п'ять десятків її сусідок входять до складу скупчення, яке називають *Місцевою групою галактик*.

Водночас скупчення галактик об'єднуються в галактичні надскупчення, які охоплюють у космосі ділянки розмірами в кілька десятків мегапарсеків.

Скупчення й надскупчення галактик, зібрані у волокнисті структури завдовжки в десятки мегапарсеків, утворюють своєрідні «нитки» і «стіни», що огортають велетенські порожнини — *войди* (рис. 38.13). Порожнини, схожі на бджолині стільники, дотикаються одна до одної, утворюючи комірчасту структуру Всесвіту. Наразі встановлено, що в порожнинах міститься темна матерія, природа якої сьогодні невідома.



**Рис. 38.13.** Комірчаста структура Всесвіту (фрагмент комп'ютерного моделювання)

**! Головне в цьому параграфі**

Сонячна система перебуває в доволі «затишному» місці велетенського зоряного утворення — галактики Молочний Шлях. У нашій галактиці є зорі, зоряні скупчення (розсіяні й кулясті), різного роду туманності з газу і пилу, космічні частинки, магнітні поля.

Галактики — основні «цеглинки», з яких нині складається Всесвіт. За зовнішнім виглядом галактик Е. Габбл виокремив три їх типи: еліптичні, спіральні й неправильні. Також Е. Габбл довів, що Всесвіт розширюється, наслідком чого є розбігання галактик. Нині з'ясовано: галактики утворюють скупчення й надскупчення. За сучасними уявленнями, Всесвіт має комірчасту структуру, тобто складається з великих порожнин (войдів), схожих на бджолині стільники, що дотикаються одна до одної.

**? Запитання для самоперевірки**

1. В яких утвореннях Галактики можна побачити зорі однакового віку й однакового початкового хімічного складу?
2. У галактиці відомо кілька типів не схожих між собою туманностей. Що це за туманності?
3. Які типи галактик вам відомі?
4. Які є методи визначення відстаней до галактик?
5. Що мають на увазі, коли говорять про комірчасту структуру Всесвіту?

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ У ПИТАННЯХ ЗІР ТА ГАЛАКТИК

1. Поясніть, яким чином можна створити аналог сонячних гранул, користуючись чайником з водою.
2. Відомо, що в ядрі Сонця внаслідок термоядерних реакцій утворюються нейтрино і гамма-кванти, які людське око не фіксує. Чому ж ми тоді бачимо Сонце?
3. Накресліть графік якісної зміни блиску затемнювано-подвійної зорі. Поясніть рисунок.
4. В яких випадках у спектрі спектрально-подвійної зоряної системи можна спостерігати розщеплення ліній, а в яких — зміщення? Поясніть.
5. Опишіть процес визначення відстаней до цефеїд зі спостережень.
6. Опишіть якісно процес утворення зорі. Чи обов'язково молода зоря посяде місце на головній послідовності діаграми Герцшпрунга — Рассела?
7. Опишіть якісно, що відбувається із зорею, яка стала Надновою.
8. Усередині білих карликів не відбуваються термоядерні реакції. За рахунок якої енергії світять ці зорі?
9. Обґрунтуйте метод спостережень чорної діри.
10. Чи можна спостерігати кульові скупчення зір у Галактиці, розкиданими по всьому небу? Відповідь обґрунтуйте.
11. У Галактиці відомо кілька типів туманностей, відмінних між собою. А чи є в них щось спільне?
12. Обчисліть швидкість віддалення галактики, що перебуває від нас на відстані  $5 \cdot 10^8$  пк.

## Розділ 5

### Всесвіт

#### § 39. Походження і розвиток Всесвіту

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити основні етапи еволюції всесвіту і природу реліктового випромінювання, а також описати спостережні дані, які підтверджують теорію Великого Вибуху; великомасштабну структуру Всесвіту; загальноприйняті моделі (сценарії) його походження й розвитку.*

**ВЕЛИКИЙ ВИБУХ — ПОЧАТОК НАШОГО ВСЕСВІТУ.** Подію, внаслідок якої виник наш всесвіт, називають Великим Вибухом. На користь теорії Великого Вибуху є кілька доказів, серед яких і відомий нам факт розширення Всесвіту. Також ця теорія пояснює поширеність у Всесвіті легких хімічних елементів, таких як Гелій і Літій. Але головним доказом є наявність космічного фонового випромінювання, про яке йтиметься далі. За його вивчення вже присуджено дві Нобелівські премії.

Теоретичні розрахунки показують: у віці  $10^{-43}$  с (так званий час Планка, гіпотетична природна найменша можлива одиниця часу, квант часу) Всесвіт був дуже маленьким і щільним. Однак за час від  $10^{-34}$  с до  $10^{-32}$  с після Великого Вибуху Всесвіт розширився від нескінченно малих розмірів до розмірів апельсина, тобто збільшився приблизно у  $10^{30}$  разів. Розміри Всесвіту зростали експоненціально (в економіці такі процеси називають інфляцією), тому космологічну теорію, що описує перші миті існування Всесвіту, називають інфляційною. Її запропонував у 1980 р. американський вчений А. Гут.

Наслідком швидкого розширення стало виділення колосальної кількості енергії й утворення елементарних частинок — кварків та антикварків. Уже через десятитисячну частку секунди з них утворилися різні частинки, зокрема протони і нейтрони та їх античастинки.

Ще через одну десятитисячну частку секунди за температури  $10^{12}$  К відбулась анігіляція протонів з антипротонами та нейтронів з антинейтронами з утворенням фотонів (явище перетворення маси в енергію за умови взаємодії речовини й антиречовини). Та, вочевидь, від самого початку концентрація частинок перевищувала кількість античастинок приблизно на одну мільярдну частку. Цей «надлишок» став будівельним матеріалом для сучасного світу.

Через секунду після Великого Вибуху за температури  $10^{10}$  К Всесвіт став прозорим для нейтрино, тоді як протони, нейтрони, електрони й позитрони були перемішані з фотонами. Через 3 с температура знизилася до  $3 \cdot 10^9$  К, електрони вступили у взаємодію з позитронами й також ані-



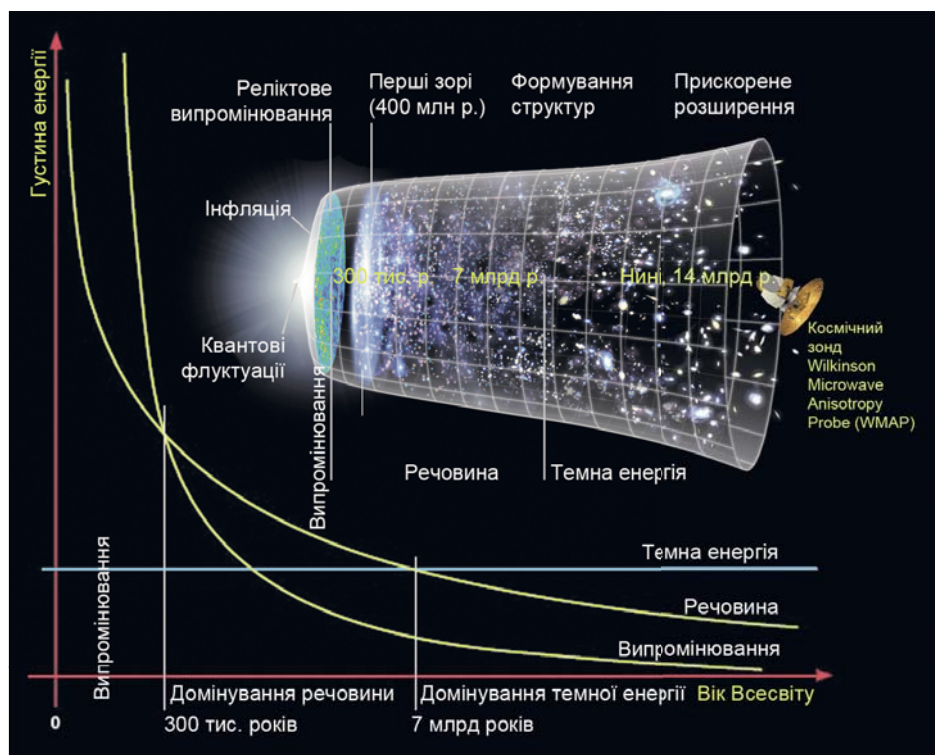
гілювали. А через 3 хв за температури  $3 \cdot 10^8$  К почалось утворення ядер перших хімічних елементів — Дейтерію, Гелію, Літію.

У наступні 300 000 років Всесвіт був непрозорим для світла, бо електрони, протони, Гелій і в значно меншій кількості Літій, з яких складалася первісна *плазма*, безперервно поглинали, випромінювали й розсіювали фотони, не даючи їм поширюватись вільно.

Та врешті-решт, розширюючись далі, Всесвіт охолов до температури близько 3000 К. Відстані між частинками зросли, й фотони втратили можливість руйнувати нейтральні атоми Гідрогену і Гелію, що утворились. Частинки, відтепер зв'язані в атомах, перестали заважати руху фотонів, і Всесвіт майже миттєво став «прозорим» для випромінювання: світло відокремилось від речовини.

Відтоді випромінювання вільно поширюється у Всесвіті, бо практично не взаємодіє з речовиною.

Отже, через 300 тис. років після Великого Вибуху домінуючою формою матерії у Всесвіті стала речовина, більшу частину якої становить темна матерія. Відтоді почали швидко збільшуватись у розмірах неоднорідності речовини, що існували ще на стадії домінування випромінювання. У наступні сотні мільйонів років під дією сил тяжіння речовина стала концентруватися в окремі згустки — протогалактики, в яких почали утворюватись перші зорі.



**Рис. 39.1.** Основні етапи розвитку нашого всесвіту на рисунку, створеному за результатами роботи WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)



**КОСМОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ.** Походження, великомасштабну структуру й еволюцію Всесвіту як єдиного цілого вивчає космологія. Від часу створення І. Ньютоном теорії гравітації в науці панувала теорія незмінного та нескінченного у просторі й часі стаціонарного Всесвіту (класична ньютонівська космологія), і еволюцію Всесвіту не розглядали, бо вважали, що її не існує.

Першу наукову космологічну модель Всесвіту розробив А. Ейнштейн у 1917 р. Він відкинув постулати ньютонівської космології про абсолютність та нескінченність простору і часу, а також застосував *космологічний принцип*, згідно з яким наш всесвіт є однорідним та ізотропним. Тобто в усіх напрямках Всесвіт має однакові властивості, незалежно від того, з якого місця в ньому ми його спостерігаємо.

Космологічну модель Всесвіту А. Ейнштейн розробив, спираючись на основне рівняння тяжіння, яке належить до створеної ним раніше загальної теорії відносності (ЗТВ). Згідно з цією теорією, простір і час — величини взаємозалежні. Їх визначає розподіл гравітаційних мас у Всесвіті. А властивості Всесвіту як цілого зумовлені значенням середньої густини речовини в ньому та іншими фізичними параметрами.

У середині 20-х років XX ст. російський вчений Олександр Фрідман знайшов нові розв'язки рівняння тяжіння ЗТВ, з яких випливав дуже важливий висновок: Всесвіт, заповнений масою, на яку діє сила тяжіння, не може бути стаціонарним. Він мусить або розширюватися, або стискатися.

Космологічна модель О. Фрідмана показує, що розвиток Всесвіту залежить від кількості речовини в ньому (від значення середньої густини речовини у Всесвіті). Якщо її замало, щоб створити силу тяжіння, потрібну для припинення розбігання, розширення триватиме необмежено довго. В іншому разі — розширення загальмується й зміниться на стискання (рис. 39.2).

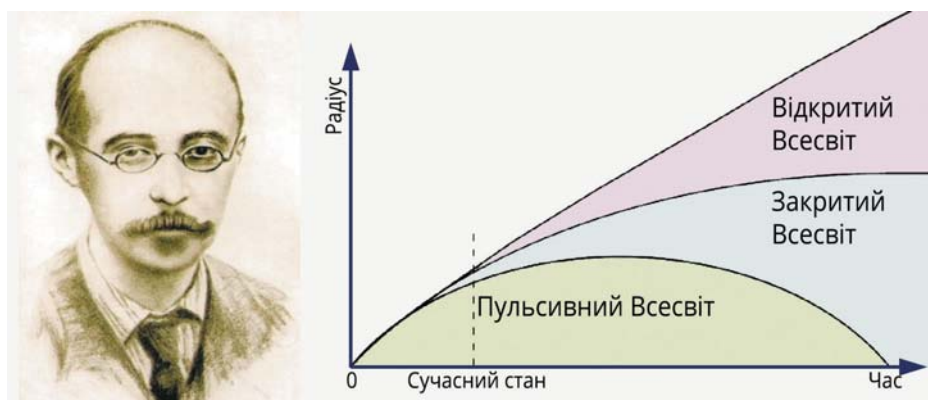


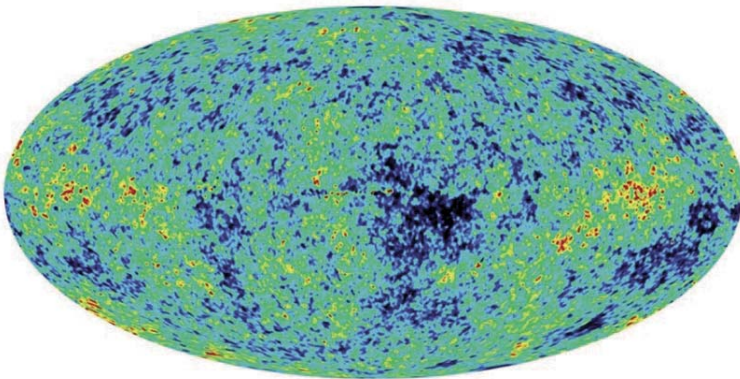
Рис. 39.2. Олександр Фрідман і його космологічні моделі: відкритий, закритий та пульсивний Всесвіти

1946 р. Дж. Гамов запропонував ще одну космологічну модель — «гарячого Всесвіту», яка пояснювала механізм утворення основного ізоотопу Гелію (Гелій-4). З його моделі випливало, що й до нашого часу має існувати космічне фонове, або реліктове, випромінювання, що залишилося

від епохи раннього Всесвіту. Експериментально його виявили в 1965 р. американські радіоастрономи А. Пензіас і Р. Вілсон. І це відкриття стало одним з найяскравіших доказів на користь теорії Великого Вибуху.

Фонове випромінювання має великий ступінь однорідності (ізотропії). Але воно не може бути абсолютно однорідним, бо пов'язане з речовиною, в якій обов'язково мали бути неоднорідності густини. Якби цих неоднорідностей не було, то галактики і скупчення галактик ніколи б не виникли.

Анізотропію мікрохвильового фонового випромінювання вдалося виявити тільки в 1992 р. на підставі космічних спостережень спеціалізованого супутника COBE (COsmic Background Explorer), а також пізніших досліджень (рис. 39.3).



**Рис. 39.3.** Карта анізотропії реліктового випромінювання (різні кольори відповідають різним інтенсивностям), побудована на основі спостережень космічного зонда WMAP

Нині теорію Великого Вибуху вважають стандартною і загальновизначальною космологічною моделлю, а всі інші — надбанням історії науки.

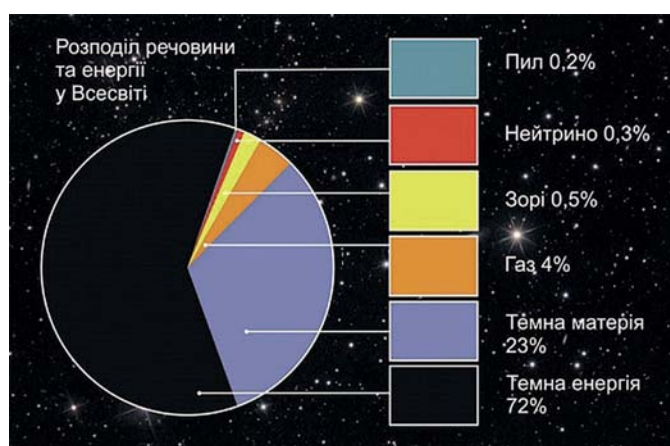
Моделі О. Фрідмана показують три можливих варіанти подальшої еволюції Всесвіту. Щоб вибрати з них той сценарій, який реалізує природа, треба визначити середнє значення густини речовини у Всесвіті. Це завдання неймовірно складне, адже можна врахувати тільки ту речовину, яку ми бачимо або реєструємо приладами, — зорі, газ, пил, різноманітні частинки, випромінювання тощо. А її, за спостережними даними, явно замало, щоб створити силу тяжіння, здатну тримати вкупі окремі галактики, їх скупчення й надскупчення. Та оскільки ці великі системи космічних тіл упродовж дуже тривалого часу зберігають стабільні розміри, у Всесвіті є ще й *прихована маса*, або *темна матерія*. Вона не світить, але виявляє себе силою тяжіння.

Природа темної матерії досі невідома. Можливо, її носій — ще не відкриті елементарні частинки, наприклад, гіпотетичні аксіони чи вімпи.

Утім питання подальшої еволюції Всесвіту вдалося з'ясувати й без визначення точного значення в ньому середньої густини речовини. Зі спостережень за вибухами Наднових у далеких галактиках випливало, що наш Всесвіт не просто розширюється, а розширюється з прискоренням, і це розширення триватиме вічно до повного «завмирання» в ньому всіх процесів і явищ. Отже, схоже на те, що ми живемо в так званому відкритому Всесвіті.

Тепер з'ясовано, що вік Всесвіту дорівнює 13,7 млрд років (з точністю до 1 %), а його складовими є: темна енергія — 72 %, яка відповідає за розширення, невидима темна матерія — 23 %, що зберігає стабільними розміри окремих меґасистем, і тільки 5 % становить видима речовина, яку можна реєструвати. Є також різні поля і випромінювання (рис. 39.4).

За прискорене розширення нашого всесвіту «відповідає» *темна енергія*. Нині більшість фізиків вважають, що природа цієї енергії — це енергія фізичного вакууму. Фізичний вакуум не варто ототожнювати з порожнечою. У ньому повсякчас виникають і зникають віртуальні частинки. Він наче «піниться» або «кипить». Тобто на дуже малих масштабах (так званому квантовому рівні) вакуум виявляє себе як дуже складна динамічна система, що, можливо, здатна проявити себе й на меґарівні — забезпечити розширення Всесвіту з прискоренням.



**Рис. 39.4.** Розподіл речовини, матерії та енергії у нашому всесвіті



Темна енергія — загадка століття

<http://www.astroosvita.kiev.ua/infoteka/articles/Temna-enerhiia-zahadka-stolittia-1.php>

### ! Головне в цьому параграфі

Вчені вважають, що наш всесвіт виник унаслідок Великого Вибуху приблизно 13,7 млрд років тому. Зазнавши надшвидкого розширення (інфляції), Всесвіт вступив у епоху формування галактик і зір. Цей етап розвитку Всесвіту триває і досі. У перші три хвилини існування Всесвіту в ньому з'явилися найпростіші хімічні елементи — Гідроген, Гелій, Літій. Усі інші елементи є результатом еволюції зір.

У середині 20-х років XX ст. О. Фрідман знайшов нові розв'язки рівняння тяжіння ЗТВ, з яких випливав дуже важливий висновок: Всесвіт, заповнений масою, на яку діє сила тяжіння, не може бути статичним. Він має або розширюватися, або стискатись. Розширення Всесвіту відбувається прискорено, і його параметри такі, що він і далі буде необмежено розширюватися.

### ? Запитання для самоперевірки

1. Наведіть два-три докази на користь теорії Великого Вибуху.
2. Чому розширення Всесвіту на початку його існування називають інфляційним?

3. Поясніть, коли і внаслідок чого Всесвіт став «прозорим» для випромінювання.

4. На які сценарії розвитку Всесвіту вказує космологічна модель О. Фрідмана?

5. У Всесвіті є невидима речовина. Що це може бути за речовина?

## § 40. Життя у Всесвіті

*Опрацювавши цей параграф, ви зможете пояснити суть антропного принципу; гіпотезу про існування інших Всесвітів; проблему пошуку життя на інших планетах Сонячної системи, а також описати міжнародні наукові проекти з пошуку життя у Всесвіті.*

**ЛЮДИНА У ВСЕСВІТІ.** У 1973 р. астрофізик Брандон Картер зауважив, що навколишній світ дивовижним чином пристосований до розвитку в ньому життя, мало того — до існування в ньому життя розумного (тут і надалі, говорячи про життя, маємо на увазі життя на білковій основі).

І справді, сучасна фізика стверджує, що все розмаїття властивостей нашого Всесвіту від моменту Великого Вибуху до утворення планетних систем і далі — до зародження на них життя, визначають кілька фізичних параметрів, які називають *світовими константами*, або *фундаментальними сталими* (тобто такими, що мають сталі числові значення).

Найпершою фундаментальною сталою є розмірність простору, в якому ми живемо. Він має три виміри — довжину, ширину й висоту. Було доведено, що в просторі з більшою кількістю вимірів планетні системи чи атоми були б нестійкими, а за меншої розмірності вони взагалі не могли б утворитись.

Між окремими матеріальними структурами у Всесвіті фізики розрізняють чотири типи взаємодії: *гравітаційну, електромагнітну, слабку і сильну*. Сталі чотирьох взаємодій виражаються через відомі фізичні числові величини: швидкість світла, сталу сили тяжіння, заряд електрона, маси елементарних частинок — електрона, нейтрона і протона — та їх взаємозалежності тощо. Числові значення цих величин обчислені з дуже великою точністю.

Виявилося, що Всесвіт значною мірою чутливий до числових значень фундаментальних сталих. Досить цим значенням трохи змінитись, і будова Всесвіту зміниться так, що життя в ньому стане неможливим.

Це тонке налаштування числових значень фундаментальних сталих назвали *антропним принципом* (з грец. *антропос* — людина), який полягає в тому, що людство може існувати тільки за певних значень світових констант. За інших їхніх значень Всесвіт був би таким, що людство в ньому не виникло б.

Антропний принцип формулюють у двох варіантах — слабкому і сильному. Згідно зі слабким антропним принципом, за інших значень космологічних параметрів Всесвіту, ніж є (його вік, стала Габбла тощо), життя в ньому могло б і не з'явитися. Сильний антропний принцип стверджує: «Фундаментальні закони та константи Всесвіту налаштовані так, щоб міг виникнути спостерігач, котрий зможе їх осмислити».



Антропний принцип отримав пояснення в межах ідеї про Мультиверсум, тобто про існування величезної кількості всесвітів, окремі з яких випадково є придатними для життя. І вже в таких всесвітах розумні спостерігачі зауважують дивовижно тонке налаштування фізичних сталей.

Удосконалення інфляційної моделі виникнення Всесвіту показало, що інфляція спричиняє появу великої кількості всесвітів. Тобто існує дуже багато ізольованих один від одного всесвітів з різними фундаментальними сталими й різними фізичними законами. Сукупність таких всесвітів називають *Мультивсесвітом*.

Тобто наш складний і величезний Всесвіт — тільки один із безлічі інших, можливо, не пов'язаних між собою всесвітів, які існували колись, існують тепер та будуть існувати в майбутньому. Вони відмінні між собою властивостями, у них діють різні фізичні закони, є інші фундаментальні сталі. Можливо, що в більшості з них не виникають складні структури. Але всесвітів так багато, що серед нескінченної їх множини обов'язково знайдеться такий, де реалізується збіг обставин, потрібний для виникнення життя й розуму, представниками якого є ми з вами.

**ПОШУКИ ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ.** Кілька особливостей роблять нашу планету, з огляду на існування на ній життя, унікальною в Сонячній системі. Перша з них і, можливо, найголовніша, та, що орбіта Землі пролягає в «поясі життя». Цей пояс — ділянка Сонячної системи, де вода може перебувати в рідкому стані.

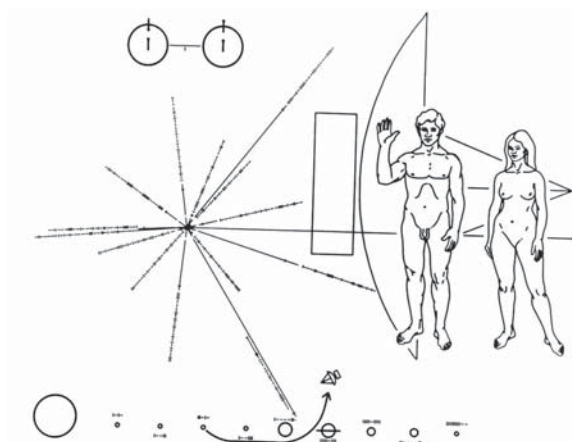


**Рис. 40.1.** Якби Земля перебувала на орбіті Венери, то сонячне випромінювання підвищило б її середню температуру, а це призвело б до зникнення води в рідкому стані, утворення потужної атмосфери з вуглекислого газу і, як наслідок, неконтрольованого підсилення парникового ефекту. У разі перебування Землі на орбіті Марса внаслідок збільшення відстані до Сонця зменшилося б надходження сонячної енергії, що спричинило б перетворення Землі на крижану пустелю

В околицях Сонця земляни, очевидно, єдині істоти — носії розуму. І хоча ще є надія виявити найпростіші форми життя на інших тілах Сонячної системи, можливо, на Європі — супутнику Юпітера або на Титані — супутнику Сатурна, складніші його форми потрібно шукати біля інших зір.

Було реалізовано кілька наукових програм із пошуку сигналів позаземних цивілізацій. Найвідоміші з них — Ceti (Communication with Extraterrestrial Intelligence — «Зв'язок з позаземним розумом») та SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence — «Пошук позаземного розуму»). Однак донині жоден з цих проєктів не досяг успіху.

Американські міжпланетні зонди «Піонер-10» і «Піонер-11» та «Вояджер-1» і «Вояджер-2», які вже покинули межі Сонячної системи, несуть спеціальні послання для мешканців інших світів. Ініціаторами відправлення перших міжзоряних послань землян були американські астрономи Френк Дрейк та Карл Саган.



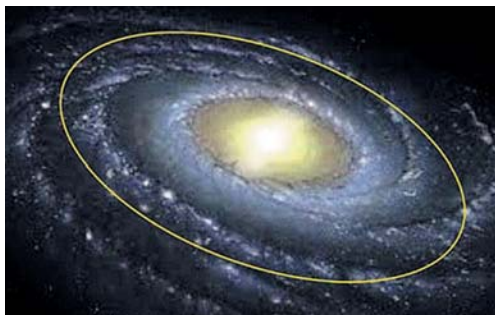
**Рис. 40.2.** Пластинка-послання «Піонерів». У точці зліва від центра зашифровано нашу «зворотну адресу»: це Сонце з променями різної довжини. Промені показують напрямки й відносні відстані до природних маяків Галактики — радіопульсарів. У кожного пульсара свій період, який у двійковому коді записаний вздовж променя. Всім розвинутим цивілізаціям ці пульсари мають бути відомі. Знаючи їхні координати, легко знайти положення Сонця в Галактиці. Найдовший горизонтальний промінь показує напрямок і відстань до центру нашої галактики

На позолочених (для кращого зберігання) дисках, відправлених з «Вояджерами», є фотографії, де вміщено найважливіші наукові дані, зображення Землі, її материків, різні ландшафти, сцени з життя тварин і людини, їх анатомічна будова й біохімічна структура, включаючи молекулу ДНК. Крім зображень є звуки: шепіт матері й плач дитини, голоси птахів і звірів, шум вітру та дощу, гуркіт вулканів і землетрусів, шурхіт піску і прибіїв океану. На дисках записано короткі привітання 58 мовами народів світу та музичні твори Баха, Бетховена, Моцарта, Луї Армстронга, Чака Беррі, а також народну музику багатьох країн.

Якщо «вийти» за межі Сонячної системи з метою пошуку життя, то потрібно розуміти, що в космосі тільки на планетах можуть збігтися всі параметри, потрібні для його існування. Але не кожна зоря підходить для пошуку біля неї життя.

Нині астрономи схильні вважати, що в нашій зоряній системі життя, подібне до земного, найімовірніше може існувати тільки біля зір сонячного типу, що перебувають у межах так званого коротаційного кола, яке пролягає ближче до краю диска Галактики, ніж до її ядра (рис. 40.3).





Пошуки життя у Всесвіті поки що не дали результатів. Але з огляду на відкриття великої кількості екзопланет надія його знайти залишається.

**Рис. 40.3.** Коротацийне коло — це відносно вузька концентрична до ядра галактики зона, де швидкості руху зір збігаються зі швидкістю руху спіральних рукавів. Уздовж коротацийного кола пролягає шлях Сонячної системи в галактиці. Можливо, саме ця обставина сприяла виникненню та розвитку життя на Землі



Що таке рівняння Дрейка?

<http://www.nashenebo.in.ua/nauka/shcho-take-rivniannia-dreika>

### ! Головне в цьому параграфі

Наш Всесвіт дуже чутливий до налаштування фундаментальних сталих, які дають можливість існування в ньому людини. Сильний антропний принцип стверджує: «Фундаментальні закони та константи Всесвіту налаштовані так, щоб міг виникнути спостерігач, котрий зможе їх осмислити». Антропний принцип можна пояснити в рамках ідеї про Мультиверсум, згідно з яким існує безліч інших всесвітів з іншими законами, іншими фундаментальними сталими. І тільки в одному з них реалізувався збіг обставин, що уможливив виникнення життя й появу людини.

Земля є унікальною планетою під оглядом появи та збереження на ній життя. Чи є життя біля інших зір, поки що невідомо. Нині астрономи схильні вважати, що в нашій зоряній системі життя, подібне до земного, найімовірніше може існувати біля зір, схожих на Сонце, тільки в межах відносно вузької зони — коротацийного кола. У XX ст. у людства вперше з'явилася принципова технічна можливість для зв'язку з гіпотетичними космічними цивілізаціями. Але жодна наукова програма пошуків штучних сигналів до сьогодні не стала успішною. А це означає, що «велике мовчання Космосу» триває.

### ? Запитання для самоперевірки

1. Сформулюйте антропний принцип.
2. Поясніть, у чому полягає суть ідеї про існування інших всесвітів.
3. Сформулюйте особливості, які роблять Землю унікальною серед інших планет Сонячної системи.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ У ПИТАННЯХ ПОХОДЖЕННЯ І РОЗВИТОКУ ВСЕСВІТУ

1. Статичний Всесвіт, тобто такий, що не розширюється і не стискається, не може реально існувати. Обґрунтуйте це.
2. Назвіть одну-дві наукові програми з пошуку сигналів позаземних цивілізацій.
3. Поясніть уявлення про те, що життя, подібне до земного, найімовірніше може існувати тільки біля зір сонячного типу, які перебувають у межах коротацийного кола.

# ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Під час проведення дослідів з фізики виконують спеціальні вимірювання. Для фізики, як науки експериментальної, вимірювання є невід'ємною складовою досліджень.

Коли наводиться значення величини з урахуванням похибки, її числове значення разом з абсолютною похибкою слід брати в дужки, а позначення одиниці розташовувати після дужок. Якщо дужки не застосовуються, то слід розташовувати позначення одиниці, як після числового значення вимірюваної величини, так і після числового значення абсолютної похибки.

Розрахунки, що виконуються під час обробки результатів експерименту, вимагають використання калькулятора. Для цього можна скористатись інженерним (науковим) калькулятором (окремим приладом чи програмою для смартфонів).

За допомогою встановленого програмного забезпечення смартфон також можна перетворити на різноманітні прилади, щоб застосувати під час дослідження. На рис. 1. зображено використання смартфона як наукового калькулятора та секундоміра.

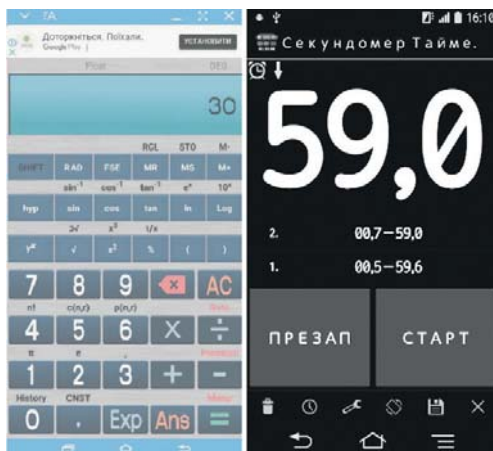


Рис. 1. Використання смартфона

## ОРІЄНТОВНА ТЕМАТИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

*Лабораторні роботи дібрано Отже, що їх можна виконати без використання складного обладнання та спеціальних експериментальних установок. Залежно від обладнання фізичного кабінету можна тематику лабораторних робіт замінювати на рівноцінну, з урахуванням місцевих особливостей побудови освітнього процесу.*

### Лабораторна робота № 1

#### Дослідження взаємодії наелектризованих тіл

**Мета роботи.** Дослідити взаємодію наелектризованих тіл. Навчитися розрізняти знаки зарядів після їх електризації.

**Обладнання:** паперова гільза, підвішена на шовковій нитці, штатив універсальний з лапкою, лінійка вимірювальна із оргскла (30 см) з міліметровими поділками, гумова смужка розміром 30×300 мм, плівка поліетиленова розміром 30×300 мм, паперова смужка розміром 30×300 мм, шматок капронової тканини (рис. 2).

## Хід роботи

1. Підвісити на штативі паперову гільзу на шовковій нитці й зарядити її.

2. Наелектризувати лінійку з оргскла і гумову смужку (тертям, притискуванням, вдаранням). (Оргскло у взаємодії з гумою заряджається позитивно.)

3. Підносити по черзі заряджену лінійку і гумову стрічку до зарядженої гільзи, не доторкуючись до неї, спостерігати їх взаємодію. Якими зарядами заряджені гільза і гумова смужка?

4. Визначити за допомогою зарядженої гільзи знаки зарядів на тілах після їх електризації одне об одне. Результати дослідів записати в таблицю:

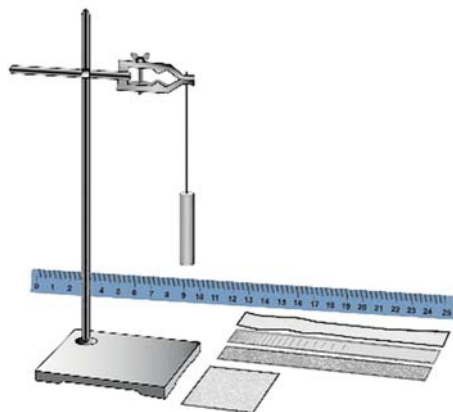


Рис. 2. Обладнання для виконання лабораторної роботи

Наелектризовані тіла	Об оргскло	Об гуму	Об поліетилен	Об папір	Об капрон
Оргскло	0	+			
Гума	—	0			
Поліетилен			0		
Папір				0	
Капрон					0

6. Пояснити явища, які ви спостерігаєте, на основі електричних уявлень.

7. Зробити висновки.

### Лабораторна робота № 2 Вивчення конденсаторів

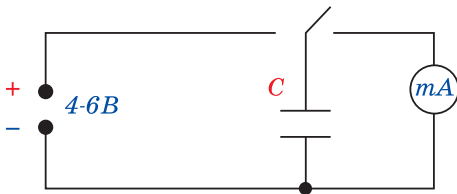
**Мета роботи.** Ознайомитися з одним із методів визначення електроємності конденсатора та виміряти його ємність.

**Обладнання:** набір конденсаторів; конденсатор невідомої ємності; ампервольтметр або мікроамперметр; джерело електроживлення; перемикач однополюсний; комплект з'єднувальних проводів.

## Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, яку зображено на рис. 3, увімкнувши в нього джерело постійного струму, конденсатор відомої ємності, гальванометр і однополюсний перемикач.

2. Зарядити конденсатор. Для цього з'єднати його на короткий час із джерелом струму. Потім, зосередивши увагу на стрілці приладу, швидко переключити конденсатор на гальванометр і визначити максимальне відхилення (відкид) стрілки, відлічуючи на око десяті частини поділки. До-



**Рис. 3.** Схема електричного кола для визначення ємності конденсатора

сатори відомої ємності (еталони), на досліді можна перекоонатися, що ємність конденсатора  $C$  прямо пропорційна числу поділок  $n$ , на яке відкидається стрілка гальванометра:  $C = k \cdot n$ . Звідси можна визначити коефіцієнт пропорційності  $k = \frac{C}{n}$ , який є електроємністю, що відповідає одній поділці. Знаючи коефіцієнт, можна за відкиданням стрілки гальванометра визначити ємність будь-якого іншого конденсатора, повторивши з ним описаний дослід.

3. Виконати дослід з конденсаторами іншої ємності та за здобутими даними обчислити середнє значення  $k$ . Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ досліді	Ємність конденсатора $C$ , мкФ	Число поділок по шкалі гальванометра	Коефіцієнт пропорційності	Середнє значення $k$

5. В електричне коло увімкнути конденсатор невідомої ємності  $C_x$  і визначити, на скільки поділок відхиляється стрілка вимірювального приладу в цьому випадку. Знаючи коефіцієнт пропорційності  $k$ , обчислити  $C$  за формулою  $C = k \cdot n_x$

5. Розрахуйте енергію конденсатора за формулою  $W = \frac{CU^2}{2}$ .

6. За результатами досліджень зробити висновок.

### Лабораторна робота № 3

#### Визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму

**Мета роботи.** Навчитись визначати ЕРС та внутрішній опір джерела струму.

**Обладнання:** досліджуваний гальванічний елемент, амперметр, вольтметр, вимикач, реостат, з'єднувальні провідники.

#### Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, показаною на рис. 4.

слід повторити кілька разів, щоб точніше зняти покази стрілки та обчислити коефіцієнт пропорційності  $k$ . (Якщо конденсатор постійної ємності заряджати від одного й того самого джерела сталої напруги, а потім розряджати його через гальванометр, то стрілка гальванометра щоразу відкидатиметься по шкалі на одне й те саме число поділок. Якщо змінити ємність конденсатора, то відкид стрілки гальванометра буде іншим). Маючи конденсатори відомої ємності (еталони), на досліді можна перекоонатися, що ємність конденсатора  $C$  прямо пропорційна числу поділок  $n$ , на яке відкидається стрілка гальванометра:  $C = k \cdot n$ . Звідси можна визначити коефіцієнт пропорційності  $k = \frac{C}{n}$ , який є електроємністю, що відповідає одній поділці. Знаючи коефіцієнт, можна за відкиданням стрілки гальванометра визначити ємність будь-якого іншого конденсатора, повторивши з ним описаний дослід.

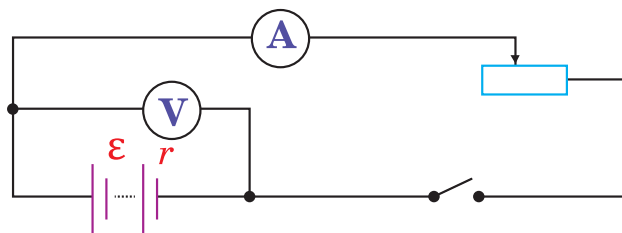


Рис. 4. Електричне коло для дослідження джерела струму

2. Після перевірки правильності складання (відповідність між складеною вами схемою та поданою на малюнку), переведіть повзунок реостата в положення, що відповідає максимальному опору та замкніть ключ. Якщо стрілки амперметра і вольтметра відхилилися від нуля, можна продовжувати роботу, якщо ж ні, тоді ще раз перевірте відповідність між складеною вами схемою та поданою на малюнку, а також надійність електричних контактів.

3. Підготувати таблицю для запису виміряних та обчислених фізичних величин.

№ дос.	ЕРС джерела живлення $\mathcal{E}$ , В	Напруга на зовнішній ділянці кола $U$ , В	Сила струму в колі $I$ , А	Внутрішній опір $r$ , Ом	Віднос- на по- хибка $\varepsilon$	Абсолют- на похиб- ка	
						$\Delta \mathcal{E}$ , В	$\Delta r$ , Ом
1							
2							

4. Зняти покази вольтметра, коли вимикач розімкнутий. ЕРС чисельно дорівнює напрузі між полюсами джерела живлення, коли його полюси не замкнуті. Занести отримане значення  $\mathcal{E}$  до таблиці.

5. Замкнути коло і за допомогою реостата відрегулювати силу струму так, щоб зручно було знімати покази приладів. Під час проведення експерименту бажано, щоб покази амперметра були в середній частині шкали, тобто від 0,5 до 1,5 А.

6. Записати значення сили струму  $I_1$  та напруги на зовнішній ділянці кола  $U_1$ .

7. Змінити положення повзунка реостата та повторити вимірювання сили струму  $I_2$  та напруги на зовнішній ділянці кола  $U_2$ . Занести отримані значення фізичних величин до таблиці.

Закон Ома для повного кола для першого та другого положення реостата буде мати вигляд:

$$\mathcal{E} = U_1 + I_1 r, \quad (1)$$

$$\mathcal{E} = U_2 + I_2 r. \quad (2)$$

Розв'язавши отриману систему рівнянь відносно  $r$ , отримаємо вираз для обчислення внутрішнього опору  $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$ . ЕРС джерела живлення

можна обчислити за одним із рівнянь (1) або (2).

8. Використавши дані про клас точності амперметра і вольтметра, визначити максимальну відносну похибку результатів вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U}.$$

Значення максимальної відносної похибки записати до таблиці.

9. Визначити максимальні абсолютні похибки  $\Delta r = \varepsilon r$  та  $\Delta \mathcal{E} = \varepsilon \mathcal{E}$  та записати значення внутрішнього опору та ЕРС джерела живлення з урахуванням похибки вимірювання:

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= \mathcal{E}_d \pm \Delta \mathcal{E} \\ r &= r_d \pm \Delta r.\end{aligned}$$

10. Порівняти значення ЕРС отримані в п. 4 та 8. Зробити висновки за результатами визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела живлення.

#### Лабораторна робота № 4

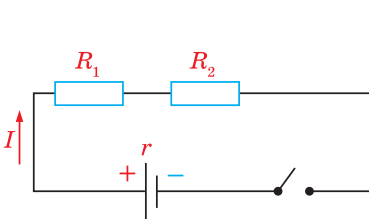
##### Дослідження послідовного та паралельного з'єднання провідників

**Мета роботи.** Навчитись з'єднувати провідники послідовно та паралельно, визначати опір такого з'єднання, розподіл сил струмів і напруг.

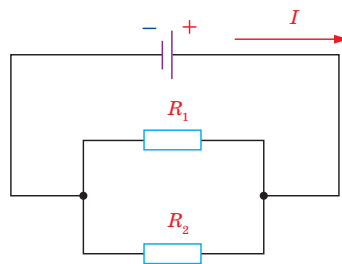
**Обладнання:** батарея акумуляторів; дві електролампочки (опори); амперметр постійного струму на 2 А; вольтметр постійного струму на 4 В; реостат; перемикач; з'єднувальні провідники.

##### Хід роботи

1. Скласти коло для вивчення послідовного з'єднання елементів (рис. 5).
2. Записати показання амперметра.
3. Вольтметр підключити паралельно: а) до опору  $R_1$  і записати показання вольтметра  $U_1$ ; б) до опору  $R_2$ ; і записати показання вольтметра  $U_2$ ; в) до ділянки кола з обома опорами і записати показання вольтметра  $U$ .
4. Скласти коло для вивчення паралельного з'єднання елементів (рис. 6).



**Рис. 5.** Електричне коло з послідовним з'єднанням резисторів



**Рис. 6.** Електричне коло з паралельним з'єднанням резисторів

5. Записати покази вольтметра.
6. Амперметр підключити послідовно: а) до опору  $R_1$  і записати покази амперметра  $I_1$ ; б) до опору  $R_2$  і записати покази амперметра  $I_2$ ; в) до ділянки кола з  $R_1$  і  $R_2$  і записати покази амперметра  $I$ .
7. Зробити висновок, чи виконуються закони послідовного та паралельного з'єднання елементів.



## Лабораторна робота № 5

## Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом

**Мета роботи.** Дослідити властивості напівпровідникового діода при пропусканні електричного струму в прямому і зворотному напрямках.

**Обладнання:** батарея гальванічних елементів, лампочка розжарення, напівпровідниковий діод, з'єднувальні провідники, вимикач лабораторний; джерело електроживлення постійного струму; міліамперметр постійного струму; вольтметр постійного струму; реостат повзунковий; ключ.

## Хід роботи

1. Скласти електричне коло, щоб анод діода був з'єднаний через лампочку з позитивною клемою батареї, а катод — з негативною клемою (рис 7, а).

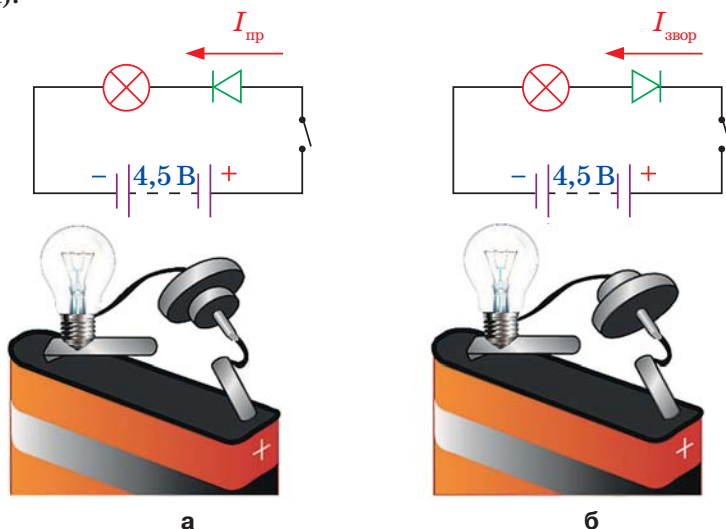


Рис. 7. Пряме та зворотне підключення діода

2. Замкнути вимикач і спостерігати за яскравістю горіння лампочки, увімкненої в електричне коло. Зробити висновок про величину опору напівпровідникового діода, увімкненого в пропускну напрямку.

3. Змінити порядок включення електродів діода в електричне коло на зворотний (рис. 7.б).

4. Замкнути вимикач і спостерігати за станом лампочки, увімкненої в електричне коло. Зробити висновок про величину опору напівпровідникового діода, увімкненого у зворотному напрямку.

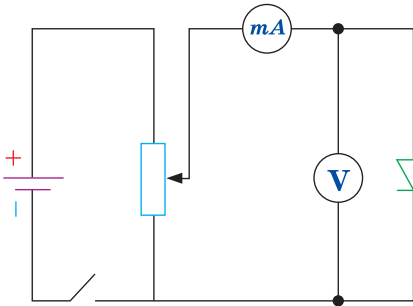
5. Дослідити залежність сили прямого струму від прикладеної до діода напруги. Для цього скласти електричне коло за схемою, яку зображено на рис. 8. Діод увімкнути у пропускну напрямі, звернувши увагу на знаки «+» і «-», позначені на його панелі. Напругу на діод подають з потенціометра і вимірюють вольтметром зі шкалою 3 В, силу прямого струму діода — міліамперметром, увімкнутим спочатку зі шкалою 7,5 мА, а потім із шкалами 15 і 30 мА.

6. Збільшуючи напругу на діоді щоразу приблизно на 0,02 В, записувати покази обох приладів у таблицю.

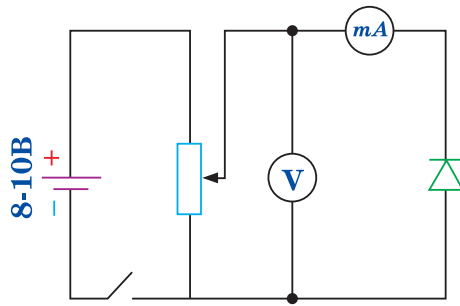
$U, \text{В}$								
$I, \text{А}$								

**Застереження.** Сила прямого струму діода не повинна перевищувати 300 мА, інакше діод вийде з ладу.

7. Дослідити залежність сили зворотного струму від прикладеної до діода напруги. Для цього скласти електричне коло за новою схемою, яку зображено на рис. 9, звернувши увагу на відмінність вмикання діода і вольтметра.



**Рис. 8.** Підключення діода у пропускну напрямі



**Рис. 9.** Підключення діода у зворотному напрямі

8. Напругу на діод подати за допомогою потенціометра; виміряти її вольтметром зі шкалою 15 В, а силу струму — міліамперметром зі шкалою 1,5 мА.

9. За результатами досліджень зробити висновок.

## Лабораторна робота № 6

### Розширення меж вимірювання амперметра та вольтметра

**Мета роботи.** Вивчити будову електровимірювальних приладів магнітоелектричної системи. Навчитись виготовляти шунт і додатковий опір до міліамперметра

**Обладнання:** міліамперметр лабораторний, амперметр лабораторний, вольтметр лабораторний, мікрометр, лінійка, омметр, джерело постійного струму на 6 В, реостат на 30 Ом, змінний резистор на 500 Ом на панелі, мідна або константанова дротина для виготовлення шунта, панель із чотирма клемми, ключ, з'єднувальні проводи.

### Теоретичні відомості

Основною частиною будь-якого амперметра і вольтметра є високочутливий прилад магнітоелектричної системи (мікроамперметр чи міліамперметр). Цей прилад має певну чутливість, і стрілка його відхиляється на всю шкалу під час проходження певного струму  $I_0$ . Коли потрібно виготовити амперметр з номінальним значенням  $I_n = n \cdot I_0$ , де  $n$  може бути числом порядку  $10—10^5$ , до мікроамперметра чи міліамперметра приєднують паралельно шунт (резистор з опором  $r_{\text{ш}}$ ) (рис. 10. а). У разі використання амперметра з шунтом сила струму  $I$  у колі дорівнює  $nI_0$ , де

$n = \frac{I}{I_0} = \frac{r_0 + r_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}}$  показує, у скільки разів зростає ціна поділки приладу;

$I_0$  — сила струму, що проходить через амперметр;  $r_0$  — опір амперметра;  $r_{\text{ш}}$  — опір шунта.

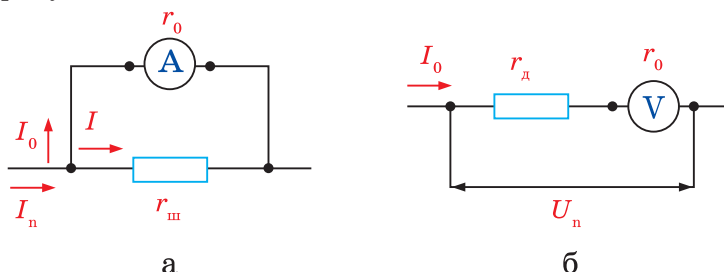


Рис. 10. Розширення меж вимірювання амперметра та вольтметра

Для вимірювання малих напруг вольтметр застосовують у поєднанні з вимірювальним підсилювачем; для вимірювання великих напруг вольтметр використовують разом із додатковими опорами (рис 9, б). Вольтметр

з додатковим опором  $U = nU_0$ , де  $n = \frac{U}{U_0} = \frac{r_0 + r_{\text{дод}}}{r_0}$ , показує, у скільки разів зростає ціна поділки приладу;  $U_0$  — напруга на вольтметрі;  $U$  — вимірювана напруга;  $r_0$  — опір вольтметра;  $r_{\text{дод}}$  — опір додаткового опору.

#### Хід роботи

1. Визначити і записати характеристики лабораторного міліамперметра.
2. Розрахувати опір шунта до лабораторного міліамперметра на 0,5 А. З мідної чи константанової дротини виготовити шунт.
3. Підключити шунт до клем міліамперметра і зібрати коло за схемою (рис. 11, а). На схемі  $A_{\text{к}}$  — контрольний амперметр, яким є лабораторний амперметр,  $R$  — змінний резистор на 500 Ом.

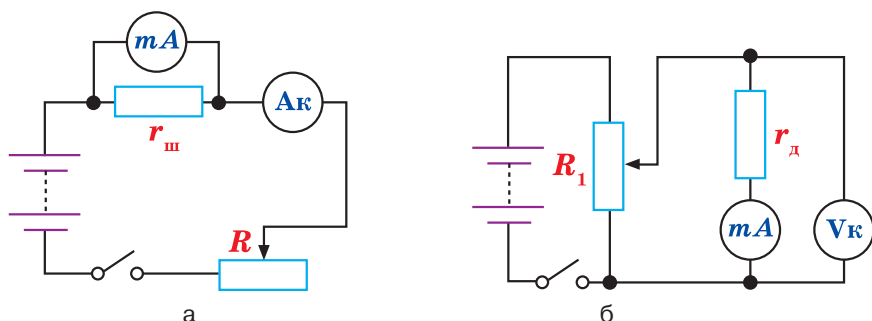


Рис. 11. Схема експериментальної установки

4. Замкнути ключ і, переміщаючи повзунок змінного резистора, перевірити показання виготовленого амперметра за допомогою контрольного.
5. Записати результати перевірки, характеристики виготовленого амперметра та його внутрішній опір.

6. Розрахувати опір додаткового резистора на напругу 5 В. Як додатковий резистор взяти змінний резистор опором 500 Ом, встановивши за допомогою омметра потрібний опір. Приєднати додатковий резистор до клем міліамперметра і зібрати коло за схемою, поданою на рис. 10, б. На схемі  $V_K$  — контрольний вольтметр, яким є лабораторний вольтметр,  $R_1$  — реостат.

7. Замкнути ключ і, переміщаючи повзунок реостата, перевірити покази виготовленого вольтметра за допомогою контрольного.

8. Записати результати перевірки, характеристики виготовленого вольтметра та його внутрішній опір.

9. Зробити висновок.

### Лабораторна робота №7

#### Дослідження явища електромагнітної індукції

**Мета роботи.** Експериментально вивчити явища електромагнітної індукції та самоіндукції.

**Обладнання:** котушка з великою кількістю витків; 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.

#### Хід роботи

1. Приєднати котушку з 1200 витків до гальванометра. Швидко вставити магніт у котушку, спостерігати за показами приладу. Залишити магніт у котушці і спостерігати за стрілкою приладу. Потім швидко витягнути магніт з котушки, спостерігаючи за показами гальванометра. Зробити висновок.

2. Повільно вставити в котушку, яка замкнена на гальванометр, або витягнути з неї два магніти, складені однойменними полюсами. Повторити дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясувати, в яких випадках сила індукційного струму більша і як змінюється напрямок струму під час дослідів.

3. Повторити досліди, рухаючи котушку відносно нерухомого магніту. Зробити висновок.

4. Послідовно до гальванометра увімкнути ще й реостат і приблизно з однаковою швидкістю вставляти в котушку (або витягувати з неї) магніт: спочатку, коли реостат виведено з кола ( $R = 0$ ), а потім, коли введено повністю ( $R = 10$  Ом). Зафіксувати покази гальванометра і зробити висновок.

5. Скласти електричне коло за схемою на рис. 12.

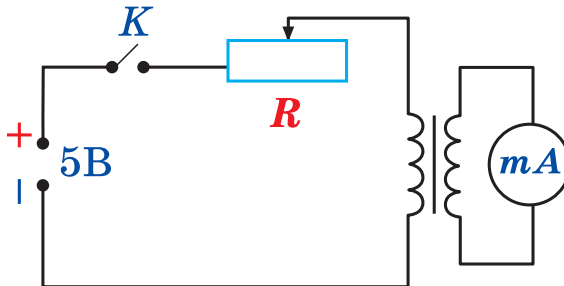


Рис. 12. Схема експериментальної установки

6. Використовуючи ключ, замкнути й розімкнути коло, зафіксувати при цьому напрям відхилення стрілки гальванометра. За напрямом відхилення стрілки визначити напрям індукційного струму, напрям індукції магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрям струму в первинній котушці й напрям індукції магнітного поля цього струму. Пояснити, який напрям має індукційний струм порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, а також під час збільшення і зменшення індукуючого струму. Перевірити виконання в цих дослідах правила Ленца.

7. Використовуючи те саме коло, повністю вивести реостат, замкнути коло і за допомогою реостата швидко збільшувати і зменшувати опір кола. Зафіксувати максимальне відхилення стрілки гальванометра при замиканні кола, при швидкому і повільному зменшенні опору кола. Зробити висновок про значення ЕРС індукції в цих дослідах.

8. Вставити і вийняти з обох котушок сталеве осердя. Весь час спостерігати за показами гальванометра. Зробити висновок.

9. Всі спостереження і висновки записати у зошит.

### Лабораторна робота № 8

#### Визначення прискорення вільного падіння за допомогою маятника

**Мета роботи.** Навчитись виготовляти нитяний маятник та визначати прискорення вільного падіння за його допомогою.

**Обладнання:** лінійка, штатив, нитка, кулька з гачком для кріплення нитки, годинник.

#### Хід роботи

1. За допомогою нитки підвісьте кульку до кільця або лапки штатива.
2. За допомогою лінійки виміряйте діаметр кульки  $d$  та довжину нитки  $l$ .
3. Поставте штатив на край стола, відхиліть маятник на невеликий кут (до  $10^\circ$ ) і відпустіть його.
4. Секундоміром виміряйте час  $t$ , за який маятник зробить  $N$  повних коливань.
5. Обчисліть прискорення вільного падіння за формулою:

$$g = \frac{4\pi^2 \left( l + \frac{d}{2} \right) N^2}{t^2}.$$

6. Повторіть дослід ще два рази з різними довжинами маятника.
7. Обчисліть середнє значення прискорення вільного падіння та абсолютну й відносну похибку.
8. Результат вимірювань запишіть у вигляді:  $g = g_c \pm \Delta g$ .
9. Зробіть висновок.

#### Контрольні запитання

1. Які коливання називають гармонічними?
2. За яких умов тіло, підвішене на нитці, можна вважати математичним маятником?

3. За яких умов коливання математичного маятника будуть гармонічними?

4. За якими формулами можна визначити період коливань математичного маятника?

5. Що називають прискоренням вільного падіння і які способи його дослідного визначення ви знаєте?

### Лабораторна робота № 9

#### Дослідження коливань пружинного маятника

**Мета роботи.** Перевірити залежність періоду коливань від амплітуди, маси вантажу та коефіцієнта жорсткості.

**Обладнання:** пружини різної жорсткості, тіла відомої маси, штатив з муфтою та лапкою, лінійка.

#### Хід роботи

1. Визначте жорсткість пружини; для цього підвісьте до неї тіло відомої маси  $m$  та виміряйте її видовження  $x$ .

2. Розрахуйте жорсткість пружини  $k = \frac{mg}{x}$ .

3. Дослідіть залежність періоду коливань від маси та амплітуди.

4. Аналогічні дії проробіть з іншою пружиною.

5. Зробіть висновок.

### Лабораторна робота № 10

#### Визначення роздільної здатності людського ока

**Мета роботи.** Навчитись визначати роздільну здатність людського ока.

**Обладнання:** папір, аркуш з отворами відомого діаметра, голка.

#### Хід роботи

1. Підготуйте об'єкт спостереження. Візьміть один аркуш паперу та нанесіть олівцем дві точки на відстані 1 мм.

2. Встановіть перед правим оком аркуш паперу з отворами і спостерігайте крізь отвір діаметром 0,5 мм дві точки на іншому аркуші білого паперу. Поступово віддаляючись від аркуша паперу, визначте максимальну відстань  $R$ , за якої дві точки ще не зливаються в одну, а видні роздільно. Занесіть результат вимірювань до таблиці.

№	Діаметр отвору $d$ , мм	Ліве око		Праве око	
		$R$ , м	$\varphi$ , '	$R$ , м	$\varphi$ , '

4. Обчисліть роздільну здатність ока, тобто мінімальну кутову відстань, з якої точки видно роздільно  $\varphi = \frac{3,42'}{R}$ .

5. Проведіть спостереження і розрахунки для правого і лівого ока й з різними отворами.

6. Зробіть висновок.



### Лабораторна робота № 11

#### Спостереження інтерференції та дифракції світла

**Мета роботи.** Навчитись спостерігати та пояснювати явища інтерференції та дифракції світла.

**Обладнання:** дві невеличкі скляні пластини розміром приблизно  $4 \times 8$  см, гумове кільце для їх скріплення з одного боку, аркуш паперу, мильний розчин, трубка для видування мильних кульок, гас, джерело світла, ємність з водою, дві половинки леза безпечної бритви, каркас із дротиною, CD-диск.

#### Хід роботи

- Отримайте інтерференційні лінії за допомогою повітряного клину. Дайте опис і пояснення побаченого явища.
- Поспостерігайте інтерференцію світла в мильній плівці. Поясніть причину утворення інтерференційної картини.
- Розгляньте гас у відбитому і прохідному світлі. Поясніть побачене явище.
- Розгляньте крізь отвір між лезами бритви спіраль лампочки (око має бути якомога далі від отвору). Поясніть побачені картини.
- Розгляньте розжарену пряму нитку лампи через тонку дротину. Дайте опис побаченої картини.
- Спостерігайте дифракційний спектр у відбитому світлі за допомогою CD-диска. Опишіть побачене явище.
- Результати проведення експериментів з вивчення явищ дифракції та інтерференції світла запишіть до таблиці.

Назва дослідж. явища	Обладнання	Проведений дослід	Спостереження	Пояснення побаченого
Інтерференція світла	Дві невеличкі скляні пластини розміром приблизно $4 \times 8$ см, гумове кільце для їх скріплення з одного боку, аркуш паперу, джерело світла — свічка або лампочка на підставці	Отримання інтерференційних ліній, за допомогою повітряного клину		
Інтерференція світла	Мильний розчин, трубка для видування мильних кульок	Інтерференція світла в мильній плівці		
Інтерференція світла	Гас, джерело світла, ємність з водою	Інтерференція світла в плівці гасу на поверхні води		
Дифракція світла	Дві половинки леза безпечної бритви	Спостереження дифракції світла крізь отвір безпечної бритви		

Дифракція світла	Каркас із дротиною	Спостереження дифракції світла крізь тонку дротину		
Дифракція світла	CD/DVD-диск	Спостереження дифракції світла у відбитому світлі		

8. Зробити висновок.

### Контрольні запитання

1. Чим пояснюють виникнення інтерференційної картини у проведених дослідах?
2. Внаслідок чого спостерігається утворення кольорових смуг у проведених дослідах?
3. Чим можна пояснити утворення дифракційної картини?
4. Що ви можете сказати про залежність дифракційної картини від розмірів отворів і перешкод?
5. Як змінюється інтерференційна і дифракційна картини в монохроматичному світлі залежно від довжини світлової хвилі? Поясніть цю залежність.

### Лабораторна робота № 12

#### Вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки

**Мета роботи.** Виміряти довжину хвилі червоного й фіолетового кольору в спектрі першого порядку; порівняти здобуті результати з табличними даними.

**Обладнання:** дифракційна ґратка (період зазначений на ґратці), лінійка з тримачем, прикріпленим до неї, з екраном із вузькою вертикальною щілиною посередині, штатив з лапкою й муфтою, лампа розжарення (або ліхтарик).

#### Хід роботи

1. Зібрати вимірювальну установку (рис. 13). Екран установити на відстані  $a = 50$  см від ґратки. Записати сталу  $d$  дифракційної ґратки.
2. Дивлячись через дифракційну ґратку й щілину в екрані на джерело світла й пересуваючи ґратку в тримачі, установити її так, щоб дифракційні спектри розташовувались паралельно до шкали екрана.
3. За шкалою екрана визначити відстань ( $b$ ) від щілини до лінії спектра червоного кольору праворуч і ліворуч від щілини в екрані.
4. Обчислити довжину хвилі ( $\lambda$ ) світла в спектрі першого порядку:  $\lambda = \frac{db}{ka}$ .
5. Те саме зробити для визначення довжини хвилі фіолетового світла першого порядку.
6. Зробити висновок.

### Контрольні запитання

1. Як впливає число штрихів дифракційної ґратки на відстані між світлими смугами і на їхні розміри в спектрі ґратки?

2. Чим відрізняється дифракційний спектр від дисперсійного?
3. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?

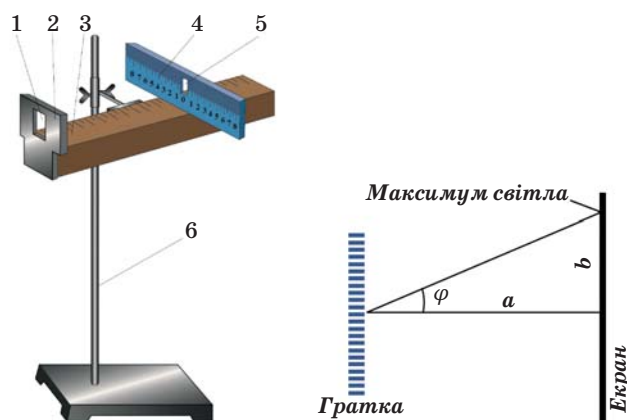


Рис. 13. Експериментальна установка

### Лабораторна робота № 13

#### Спостереження неперервного і лінійчатого спектрів речовини

**Мета роботи.** Навчитися спостерігати суцільний і лінійчатий спектр за допомогою скляної пластини зі скошеними гранями (або спектроскопа прямого зору).

**Обладнання:** проекційний апарат, спектральні трубки з воднем, неоном, гелієм, високовольтний індуктор, джерело струму, з'єднувальні провідники, штатив, спектроскоп, спиртівка, водні розчини солей металів, кольорові олівці.

#### Хід роботи

1. Розташувати спектроскоп горизонтально перед оком, спостерігати світлу вертикальну смугу на екрані — зображення розсувної щілини проекційного апарату. Виділити основні кольори спектру й намалювати їх у спостереженій послідовності.

2. Вставити у високовольтний індуктор по черзі спектральні трубки з воднем, натрієм, гелієм. Спостерігати спектри, розглядаючи спектральні трубки, що світяться, через спектроскоп. Замалювати види спектрів.

3. Розмістити перед спектроскопом полум'я спиртівки і по черзі внести в нього жмутки вати, змочені водними розчинами хлориду натрію і хлориду барію. Спостерігати на фоні слабкого суцільного спектра яскраві лінії натрію і барію. Результати спостережень замалювати або записати в зошит.

4. Зробити висновок.

#### Контрольні запитання.

1. Які речовини дають суцільний спектр? Які — лінійчатий?
2. Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пари?
3. З'ясуйте, який спектр і чому виникає в газі за рекомбінацій додатних йонів з вільними електронами.

4. Який перехід електрона в атомі Гідрогену зумовлює утворення зеленої лінії спектра?

### Лабораторна робота № 14

#### Вивчення треків заряджених частинок за готовими фотографіями

**Мета роботи.** Навчитися аналізувати фотографії треків заряджених частинок.

**Обладнання:** фотографії треків заряджених частинок; трикутник або лінійка з ціною поділки 1 мм/под; циркуль; аркуш прозорого паперу; олівець.

#### Хід роботи

1. Розглянути фотографії треків, рис. 14. Трек I належить протону, треки II, III і IV — частинкам, які потрібно ідентифікувати. Вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини фотографії і дорівнює 2,17 Тл. Початкові швидкості всіх частинок однакові й перпендикулярні до напрямку магнітного поля.

2. Накласти на фотографію аркуш прозорого паперу і перенести на нього треки.

3. Для кожного треку провести дві хорди і в їх серединах поставити перпендикуляри. На перетині перпендикулярів лежать центри кіл.

4. Виміряти радіуси кривизни треків частинок, перенесених на папір, на їх початкових ділянках. Пояснити, чому траєкторії частинок є дугами кіл. Яка причина різниці в кривизні траєкторій різних ядер? Пояснення записати в зошит.

5. Виміряти радіуси кривизни на початку і в кінці одного з треків. Пояснити, чому кривизна траєкторії кожної частинки змінюється від початку до кінця пробігу частинки.

6. Пояснити причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки більш товстий наприкінці пробігу, ніж на початку? Пояснення записати в зошит.

7. Порівняти питомі заряди  $\frac{q}{m}$  час-

тинки III і протона I, знаючи, що початкові швидкості частинки і протона однакові. Відношення питомих зарядів частинок обернене до відношення радіусів їх

траєкторій, так як  $\frac{q}{m} = \frac{v}{B \cdot R}$ .

8. Ідентифікувати частинку III за наслідками дослідження.

9. Інші треки належать ядрам дейтерію і тритію. З'ясувати, якому саме ядру належить трек II і IV.

10. Зробити висновок.

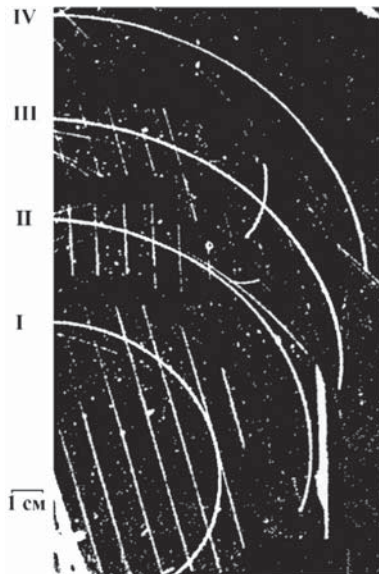


Рис. 14. Фотографії треків заряджених частинок

## ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ

§ 1. 1(с). Зменшиться в 9 разів; 2(с). Збільшиться в 4 рази; 3(д).  $2,4 \cdot 10^5 \text{ Н}$ ; 4(д).  $3,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; 5(д).  $\approx 28 \cdot \text{нКл}$ ; 6(в).  $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ;  $2,025 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ; 7(в).  $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ , в напрямку заряду  $40 \text{ нКл}$ .

§ 2. 1(с).  $8,25 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ ; 2(с).  $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ ; 3(д).  $90 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ ;  $0,1 \text{ нКл}$ ; 4(д).  $\approx 0,5 \cdot 10^{12} \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ ;  $0,8 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ ; 5(д).  $E_3 = E_4 \approx 1215 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

§ 3. 1(с).  $10^{-5} \text{ Дж}$ ; 2(с).  $6 \cdot 10^3 \text{ В}$ ; 3(д).  $9,2 \text{ Дж}$ ; 4(д).  $16 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ; 5(в).  $2,65 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ; 6(в).  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$ ;  $-5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$ ;  $2 \text{ В}$ .

§ 5. 1(с).  $8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ; 2(с).  $5,4 \text{ нКл}$ ; 3(д). Будуть; 4(д).  $5 \text{ нКл}$ ; 5(д). Збільшиться у два рази; 6(д). а)  $1,18 \text{ пФ}$ ; б)  $37 \text{ пФ}$ ; 7(д).  $10^{-4} \text{ Дж}$ ; 8(в).  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ ; 9(в).  $1,7 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

### ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ №1

1(с).  $q \approx 8,6 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}$ ; 2(с).  $q_1 = q_2 \approx 4,2 \text{ нКл}$ ; 3(с). ; 4(с).  $r = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; 5(с).  $r \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; 6(с).  $d \approx 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 7(с).  $\varepsilon_1 = 3$ ; 8(с).  $U_2 = 400 \text{ В}$ ; 9(д).  $q \approx 5,2 \text{ нКл}$ ; 10(д).  $\alpha \approx 0,122 \text{ рад}$ ; 11(д).  $x \approx 0,12 \text{ м}$ ; 12(д).  $4,32 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ; 13(д).  $A = 540 \text{ Дж}$ ; 14(д).  $U = 2,4 \text{ мВ}$ ; 15(д).  $U = 2,66 \text{ МВ}$ ; 16(в).  $E \approx 590 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ; 17(в).  $C \approx 248 \text{ пФ}$ ; 18(в).  $150 \text{ В}$ ; 19(в).  $24 \text{ пФ}$ .

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №1

1(п). Г; 2(п). Г; 3(с). В; 4(с). Г; 5(д). Г; 6(д). Б; 7(д). В; 8(д). А; 9(д). Г; 10(д). В; 11(д). Б; 12(д). А; 13(д). Б; 14(д). 1—Г; 2—Б; 3—А; 4—Д; 15(в).  $U = 125 \text{ В}$ .

§ 8. 1(д).  $2 \text{ А}$ ;  $10 \text{ В}$ ; 2(д).  $I_1 = I_2 = 10 \text{ А}$ ;  $I_3 = 7,5 \text{ А}$ ;  $I_4 = I_5 = I_6 = 2,5 \text{ А}$ ;  $U_1 = U_2 = 20 \text{ В}$ ;  $U_3 = 15 \text{ В}$ ;  $U_1 = U_2 = U_3 = 5 \text{ В}$ ; 3(д).  $3,7 \text{ В}$ ;  $0,2 \text{ Ом}$ ; 4(в).  $1 \text{ А}$ ;  $9 \text{ кДж}$ .

§ 10. 1(с).  $2,26 \text{ А}$ ; 2(с).  $56,3 \text{ А/м}^2$ ; 3(д).  $65,38 \text{ г/моль}$ ; 4(д).  $11 \text{ г}$ ; 5(д).  $1,8 \text{ кДж}$ ; 6(в).  $0,612 \text{ кг}$ ; 7(в).  $54,5 \text{ мкМ}$ .

### ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ №2

1(п). Показники вольтметра зменшуватимуться; 4(с).  $R_{AD} \approx 0,33 \text{ Ом}$ ; 5(с).  $U = 5,4 \text{ В}$ ; 6(с).  $I_0 = 5,05 \text{ А}$ ; 7(с).  $R = 40 \text{ Ом}$ ;  $I = 0,5 \text{ А}$ ;  $l = 25 \text{ м}$ ; 8(с).  $I = 0,3 \text{ А}$ ;  $U_1 = 0,3 \text{ В}$ ;  $U_2 = 1,2 \text{ В}$ ; 9(с).  $r' = 20 \text{ Ом}$ ;  $\mathcal{E}' = 8 \text{ В}$ ; 10(с).  $R_0 = 625 \text{ Ом}$ ; 11(д).  $\frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{k}{k+1}$ ; 12(д).  $R_{ш} = 0,1 \text{ Ом}$ ; 13(д).  $I \approx 0,12 \text{ А}$ ; 14(д).  $I = 0,11 \text{ А}$ ;  $U = 0,99 \text{ В}$ ;  $U_r = 0,11 \text{ В}$ ;  $\eta = 0,9$ ; 15(д).  $R_0 = 4 \text{ Ом}$ ; 16(д).  $R_0 = 10 \text{ Ом}$ ; 17(д).  $I = 34 \text{ мА}$ ; 18(д).  $6 \text{ Ом}$ ;  $4 \text{ Ом}$ ; 19(д).  $I_{к.з.} = 1,5 \text{ А}$ ; 20(д). По-слідовно; 21(д).  $I = 1 \text{ А}$ ;  $I_1 = 0,6 \text{ А}$ ;  $I_2 = 0,4 \text{ А}$ ; 22(д).  $I = 0,2 \text{ А}$ ; 23(д).  $Q_2 = 10,5 \text{ кДж}$ ;  $Q_3 \approx 7,9 \text{ кДж}$ ; 24(д).  $N_1 = 4N_2$ ; 25(д).  $n_1 = 9,4 \cdot 10^{18}$ ; 26(д).  $\mathcal{E}_n \approx 0,7 \text{ В}$ ; 27(д).  $\Delta T \approx 23,3 \text{ К}$ ; 28(в).  $I_2 = 0,4 \text{ А}$ ;  $U_2 = 32 \text{ В}$ ; 29(в).

У три паралельні групи, що складаються із двох послідовно з'єднаних елементів; 30(в).  $n=5$ ; 31(в). 12,5 А; 32(в).  $Q_1 \approx 15,6$  Дж;  $Q_2 \approx 9,4$  Дж;  $Q_3 = 40$  Дж;  $Q_4 \approx 6,7$  Дж; 33(в). збільшилася в 1,11 рази; 34(в).  $1,14 \cdot 10^3$  с.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №2

1(п). 1—Д; 2—Г; 3—Б; 4—В; 2(п). А; 3(с). Г; 4(с). А; 5(с). Г; 6(с). Г; 7(с). Б; 8(д). Г; 9(д). Б; 10(д). В; 11(д). Б; 12(д). А; 13(д). Г; 14(в). Г; 15(в). Б; 16(в). 0,75; 17(в). 15 мкм; 18(в). 0,6 кг.

§ 14. 1(с). Сила не зміниться; 2(с). 2; 5(д). 0,02 А; 6(д). 1—«+»; 2—«—» 7(д). 2; 9(в). 40 А.

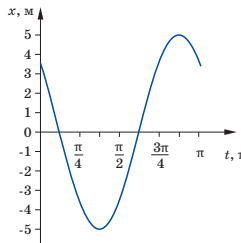
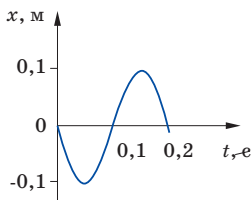
### ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ №3

5(с).  $B=44$  мкТл; 6(с).  $I \approx 58$  мА; 7(с).  $B=50$  мкТл; 8(с).  $B=62,8$  мкТл; 9(с).  $I=15$  А; 10(с).  $A=2,5$  Дж; 11(д).  $U \approx 2,7$  В; 12(д).  $l \approx 6,57$  м; 13(д).  $F \approx 4,6 \cdot 10^{-16}$  Н; 14(д).  $B \approx 119$  мТл; 15(д).  $B=1,84$  Тл; 16(д).  $B=96$  мкТл; 17(д).  $R \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$  м; 18(д).  $F=1,6 \cdot 10^{-13}$  Н;  $R \approx 1,04 \cdot 10^{-2}$  м; 19(д).  $B=5$  мТл; 20(д).  $\mathcal{E} \approx 0,24$  В; 21(д).  $t=10$  с; 22(д).  $I=10^{-5}$  А; 23(д).  $I=0,74$  А; 24(д).  $q=0,074$  Кл; 25(д).  $S=1,07 \cdot 10^{-2}$  м; 26(д).  $v=8$  с $^{-1}$ ; 27(д).  $L=7,1 \cdot 10^{-4}$  Гн;  $\Phi=3,55$  мкВб; 28(д).  $L=1,6$  мГн; 29(д).  $t=0,017$  с; 30(д).  $W=1,69$  Дж; 31(в).  $x_1 \approx 1,2 \cdot 10^{-2}$  м; 32(в).  $A_1=0,024$  Дж;  $A_2=0,048$  Дж;  $A_3=0$ ; 33(в).  $A_{\text{зовн}}=3,14 \cdot 10^{-4}$  Дж; 34(в).  $q=2,4$  мКл.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №3

1(п). 1—Г; 2—А; 3—Д; 4—Б; 2(п). А; 3(с). Г; 4(с). А; 5(с). В; 6(с). А; 7(с). Б; 8(с). В; 9(д). В; 10(д). Б; 11(д). А; 12(д). В; 13(д). А; 14(д). А; 15(д). Г; 16(в). 45°; 17(в). 50 кДж/м $^3$ ; 18(в). 46 кеВ; 19(в).  $q=0,10$  мКл.

§ 16. 1., рис. 1; 2. рис. 2; 3. ; 4.  $v=36$  кГц; 5. Від 1,2 пФ до 0,14 пФ; 6.  $\mathcal{E}=2,5$ .



§ 17. 1. 9 рад/с; 3,5 мДж; 2. 19,2 км/год; 3. 0,1 А; 4.

§ 18. 1. 75 м /с; 2. 2,5 с; 3.  $1,1 \cdot 10^2$  м; 4. 1,2 м/с; 5. 450 м; 6. 153 с.

§ 19. 1. 2 год 13хв 20 с; 2. 30 км; 3. 73 км; 4. 5000.

§ 20. 7. 755 лк; 8. 1 лк; 9. 4 лк; 10. 77,19 лк; 11. 12 с.

§ 21. 6. 9°; 7. 14 мкм; 8. мінімум освітленості; 9. 310 нм.

§ 22. 3. 20°; 4. 53°; 5. 19 см; 6. 2 м; 7. 1м; 8. 13,5 см, 108 см; 9. — 6 дптр.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №4

1. В. 2200 коливань; 2. 3. Б; 4. Г; 5. Г; 6. Б; 7. Б. 5,6 м; 8. Б. 40°; 9. 84 м; 10. 0,6 с; 11. 7,1 с; 12. 1,8 с; 13., 2 Гц, 0,5 с, рад; 14. 2 А; 15. ; 16. 0,2 А; 17. 0,1 мкФ; 18. 0,2 мКл, 2 А.



**ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ №5**

3.  $n = 50$ . 4.  $\lambda_{\max} \approx 2,34 \cdot 10^{-7}$  м. 5.  $v_{\max} = 6,5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 6.  $A \approx 3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 7.  $E = 1,15 \cdot 10^{-13}$  Дж. 8.  $A = 6,55 \cdot 10^{-19}$  Дж. 9.  $v_0 = 5,8 \cdot 10^{14}$  Гц. 10.  $U = 1,75$  В. 11.  $U = 0,95$  В. 12.  $v_0 = 4,76 \cdot 10^{14}$  Гц. 13. а)  $3,2 \cdot 10^{-36}$  кг; б)  $8,8 \cdot 10^{-32}$  кг; в)  $1,8 \cdot 10^{-30}$  кг. 14.  $E = 1,15 \cdot 10^{-13}$  Дж;;  $m = 1,38 \cdot 10^{-30}$  кг;  
 $p = 4,1 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ . 15.  $v = 9,2 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 16.  $E = 5,1 \cdot 10^5$  еВ;  $E = 8,16 \cdot 10^{-14}$  Дж.  
 17.  $E_1 = 150 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ . 18.  $A = 4,2$  еВ. 19.  $\lambda_0 = 5,17 \cdot 10^{-7}$  м. 20.  $E_{\min} = 4,2$  еВ.  
 21.  $v = 13,2 \cdot 10^{14}$  Гц. 22.  $p_{\max} = 3,4 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ . 23.  $\lambda = 204$  нм;  
 $\lambda_0 = 234$  нм. 24.  $U = 1,5$  В;  $v = 7,3 \cdot 10^5$  м/с. 25.  $\lambda_0 = 226$  нм. 26.  
 $\frac{\Delta T}{\Delta t} = 3,15 \cdot 10^{-9} \frac{\text{К}}{\text{с}}$ . 27.  $k = 60\%$ . 28.  $I_n = 7,27 \cdot 10^{-18}$  А. 29.  $n = 2,52 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №5**

1. Б; 2. А; 3. А; 4. Б; 5. Б; 6. А; 7. Б; 8. А; 9. Б; 10. Г; 11. А; 12. А; 13.  
 94,4 нм; 14. 650 км/с; 15. 10 км/с; 16. 2 еВ.

**ПРАКТИКУМ ІЗ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ №6**

5.  $E = 1,94 \cdot 10^{-18}$  Дж. 6.  $\Delta W = 4,4 \cdot 10^{-19}$  Дж. 7.  $W = 5,44 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
 8.  $W = -2,42 \cdot 10^{-19}$  Дж. 9.  $Z = 3$ ;  $N = 4$ . 10.  $N_1 = 7$ ;  $N_2 = 8$ . 11.  $A = 39$ ;  $Z = 19$ .  
 12. Кількістю нейтронів. 13.  ${}^{17}_8\text{O}$ . 14.  $\Delta A = 1$ ;  $\Delta Z = 1$ . 15.  ${}^{17}_{14}\text{Si}$ . 16.  ${}^{30}_{15}\text{P}$ . 17.  
 $n_k = 5$ . 18.  $4,86 \cdot 10^{-7}$  м. 19.  $3,45 \cdot 10^{-7}$  м. 20.  $3,6 \cdot 10^{16}$  Гц. 21.  $W_{n1} = -27,2$  еВ;  
 $W_1 = -13,6$  еВ. 22.  $W_{k1} = 13,6$  еВ;  $W_{k2} = 3,4$  еВ;  $W_{k3} = 1,51$  еВ;  $W_{k\Gamma} = 0$  еВ.  
 23.  $\Delta m = 2,882 \cdot 10^{-28}$  кг. 24.  $T_{1/2} \approx 3,3 \cdot 10^5$  с. 25.  $W \approx 4,53 \cdot 10^{-12}$  Дж. 26.  
 $\Delta m \approx 2,44 \cdot 10^{-29}$  кг. 27.  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 8$ . 28.  $25,3 \cdot 10^{-7}$  м. 29.  $\Delta N = 10^3$ . 30.  $n = 27$ .

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ №6**

1. Б; 2. А; 3. Б; 4. Б; 5. Г; 6. Г; 7. А; 8. А; 9. А; 10. В; 11. Б; 12. В; 13.  
 4 доби; 14. 486 нм; 15. 92,16 МеВ; 16. 4,4 пДж; 17. 5,3 кг.

**§ 30.****ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ**

5.  $v = 29,8$  км/с.

**§ 31.****ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ**

5.  $T = 8$  років.

**§ 35.****ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ**

3.  $M_{\odot}$