



ВОЛОДИМИР СИРОТЮК
ЮРІЙ МИРОШНІЧЕНКО

ФІЗИКА *i* АСТРОНОМІЯ

РІВЕНЬ СТАНДАРТУ



11

ВОЛОДИМИР СИРОТЮК, ЮРІЙ МИРОШНІЧЕНКО

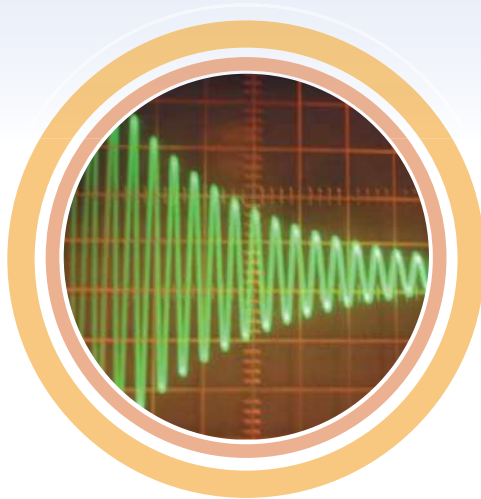
ФІЗИКА *i* АСТРОНОМІЯ

(РІВЕНЬ СТАНДАРТУ,

за навчальною
програмою авторського колективу
під керівництвом Ляшенка О. І.)

**Підручник для 11 класу закладів
загальної середньої освіти**

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України*



Київ
«ГЕНЕЗА»
2019

УДК 52/53(075.3)
С40

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

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Сиротюк В. Д.
С40 Фізика і астрономія (рівень стандарту, за навч. програмою авт. кол. під керівництвом Ляшенка О. І.) : підруч. для 11-го кл. закл. заг. серед. освіти / Володимир Сиротюк, Юрій Мирошніченко. — Київ : Генеза, 2019. — 368 с. : іл.

ISBN 978-966-11-0982-6.

УДК 52/53(075.3)

Навчальне видання

СИРОТЮК Володимир Дмитрович, МИРОШНІЧЕНКО Юрій Борисович

ФІЗИКА І АСТРОНОМІЯ

(рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.)

Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Головний редактор *Наталія Заблоцька*. Редактор *Олена Мовчан*.
Обкладинка *Світлани Железняк*. Художній редактор *Світлана Железняк*.
Технічний редактор *Цезарина Федосіхіна*.
Комп'ютерна верстка *Олександра Павленка*. Коректор *Любов Федоренко*

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 29,90. Обл.-вид. арк. 20,03.
Тираж 44 623 пр. Вид. № 2006. Зам. №

Видавництво «Генеза», вул. Тимошенка, 2-л, м. Київ, 04212.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 5088 від 27.04.2016.


Віддруковано у ТОВ «ПЕТ», вул. Ольмінського, 17, м. Харків, 61024.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 4526 від 18.04.2013.

© Сиротюк В. Д.,
Мирошніченко Ю. Б., 2019
© Видавництво «Генеза»,
оригінал-макет, 2019


ISBN 978-966-11-0982-6


ШАНОВНІ ОДИНАДЦЯТИКЛАСНИЦІ ТА ОДИНАДЦЯТИКЛАСНИКИ!



В 11-му класі ви вивчатимете електродинаміку, коливання і хвилі, квантову фізику та астрономію. Теоретичний матеріал цього підручника допоможе вам зрозуміти й пояснити відповідні процеси, явища, закони та теорії. Звертайте увагу на текст, виділений **напівжирним** шрифтом і кольором. Це фізичні й астрономічні терміни, означення, важливі правила і закони, які треба пам'ятати і вміти застосовувати.

Підручник містить багато ілюстрацій, у ньому описано досліди, які ви можете виконати самостійно чи з допомогою вчителя або вчительки. Виконавши їх, ви глибше зрозумієте фізичний зміст явищ, що вивчаються. Рубрика  «**Чи знаєте ви, що...**»


містить цікаві факти, які доводять, що в природі все відбувається за законами фізики та астрономії.

Наприкінці кожного параграфу є  «**Запитання до вивченого**», щоб перевірити, як ви засвоїли матеріал, а також закріпити свої знання. Також є завдання для роботи в групах, завдання для дослідження та виконання навчальних проєктів.

У рубриці  «**Розв'язуємо разом**» наведено алгоритми та зразки розв'язування найважливіших видів фізичних та астрономічних задач. У підручнику є задачі, вправи й запитання різних рівнів складності: **А** — на закріплення, **Б** — творчого характеру, а також задачі підвищеного рівня складності, над якими треба поміркувати.

Для виконання завдань-досліджень з позначкою  потрібно відшукати інформацію із заданої теми в Інтернеті чи додатковій літературі, а для деяких — створити мультимедійну презентацію і результати самостійної роботи презентувати. Над завданнями з позначкою  доцільно попрацювати в парах або невеликих групах.

Розв'язування фізичних та астрономічних задач — це одне з важливих умінь, що формується у процесі навчання фізики й астрономії, тому наприкінці підручника подано «**Практикум з розв'язування фізичних та астрономічних задач**», де наведено загальні алгоритми з розв'язування задач із електродинаміки, коливань і хвиль, квантової фізики та астрономії. Це допоможе вам скласти план розв'язання задачі.

Виконуючи завдання з рубрики  «**Перевір свою компетентність**», ви отримаєте навички, які допоможуть вам у майбутньому розв'язувати реальні проблеми і забезпечити здоровий спосіб життя.

Роботи фізичного практикуму сприятимуть поглибленому розумінню закономірностей фізичних явищ та навчать виконувати досліди й безпечно користуватися вимірювальними приладами.

Якщо виникне потреба дізнатися про якийсь фізичний чи астрономічний термін або правило, скористайтеся *предметно-іменним покажчиком*.

Намагайтеся бути максимально самостійними в засвоєнні матеріалу.

І налаштуйтеся на те, що вивчення фізики й астрономії — це нелегка праця.

Щасливої вам дороги до знань!

Ми живемо у світі, у якому відбуваються різноманітні електромагнітні явища, які є корисними, але іноді й шкідливими для людини. Сьогодні ми не можемо обійтися без побутових електроприладів, електротранспорту тощо. Щоб отримати чисті речовини потрібна електроенергія. Прилади, які використовуються в медицині, дають змогу провести діагностику організму людини. Завдяки роботі генераторів на електростанціях ми маємо освітлення в будівлях, впровадження технологічних процесів у різних сферах виробництва тощо.

§ 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ВЗАЄМОДІЯ. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАКОН КУЛОНА. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

З курсу фізики 7–9-х класів ви дізналися, що всі тіла, які нас оточують, складаються з атомів, а атоми можуть об'єднуватися в молекули. До складу всіх без винятку атомів (і молекул) входять так звані елементарні частинки — найменші частинки речовини, що мають електричні заряди, — *електрони і протони*. Електрони мають *негативний* заряд, а протони — *такий самий за значенням, але позитивний*.

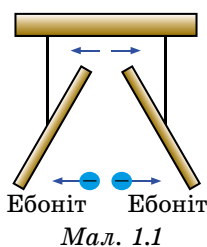
Електрон (від грец. $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ — «янтар», «бурштин») — стабільна елементарна частинка з негативним електричним зарядом $e = -1,6021892(46) \cdot 10^{-19}$ Кл і масою $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг.

Тепер пригадаємо властивості заряджених тіл.

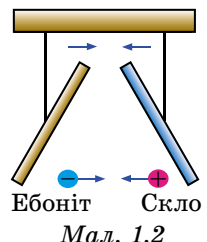
Дослід 1. Зарядимо натиранням об хутро ебонітову паличку і підвісимо її на нитці. Якщо піднести до неї так само заряджену іншу ебонітову паличку (мал. 1.1), то палички відштовхуватимуться одна від одної. Якщо до зарядженої ебонітової палички піднести заряджену тертям об шовк чи сухий папір скляну паличку, то палички притягуватимуться одна до одної (мал. 1.2).

Отже, **однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменно заряджені тіла — притягуються.**

Якщо заряджені тіла *відштовхуються* або *притягуються*, то кажуть, що вони взаємодіють між собою. Пригадаємо закон взаємодії, який експериментально відкрив у XVIII ст. французький учений **Шарль Кулон** (1736–1806).



Мал. 1.1



Мал. 1.2

Сила взаємодії двох заряджених нерухомих тіл, розмірами яких можна знехтувати порівняно з відстанню між ними, прямо пропорційна значенням їхніх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними та направлена вздовж лінії, що сполучає ці тіла.

Математично закон Кулона записують так:

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

де q_1, q_2 — точкові заряди, що взаємодіють; r — відстань між ними; k — коефіцієнт, який залежить від вибору одиниць величин, що входять до закону, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$.

Розглянемо детальніше саме явище електричної взаємодії.

Дослід 2. Закріпимо металеву кулю на стержні електromетра (мал. 1.3) і зарядимо її від ебонітової палички, потертої об хутро. Стрілка відхилиться від положення рівноваги, це свідчить про те, що куля має електричний заряд. Підвісимо на тонкій нитці легку, виготовлену з фольги гільзу і почнемо підносити її до кулі. На певній відстані помітимо, що гільза притягується до кулі, унаслідок чого нитка відхилиться від вертикального положення.

Ми звикли до того, що дія одного тіла на інше відбувається внаслідок безпосереднього контакту між ними. Так, вагон почне рухатися лише тоді, коли локомотив буде тягти чи штовхати його. М'яч змінить напрямку руху в той момент, коли доторкнеться до ноги футболіста чи стійки (штанги) воріт.

Який механізм взаємодії заряджених тіл? Відповідь на це запитання дав англійський фізик **Майкл Фарадей** (1791–1867), осмисливши всі відомі на той час знання з електрики і дійшовши висновку про існування електричного поля як виду матерії.

Електричне поле — особлива форма матерії, нерозривно пов'язана з усяким електричним зарядом. Через електричне поле відбуваються всі електричні взаємодії.



Мал. 1.3

Сили, з якими електричне поле діє на заряджені тіла, називають електричними силами.

Дослідження електричного поля можна проводити, поміщаючи в поле невеликі заряджені тіла. Це можуть бути легкі заряджені кульки чи гільзи.

Такі тіла ми далі називатимемо пробними зарядами (уявними зарядами, власне електричне поле яких досить слабе порівняно з досліджуваними). За їхньою допомогою виявляють наявність електричного поля в даній точці простору. Про наявність поля свідчить дія на заряджене тіло певної сили.

Дія електричного поля на заряджені тіла є основною характеристикою електромагнітного поля.

Якщо в конкретну точку електричного поля послідовно поміщати пробні заряди q_1, q_2, \dots, q_n , які мають різні значення, то на них з боку поля будуть діяти різні сили $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$. Якщо знайти відношення кожної із цих сил до значення пробного заряду, на який діє ця сила, то отримаємо

$$\text{одне й те саме значення: } \frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \frac{\vec{F}_n}{q_n}.$$

Це означає, що відношення $\frac{\vec{F}}{q}$ характеризує електричне поле, адже

воно не залежить від значення вміщеного в дану точку поля пробного заряду і має одне й те саме значення для конкретної точки даного поля, але в різних точках поля може мати різні значення.

Фізичну величину, яка визначається відношенням сили, що діє на заряд, уміщений у дану точку поля, до значення цього заряду, називають **напруженістю електричного поля**. Позначають напруженість літерою E

і визначають за формулою: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

Напруженість електричного поля — векторна фізична величина, яка є основною кількісною характеристикою електричного поля. Її називають силовою характеристикою поля.

Одиницею напруженості електричного поля в СІ є **1 вольт на 1 метр (1 В/1 м): 1 Н/1 Кл = 1 В/1 м**.

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд, розміщений у даній точці поля.

Якщо поле створено нерухомим точковим зарядом q_0 , то на пробний за-

ряд q діятиме сила $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$. Тому значення напруженості електростатичного поля, створеного нерухомим точковим зарядом, визначатиметься так:

$$E = k \frac{q_0}{r^2},$$

де E — напруженість електричного поля; $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$; q_0 — точковий заряд; r — відстань між зарядами.

Для того щоб визначити напруженість електричного поля, створеного системою нерухомих точкових заряджених тіл, слід виходити з **принципу суперпозиції**, згідно з яким:

повна напруженість поля в точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими точковими зарядженими тілами: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$.

Електричне поле можна зображати, проводячи вектори напруженості в кожній його точці. Проте таке графічне зображення є незручним, тому що вектори напруженості накладаються один на одного і спостерігається заплутана картина.

Майкл Фарадей запропонував більш наочний метод зображення електричних полів за допомогою **силових ліній (ліній напруженості)**.

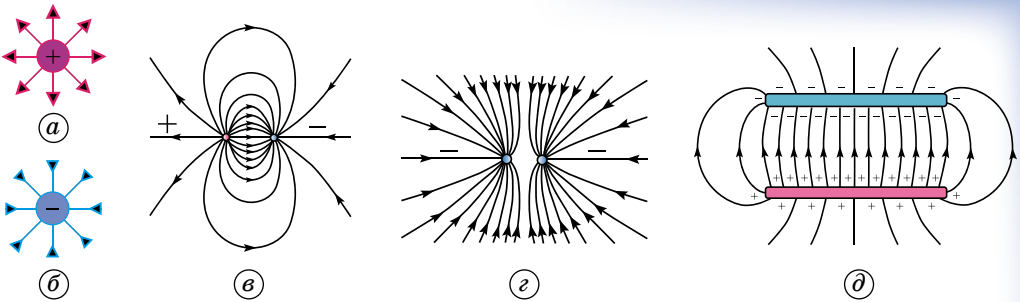
Силкові лінії точкових зарядів є прямими лініями, що проходять через ці заряди.

Силкові лінії електричного поля — це уявні криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості.

Вважається, що силкові лінії починаються на позитивно заряджених тілах і закінчуються на негативно заряджених (мал. 1.4).

Лінії напруженості не перетинаються, адже в кожній точці поля вектор E має лише один напрямок. З того, як густо розміщені силкові лінії в полі, можна судити про напруженість поля.

Отже, силкові лінії дають наочну картину розподілу електричного поля у просторі: щільність силових ліній та їхній напрямок характеризують значення і напрямок вектора напруженості електричного поля в кожній його точці. Силкові лінії електричного поля ніде не перетинаються, вони можуть тільки сходитися до заряду або розходитися від нього.



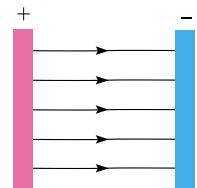
Мал. 1.4

На малюнку 1.4 показано приклади ліній напруженості позитивно та негативно заряджених кульок (мал. 1.4, а, б), двох різнойменно заряджених кульок (мал. 1.4, в), двох однойменно заряджених кульок (мал. 1.4, г), двох пластин, заряди яких однакові за модулем і протилежні за знаком (мал. 1.4, д).

Електричне поле, у якому напрямок і значення напруженості в усіх точках однакові, називають *однорідним*. В однорідному полі силові лінії паралельні одна одній, мають однаковий напрямок, однакову щільність. Прикладом однорідного поля може слугувати поле між двома паралельними металевими пластинами з однаковими за значенням і протилежними за знаком зарядами (мал. 1.5).

Електричне поле не має меж, воно існує в усіх точках простору. Якщо й кажуть про певну межу, то мають на увазі певну точку поля, у якій прилади вже не можуть виявити це поле.

На основі закону Кулона і принципу суперпозиції полів можна визначити напруженість поля практично будь-якої сукупності заряджених тіл.



Мал. 1.5

7



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як проявляється взаємодія заряджених тіл?
2. Сформулюйте закон Кулона.
3. Що таке електричне поле?
4. Що є основною характеристикою електромагнітного поля?
5. Що називають пробним зарядом?
6. Що таке напруженість електричного поля? Що вона характеризує?
7. Як визначається напруженість електричного поля?
8. У чому полягає принцип суперпозиції?
9. Які лінії називають силовими?
10. Яке електричне поле називають однорідним?



Знайдіть в додаткових джерелах, Інтернеті відомості про вплив електричного поля на живі організми. Створіть мультимедійну презентацію та презентуйте її класу.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Велике значення напруженості поблизу вістря на зарядженому провіднику спричиняє явище, відоме як «електричний вітер».

В атмосферному повітрі завжди є невелика кількість позитивних йонів і вільних електронів, які виникають під впливом космічних променів, випромінювання радіоактивних речовин тощо. У сильному електричному полі біля вістря позитивні йони рухаються і захоплюють за собою молекули повітря, утворюючи «електричний вітер». Якщо біля вістря розмістити полум'я свічки, то воно під дією «вітру» буде відхилитися.

§ 2. РЕЧОВИНА В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Речовина, внесена в електричне поле, може істотно змінитися. Це пов'язано з тим, що вона складається із заряджених частинок. За відсутності зовнішнього поля частинки розподіляються всередині речовини так, що створюване ними електричне поле дорівнює нулю. За наявності зовнішнього поля відбувається перерозподіл заряджених частинок, і в речовині виникає власне електричне поле. Повне електричне поле складається відповідно до принципу суперпозиції із зовнішнього поля і внутрішнього поля, яке створюється всередині речовини.

Розглянемо два класи речовин: *провідники* і *діелектрики*.

Основна особливість провідників — це наявність вільних зарядів (електронів), які беруть участь у тепловому русі і можуть переміщуватися по всьому об'єму провідника.

Типовими провідниками є метали. За відсутності зовнішнього поля в будь-якому елементі об'єму провідника негативний вільний заряд компенсується позитивним зарядом іонних ґраток. У провіднику, внесеному в електричне поле, відбувається перерозподіл вільних зарядів, унаслідок чого на поверхні провідника виникають позитивні і негативні заряди, що не компенсуються (мал. 1.6). Цей процес називають *електростатичною індукцією*, а заряди, що з'явилися на поверхні провідника, — *індукційними зарядами*.

Індукційні заряди створюють своє власне поле, яке компенсує зовнішнє поле в усьому об'ємі провідника (усередині провідника). Повне електростатичне поле всередині провідника дорівнює нулю.

Усі внутрішні області провідника,

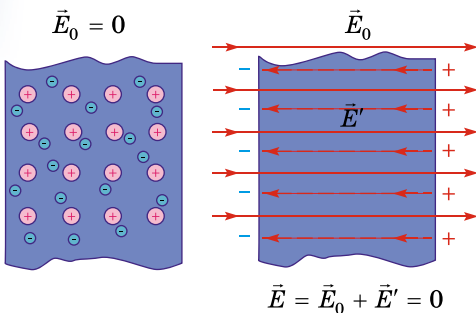
внесеного до електричного поля, залишаються електронейтральними. Якщо видалити деякий об'єм, виділений усередині провідника, і утворити порожнину, то електричне поле всередині порожнини дорівнюватиме нулю (мал. 1.7). На цьому ґрунтується електростатичний захист — чутливі до електричного поля прилади для уникнення впливу поля поміщають у металеві ящики.

На відміну від провідників у діелектриках (ізоляторах) немає вільних електричних зарядів. Вони складаються з нейтральних атомів або молекул. Заряджені частинки в нейтральному атомі зв'язані одна з одною і не можуть переміщуватися під дією електричного поля.

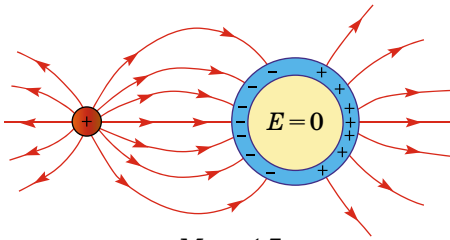
Цікавою властивістю діелектриків є їхня поляризація під дією електричного поля.

Поляризація діелектрика — явище впорядкованого переорієнтування молекул діелектрика під дією зовнішнього електричного поля.

У результаті поляризації разом з молекулами перерозподіляються і їхні електрично заряджені частинки. Отже, що в одному напрямку відносно силових ліній поля переважають позитивно заряджені частинки, а в протилежному — негативно заряджені.



Мал. 1.6



Мал. 1.7

Цікаво, що в результаті поляризації в діелектрику з'являється власне електричне поле, яке спрямоване протилежно до зовнішнього, яке й спричинило цю поляризацію. І хоча внутрішнє поле значно менше від зовнішнього, спостерігається ефект досить істотного ослаблення останнього.

Серед твердих діелектриків існує група речовин, які можуть тривалий час зберігати наелектризований стан (бути поляризованими) за відсутності зовнішнього електричного поля. Їх називають **електретами**. Подібні властивості мають ряд органічних (парафін, бджолиний віск, нейлон, ебоніт тощо) і неорганічних (сірка, борне скло тощо) речовин.

Така властивість електретів зумовлена тим, що виникає залишкова поляризація, оскільки на процеси поляризації та деполіаризації потрібен різний час. Прискорити процес деполіаризації можна шляхом підвищення температури діелектрика. Час збереження поляризації без помітного її зменшення в різних електретів різний. У деяких електретів він може сягати кількох десятків років. Електрети застосовують як джерела постійного електричного поля у техніці, зокрема в електрографії.

Для характеристики діелектриків вводять поняття діелектрична проникність.

Діелектрична проникність (діелектрична стала) середовища ϵ — безрозмірна величина, що характеризує ізоляційні властивості середовища. Вона показує у скільки разів взаємодія між зарядами в однорідному середовищі менша, ніж у вакуумі.

Діелектрична проникність деяких діелектриків за певної температури набуває великих значень. Спочатку таку властивість було виявлено у кристалів сегнетової солі, і тому всі діелектрики цього типу отримали назву **сегнетоелектрики**. Цей термін увів у науку **Ігор Курчатов (1903– 1960)** у 30-х роках ХХ ст.

Діелектрична проникність сегнетової солі може перевищувати діелектричну проникність вакууму в кілька тисяч разів. Вона помітно змінюється зі зміною напруженості зовнішнього електричного поля.

Аномально велика діелектрична проникність сегнетоелектриків спричинена виникненням у цих речовин у певному інтервалі температур вираженої спонтанної (самодовільної) поляризації. Навіть за відсутності зовнішнього електричного поля окремі ділянки кристала сегнетоелектрика (домени) виявляються поляризованими, але в різних напрямках. Тому в цілому весь кристал сегнетоелектрика поводить себе так, ніби він зовсім не поляризований. Під дією електричного поля відбувається зміна напрямку поляризації (зміна орієнтації) доменів — вони повертаються в напрямку цього поля. Сегнетоелектрик частково зберігає свою поляризацію і тоді, коли його видаляти з поля.

Виявляється, що домени ϵ в сегнетоелектриках лише в певному інтервалі температур і саме за цих температур у них зберігаються сегнетоелектричні властивості. Наприклад, сегнетова сіль має ці властивості лише за температури від -15 до $22,5$ °С.

Сегнетоелектрики використовують для виготовлення генераторів і приймачів ультразвукових хвиль та інших радіотехнічних пристроїв.

Вивчення властивостей твердих діелектриків показало, що деякі з них поляризуються не лише за допомогою електричного поля, а й у процесі деформації внаслідок механічної дії на них.

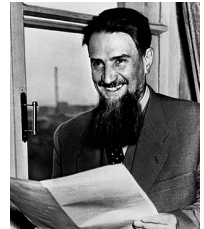


ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що відбувається з речовиною, внесеною в електричне поле?
2. Чим відрізняються провідники від діелектриків?



Дослідіть, у яких галузях використовуються діелектрики.



Ігор Курчатов

§ 3. РОБОТА ЗА ЧАС ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАРЯДУ В ОДНОРІДНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ. ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ. РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ

На кожен заряд, розміщений в електричному полі, діє сила, під дією якої він переміщується. Під час руху заряду електричне поле виконує певну роботу.

Електричне поле нерухомих зарядів має ту надзвичайну особливість, що робота сил цього поля на шляху між двома довільними точками залежить лише від початкового та кінцевого положення переміщення і не залежить від форми шляху. Силі поля, які мають ці особливості, називають **потенціальними**.

Роботу сил електричного поля можна розглядати як зміну потенціальної енергії, яку має кожне заряджене тіло, що перебуває в цьому електричному полі. Якщо позначити потенціальну енергію зарядженого тіла, що переміщується під дією електричних сил, у початковій і кінцевій точках траєкторії відповідно W_1 і W_2 , то робота сил електричного поля визначатиметься за формулою: $A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1)$.

Різні пробні заряди в даній точці поля матимуть різні потенціальні енергії. Водночас відношення потенціальної енергії пробних зарядів до їхніх значень для даної точки поля є величиною сталою.

Фізичну величину, яка визначається відношенням потенціальної енергії пробного заряду, що міститься в даній точці електричного поля, до значення заряду, називають **потенціалом**.

10

Потенціал позначають літерою ϕ і записують у вигляді: $\phi = \frac{W}{q}$.

Потенціал є скалярною величиною. Потенціали точок поля позитивно зарядженого тіла мають додатне значення, а негативно зарядженого — від'ємне значення.

Одиницею потенціалу в СІ є **1 вольт: 1 В = 1 Дж/1 Кл**.

Потенціал характеризує електричне поле в даній його точці та є його енергетичною характеристикою.

Якщо позначити потенціали точок, у яких перебував пробний заряд до і після виконання роботи силами електричного поля з його переміщення, відповідно ϕ_1 і ϕ_2 та врахувати, що $W = \phi q$, то можна записати:

$$A = W_1 - W_2 = q(\phi_1 - \phi_2).$$

Значення цієї роботи пропорційне значенню переміщуваного заряду і залежить від того, з якої в яку точку переміщується заряд.

Фізичну величину $(\phi_1 - \phi_2)$ називають різницею потенціалів і визначають відношенням роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$(\phi_1 - \phi_2) = \frac{A}{q}.$$

Значення потенціальної енергії залежить від вибору початку її відліку (вибору нульового рівня потенціальної енергії). Отже, значення потенціалу залежить від вибору точки, у якій потенціал дорівнює нулю. Такою точкою у фізиці вважають точку, що міститься в нескінченності.

Тому потенціал даної точки електричного поля можна визначити як фізичну величину, що показує, яка робота виконується електричними силами під час переміщення одиничного позитивного пробного заряду з даної точки в нескінченність.

Поняття «нескінченність», де прийнято вважати $\varphi = 0$, фізично не визначено. Тому під час знаходження потенціалу в довільній точці поля завжди допускають неточність на значення потенціалу в точці, яку вважають розміщеною у нескінченності. Інакше кажучи, потенціал довільної точки поля визначають завжди з точністю до сталого значення. Тому поняття «потенціал» у цьому розумінні фізично не визначено. Більш точним й однозначним поняттям є «різниця потенціалів» як фізична величина, що визначається роботою під час переміщення пробного заряду $q = 1$ Кл між точками поля з потенціалами φ_1 і φ_2 .

На практиці зручно вважати, що потенціал Землі дорівнює нулю. Це допустимо, оскільки під час будь-яких розрахунків важливо знати різницю потенціалів між деякими точками електричного поля, а не абсолютне значення потенціалів у цих точках. Вимірюють різницю потенціалів заземленим електрометром, порівнюючи потенціал зарядженого електрометра з потенціалом Землі.

Різницю потенціалів в електричному полі називають напругою.

Позначають напругу літерою U . Одиницею напруги в СІ є **1 вольт (1 В)**.

Враховуючи, що $U = \frac{A}{q}$ і $A = qEd$, маємо зв'язок між напругою і напруженістю електричного поля:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}.$$

Учені домовилися проводити поверхні так, щоб різниця потенціалів для двох сусідніх поверхонь була всюди одна й та сама. Тоді за густотою екіпотенціальних поверхонь можна дійти висновку про значення напруженості поля: що густіше розміщені ці поверхні, то швидше змінюється потенціал під час переміщення вздовж нормалі до поверхонь і ще більша в цьому місці напруженість E .

11



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як визначити роботу сил електричного поля?
2. Дайте означення потенціалу.
3. Яких значень може набувати потенціал?
4. Що таке різниця потенціалів в електричному полі?
5. Які одиниці напруги в системі СІ?



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Усе життя людину оточують природні атмосферні електричні поля. Найяскравіше проявляє себе електричне поле під час грози. Тоді його напруженість поблизу Землі досягає 10 ківольт на метр (кВ/м). Але і в безмарну погоду напруженість атмосферного поля в середньому становить 130 В/м.

Учені встановили, що потенційно небезпечним є перебування людини в електричному полі, напруженість якого перевищує 25 кВ/м. Тут можна працювати тільки із застосуванням засобів індивідуального захисту.

Безпечним є рівень напруженості електричного поля (0,5 кВ/м) в житлових будівлях, де людина перебуває необмежений час. Наприклад, електроковдра створює рівень напруженості до 0,2 кВ/м. Допустимий рівень напруженості в районах житлової забудови становить 1 кВ/м. А ось у місцях (незабудовані території, сільськогосподарські угіддя, які мало відвідують люди) безпечний рівень встановлено до 15 кВ/м, у важкодоступних, практично непрохідних місцях — 20 кВ/м.

Не знаючи про те, як впливає на організм електричне поле високої напруги, деякі люди в зоні ЛЕП облаштовують городи, де довго і часто працюють.

Це неприпустимо! Навіть професіоналам, що за службовим обов'язком здійснюють контроль і ремонт ЛЕП, дозволено працювати не більше ніж 1,5 год на день, якщо напруженість там сягає 15 кВ/м, і не більше ніж 10 хв за напруженості до 20 кВ/м.

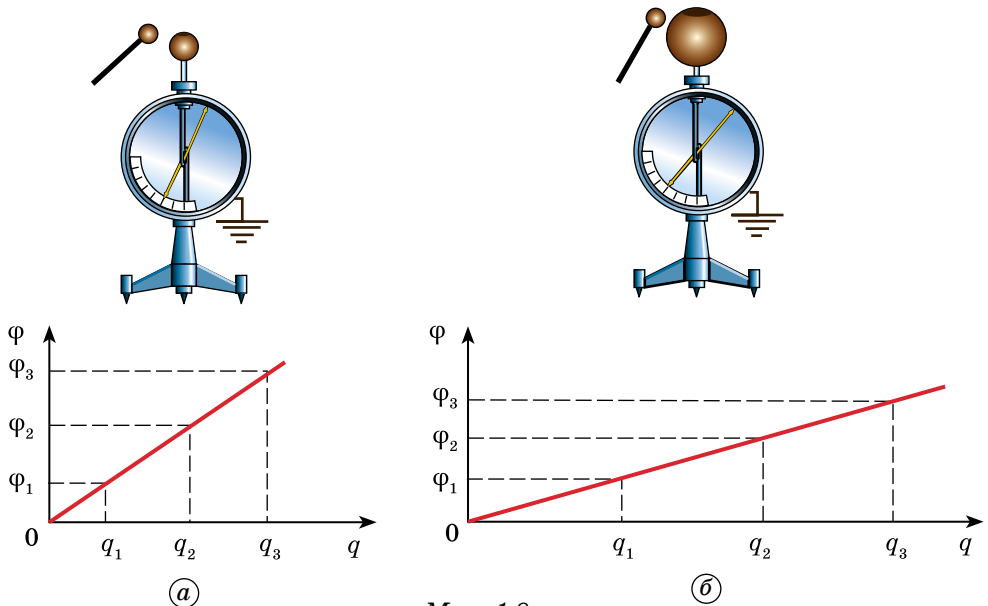
У зоні електричного поля ЛЕП не бажано гуляти, кататися на лижах, особливо дітям та людям з ослабленою серцево-судинною системою. Це стосується і міських територій, через які проходять високовольтні лінії. Потрібно максимально обмежити своє перебування в таких місцях. Ночівлі беззастережно заборонено.

Хотілося б застерегти садівників-аматорів, щоб вони не будували металевих будиночків, сарайчиків для зберігання інвентарю на території ЛЕП. Дотик до такої споруди, навіть якщо людина ізольована від землі, наприклад гумовим взуттям, може завдати небезпечного для життя ураження струмом.

§ 4. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА. З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Якщо ізольованому провіднику будь-якої форми надавати послідовно заряди q , $2q$, ..., nq , збільшуючи загальний заряд, то його потенціал буде збільшуватися.

12 **Дослід.** З'ясуємо, від чого залежить потенціал зарядженого тіла. Для цього скористаємося двома електрометрами, корпуси яких заземлено. На стержнях електрометрів закріпимо металеві порожнисті кулі різного діаметра (мал. 1.8). Зарядимо металеву кульку на ізоляційній ручці від високовольтного перетворювача або електрофорної машини і почнемо вносити її в порожнину меншої за діаметром кулі (мал. 1.8, а), аж доки не торкнемося нею внутрішньої поверхні кулі. Весь заряд з кульки перейде на зовнішню поверхню кулі, електрометр покаже певне значення потенціалу. Проробивши аналогічний дослід з більшою



Мал. 1.8

кульку (мал. 1.8, б), ми побачимо, що стрілки обох електрометрів відхиляються, але на різний кут. Знову зарядимо кульку і перенесемо порцію заряду на порожнисті кулі, їхні заряди збільшаться вдвічі, а електрометри покажуть збільшення потенціалу. Якщо повторювати такі дії кілька разів, то спостерігатимемо відповідне збільшення потенціалів куль. Він буде пропорційний значенню їхнього заряду, що можна відобразити відповідними графіками. Але потенціал більшої кулі буде збільшуватися повільніше, ніж меншої. Отже, графіки залежності потенціалу куль від заряду будуть різними (мал. 1.8). Проаналізувавши результати досліду та графіки, можна дійти висновків: потенціал кожної кулі прямо пропорційний її заряду; коефіцієнт пропорційності для різних куль має різні значення.

Отже, відношення заряду провідника до його потенціалу для різних куль буде різне. Це відношення називають *електроємністю провідника*.

Електроємністю провідника називають величину, яка визначається відношенням заряду провідника q до його потенціалу ϕ :

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

Проаналізувавши ці досліди та отримане рівняння, можна сказати, що електроємність кулі більшого діаметра більша. У XVII–XVIII ст. електрику уявляли як аналог рідини, що може «вливатися» у провідник і «вилитися» з нього. Електроємність провідника залежить від його розмірів і форми, не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми та розмірів порожнин усередині провідника. Це пояснюється тим, що надлишок зарядів розподіляється лише на зовнішній поверхні провідника. Електроємність провідника не залежить також від заряду, розташованого на провіднику, від його потенціалу, але залежить від їхнього співвідношення. Сказане не суперечить формулі, оскільки вона лише показує, що потенціал провідника прямо пропорційний до його заряду й обернено пропорційний до електроємності.

Одиницею електроємності є **1 фарад (1 Ф)**. Цю одиницю названо на честь англійського фізика М. Фарадея, який зробив значний внесок у вивчення електричних явищ.

Тіло має ємність **1 фарад**, якщо зі зміною його заряду на 1 кулон потенціал змінюється на 1 вольт: **1 Ф = 1 Кл/1 В**.

Значення ємності тіла 1 Ф дуже велике, тому на практиці використовують одиниці ємності, кратні фараду:

1 мікрофарад = 1 мкФ = 10^{-6} Ф; 1 пікофарад = 1 пФ = 10^{-12} Ф.

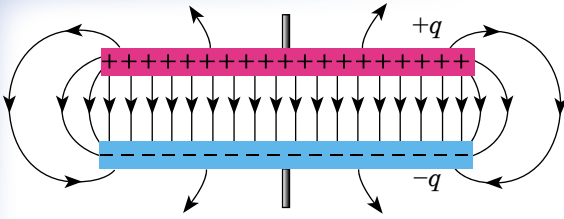
Велику електроємність мають системи з двох провідників, які називають конденсаторами (від лат. *condenso* — «згущую»). Конденсатор — два провідники, розділені шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників. Провідники називають обкладками конденсатора.

Класифікують конденсатори за типом діелектрика в конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, величину втрат тощо. На малюнку 1.9 зображено конденсатори різного типу.

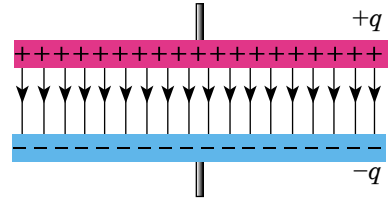
Найпростішим конденсатором є плоский конденсатор. **Плоский конденсатор** — система з двох плоских провідних плас-



Мал. 1.9



Мал. 1.10



Мал. 1.11

тин, розміщених паралельно одна одній на малій порівняно з розмірами пластин відстані і розділених шаром діелектрика.

Електричне поле плоского конденсатора в основному зосереджене між пластинами (мал. 1.10), але біля країв пластин і в навколишньому середовищі також виникає порівняно слабке електричне поле, яке називають полем розсіювання. У багатьох задачах можна нехтувати полем розсіювання і вважати, що електричне поле плоского конденсатора цілком зосереджене між його обкладками (мал. 1.11).

З урахуванням розмірів обкладок плоского конденсатора і відстані між ними електроємність плоского конденсатора визначають так:

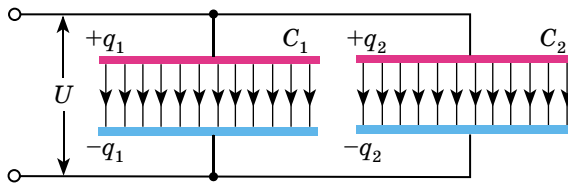
$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

14 де C — електроємність плоского конденсатора; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (електрична стала); ε — діелектрична проникність; S — площа обкладки конденсатора; d — відстань між обкладками конденсатора.

Щоб одержати потрібну електроємність, конденсатори з'єднують у батареї. Під час паралельного з'єднання конденсаторів (мал. 1.12) напруги на конденсаторах однакові: $U_1 = U_2 = U$, а заряди дорівнюють $q_1 = C_1 U$ і $q_2 = C_2 U$. Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор електроємністю C , заряджений зарядом $q = q_1 + q_2$ при напрузі між обкладками U .

Звідси випливає: $C = \frac{q_1 + q_2}{U}$ або $C = C_1 + C_2$.

Під час паралельного з'єднання конденсаторів їхні електроємності додаються.



Мал. 1.12

Якщо конденсатори з'єднати послідовно (мал. 1.13), то однаковими виявляться заряди обох конденсаторів: $q_1 = q_2 = q$, а напруги на них дорівнюватимуть $U_1 = \frac{q_1}{C}$ і $U_2 = \frac{q_2}{C}$.

Таку систему можна розглядати як єдиний конденсатор, заряджений зарядом q при напрузі між обкладками $U_1 + U_2 = U$. Отже,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ або } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Під час послідовного з'єднання конденсаторів додаються їхні обернені електроємності.

Формули для паралельного та послідовного з'єднання справджуються для будь-якого числа конденсаторів, з'єднаних у батарею.

На практиці використовується також змішане з'єднання конденсаторів. Досліди показують, що заряджений конденсатор містить запас енергії.

Енергія зарядженого конденсатора дорівнює роботі зовнішніх сил, яку потрібно затратити, щоб зарядити конденсатор.

Процес зарядки конденсатора можна уявити як послідовне перенесення досить малих порцій заряду $\Delta q > 0$ з однієї обкладки на іншу (мал. 1.14).

У цей самий час одна обкладка поступово заряджається позитивним зарядом, а інша — негативним. Оскільки кожна порція переноситься в умовах, коли на обкладках уже є деякий заряд q , а між ними існує деяка різниця потенціалів $U = q/C$, то при перенесенні кожної порції Δq зовнішні сили мають виконати роботу:

$$\Delta A = U \Delta q = \frac{q \Delta q}{C}.$$

Після закінчення процесу зарядки енергія W_k конденсатора ємністю C , зарядженого зарядом q , визначається за формулою:

$$W_k = A = \frac{q^2}{2C}.$$

Якщо врахувати співвідношення $q = CU$, то формулу, яка виражає енергію зарядженого конденсатора, можна записати так:

$$W_k = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}.$$

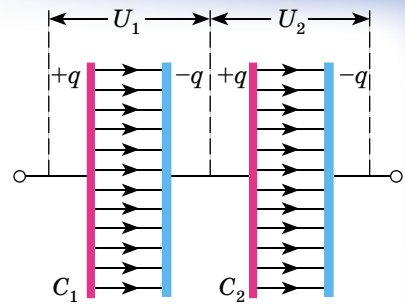
Електричну енергію W_k слід розглядати як потенціальну енергію, що накопичилася в зарядженому конденсаторі.

Конденсатори застосовують у всіх галузях електротехніки. Вони використовуються для побудови різних електричних кіл із частотно-залежними властивостями, зокрема фільтрів, кіл зворотного зв'язку, коливальних контурів тощо.

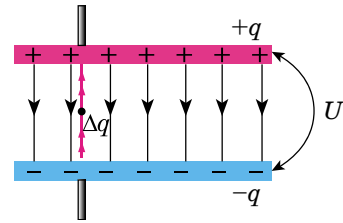
Під час швидкого розрядження конденсатора можна отримати імпульс великої потужності, наприклад у фотоспалахах, електромагнітних прискорювачах, імпульсних лазерах з оптичною накачкою.

Якщо конденсатор може тривалий час зберігати заряд, то його можна використовувати як елемент пам'яті або пристрій зберігання електричної енергії.

Конденсатори використовують як вимірвальні перетворювачі, а саме: у вимірвальному перетворювачі малих переміщень (мала зміна відстані між обкладками дуже помітно впливає на ємність конденсатора), у вимірвальному перетворювачі вологості повітря, деревини (зміна складу діелектрика спричиняє зміну ємності).



Мал. 1.13



Мал. 1.14

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Що таке електроємність провідника? Від чого вона залежить? Як вона визначається?
2. Що таке 1 фарад?
3. Який конденсатор називають плоским?
4. За якою формулою визначають електроємність плоского конденсатора?
5. Які види конденсаторів ви знаєте?
6. Як визначають електроємність конденсаторів, з'єднаних паралельно? Послідовно?
7. Що таке енергія конденсатора? Як вона визначається?
8. Наведіть приклади застосування конденсаторів у техніці.

**РОБОТА У ГРУПАХ**

Об'єднайтеся у групи та виконайте проект «Види конденсаторів та їхнє застосування в техніці».

**ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...**

- Експериментально доведено, що поверхня Землі заряджена негативно, а верхні шари атмосфери — позитивно.
- Відомо, що клітини й тканини організму також створюють навколо себе електричні поля. Вимірювання та реєстрацію цих полів широко застосовують для діагностування різних захворювань (електроенцефалографія, електрокардіографія, електроретинографія тощо).
- Ми живемо у справжньому павутинні, зітканому з величезної кількості електричних полів, і довгий час вважали, що вони не впливають на організми. Проте тривалий вплив зовнішнього електричного поля на клітини й тканини організмів призводить до негативних наслідків.

Так, під час роботи комп'ютера на екрані монітора накопичується електричний заряд, який утворює електричне поле. Електричне поле створюють також клавіатура і комп'ютерна миша, що електризуються від тертя. Під впливом цих електричних полів, навіть унаслідок короточасної роботи, у користувача змінюється гормональний фон і біоструми мозку, що спричиняє погіршення пам'яті, підвищену стомлюваність тощо. Ці перші симптоми зі збільшенням тривалості роботи за комп'ютером можуть перетворитися на захворювання нервової, серцево-судинної, імунної та інших систем організму.

- Що ж робити? Електричне поле можна послабити, наприклад підвищуючи вологість повітря або застосовуючи антистатиками. Ефективніший, але й дорожчий вихід — штучна йонізація повітря, насичення його легкими негативними йонами. Із цією метою застосовують генератори негативних йонів повітря — їх ще називають йонізаторами повітря (аеройонізаторами).

**РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ**

1. В однорідному електростатичному полі на однаковій відстані від двох пластин розміщені електрон і протон. Чи з однаковою швидкістю вони досягнуть пластин?

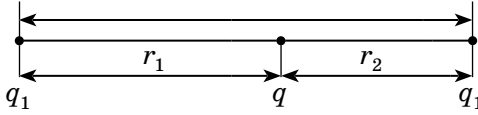
Розв'язання

Більшу швидкість матиме електрон, тому що внаслідок меншої маси він набуває значно більшого прискорення.

2. Маємо два додатні заряди $q_1 = ne$ і $q_2 = te$. Відстань між зарядами — l . Як потрібно розташувати третій заряд q , щоб він перебував у рівновазі, якщо заряди q_1 і q_2 : 1) закріплені; 2) вільні? Визначити в цьому випадку значення заряду q .

Розв'язання

1) Для того щоб заряд був у рівновазі, сила F_1 , яка діє на нього з боку заряду q_1 , має дорівнювати силі F_2 , яка діє на нього з боку заряду q_2 (мал. 1.15).



Мал. 1.15

$$\text{За законом Кулона: } \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_2 q}{r_2^2}.$$

Оскільки, що $r_1 = l - r_2$, то $\frac{q_1}{(l - r_2)^2} = \frac{q_2}{r_2^2}$, або $\frac{ne}{(l - r_2)^2} = \frac{me}{r_2^2}$, звідки

$$r_2 = \frac{l\sqrt{m}}{\sqrt{m} + \sqrt{n}}.$$

Для стійкої рівноваги заряд q має бути додатним. Якщо він зміститься з положення рівноваги ближче до заряду q_2 , то сила відштовхування з боку цього заряду збільшиться, а з боку заряду q_1 — зменшиться, і заряд q повернеться в положення рівноваги.

2) У цьому випадку заряд q має бути від'ємним, але рівновага буде нестійкою. Якщо, наприклад, заряд q_1 зміститься в бік заряду q , то сила притягання з боку заряду q перевищить силу відштовхування з боку заряду q_2 і рівновага порушиться, причому заряди q_1 і q зімкнуться, а заряд q_2 полетить у нескінченність.

Умовою рівноваги системи буде рівність нулю суми сил, які діють на кожний із зарядів:

$$F_1 = F_2; F_{21} = F_1; F_2 = F_{21},$$

де F_1 — сила взаємодії зарядів q і q_1 ; F_2 — сила взаємодії зарядів q і q_2 ; F_{21} — сила взаємодії зарядів q_1 і q_2 .

Із цих рівнянь з урахуванням того, що $r_1 + r_2 = l$, отримуємо значення r_1 і r_2 , як у випадку 1. Потім запишемо:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{l^2} = \frac{q q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2^2}; \quad \frac{q_1}{l^2} = \frac{q}{r_2^2}, \text{ звідки } q = q_1 \frac{m}{(\sqrt{m} + \sqrt{n})^2}.$$

3. Позитивну обкладку конденсатора електроємністю $C_1 = 1$ мкФ з'єднали з позитивною обкладкою конденсатора, електроємність якого $C_2 = 2$ мкФ, а негативну — з негативною. Визначте різницю потенціалів U на затискачах такої батареї конденсаторів, якщо до з'єднання напруга на першому конденсаторі була $U_1 = 300$ В, а на другому — $U_2 = 150$ В.

Розв'язання

Заряд першого конденсатора дорівнював до з'єднання $q_1 = C_1 U_1$, а після з'єднання — $q_{1к} = C_1 U$. Відповідно заряд другого конденсатора був до з'єднання $q_2 = C_2 U_2$, після — $q_{2к} = C_2 U$. Оскільки з'єднано однойменно заряджені обкладки, то за законом збереження заряду: $q_{1к} + q_{2к} = q_1 + q_2$.

$U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}$. Підставивши значення фізичних величин, отримаємо 200 В.

Відповідь: $U = 200$ В.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

- 1.1. Чому лінії напруженості електричного поля не перетинаються?
- 1.2. Зобразіть картину ліній напруженості електричного поля між двома зарядами у випадках: а) q і $-q$; б) q і q ; в) q і $2q$.
- 1.3. Заряд $0,1$ мкКл перебуває в електричному полі в точці напруженістю 5 Н/Кл. Яка сила діє на цей заряд?
- 1.4. У деякій точці поля на заряд 2 нКл діє сила $0,4$ мкН. Визначте напруженість поля в цій точці.
- 1.5. Яке значення точкового заряду, на який однорідне електричне поле напруженістю 600 кН/Кл діє із силою $0,3$ мН?
- 1.6. На якій відстані від заряду $1 \cdot 10^{-8}$ Кл напруженість поля дорівнює 300 Н/Кл?
- 1.7. Ємність конденсатора дорівнює 40 пФ. Виразіть цю ємність у фарадах та мікрофарадах.
- 1.8. Відокремленому провіднику надали заряд $1 \cdot 10^{-9}$ Кл, зарядивши його до потенціалу 100 В. Визначте електроємність провідника у фарадах, мікрофарадах і пікофарадах.
- 1.9. На конденсаторі написано: 100 пФ; 300 В. Чи можна використати цей конденсатор для накопичення заряду 50 нКл?
- 1.10. До якої напруги зарядили конденсатор ємністю 20 мкФ, якщо він отримав заряд 4 мКл?
- 1.11. Найбільша ємність шкільної демонстраційної батареї конденсаторів — 58 мкФ. Який заряд вона накопичить, якщо її приєднати до полюсів джерела струму напругою 50 В?
- 1.12. Як зміниться електроємність шкільного розсувного конденсатора, якщо збільшити відстань між його пластинами?
- 1.13. Площа пластин слюдяного конденсатора 15 см², а відстань між пластинами — $0,02$ см. Яку ємність має конденсатор?
- 1.14. Пластини конденсатора мають площу по 10 см². Яка товщина діелектрика (слюди) між ними, коли ємність конденсатора становить 500 пФ?
- 1.15. Визначте енергію конденсатора, якщо його ємність $0,25$ мкФ, а різниця потенціалів між пластинами 400 В. Який заряд має конденсатор?
- 1.16. Ємність конденсатора 6 мкФ, а заряд $3 \cdot 10^{-4}$ Кл. Визначте енергію електричного поля конденсатора.
- 1.17. Заряд конденсатора $3,2 \cdot 10^{-3}$ Кл, напруга на обкладках 500 В. Визначте енергію електричного поля конденсатора.

Рівень Б

- 1.18. Визначте напруженість електричного поля в точці, віддаленій на відстань 10 см від точкового заряду, якщо в точці, віддаленій від нього на 5 см, напруженість дорівнює 40 В/м.
- 1.19. Відстань між двома точковими зарядами $+1 \cdot 10^{-7}$ і $-5 \cdot 10^{-8}$ Кл дорівнює 10 см. Яка напруженість поля, створеного цими зарядами, у точці, що міститься посередині між ними?
- 1.20. Два однакові точкові заряди по 3 нКл розміщені на відстані 6 см один від одного. Визначте напруженість поля в точці, що перебуває на відстані 5 см від кожного із зарядів.
- 1.21. Напруженість поля між двома горизонтально розміщеними пластинами дорівнює $6 \cdot 10^3$ Н/Кл. У полі цих пластин зависла заряджена порошок масою $3 \cdot 10^{-8}$ г. Який заряд порошок?
- 1.22. Наблизьте палець до кульки зарядженого електроскопа. Листочки зійдуться. Заберіть палець — і листочки знову розійдуться. Як пояснити це явище?

1.23. Конденсатор невідомої ємності C зарядили до напруги 100 В. Потім його з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 5 мкФ. При цьому напруга на першому конденсаторі зменшилася на 25 В. Визначте ємність C .

1.24. З якою силою взаємодіють пластини плоского конденсатора площею 100 см^2 , якщо різниця потенціалів між ними 500 В, а відстань 3 мм?

1.25. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 1 см, заряджено до напруги 200 В. Якою буде напруга на конденсаторі, якщо його пластини розсунути до 10 см?

1.26. Визначте заряд плоского конденсатора ємністю 0,04 мкФ, якщо напруженість поля в конденсаторі 320 В/см, а відстань між пластинами — 2 мм.

1.27. У скільки разів зміниться енергія конденсатора, якщо напругу на ньому збільшити в 4 рази?

1.28. Площа кожної з пластин плоского конденсатора становить 200 см^2 , а відстань між ними дорівнює 1 см. Визначте енергію поля, якщо напруженість 500 кВ/м.

1.29. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його пластинами розмістити провідну пластинку, товщиною якої можна знехтувати? Як буде впливати на ємність конденсатора місце розташування розміщеної пластинки? Чи буде впливати на зміну ємності товщина розміщеної пластинки?

1.30. Пластини плоского повітряного конденсатора площею S притягуються із силою F . Визначте заряд конденсатора.

1.31. Плоский повітряний конденсатор із площею пластин S і відстанню між ними d заряджено до напруги U , після чого від'єднано від джерела. Яку роботу треба виконати, щоб розсунути пластини до відстані d_1 ?

Є над чим замислитися

1.32. Два точкові однойменні заряди $2 \cdot 10^{-7}$ Кл і $3 \cdot 10^{-7}$ Кл розташовані на деякій відстані у вакуумі. Щоб зменшити відстань між ними на 30 см, треба виконати роботу 10^{-2} Дж. Визначте початкову відстань між зарядами.

1.33. Протон, що летить у напрямку до двічі йонізованого ядра атома Гелію, у деякій точці поля з напруженістю 1 МВ/м має швидкість 1 км/с. На яку найменшу відстань зможе протон наблизитися до ядра?

1.34. Маленьку кульку, маса якої 1 г і заряд 0,15 мкКл, кинуту з далекої відстані зі швидкістю 1 м/с у сферу, заряджену зарядом 0,3 мкКл. За якого найменшого значення радіуса сфери кулька досягне її поверхні?

1.35. Після з'єднання зарядженого повітряного конденсатора з таким самим незарядженим, але заповненим діелектриком, напруга на ньому зменшилась у 8 разів. Визначте діелектричну проникність діелектрика.

§ 5. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО. З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що електричним струмом називають упорядкований (напрявлений) рух заряджених частинок. Електричний струм виникає, коли впорядковано переміщуються вільні електрони в металі або йони в електролітах тощо. Але якщо переміщувати в цілому нейтральне тіло, то, незважаючи на впорядкований рух величезної кількості електронів і атомних ядер, електричний струм не виникає. Повний заряд, який переноситься через будь-який переріз провідника, дорівнюватиме нулю, бо заряди різних знаків переміщуються з однаковою середньою швидкістю.

Електричний струм має певний напрямок. **За напрямок струму беруть напрямок руху позитивно заряджених частинок.** Якщо струм утворився рухом негативно заряджених частинок, то напрямок струму вважають про-

тилежним до напрямку руху частинок. Розрізняють постійний і змінний струми. При постійному струмі через провідник у будь-якій його ділянці із часом проходить однаковий за значенням заряд і в одному напрямку. Для існування електричного струму в певному середовищі повинні виконуватися такі умови: 1) наявність вільних носіїв заряду (електронів, йонів тощо); 2) наявність у середовищі причин, унаслідок яких вільні заряджені частинки переміщуються в певному напрямку, наприклад наявність електричного поля; 3) наявність замкненого кола.

Струм, якщо він існує, обов'язково призводить або до виникнення магнітного поля, або до нагрівання провідника, або до зміни його структури.

Ви вже знаєте, що будь-який заряджений провідник має певний потенціал і в усіх точках його поверхні цей потенціал однаковий. **Коли ж у провіднику існує струм, то потенціал у його різних точках не буде однаковий — він зменшується (спадає) у напрямку струму.**

У провідниках майже завжди потрібно підтримувати струм протягом тривалого часу, тобто на їхніх кінцях різниця потенціалів не повинна зменшуватися. Пристрої, у яких відбувається розділення заряджених частинок, за рахунок чого і підтримується необхідна різниця потенціалів, називають **джерелами струму**. Сили, які діють у джерелі струму, переносять заряд від точок з меншим потенціалом до точок з більшим потенціалом, виконуючи в цей час роботу. Отже, джерело струму є джерелом енергії. Напругу на кінцях джерела (різницю потенціалів) ще називають енергетичною характеристикою струму. У гальванічних елементах та акумуляторах в електричну енергію перетворюється енергія хімічних взаємодій, у термогенераторах — теплова енергія тощо.

Електричні кола, у яких підтримується струм і використовуються його властивості, складаються із джерела струму, споживачів (нагрівники, освітлювальні прилади, електродвигуни тощо), вимірювальних і регулювальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками.

Кількісною характеристикою електричного струму є його сила I .

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

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

де Δq — заряд, що переноситься вільними носіями заряду через поперечний переріз провідника; Δt — інтервал часу перенесення заряду. Сила струму вказує, скільки заряджених частинок пройшло через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Для створення та існування електричного струму потрібна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) — позитивно або негативно заряджених, не зв'язаних в єдину електрично нейтральну систему, та сили, що створює і підтримує їхній упорядкований рух. Як правило, такою силою є сила з боку електричного поля всередині провідника, яке визначається електричною напругою на кінцях провідника.

Для того щоб струм був тривалий, енергія електричного поля має весь час поповнюватися. Тобто потрібен такий пристрій, у якому певний вид енергії безперервно перетворюється на енергію електричного поля. Такий пристрій називають джерелом електрорушійної сили, або **джерелом струму**.

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що сила струму на ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі й обернено пропорційна опору

цієї ділянки: $I = \frac{U}{R}$. Нагадаємо, що опір характеризує здатність провідника протидіяти напрямленому руху заряджених частинок. Уперше цю

залежність сили струму від напруги й опору у 1827 р. встановив німецький учений **Георг Ом** (1789–1854). На його честь її називають законом Ома для ділянки кола. Іноді формулу для закону Ома записують так: $U = IR$.

Добуток IR називають **спадом напруги** на ділянці кола. Якщо вона не містить джерела струму, то поняття напруги і спаду напруги збігаються.

Електрична енергія від джерела струму передається по провадах споживачам: електродвигунам, лампам, нагрівальним приладам, телевізорам, радіоприймачам тощо. За допомогою з'єднувальних провідників і вимикачів в електричне коло часто вмикають також вимірювальні прилади: амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники електроенергії тощо.

Найпоширенішими і найпростішими типами з'єднання провідників є **послідовне** і **паралельне** з'єднання.

Під час послідовного з'єднання електричне коло не має розгалужень. Усі провідники увімкнено в коло по черзі, один за одним. На малюнку 1.16 показано послідовне з'єднання двох провідників, опори яких R_1 і R_2 (наприклад, з двома лампочками, двома обмотками електродвигуна тощо).

Сила струму в обох провідниках однакова: $I = I_1 = I_2$, оскільки в провідниках під час проходження постійного струму електричний заряд не накопичується і через будь-який переріз провідника за певний інтервал часу проходить один і той самий заряд.

Напруга (або різниця потенціалів) на кінцях цієї ділянки кола складається з напруг на першому і другому провідниках: $U = U_1 + U_2$.

Застосувавши закон Ома для всієї ділянки в цілому і для ділянок з опорами R_1 і R_2 , можна довести, що повний опір під час послідовного з'єднання такий:

$$R = R_1 + R_2$$

Аналогічну формулу застосовують і для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.

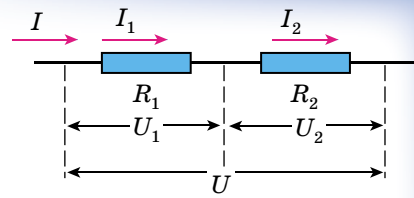
Напруги на провідниках і їхні опори у випадку послідовного з'єднання пов'язані співвідношенням:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

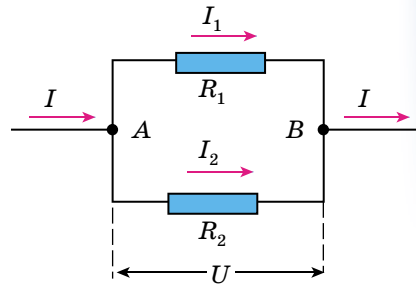
На малюнку 1.17 показано паралельне з'єднання двох провідників, опори яких R_1 і R_2 . У цьому випадку електричний струм I розгалужується на дві частини. Силу струму в першому і другому провідниках позначимо I_1 і I_2 . Оскільки в точці A — розгалуженні провідників (цю точку називають вузлом) — електричний заряд не накопичується, то заряд, що надходить за одиницю часу у вузол, дорівнює заряду, що виходить з вузла за той самий час. Отже, $I = I_1 + I_2$.

Напруга U на провідниках, з'єднаних паралельно, однакова.

В освітлювальній мережі підтримується напруга 220 В. На цю напругу розраховані прилади, що використовують електричну енергію. Тому паралельне з'єднання — найпоширеніший спосіб з'єднання різних споживачів. У цьому випадку вихід з ладу одного приладу не впливає на роботу інших, тоді як під час послідовного з'єднання вихід з ладу одного приладу розмикає все коло.



Мал. 1.16

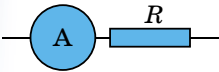


Мал. 1.17

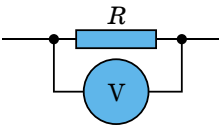
Застосовуючи закон Ома для ділянок з опорами R_1 і R_2 , можна довести, що величина, обернена до повного опору ділянки AB , дорівнює сумі величин, обернених до опорів окремих провідників: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Звідси $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. Ці формули можна застосувати до паралельного з'єднання будь-якої кількості провідників.

Сили струму в провідниках і їхні опори у випадку паралельного з'єднання пов'язані співвідношенням: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$.



Мал. 1.18



Мал. 1.19

На практиці, щоб виміряти силу струму в провіднику, амперметр вмикають послідовно до цього провідника (мал. 1.18). Але треба мати на увазі, що сам амперметр має деякий опір R_a . Тому опір ділянки кола з увімкнутим амперметром збільшується, і за незмінної напруги сила струму зменшується згідно із законом Ома. Щоб амперметр якомога менше впливав на силу струму, який вимірюють, його опір роблять дуже малим. Це слід пам'ятати і ніколи **не намагатися** «виміряти силу струму» в мережі, вмикаючи амперметр у розетку: станеться коротке замикання. Сила струму за малого опору приладу досягне такого великого значення, що обмотка амперметра згорить.

Щоб виміряти напругу на ділянці кола з опором R , до нього паралельно вмикають вольтметр. Напруга на вольтметрі збігатиметься з напругою на ділянці кола (мал. 1.19). Якщо опір вольтметра R_b , то після його вмикання в коло опір ділянки вже буде не R , а $R = \frac{RR_b}{R + R_b} < R$.

Тому напруга, яку вимірюють на ділянці кола, зменшиться. Щоб вольтметр помітно не спотворював вимірюваної напруги, його опір має бути набагато більший порівняно з опором ділянки кола, на якій вимірюється напруга. Вольтметр можна вмикати в коло, не ризикуючи, що він згорить, якщо він розрахований на напругу, яка перевищує напругу в мережі.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

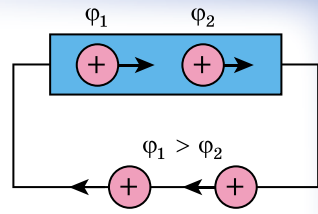
1. Що таке електричний струм? Який його напрямок?
2. Які є види електричного струму?
3. Як дізнатися, що струм в провіднику є?
4. Як визначається сила струму, що проходить через поперечний переріз провідника?
5. Назвіть умови створення та існування електричного струму в колі.
6. Запишіть закони послідовного і паралельного з'єднання провідників.
7. Чому опір амперметра має бути малий, а опір вольтметра — великий?

§ 6. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОВНОГО КОЛА. ПРАВИЛО КІРХГОФА

Якщо у провіднику існує електричне поле, але не створено умов для його підтримки, то переміщення носіїв струму (електронів, йонів) за короткий час призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм

припиниться. Як ви вже знаєте, за напрямком струму взято напрямком руху позитивно заряджених носіїв. Вони рухаються в напрямку напруженості поля в провіднику, тобто в бік зменшення потенціалу.

Переміщення носіїв струму в провіднику без підтримки електричного поля призводить до вирівнювання потенціалів уздовж провідників. Тому, для того щоб підтримувати струм тривалий час, треба від кінця провідника з меншим потенціалом (носії струму вважаються позитивно зарядженими) безперервно відводити заряди, які приносяться до цього кінця провідника струмом. А до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити. Інакше кажучи, потрібно зробити кругообіг зарядів, щоб вони рухалися замкненим контуром (мал. 1.20).



Мал. 1.20

Здійснити такий рух носіїв струму тільки за наявності електростатичного поля не можна. Адже рух позитивно заряджених носіїв струму від кінця провідника з меншим потенціалом до кінця провідника з більшим потенціалом відбувається проти дії кулонівських сил — сил електростатичного поля. Отже, у замкненому колі мають бути ділянки, де перенесення позитивних зарядів відбувається проти сил електростатичного поля. Переміщення носіїв заряду на цих ділянках можливе лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які називають **сторонніми силами**.

Отже, для підтримки струму потрібні сторонні сили, що діють або в усьому колі, або на окремих його ділянках. Вони можуть спричинятися хімічними процесами, дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі або через межу між двома різнорідними речовинами, електричними або неелектростатичними полями, які породжуються змінними в часі магнітними полями.

Сторонні сили можна схарактеризувати роботою, яку вони виконують над зарядами, що переміщуються по колу.

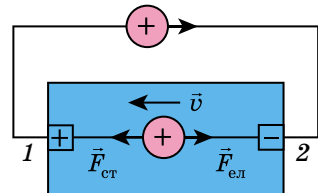
Фізичну величину, яка визначається роботою сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом, називають *електрорушійною силою* (ЕРС), що діє в колі або на його ділянці.

Позначають ЕРС літерою \mathcal{E} . Тоді $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$. Одиницею ЕРС у СІ є **1 вольт (1 В):**

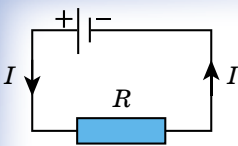
1 В = 1 Дж/1 Кл.

У визначенні ЕРС можна говорити про ту ділянку кола, де діють сторонні сили, а також можна говорити про все замкнене коло. Ці визначення еквівалентні.

Дійсно, під час руху зарядів між полюсами джерела в зовнішньому колі роботу виконують тільки електростатичні сили $F_{\text{ел}}$. У внутрішній частині кола роботу виконують як електростатичні, так і сторонні сили $F_{\text{ст}}$ (мал. 1.21). При цьому робота електростатичних сил A_{12} у зовнішньому колі дорівнює роботі електростатичних сил A_{21} між тими самими полюсами всередині джерела, взятій з протилежним знаком: $A_{12} = -A_{21}$. Повна робота в усьому колі складається із суми робіт електростатичних сил у зовнішній ділянці кола і сил у внутрішній ділянці. Остання складається з роботи електростатичних сил A_{21} і роботи сторонніх сил $A_{\text{ст}}$.



Мал. 1.21



Мал. 1.22

Повна робота всіх сил у повному колі дорівнює роботі тільки сторонніх сил, де вони діють.

Сила струму, напруга і ЕРС — величини скалярні. Вони можуть бути як позитивними, так і негативними залежно від вибору напрямку обходу контуру зі струмом. Якщо напрямок струму збігається з вибраним позитивним напрямком обходу кола, то сила струму є позитивною (мал. 1.22). ЕРС джерела позитивна, якщо

з вибраним напрямком обходу контуру збігається напрямок сторонніх сил у джерелі.

ЕРС зосереджена тільки всередині джерела, а її значення не залежить від сили струму в колі.

Розглянемо найпростіше повне або замкнене коло, яке складається із джерела струму (гальванічного елемента або акумулятора чи генератора струму), споживача струму — резистора опором R (мал. 1.22). Будь-яке джерело струму має ЕРС \mathcal{E} і опір r , який називають **внутрішнім опором** на відміну від зовнішнього опору R кола. У гальванічних елементах r — це опір розчинів електролітів і електродів, у генераторах струму — опір обмоток.

Покажемо зв'язок сили струму I в колі, ЕРС \mathcal{E} і повного опору $R + r$ кола. Для цього скористаємося законом збереження енергії і законом Джоуля–Ленца (ви вивчали у 8-му класі): $Q = I^2 R \Delta t$.

Нехай за час Δt через поперечний переріз провідника пройде заряд Δq . Тоді роботу сторонніх сил з переміщення заряду A_q можна визначити так: $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} \Delta q$. Скориставшись визначенням сили струму $\Delta q = I \Delta t$, отримаємо: $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t$.

За рахунок цієї роботи у внутрішній і зовнішній ділянках кола, опори яких r і R , виділяється кількість теплоти, яка за законом Джоуля–Ленца дорівнює:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t.$$

Згідно із законом збереження енергії $A = Q$. Прирівнявши рівняння $A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t$ і $Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t$, отримаємо: $\mathcal{E} = IR + Ir$.

Добуток сили струму й опору ділянки кола IR називають спадом напруги на цій ділянці. Отже, ЕРС \mathcal{E} дорівнює сумі спадів напруг у внутрішній і зовнішній ділянках повного кола.

У замкненому колі постійного струму сума спадів напруг у зовнішній і внутрішній ділянці кола є величиною сталою і дорівнює ЕРС джерела струму.

Перепишемо вираз $\mathcal{E} = IR + Ir$ в іншому вигляді: $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$.

Сила струму в повному колі визначається відношенням ЕРС кола до його повного опору.

Цей закон отримав назву **закона Ома для повного кола**.

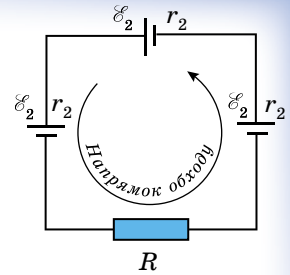
Отже, сила струму в повному колі залежить від трьох величин: ЕРС \mathcal{E} , опору R зовнішньої і опору r внутрішньої ділянок кола. Внутрішній опір джерела струму не впливає помітно на силу струму, якщо він дуже малий порівняно з опором зовнішньої частини кола ($R \gg r$). При цьому напруга на затискачах джерела приблизно дорівнює ЕРС: $U = IR \approx \mathcal{E}$.

Проте під час короткого замикання ($R \rightarrow 0$) сила струму в колі визначається саме внутрішнім опором джерела і може досягти при ЕРС у кілька вольтів великого значення, якщо опір малий (наприклад, $r \approx 0,1 - 0,001$ Ом). Провідники при цьому плавляться, а джерело виходить з ладу.

Правило Кірхгофа: якщо коло містить кілька послідовно з'єднаних елементів, ЕРС яких $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \dots, \mathcal{E}_n$, то повна ЕРС кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих елементів. Для визначення знака ЕРС будь-якого дже-

рела струму треба спочатку вибрати додатний напрямок обходу контуру. На малюнку 1.23 додатним вважається напрямок обходу проти руху стрілки годинника.

Якщо під час обходу кола переходять від негативного полюса джерела до позитивного, то $\mathcal{E} > 0$. Сторонні сили всередині джерела виконують при цьому додатну роботу. Якщо ж під час обходу кола переходять від позитивного полюса джерела до негативного, то $\mathcal{E} < 0$. Сторонні сили всередині джерела виконують від'ємну роботу. Для кола на малюнку 1.23 під час обходу контуру проти руху стрілки годинника:



Мал. 1.23

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Якщо $\mathcal{E} > 0$, то згідно з формулою $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ сила струму $I > 0$, тобто напрямок струму збігається з напрямком обходу контуру. Якщо $\mathcal{E} < 0$, навпаки, напрямок струму протилежний напрямку обходу контуру. Повний опір кола $R_{\text{п}}$ дорівнює сумі всіх опорів:

$$R_{\text{п}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що прийнято за напрямок руху струму?
2. Які сили називають сторонніми?
3. Чим можуть бути зумовлені сторонні сили?
4. Що таке електрорушійна сила?
5. Чому дорівнює повна робота всіх сил у повному колі?
6. Від чого не залежить ЕРС і де вона зосереджена?
7. Що називають спадом напруги в ділянці кола?
8. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
9. Від чого залежить знак ЕРС у законі Ома для повного кола?
10. Чому дорівнює повний опір замкненого кола?

§ 7. РОБОТА ТА ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

При впорядкованому русі заряджених частинок у провіднику електричне поле виконує роботу. Цю роботу називають роботою струму.

Якщо розглядати довільну ділянку електричного кола — однорідний провідник: нитку лампи розжарювання, резистор, обмотку електродвигуна тощо, то можна з'ясувати, що за інтервал часу Δt через поперечний переріз провідника S проходить заряд Δq . Тоді електричне поле виконує

роботу: $A = \Delta q U$. Оскільки $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то цю роботу визначають за формулою:

$$A = IU\Delta t,$$

де I — сила струму в колі; U — напруга на ділянці кола; Δt — інтервал часу, протягом якого виконувалася робота.

Робота електричного струму на ділянці кола визначається добутком сили струму, напруги та інтервалу часу, протягом якого ця робота виконувалася.

Згідно із законом збереження енергії ця робота має дорівнювати зміні енергії розглядуваної ділянки кола. Тому енергія, яка виділяється на цій

ділянці кола за інтервал часу Δt , дорівнює роботі електричного струму: $A = IU\Delta t$.

Якщо на ділянці кола не виконується механічна робота і струм не чинить хімічних дій, то відбувається тільки нагрівання провідника, який віддає теплоту навколишньому середовищу.

Як же це відбувається? Відомо, якщо електрон потрапляє в електричне поле, то він починає рухатися з прискоренням. Після зіткнення з йонами кристалічної ґратки електрони передають йонам свою енергію, і внаслідок цього енергія хаотичного руху йонів біля положень рівноваги збільшується. Це свідчить про збільшення внутрішньої енергії провідника, температура якого підвищується, і він починає передавати теплоту навколишнім тілам. Через невеликий інтервал часу після замикання кола процес установлюється, і температура із часом перестає змінюватися. До провідника за рахунок роботи електричного поля безперервно надходить енергія, його внутрішня енергія залишається незмінною, оскільки провідник передає навколишнім тілам кількість теплоти, яка дорівнює роботі електричного струму. Отже, співвідношення $A = IU\Delta t$ для роботи струму у випадку однорідного провідника визначає кількість теплоти, що передається провідником іншим тілам.

Якщо у формулі $A = IU\Delta t$ напругу записати через силу струму або силу струму через напругу, скориставшись законом Ома для ділянки кола, то отримаємо три еквівалентні формули для роботи електричного струму:

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

26

Формулу $A = I^2 R\Delta t$ зручно використовувати для кола з послідовним з'єднанням провідників, тому що сила струму в усіх провідниках однакова.

Для паралельного з'єднання краще використовувати

формулу $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$, тому що напруга на всіх провідниках

однакова.

Закон, що визначає кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом у навколишнє середовище, уперше експериментально встановили англійський учений Джеймс Джоуль (1818–1889) і російський учений Емілій Ленц (1804–1865), тому він і отримав назву закону Джоуля–Ленца.



Джеймс
Джоуль



Емілій
Ленц

Кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом, визначається добутком квадрата сили струму, опору провідника та інтервалу часу проходження струму по провіднику:

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

де Q — кількість теплоти, що виділилася у провіднику; I — сила струму в провіднику; R — електричний опір провідника; Δt — інтервал часу проходження струму по провіднику.

Закон Джоуля–Ленца виведено із закону збереження енергії. Формула $A = I^2 R\Delta t$ дає змогу визначити кількість теплоти, що виділяється на будь-якій ділянці електричного кола, яке складається з будь-яких провідників.

Будь-який споживач електричного струму (лампочка, електродвигун, електродзвінок тощо) розрахований на використання певної енергії за одиницю часу. Тому разом з роботою струму важливе значення має поняття потужності електричного струму.

Потужність електричного струму визначається відношенням роботи струму за інтервал часу Δt до цього інтервалу часу:

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

Цей вираз для потужності можна подати в кількох еквівалентних формах, використовуючи закон Ома для ділянки кола: $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.

Для більшості електроприладів зазначено потужність, яку вони споживають, на їхньому корпусі або в технічних паспортах.

Як відомо, ідеальних машин і механізмів не існує. Тобто не існує машин і механізмів, які б повністю перетворювали один вид енергії в інший чи генерували б енергію. Під час роботи пристрою обов'язково частина затраченої енергії йде на подолання небажаних сил опору чи просто розсіюється в навколишнє середовище. Отже, лише частина енергії, яку ми затратили, йде на виконання корисної роботи, для виконання якої і було створено цей пристрій.

Фізичну величину, що показує, яка частина корисної роботи в затраченій, називають коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Інакше кажучи, ККД показує, як ефективно використовується затрачена робота під час її виконання, наприклад, електричним приладом.

ККД — фізична величина, що характеризує ефективність електричного приладу і показує, яка частина корисної роботи в затраченій.

27

ККД визначається (як і в механіці) за формулою:

$$\eta = \frac{A}{A_3} 100 \% = \frac{P}{P_3} 100 \%,$$

де A — корисна робота; A_3 — затрачена робота; P — корисна потужність; P_3 — затрачена потужність.

Перш ніж визначити ККД деякого пристрою, потрібно визначити, що є корисною роботою (для чого створено пристрій) і що є затраченою роботою (яка робота виконується або яка енергія витрачається для виконання корисної роботи).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

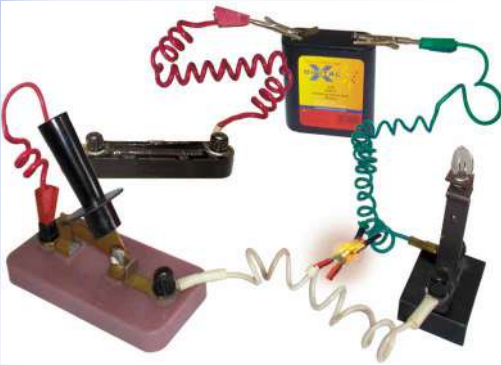
1. Що називають роботою електричного струму? За якими формулами вона визначається?
2. Як пов'язана робота електричного струму з потужністю споживача струму?
3. Як можна визначити потужність струму?



Дослідіть та опишіть, як працюють електровимірвальні прилади, зокрема лічильник електроенергії.

§ 8. ЗАХОДИ ТА ЗАСОБИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИСТРОЯМИ

Будь-яке електричне коло розраховано на певну силу струму. Якщо з якоїсь причини сила струму в колі перевищить допустиму, то дроти можуть перегрітися, а їхня ізоляція — спалахнути.



Мал. 1.24

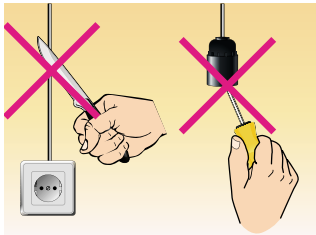
жаряться і світитимуться (мал. 1.24) доти, доки ми не розімкнемо коло або вони не перегорять зі спалахом.

Коротким замиканням називають з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором ділянки кола.

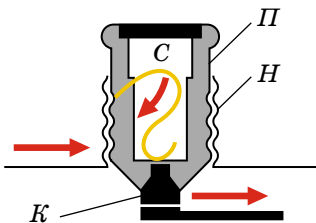
Коротке замикання може виникнути, наприклад, під час ремонту проводки під струмом (мал. 1.25) або в разі випадкового зіткнення оголених проводів.

28

Опір кола під час короткого замикання незначний, тому в колі різко зростає сила струму, від чого проводи можуть спалахнути. Для уникнення цього в електромережу обов'язково вмикають **запобіжники**.



Мал. 1.25



Мал. 1.26



Мал. 1.27

Причиною значного збільшення сили струму в колі може бути одночасне вмикання багатьох потужних споживачів струму (наприклад, електроплитки, електропраски, пральної машини, водонагрівника) або **коротке замикання**.

Дослід. Складемо електричне коло із джерела струму, електричної лампи, ключа. Один із проводів цього кола складається з тоненьких провідників. Замкнено ключ — лампа світитиметься. Тепер до затискачів лампи приєднаємо провід і знову замкнемо коло. Лампа згасне, а тоненькі провідники роз-

Яке призначення і яка будова запобіжників?

Призначення запобіжників — відразу вимкнути лінію, якщо сила струму раптом стане більшою за допустиму норму.

Головною частиною запобіжника є дротина *С* з легкоплавкого металу (наприклад, зі свинцю), розміщена всередині порцелянової пробки *П*. Пробка має гвинтову нарізку *Н* і центральний контакт *К*. Нарізку з'єднано із центральним контактом свинцевою дритою. Пробку вкручують у патрон, який міститься всередині порцелянової коробки (мал. 1.26).

Отже, свинцева дротина є частиною загального кола. Товщина свинцевих дротин розрахована так, що вони витримують певну силу струму, наприклад 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 25, 32 А (мал. 1.27). Якщо сила струму в колі перевищить допустиме значення, то свинцева дротина розплавиться і коло розімкнеться.

Запобіжники з провідником, що плавиться, називають **плавкими запобіжниками**.

На малюнку 1.28 зображено плавкий запобіжник із вставкою, яку в разі перегорання можна замінювати.

У різних приладах застосовують різні запобіжники (мал. 1.29). На малюнку 1.30 показано запобіжник, дія якого ґрунтується не на плавленні, а на тепловому розширенні тіл під час нагрівання.



Мал. 1.28



Мал. 1.29



Мал. 1.30

Звичайно, розглянуті запобіжники сьогодні використовують рідко, але ми розглянули їх будову з точки зору фізики.

Перераховані запобіжники витіснили так звані автомати (мал. 1.31), дія яких ґрунтується на тепловому розширенні тіл під час нагрівання. Коли в мережі виникає коротке замикання, автомат миттєво вимикається. Автомати зручні тим, що їх можна монтувати в електричних щитках цілими пакетами (мал. 1.31).

Під час роботи з електроприладами потрібно суворо й неухильно дотримуватися застережних заходів. Якщо цим нехтувати, то вашому життю загрожуватиме смертельна небезпека внаслідок можливої електротравми. **Електротравма — ураження людини електричним струмом.** Вона виникає під час контакту тіла людини з електричним кабелем, приладом чи устаткуванням, що перебувають під напругою за умови їхньої несправності або порушень правил безпеки під час їхнього ремонту й експлуатації.

У разі ураження електричним струмом має значення його сила, напруга, частота, а також багато інших чинників: місце ураження, час впливу струму на організм, стан навколишнього середовища, особливості організму, шкіри, одяг постраждалого. Тіло людини — провідник. Під час контакту частин тіла з оголеними проводами або з устаткуванням, що перебувають під напругою, через тіло проходить струм, дія якого може бути небезпечною залежно від значення сили струму.

Струм силою 0,6–1,5 мА людина відчуває як пощипування шкіри чи як сильніші больові відчуття.

Струм силою 5–25 мА може спричиняти мимовільні непереборні судоми (скорочення м'язів), через що уражена людина не може самостійно від'єднатися від джерела небезпеки. Оскільки м'язи-згиначі сильніші за м'язи-розгиначі, то під час контакту з несправним електроприладом чи кабелем є ризик, що рука мимоволі обхопить небезпечно поверхню. Зрозуміло, що краще, якщо з увімкненим електроприладом відбувся контакт тильним боком долоні: ураження струмом все одно станеться, але, коли м'язи-згиначі скоротяться, рука відсмикнеться від джерела небезпеки.

Струм 50–350 мА викликає фібриляцію (безладні скорочення) серця, тобто розлад серцевої діяльності, аж до зупинки серця.

Ступінь травматизму залежить від **місця ураження** і від того, через які органи проходить струм. Є кілька напрямків проходження електричного струму через тіло людини, по лінії: нога — нога; рука — рука — нога. Найнебезпечніше, коли струм проходить через серце.

Ступінь ураження залежить і від **часу дії струму на організм**. Суттєве значення під час електротравматизму має **стан навколишнього середовища**.

Ступінь ураження залежить і від часу дії струму на організм. Суттєве значення під час електротравматизму має стан навколишнього середовища.



Мал. 1.31

Вологість, струмопровідна підлога — усе це збільшує дію струму на організм людини. Особливо небезпечно користуватися електроприладами в підсобних приміщеннях і надворі.

Наслідки електротравм залежать і від стану організму постраждалого. Сп'яніння, хворобливий стан людини, юний вік, психологічний стрес зменшують опір організму і збільшують ступінь ураження. Зрозуміло, що певний одяг, наприклад гумові рукавички або гумове взуття, можуть захистити чи суттєво послабити вплив струму на організм людини.

Нормами встановлено значення найбільшої допустимої *напруги торкання* протягом досить тривалого часу її дії: для постійного струму — 8 В (струм проходження 1 мА); для змінного струму — 2 В (струм проходження 0,3 мА). Виходячи з того, що значення електричного опору людського тіла може коливатися в межах від ста омів до кількох десятків кілоомів, безпечно вважають постійну напругу 25 В. У приміщеннях з підвищеною вологістю безпечно вважають напругу 15 В.

Навчальний фізичний кабінет у школі належить до приміщень з підвищеною небезпекою. Під час виконання лабораторних та інших робіт учні мають суворо дотримуватися правил електробезпеки, розміщених у кожному кабінеті фізики на спеціальному плакаті.

Усім, хто користується електричним обладнанням, обслуговує чи ремонтує його, завжди **треба пам'ятати про таке:**

1. Дуже небезпечно одночасно торкатися обома руками до двох оголених проводів.

2. Найнебезпечніше торкатися оголеного проводу, стоячи на землі, на вологій або бетонній підлозі.

3. Небезпечно користуватися зіпсованими електричними приладами. Їх повинні періодично перевіряти фахівці.

4. Не можна збирати, розбирати чи налагоджувати будь-що в електроприладі, не від'єднавши його від джерела струму.

5. Не можна розбирати вимикачі, розетки та інше обладнання електромережі, не викрутивши запобіжники або не вимкнувши автомат.

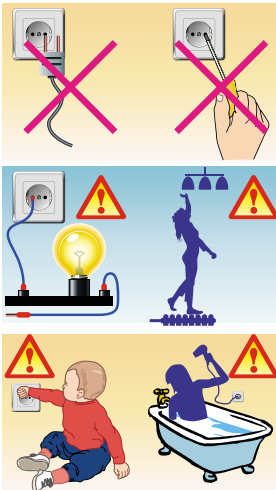
На застережних знаках (мал. 1.32) зображено, що категорично **не можна робити!**

Як надати першу допомогу ураженій електричним струмом людині?

Запам'ятайте: під час ураження електрострумом важлива кожна хвилина, слід негайно розпочати рятувальні заходи, надати ураженому першу допомогу. Насамперед потрібно звільнити людину від контакту з проводом під напругою, по якому проходить струм. Якщо це відбулося в приміщенні, де є вимикач або штепсель, потрібно вимкнути струм вимикачем або витягнути штепсельну вилку. Якщо випадок стався у приміщенні, де немає вимикача, потрібно викрутити запобіжники або вимкнути головний вимикач, що є біля лічильника.

У разі коли вимикачі розміщено дуже далеко, а людина перебуває під струмом, рятувальник насамперед повинен узути гумове взуття або надіти гумові рукавички, скинути з потерпілого сухою дерев'яною (чи з іншого ізоляційного матеріалу) палицею провід або перерізати його ножем, перерубати сокирою, «перекусити» гострозубцями. Варто, однак, пам'ятати, що в усіх перелічених інструментах ручки мають бути виготовлені з ізоляційного матеріалу.

Звільнивши потерпілого від дії струму, треба покласти його на спину, звільнити груди від одягу, викликати лікаря або «швидку допомогу», а якщо це неможливо, то потрібно зробити йому штучне дихання.



Мал. 1.32

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Якщо вийняти з води увімкнений електричний кип'ятильник, то його спіраль може перегоріти. Поясніть чому.
2. Поясніть, чи можна замість запобіжника вставити товстий провід або пучок тонких мідних провідників.
3. Поясніть, чи можна наливати воду в електрочайник, увімкнутий у мережу.
4. Чи можна знімати провід з потерпілого за допомогою мокрої палиці або металевого стержня?



З'ясуйте, які можуть бути наслідки дії електричного струму на організм людини.

**РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ**

1. Унаслідок увімкнення чергового споживача на ділянці, де вольтметром вимірювали напругу, покази його зменшилися. Чому?

Розв'язання

Споживач увімкнули паралельно ділянці, що зменшило її опір. При постійній силі струму на ділянці зменшення опору призвело до зменшення показів вольтметра.

2. Акумулятор ($\mathcal{E} = 6$ В і внутрішній опір $0,1$ Ом) живить зовнішнє коло опором $12,4$ Ом. Яка кількість теплоти виділиться за 10 хв у всьому колі?

Розв'язання

Згідно із законом Ома для повного кола сила струму в ньому $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$.

31

Кількість теплоти, що виділилася на зовнішній ділянці, визначається за формулою $Q_1 = I^2 R t$, на внутрішній — $Q_2 = I^2 r t$. Отже, повна кількість теплоти така: $Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R + r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R + r}$.

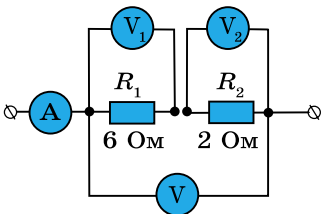
Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $Q = 1728$ Дж.
Відповідь: 1728 Дж.

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ****Рівень А**

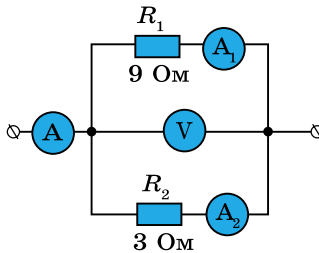
1.36. Вольтметр V_1 показує напругу 6 В. Які покази амперметра A і вольтметрів V_1 і V_2 (мал. 1.33)?

1.37. Вольтметр показує 0,9 В. Які покази амперметрів A_1 і A_2 (мал. 1.34)?

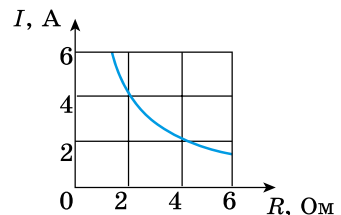
1.38. За графіком залежності сили струму в реостаті від його опору визначте напругу на реостаті (мал. 1.35).



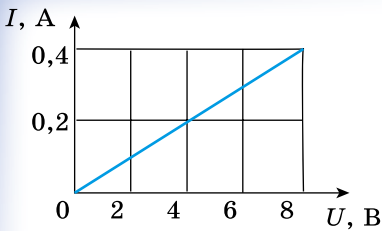
Мал. 1.33



Мал. 1.34



Мал. 1.35



Мал. 1.36

1.39. За графіком залежності сили струму в провіднику від напруги обчисліть опір провідника (мал. 1.36).

1.40. Чому нитка електролампочки сильно розжарюється, а дроти, що підводять струм, залишаються холодними, хоча через лампу і дроти проходить струм однакової сили?

1.41. В обмотці електродвигуна, опір якої $0,75 \text{ Ом}$, сила струму 20 А . Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

1.42. Під час переміщення заряду 20 Кл по провіднику опором $0,5 \text{ Ом}$ було виконано роботу в 100 Дж . Визначте час, протягом якого проходив струм.

1.43. Яку потужність споживає електролампочка, увімкнена в мережу з напругою 220 В , якщо опір її нитки в розжареному стані 484 Ом ?

1.44. Електродвигун швейної машини розвиває потужність 40 Вт . Який струм проходить через двигун, якщо він працює при напрузі 127 В ? Скільки енергії використовує двигун протягом $1,5 \text{ год}$?

1.45. Коли через електролампочку розжарення проходить струм більшої сили: відразу після вмикання її в мережу чи через кілька хвилин? Чому?

1.46. Сила струму в металевому провіднику дорівнює $0,8 \text{ А}$, переріз провідника 4 мм^2 . Вважаючи, що в 1 см^3 є $2,5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів, визначте середню швидкість їхнього упорядкованого руху.

1.47. Визначте силу струму в мідному провіднику перерізом 10 мм^2 , якщо середня швидкість упорядкованого руху вільних електронів дорівнює $4,2 \text{ мм/с}$, а їхня кількість становить $5 \cdot 10^{24}$.

1.48. Якщо лампочку живити від елемента, що має ЕРС $1,5 \text{ В}$, то робота сторонніх сил в елементі дорівнюватиме 18 Дж . Визначте заряд, що проходить за цей час через лампочку.

1.49. Гальванічний елемент з ЕРС 5 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнено на провідник опором 14 Ом . Яка напруга на кінцях провідника?

1.50. Яке значення зовнішнього опору, якщо генератор, ЕРС якого 230 В і внутрішній опір $0,1 \text{ Ом}$, подає в зовнішню частину кола напругу 220 В ?

1.51. ЕРС джерела 100 В . При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А . Визначте внутрішній опір джерела і спад напруги на ньому. Визначте напругу на затискачах джерела струму, що має ЕРС 2 В і внутрішній опір $0,5 \text{ Ом}$, до і після під'єднання до нього зовнішнього опору $4,5 \text{ Ом}$.

1.52. Який внутрішній опір елемента, якщо його ЕРС становить $1,2 \text{ В}$ і при зовнішньому опорі 5 Ом сила струму дорівнює $0,2 \text{ А}$?

Рівень Б

1.53. Мідний і залізний провідники однакової довжини та перерізу з'єднані й увімкнені в коло. Чи різняться напруги на провідниках у разі їхнього послідовного і паралельного увімкнення?

1.54. Унаслідок обробки провідника методом волочіння його довжина збільшилась у 5 разів, а площа поперечного перерізу в стільки само разів зменшилась. У скільки разів змінився опір провідника?

1.55. До мережі з напругою 24 В під'єднали два послідовно з'єднаних резистори. При цьому сила струму стала дорівнювати $0,6 \text{ А}$. Коли резистори з'єднали паралельно, сумарна сила струму стала $3,2 \text{ А}$. Визначте опір резисторів.

1.56. Два провідники під'єднують до джерела постійної напруги спочатку послідовно, а потім паралельно. Опір одного з провідників у n разів більший від іншого. Як змінюється сила струму в колі?

1.57. Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників — 5 Ом, а паралельно з'єднаних — 1,2 Ом. Визначте опір провідників.

1.58. Амперметр із внутрішнім опором 0,72 Ом розраховано на силу струму 0,5 А. Яку максимальну силу струму можна буде виміряти амперметром, якщо паралельно йому під'єднати шунт опором 0,08 Ом?

1.59. Визначте силу струму в кожному з резисторів (мал. 1.37), якщо напруга між точками А і В дорівнює 12 В, $R_1 = R_2 = 8$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 6$ Ом, $R_5 = 3$ Ом, $R_6 = 6$ Ом.

1.60. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 1.38), якщо амперметр показує 2 А, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 15$ Ом, $R_4 = 4$ Ом.

1.61. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 1.39), якщо $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 12$ Ом, $R_3 = 3$ Ом, а вольтметр показує 20 В.

1.62. Визначте розподіл струмів і напруг між опорами (мал. 1.40), якщо амперметр показує 5 А, $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 15$ Ом, $R_4 = 4$ Ом.

1.63. Електричний нагрівник має дві однакові обмотки, які можна вмикати в коло окремо і разом. Як слід з'єднати обмотки, щоб нагрівання відбувалося швидше?

1.64. Дві лампи опорами 180 і 360 Ом під'єднали паралельно в коло напругою 120 В. Яку потужність буде мати кожна з ламп? Яка буде потужність, якщо лампи з'єднати послідовно?

1.65. Трамвайний двигун споживає силу струму 110 А при напрузі 600 В і розвиває силу тяги 3 кН. Визначте швидкість руху трамваю на горизонтальній ділянці, якщо ККД = 60 %.

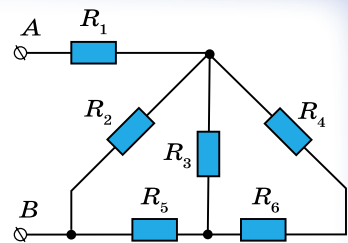
1.66. Ліфт масою 1,5 т піднімається на висоту 20 м за 0,5 хв. Напруга на затискачах двигуна становить 220 В, а його ККД — 90 %. Визначте силу струму в двигуні.

1.67. На скільки градусів нагріється алюмінієвий провідник із площею поперечного перерізу $4,5 \text{ мм}^2$ після пропускання по ньому струму силою 0,75 А протягом 20 с? Вважати, що від усієї енергії, що виділяється в провіднику під час проходження струму, навколишньому повітрю передається половина енергії.

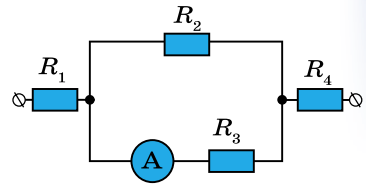
1.68. По срібному дроту, що має переріз 1 мм^2 , проходить струм силою 1 А. Обчисліть середню швидкість дрейфу вільних електронів у цьому дроті, припустивши, що кожен атом срібла дає один вільний електрон.

1.69. У 70-х роках ХХ ст. існували електронні обчислювальні машини, у яких імпульс струму від одного пристрою до іншого мав передаватися за 10 с. Чи можна було ці пристрої з'єднати дротиною завдовжки 40 см?

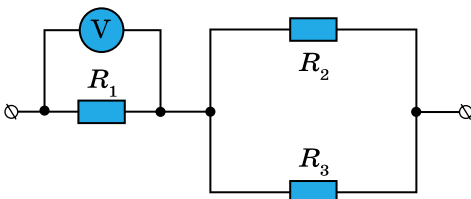
1.70. Значення ЕРС джерела струму часто визначають за показами



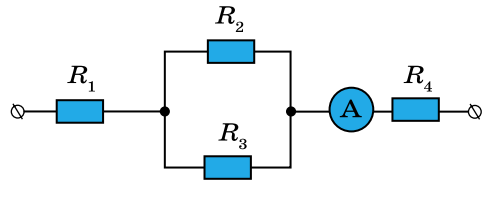
Мал. 1.37



Мал. 1.38



Мал. 1.39



Мал. 1.40

вольтметра, під'єданого до затискачів джерела. Чи точне значення ЕРС дає цей найпростіший метод її оцінки? Що показує вольтметр, під'єданий до затискачів джерела?

1.71. Батарейку для кишенькового ліхтарика замкнуто на реостат. При опорі реостата $1,65 \text{ Ом}$ напруга на ньому дорівнює $3,3 \text{ В}$, а при опорі $3,5 \text{ Ом}$ — $3,5 \text{ В}$. Визначте ЕРС і внутрішній опір батарейки.

1.72. Визначте ЕРС і внутрішній опір гальванічного елемента, якщо при зовнішньому опорі 2 Ом сила струму в колі $0,6 \text{ А}$, а при опорі 1 Ом — 1 А .

1.73. Від генератора, що має ЕРС 40 В і внутрішній опір $0,04 \text{ Ом}$, струм надходить по мідному кабелю, переріз якого 170 мм^2 , до місця електрозварювання, віддаленого від генератора на 50 м . Визначте напругу на затискачах генератора і на зварювальному апараті, якщо сила струму в колі становить 200 А .

1.74. Яка напруга на полюсах джерела струму з ЕРС, що дорівнює 1 В , якщо опір зовнішньої частини електричного кола дорівнює внутрішньому опору джерела?

Є над чим замислитися

1.75. У вашому розпорядженні батарея акумуляторів з ЕРС, що дорівнює \mathcal{E} , вольтметр і великий набір резисторів найрізноманітніших опорів R_1 . Як за допомогою цього обладнання визначити внутрішній опір r батареї? Перевірте спосіб за допомогою досліду.

1.76. Акумулятор під'єднано для заряджання в коло з напругою $12,5 \text{ В}$. Внутрішній опір акумулятора 1 Ом . Яка ЕРС акумулятора, якщо під час заряджання через нього проходить струм силою $0,5 \text{ А}$?

1.77. Дано 12 елементів з ЕРС $1,5 \text{ В}$ і внутрішнім опором $0,4 \text{ Ом}$. Як потрібно з'єднати ці елементи, щоб отримати від зібраної з них батареї найбільшу силу струму в зовнішньому колі, що має опір $0,3 \text{ Ом}$? Визначте максимальну силу струму.

34

§ 9. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ. НАДПРОВІДНІСТЬ

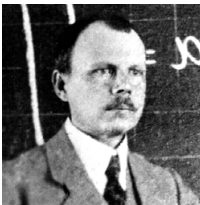
Припущення про електронну природу струму в металах було обґрунтовано експериментально на початку ХХ ст. У 1901 р. німецький фізик **Карл Рікке** (1845–1915) провів дослід і дійшов висновку, що електропровідність металів зумовлена перенесенням заряджених частинок, спільних для всіх металів, та не пов'язана з відмінністю їхніх фізичних і хімічних властивостей.

Найпереконливішими дослідями, які підтверджують електронний характер провідності металів, є дослід з визначення знака заряду та інертності заряджених частинок, що створюють струм.

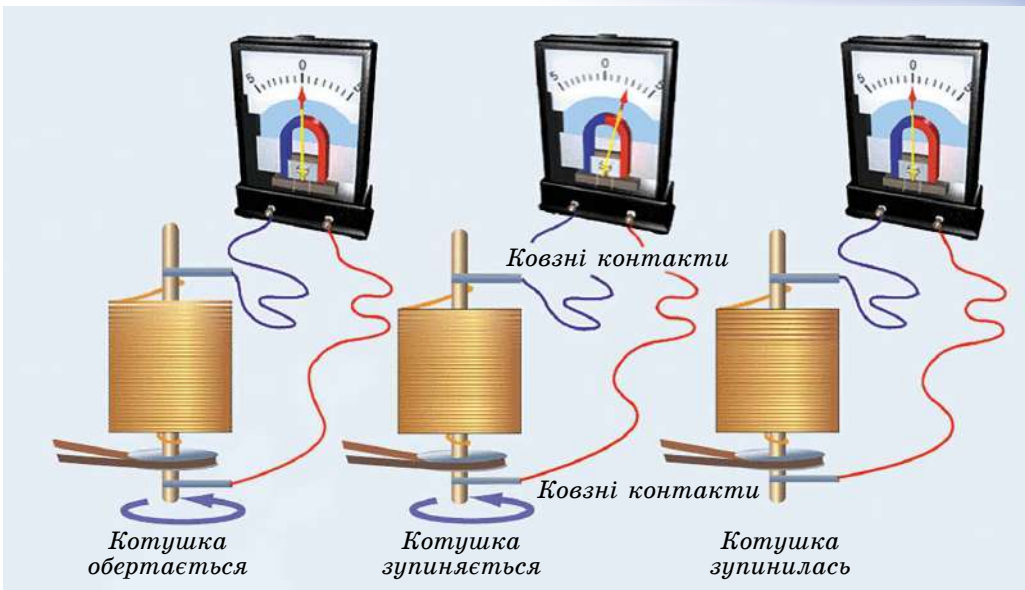
У 1913 р. видатні фізики **Леонід Мандельштам** (1879–1944) і **Микола Папалексі** (1880–1947) провели дослід.

Учені надавали котушці з провідником швидких крутильних коливань відносно осі, а кінці провідника приєднували до нерухомої телефонної трубки (мал. 1.41). У колі з'являвся електричний струм, який спричиняв тріск у телефонній трубці. Цими дослідями було підтверджено наявність у металах вільних електрично заряджених частинок, проте ці дослідження не виявляли напрямку струму і знака заряду частинок.

Дослідженнями, що стосуються електронної провідності металів, займався й український учений **Андрій Малиновський** (1884–1937). Він представив свою інтерпретацію взаємодії вільних електронів і позитивних йонів у металах. Зробив уточнення до теорії дослідів, які виконали 1916 р. англійські фізики **Чарльз Стюарт** і **Річард Толмен**.



Андрій
Малиновський



Мал. 1.41

Учені замінили телефон чутливим балістичним гальванометром, а крутильні коливання — швидким обертанням котушки з великою кількістю витків тонкого дроту навколо власної осі (мал. 1.42).

Під час рівномірного обертання котушки гальванометр не виявив електричного струму, а під час раптового гальмування спостерігалися відхилення стрілки гальванометра. Напрямок відхилення стрілки вказував на те, що струм у металах зумовлений рухом негативно заряджених частинок. Було визначено також їхній питомий заряд (відношення заряду до маси частинки):

$$\frac{e}{m} = \frac{Lv_0}{qR},$$

де e — заряд електрона; m — маса електрона; v_0 — початкова швидкість руху частинки; q — заряд частинки; L — довжина провідника; R — опір провідника.

Дослід проводився з котушками з мідного й алюмінієвого дроту.

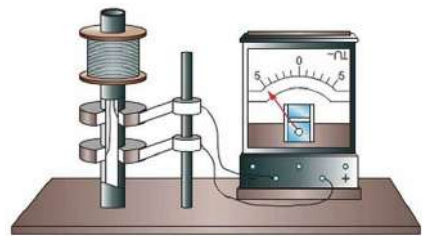
Тепер розглянемо класичну електронну теорію металів. В основі класичної теорії провідності металів є такі положення:

1. Метал як кристалічне тіло є системою позитивних йонів і вільних електронів. Кристалічну ґратку утворюють розташовані правильними і жорсткими рядами йони, які здійснюють теплові коливання навколо положення рівноваги. Усередині йонної ґратки хаотично рухаються електрони, створюючи електронний газ.

2. Електронний газ вважається ідеальним газом, взаємодією між електронами можна знехтувати, враховується тільки взаємодія з йонами ґратки.

3. Електронний газ описується законом одноатомного ідеального газу.

4. Унаслідок хаотичного руху електронів у разі відсутності електричного поля в металі немає домінуючого напрямку переміщення зарядів.



Мал. 1.42

5. Електрон набуває енергії впорядкованого руху під дією зовнішнього електричного поля тільки на шляху вільного пробігу.

Пояснимо електропровідність металів на основі класичної електронної теорії провідності і, спираючись на її основні положення, розглянемо закономірності електричного струму в металах.

Як йони кристалічної ґратки, так і електрони беруть участь у тепловому русі. Йони здійснюють теплові коливання поблизу положень рівноваги — вузлів кристалічної ґратки. Вільні електрони рухаються хаотично і під час свого руху стикаються з йонами ґратки. У результаті таких зіткнень встановлюється термодинамічна рівновага між електронним газом та йонами ґратки. Згідно з класичною теорією, яка описує рух електронів у металах, можна оцінити середню швидкість теплового руху електронів за формулами молекулярно-кінетичної теорії. За кімнатної температури вона виявляється приблизно рівною 10^5 м/с. У зовнішньому електричному полі в металевому провіднику окрім теплового руху електронів виникає їхній упорядкований рух. Оцінимо швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику, скориставшись прийомом, який ми використовували для виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. У результаті розрахунків виявилось, що швидкість упорядкованого руху електронів становить 10^{-4} м/с.

Отже, швидкість упорядкованого руху електронів майже в 10^9 разів менша за швидкість їхнього теплового (хаотичного) руху. Але з практики відомо, що всі електроприлади, увімкнені в коло, починають працювати одночасно відразу після замикання кола, хоч би як далеко від перемикача вони перебували. Звідси випливає, що швидкість поширення електричного струму в провіднику і швидкість впорядкованого руху електронів у ньому — це не одне й те саме!

Класична теорія провідності металів механізм проходження електричного струму в металевих провідниках пояснює так. За відсутності електричного поля у провіднику електрони беруть участь у тепловому (хаотичному) русі. У разі створення на кінцях провідника різниці потенціалів на електрони діє електрична сила $F = eE$, що надає їм прискорення, яке вони швидко втрачають через зіткнення з йонами кристалічної ґратки. У результаті встановлюється деяка середня швидкість впорядкованого руху електронів, її називають середньою швидкістю дрейфу. Як відомо, тепловий рух електронів не припиняється ніколи, тому електрони з величезними швидкостями рухаються в усіх напрямках, і на фоні цього хаотичного руху відбувається повільний «дрейф» у напрямку електричного поля. А швидкість поширення електричного поля в провіднику (як і швидкість поширення будь-якого електромагнітного випромінювання) становить близько 300 000 км/с. Отже, кожен вільний електрон металу починає «дрейф», відчувши дію електричного поля, практично в мить замикання кола.

Класична теорія провідності пояснює також механізм виникнення електричного опору металевих провідників. Опір металів зумовлений взаємодією електронів, що рухаються в провіднику, з йонами кристалічної ґратки. У процесі взаємодії електрони втрачають частину енергії, яку вони отримують в електричному полі. Ця енергія перетворюється у внутрішню енергію. Відповідно, під час проходження по металевому провіднику електричного струму він нагрівається. З підвищенням температури розмах коливань йонів зростає, і частішими стають співудари електронів з йонами. Тому можна стверджувати, що опір металів має залежати від температури:

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

де R — опір провідника за температури T ; R_0 — опір провідника за температури 0°C (273 K); α — температурний коефіцієнт опору; ΔT — різниця температур.

У процесі нагрівання провідника ефекти від збільшення його довжини і площі перерізу взаємно компенсуються, тому опір в основному змінюється внаслідок зміни питомого опору. Залежність питомого опору металу від температури можна записати формулою $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Зміна питомого опору речовини характеризується сталою для цієї речовини величиною — температурним коефіцієнтом опору α . Він дорівнює відносній зміні питомого опору провідника при його нагріванні на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T},$$

де α — питомий опір за температури $T_0 = 273 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$); а ρ — питомий опір за температури T .

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

У вимірювальних системах та системах автоматизації для вимірювання температури використовують термометри опору, що дають змогу вимірювати температуру з точністю до тисячних часток градусів. Термометр опору складається з платинової спіралі, намотаної на керамічний каркас. Спіраль вміщують у середовище, температуру якого треба виміряти. Знаючи опір спіралі при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (R_0) та вимірюючи опір спіралі (R) у середовищі, за допомогою формули обчислюють температуру середовища. Термометрами опору можна вимірювати як дуже низькі, так і досить високі температури, які не можна виміряти, скориставшись рідинним термометром.

У 1911 р. голландський фізик **Гейке Камерлінг-Оннес** (1853–1926) у Лейденській лабораторії відкрив нове явище — **надпровідність**. Згодом він перший отримав наднизьку температуру і при $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ перетворив гелій у рідину. Нарешті з'явилася можливість охолоджувати речовини в рідкому гелії і вивчати їхні властивості в абсолютної новій області температур.

У той час багато хто вважав, що з наближенням до $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ електричний опір будь-якого металу повинен падати до нуля. Хоча підтвердити це ніхто не міг. Може, річ у домішках? Відповідним металом, який можна було дослідити в дуже чистому стані, учений вважав ртуть. І дійсно: як і пророкувала електронна теорія металів, з пониженням температури опір ртуті закономірно зменшувався. Усе йшло нормально до $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, а потім опір повністю зник. Зник раптово, відразу — стрибком.

Учений прийняв це за підтвердження своєї теорії електричного опору і назвав новий стан ртуті, який він знайшов, **надпровідним**. Але незабаром з'ясувалося, що парадоксальний стрибок опору до нуля неможливо пояснити жодною теорією і що Оннес відкрив зовсім не те, на що розраховував.

Що могло змінитися в металі, чому за деякої температури (учений назвав її критичною) електронам уже ніщо не заважає рухатись, чому вони перестають взаємодіяти з атомами кристалічної ґратки або, як кажуть фізики, перестають розсіюватися на коливаннях ґратки?

А може, опір у речовини все ж залишається, просто стає таким малим, що його не вдається навіть виміряти? І сам фізик, і багато експеримента-



Гейке
Камерлінг-
Оннес

торів намагалися «спіймати» цей залишковий опір. Вони використовували найчутливіші методи, щоб по тому, як затухає електричний струм в надпровідному кільці, оцінити значення опору. Досліди ці завершилися знаменитим експериментом **Коллінза**, де надпровідне свинцеве кільце з електричним струмом зберігалося в рідкому гелії близько трьох років.

Минуло 22 роки, перш ніж було зроблено друге, не менш вражаюче відкриття. Виявилось: надпровідність — це не тільки «ідеальна провідність», але й «ідеальний діаманетизм». Нагадаємо, що діаманетики — це речовини, які «не в ладах» з магнітним полем. Поміщені в магнітне поле, вони прагнуть витіснити його із себе і зайняти в просторі таке положення, де напруженість поля мінімальна. Як ідеальний діаманетик надпровідник «не терпить» усередині себе ні найменшого магнітного поля. Так, ще в 1933 р. було доведено, що нульовий опір і нульове магнітне поле — це дві властивості надпровідного стану.

За деякими властивостями, головним чином магнітними, надпровідні речовини стали розділяти на надпровідники першого та другого роду. Усі речовини з високими критичними температурами виявилися надпровідниками другого роду. У них є й інші важливі властивості: високі значення критичного магнітного поля та критичної густини струму. Що це означає? Було відомо: надпровідність можна «зруйнувати», не тільки підвищуючи температуру вище критичної, але й діючи магнітним полем. Так зразки цих сполук залишалися надпровідними, навіть якщо через них в надсильному магнітному полі пропускали струми густиною до мільйона ампер на квадратний сантиметр перерізу.

Явище надпровідності використовується в приладах для фізичного експерименту: надпровідних гальванометрах і детекторах випромінювань, резонаторах з надпровідним покриттям для мікрохвильової техніки, для лінійних прискорювачів важких частинок, магнітних лінзах для електронних мікроскопів, електродвигунах на надпровідних підшипниках без тертя, трансформаторах та лініях передач без втрат, магнітних екранах, акумуляторах енергії тощо.

38



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Хто довів, що носіями електричного струму є електрони?
2. Які положення є основою класичної теорії провідності металів?
3. У чому полягає теорія провідності металів?
4. Чому у провіднику виникає опір електричному струму?
5. Як залежить опір провідника від температури?
6. Що таке питомий опір металу?
7. Що таке температурний коефіцієнт опору металів?
8. У чому полягає явище надпровідності?

§ 10. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

Відрізнити напівпровідники від провідників можна за характером залежності електропровідності від температури. Вимірювання під час дослідів показують, що в таких елементах, як Силіцій (Si), Германій (Ge), Селен (Se) тощо, і їхніх сполук (PbS, CdS тощо) питомий опір з підвищенням температури не збільшується, як у металів (мал. 1.43), а, навпаки, різко зменшується (мал. 1.44). Такі речовини і називають **напівпровідниками**.

З графіка на малюнку 1.44 видно, що за температур, які наближаються до абсолютного нуля, питомий опір напівпровідників дуже великий. Це означає, що за низьких температур напівпровідник є фактично діелектриком. З підвищенням температури питомий опір швидко зменшується. У чому ж причина цього явища?

Щоб зрозуміти механізм виникнення провідності в напівпровідниках, слід розглянути будову напівпровідникових кристалів і природу зв'язків, що утримують атоми кристала один біля одного. Як приклад розглянемо кристала Силіцію.

Силіцій — чотиривалентний елемент. Це означає, що в зовнішній оболонці атома є 4 електрони, які порівняно слабо зв'язані з ядром. Кожний атом Силіцію має чотирьох найближчих сусідів. Схему структури кристала Силіцію зображено на малюнку 1.45.

Між парою сусідніх атомів існує так званий парноелектронний, або ковалентний, зв'язок. В утворенні цього зв'язку бере участь один валентний електрон від кожного атома, що відірвався від нього (колективізувався кристалом) і рухається у просторі між сусідніми атомами. Негативний заряд цих електронів утримує позитивні йони Силіцію один біля одного.

Не слід вважати, що колективізована пара електронів належить двом атомам. Кожний атом утворює 4 зв'язки із сусідніми, і будь-який валентний електрон може рухатися по одному з атомів. Дійшовши до сусіднього атома, він може перейти до наступного і так переміщуватися уздовж усього кристала. Колективізовані валентні електрони належать усьому кристалу.

Парноелектронні зв'язки Силіцію досить міцні й за низьких температур не розриваються. Тому Силіцій за низької температури не проводить електричний струм. Валентні електрони, що беруть участь у зв'язку атомів, міцно прив'язані до кристалічної ґратки, і зовнішнє електричне поле помітно не впливає на їхній рух. Аналогічну будову має кристал Германію.

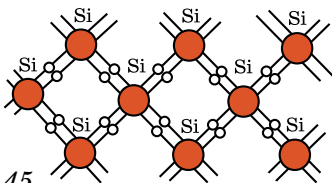
Від нагрівання Силіцію кінетична енергія валентних електронів збільшується і окремі зв'язки розриваються. Деякі електрони залишають свої «уторовані шляхи» і стають вільними, подібно до електронів у металі. В електричному полі вони переміщаються між вузлами ґратки, утворюючи електричний струм (мал. 1.46).

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають електронною провідністю.

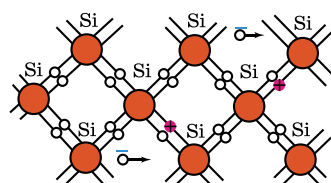
З підвищенням температури кількість розірваних зв'язків і, отже, вільних електронів збільшується. Під час нагрівання від 300 до 700 К кількість вільних носіїв заряду збільшується від 10^{17} до 10^{24} м⁻³. Це спричиняє зменшення опору.

Якщо розривається зв'язок, то утворюється вакантне місце, де не вистачає електрона. Його називають діркою. У дірці є надлишковий позитивний заряд порівняно з іншими нормальними зв'язками (мал. 1.46).

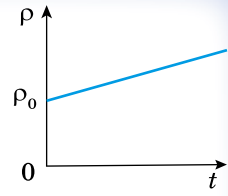
Положення дірки в кристалі не є незмінним. Такий процес відбувається безперервно. Один з електронів, що забезпечує зв'язок атомів, займає місце дірки і відновлює тут парноелектронний зв'язок. При цьому в місці, звідки перескочив електрон, утворюється нова дірка. Отже, дірка може переміщуватися в кристалі.



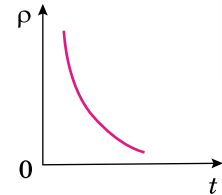
Мал. 1.45



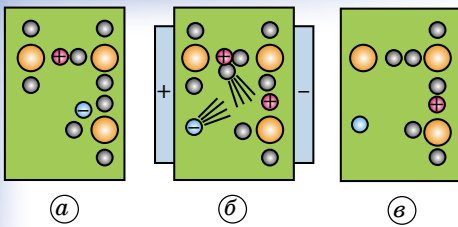
Мал. 1.46



Мал. 1.43



Мал. 1.44



Мал. 1.47

електронів (мал. 1.47, б). Це виглядає як перехід дірки в напрямку поля (мал. 1.47, в).

Якщо напруженість електричного поля в зразку дорівнює нулю, то переміщення дірок, рівноцінне переміщенню позитивних зарядів, відбувається хаотично і тому не створює електричний струм. За наявності електричного поля виникає впорядкований перехід дірок, і до електричного струму вільних електронів додається електричний струм, зумовлений переходом дірок. Напрямок руху дірок протилежний напрямку руху електронів.

Отже, у напівпровідниках є носії зарядів двох типів: електрони й дірки.

Напівпровідники мають не тільки електронну, а й діркову провідність.

Ми розглянули механізм провідності ідеальних напівпровідників, що не мають ніяких домішок.

Провідність напівпровідників, які не мають домішок, називають власною провідністю напівпровідників.

40

Власна провідність напівпровідників зазвичай невелика, оскільки в них мало вільних електронів (наприклад, у Германію за кімнатної температури $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Водночас кількість атомів у 1 см^3 Германію — близько 10^{23} . Отже, кількість вільних електронів становить приблизно одну десятимільярдну частку від загальної кількості атомів. Власна провідність напівпровідників багато в чому подібна до провідності водних розчинів і розплавів електролітів. В обох випадках кількість вільних носіїв заряду збільшується зі збільшенням інтенсивності теплового руху. Тому і в напівпровідників, і у водних розчинів або розплавів електролітів провідність збільшується зі збільшенням температури.

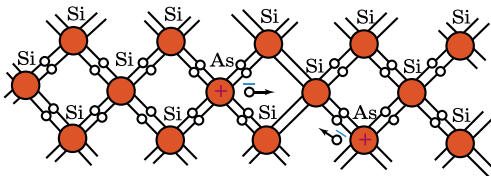
Істотна особливість напівпровідників полягає в тому, що в них за наявності домішок крім власної провідності виникає додаткова — **домішкова провідність**. Змінюючи концентрацію домішки, можна змінювати кількість носіїв заряду того чи іншого знака. Завдяки цьому створюються напівпровідники з переважною концентрацією або негативно, або позитивно заряджених носіїв.

Виявляється, що коли є домішки, наприклад атомів Арсену, навіть якщо їхня концентрація дуже мала, то кількість вільних електронів зростає в багато разів. Відбувається це з такої причини. Атоми Арсену мають 5 валентних електронів, 4 з них беруть участь у створенні хімічного (ковалентного) зв'язку цього атома з навколишніми атомами, наприклад з атомами Силіцію. П'ятий валентний електрон виявляється слабкозв'язаний з атомом. Він легко залишає атом Арсену і стає вільний (мал. 1.48).

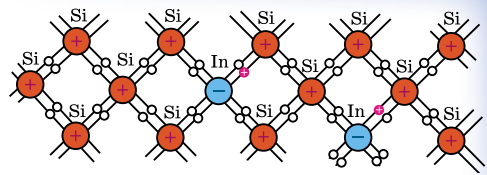
Під час додавання однієї десятимільйонної частки атомів Арсену концентрація вільних електронів дорівнюватиме 10^{16} см^{-3} . Це в тисячу разів більше за концентрацію вільних електронів у чистому напівпровіднику.

Домішки, які легко віддають електрони і, отже, збільшують кількість вільних електронів, називають донорними домішками.

Оскільки в напівпровідників з донорною домішкою багато електронів (порівняно з кількістю дірок), їх називають напівпровідниками *n*-типу (від лат. *negativ* — «негативний»).



Мал. 1.48



Мал. 1.49

У напівпровіднику n -типу електрони — основні носії заряду, а дірки — неосновні.

Якщо як домішку використати Індій, атоми якого тривалентні, то характер провідності напівпровідника зміниться. Тепер для встановлення нормальних парноелектронних зв'язків із сусідами атома Індію не вистачає електрона. Унаслідок цього утворюється дірка. Кількість дірок у кристалі дорівнюватиме кількості атомів домішки (мал. 1.49). Такі домішки називають **акцепторними**.

Якщо існує електричне поле, то дірки переміщуються по полю і виникає діркова провідність.

Напівпровідники з переважанням діркової провідності над електронною називають напівпровідниками p -типу (з лат. *positiv* — «позитивний»).

У напівпровіднику p -типу дірки — основні носії заряду, а електрони — неосновні.

Будемо розглядати напівпровідник (мал. 1.50), права частина якого містить донорні домішки, у цьому випадку він є напівпровідником n -типу, а ліва — акцепторні домішки, тоді він є напівпровідником p -типу.

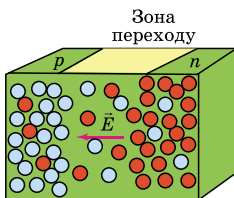
Контакт двох напівпровідників називають p - n -переходом.

При утворенні контакту електрони частково переходять з напівпровідника n -типу в напівпровідник p -типу, а дірки — у зворотному напрямку. Відбувається процес дифузії, який самий, як і під час зіткнення двох різних газів, молекули яких переміщуються внаслідок теплового руху. Отже, напівпровідник n -типу заряджається позитивно, а p -типу — негативно. Дифузія припиняється після того, як електричне поле, що виникає в зоні переходу, перешкоджає подальшому переміщенню електронів і дірок.

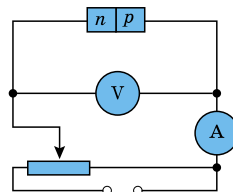
Увімкнемо напівпровідник з p - n -переходом в електричне коло (мал. 1.51). Спочатку приєднаємо батарею так, щоб потенціал напівпровідника p -типу був позитивний, а n -типу — негативний. При цьому струм через p - n -перехід передаватиметься основними носіями: з ділянки n у ділянку p електронами, а з ділянки p у ділянку n дірками (мал. 1.52). Унаслідок цього провідність усього зразка буде великою, а опір — малим.

Розглянутий перехід називають прямим. Залежність сили струму від різниці потенціалів — вольт-амперну характеристику прямого переходу — зображено на малюнку 1.53 суцільною лінією.

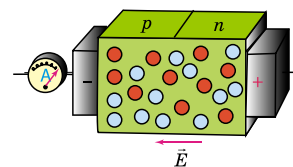
Перемкнемо полюси батареї. У цьому разі за такої самої різниці потенціалів сила струму в колі буде значно меншою, ніж при прямому переході.



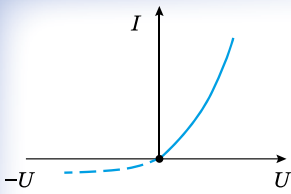
Мал. 1.50



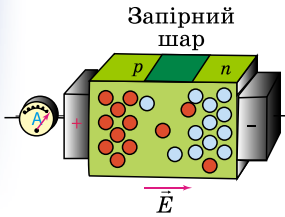
Мал. 1.51



Мал. 1.52



Мал. 1.53



Мал. 1.54

Це зумовлено тим, що електрони через контакт переходять з ділянки p у ділянку n , а дірки — з ділянки n у ділянку p . Проте у напівпровіднику p -типу мало вільних електронів, а в напівпровіднику n -типу мало дірок. Отже, через контакт переходять не основні носії, а їхня незначна кількість (мал. 1.54).

Унаслідок цього провідність зразка буде малою, а опір — великим. Утворюється так званий запірний шар. Цей перехід називають зворотним. Вольт-амперну характеристику зворотного переходу зображено на малюнку 1.53 штриховою лінією.

Цю властивість p - n -переходу використовують для випрямлення змінного струму. Протягом половини періоду, коли потенціал напівпровідника p -типу додатний, струм вільно проходить через p - n -перехід. У наступну половину періоду струм практично дорівнює нулю.

Відомо, що в електронній лампі носії заряду — електрони — виникають унаслідок термоелектронної емісії. Це потребує спеціального джерела електричної енергії для розжарення нитки катода. У p - n -переході носії заряду утворюються тоді, коли у кристал вводять акцепторну або донорну домішку. Отже, відпадає потреба використовувати джерело енергії для одержання вільних носіїв заряду. У складних схемах зекономлена внаслідок цього енергія буває досить значною.

42

У напівпровідниках електричний опір значною мірою залежить від температури. Цю властивість використовують для вимірювання температури за силою струму в колі з напівпровідником. Такі прилади називають **термісторами** або **терморезисторами**.

Термістори — одні з найпростіших напівпровідникових приладів. Їх виготовляють з германію, селену тощо. Термістори випускають у вигляді стержнів, трубок, дисків, шайб і намістин розміром від кількох мікрометрів до кількох сантиметрів.

Діапазон вимірюваних температур більшості термісторів лежить у межах від 170 до 570 К. Проте є термістори для вимірювання дуже високих (до 1300 К) і дуже низьких (від 4 до 80 К) температур.

Термістори застосовують для дистанційного вимірювання температури, протипожежної сигналізації тощо.

Електрична провідність напівпровідників підвищується не тільки від їхнього нагрівання, а й від їхнього освітлення. При освітленні напівпровідника сила струму в колі помітно збільшується, що свідчить про збільшення провідності (зменшення опору) напівпровідників під дією світла. Цей ефект не пов'язаний з нагріванням, оскільки він може спостерігатися і за незмінної температури.

Електрична провідність збільшується внаслідок розривання зв'язків та утворення вільних електронів і дірок за рахунок енергії світла, що падає на напівпровідник. Це явище називають **фотоелектричним ефектом**. Прилади, у яких використовують фотоелектричний ефект у напівпровідниках, називають **фоторезисторами** або **фотоопорами**. Завдяки мініатюрності й високій чутливості фоторезистори використовують у найрізноманітніших галузях техніки для реєстрації і вимірювання слабких світлових потоків. За допомогою фоторезисторів визначають якість поверхонь, контролюють розміри виробів тощо.

Сьогодні швидкими темпами розвиваються напівпровідникові технології виробництва мікросхем. Це наукова розробка та втілення в «кремнії» щораз швидших і менших транзисторів, схем зв'язку між ними та іншим «обрамлен-

ням» мікроструктур на кристалі, створення технологій виготовлення малюнка ліній і транзисторів на поверхні кремнію, нових матеріалів та устаткування для цього, а також галузь знань про те, як виробляти мікросхеми вищої якості, швидші, з більшою кількістю придатних кристалів на пластині, меншим числом дефектів і розміщенням робочих параметрів.

Більшість компонентів звичайної електроніки так само застосовуються і в мікроелектроніці: резистори, конденсатори, котушки індуктивності, діоди, транзистори, ізолятори і провідники, але вже у вигляді мініатюрних пристроїв в інтегральному виконанні. Цифрові інтегральні мікросхеми в основному складаються з транзисторів. Аналогові схеми в основному містять резистори та конденсатори. Котушки індуктивності використовуються в схемах, що працюють на високих частотах.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які речовини належать до напівпровідників?
2. Опишіть будову напівпровідників. Назвіть їхні основні властивості.
3. Що називають електронною провідністю? Дірковою провідністю?
4. Опишіть механізм електронної і діркової провідності.
5. Які рухомі носії зарядів є в чистому напівпровіднику?
6. Що відбувається під час зустрічі електрона з діркою?
7. Чому опір напівпровідника значно залежить від наявності домішок?
8. Яку домішку — донорну чи акцепторну — треба ввести, щоб отримати напівпровідник n -типу?
9. Які носії заряду є основними, а які — неосновними в напівпровіднику з акцепторною домішкою?
10. Що таке p - n -перехід?
11. Що таке напівпровідниковий діод? Яка його будова?
12. Які види напівпровідників ви знаєте? Де вони застосовуються?

§ 11. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ. ЕЛЕКТРОЛІТИЧНА ДИСОЦІАЦІЯ

Розглянемо, як проходить електричний струм через рідини. Чисті рідини не пропускають електричний струм (дистильована вода, гліцерин, гас тощо). Це пояснюється тим, що в таких рідинах мало носіїв струму — йонів. Вони являють собою атоми або групи атомів, у яких не вистачає або є надлишок електронів порівняно з нейтральними частинками. Якщо в рідині, наприклад у воді, розчинити сіль, кислоту або луг, то вона стає електропровідною. Це пояснюється тим, що під впливом розчинника молекули розчиненої речовини розпадаються (дисоціюють) на різнойменні йони.

Електролітична дисоціація — це процес розпаду нейтральних молекул розчиненої речовини на йони під впливом молекул розчинника та теплового руху молекул.

Електричне поле молекул розчинника послаблює електричне поле молекул розчиненої речовини. Так, молекули води послаблюють йонні зв'язки молекул розчиненої речовини у 81 раз.

Рекомбінація (молізація) — процес воз'єднання різнойменних йонів у нейтральні молекули.

Якщо в посудину з електролітом занурити два електроди й приєднати до них джерело струму (мал. 1.55), то між електродами виникне електричне поле. Позитивні йони, що рухаються до катода, — катіони, а негативні, що рухаються до анода, — аніони.



Мал. 1.55

Електроліти — це провідники, у яких проходження струму спричиняє електроліз.

Електроліз — це окисно-відновні реакції з виділенням на електродах речовини. На катоді при цьому виділяється чистий метал.

З підвищенням температури електропровідність електролітів збільшується унаслідок збільшення швидкості теплового руху молекул та більш інтенсивної їхньої руйнації на йони. При цьому збільшується концентрація йонів, їхня рухливість, що веде

до зменшення опору електроліту. Механічне збільшення концентрації розчиненої речовини також зменшує опір.

Майкл Фарадей експериментально встановив у 1834 р. закон електролізу.

Закон Фарадея полягає в тому, що маса речовини, яка виділяється на кожному з електродів, пропорційна значенню заряду, що проходить через електроліт:

$$m = kq,$$

де k — електрохімічний еквівалент речовини, що визначається масою речовини, яка виділяється на катоді під час проходження через електроліт одиниці заряду.

Якщо прийняти, що $q = It$, то формула $m = kq$ набуде вигляду: $m = kIt$.

Електроліз застосовують в **електрометалургії**. В електролітичній ванні (залізний ящик з вугільним дном), що є одночасно катодом, відбувається електроліз руд за високих температур (близько 900 °С) для отримання чистих металів. Анод — вугільні стержні. Так отримують алюміній, натрій, магній, берилій, фтор, кальцій та інші метали.

Електроліз також використовують для очищення (рафінування) металів. Для цього очищений метал відливають у вигляді пластин та роблять їх анодами в електролітичній ванні. Електролітом слугує розчин солі цього металу. Добирають напругу між анодом і катодом так, щоб тільки очищений метал переходив з анода в розчин і виділявся на катоді. Домішки випадають на дно у вигляді осаду.

Гальванопластика, або **електричне осадження** металу на поверхні предмета для відтворення його форми, здійснюється так. З предмета знімають спочатку зліпок з воску, гіпсу, покривають його порошком графіту для надання електропровідності. Потім зліпок поміщають в електролітичну ванну, яка містить розчинену сіль відповідного металу. Під час електролізу метал електроліту виділяється на поверхні зліпка й утворює металеву копію предмета (безшовні труби, металеві деталі складної форми).

Гальваностегія — електричне осадження металів для покриття одних металів шаром інших для оздоблення або захисту їх від корозії.

За допомогою електролізу можна **травити та полірувати поверхні металевих виробів**.

Явище електролізу використовується для виготовлення електролітичних конденсаторів. Електролітичне розкладання води на водень і кисень широко використовується для **добування важкої води**. У звичайній воді

завжди в незначній кількості є молекули важкої води (вода, у якій замість водню містяться нукліди водню-дейтерію з атомною масою 2). Унаслідок електролізу концентрація важкої води в електроліті підвищується.

Постійний електричний струм використовують для лікувальних цілей. Метод лікування за допомогою постійного струму малої сили (до 50 мА) називають **гальванізацією**.

Під час гальванізації в результаті проходження електричного струму через тканини організму в клітинах відбувається зміна звичайної концентрації йонів. Функціональний стан клітини змінюється, чим і зумовлюється терапевтична дія постійного струму.

Одним з різновидів гальванізації є електрофорез — електролітичне введення лікарських речовин в організм через шкіру або слизові оболонки за допомогою постійного струму. За допомогою електрофорезу через шкіру і слизові оболонки в організм вводять як позитивні (Натрій, Кальцій, кодеїн, новокаїн тощо), так і негативні (Бром, Йод, кофеїн тощо) йони. Причому позитивні йони завжди вводять з позитивного електрода, а негативні — з негативного. Сила струму під час електрофорезу коливається від 2 до 50 мА залежно від характеру процедури та індивідуальних особливостей хворого.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке електролітична дисоціація? Рекомбінація? Електроліз?
2. Назвіть речовини, які належать до електролітів.
3. У чому полягає закон Фарадея?
4. У яких сферах застосовують електроліз? Наведіть приклади.

§ 12. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ

Гази, на відміну від металів та електролітів, за звичайних умов складаються з електрично нейтральних атомів та молекул і тому не є провідниками електрики. Наелектризоване тіло в сухому повітрі зберігає свій заряд довгий час. Гази стають електропровідниками внаслідок **йонізації** їх під дією зовнішніх збудників. При цьому їхні молекули перетворюються в позитивні йони. Електрон, який відділився від нейтральної молекули, стикаючись із другою нейтральною молекулою, може з'єднуватися з нею та утворювати негативний йон.

Щоб йонізувати атом (молекулу), треба виконати роботу (роботу йонізації) проти сил взаємодії електрона з іншими частинками атома (молекулами). Зовнішні збудники, або джерела енергії, які спричиняють йонізацію газу, називають **йонізаторами**.

Процес, який забезпечує йонізацію газу й подальший розвиток газового розряду, називають **йонізованим**.

Як йонізатор діють **рентгенівські промені**, а також радіоактивне випромінювання, яке вивчатимемо згодом. За нормальних умов оточуюче повітря завжди певною мірою йонізоване внаслідок сонячних променів і **космічного випромінювання** (потік швидких заряджених частинок, переважно протонів, які потрапляють на Землю з глибин Космосу).

Йонізація газу можлива також під дією прискорених електронів та йонів (ударна йонізація).

Дослід. Зарядимо (наприклад, від електрофорної машини) алюмінієві диски, з'єднані провідниками з виводами електрометра (мал. 1.56, а). Спостерігатимемо, що відхилення стрілки електрометра залишатиметься сталим, тому що електрична провідність повітря за умов кімнатної температури та сухого повітря дуже мала, і пластини помітно не розряджаються.

Внесемо у простір між дисками полум'я від запаленого сірника або свічки (мал. 1.56, б). Побачимо, що електрометр швидко розрядився. Отже,



Мал. 1.56

повітря внаслідок значного підвищення температури набуло провідності й замкнуло коло, тобто в нагрітому газі проходить електричний струм.

Проходження електричного струму через газ називають *газовим розрядом*.

46

Залежно від механізму йонізації газу розрізняють **самостійні** і **несамостійні газові розряди**.

Самостійний газовий розряд підтримує сам себе і зберігається після припинення дії зовнішнього йонізатора, тобто під час розряду весь час утворюються вільні заряджені частинки. Вони можуть виникати внаслідок ударної йонізації.

Несамостійний газовий розряд не підтримує сам себе і відбувається під впливом зовнішнього йонізатора. Якщо йонізатор перестає діяти, то розряд припиняється.

Розглянемо види газових розрядів.

Тліючий розряд спостерігається за **низьких тисків (десяті й соті частки міліметра ртутного стовпчика) і напруги між електродами в кілька сотень вольтів**. Його використовують у рекламних трубках (мал. 1.57). Якщо трубка наповнена неонам, то виникає червоне світіння, якщо аргон — синювато-зелене. У лампах денного світла використовують розряд у парі ртуті.



Мал. 1.57

Електрична дуга — явище виникнення яскравого світлого стовпа газу між двома вугільними електродами за низької напруги.

Електричну дугу «запалюють» так. Спочатку зближують і вводять у контакт вугільні електроди, замикаючи коло. Унаслідок теплової дії струму, що проходить через точкові контакти з великим електричним опором, кінці електродів розжарюються до світіння. З поверхні електродів при цьому вилітають з великою швидкістю електрони й через зіткнення йонізують газ у прилеглому просторі. Якщо електроди розвести, то електричний струм у колі не зникає, він проходить через йонізований газ, що супроводжується його розжаренням і яскравим світінням.

Сила струму в невеликій дузі сягає кількох ампер, а в потужних дугах — кількох сотень ампер за напруги приблизно 50 В.

Під час горіння дуги повітря (або інший газ) у проміжку між вугільними електродами розігрівається до кількох тисяч градусів і, піднімаючись угору

внаслідок конвекції, вигинає світний стовпчик у формі дуги, за що цей вид газового розряду й отримав свою назву (мал. 1.58). Дуговий розряд — потужне джерело світла. Його використовували у прожекторах, проекційних апаратах і кіноапаратах. У металургії досить поширені електропечі, у яких джерелом тепла є дуговий розряд. Дуговий розряд використовують для зварювання металів.

Коронний розряд — це світна область, яка нагадує корону. Він утворюється за атмосферного тиску поблизу загострених частин провідника з великим електричним зарядом.

Газ у цьому разі йонізують ударом електрони, прискорені сильним неоднорідним електричним полем, яке виникає поблизу загострених заряджених провідників (мал. 1.59).

Перед грозою або під час грози часто на вістрях і гострих кутах високо піднятих предметів спалахують схожі на щіточки конуси світла, наприклад на вістрях корабельних щогл (мал. 1.60). З давніх-давен це світіння називають вогнями святого Ельма.

Коронним розрядом не можна нехтувати, якщо висока напруга. Коли є частини, що виступають, або дуже тонкі дроти, то може виникнути коронний розряд. Це призводить до втрат електроенергії. Що вища напруга високовольтної лінії, то товщими мають бути дроти.

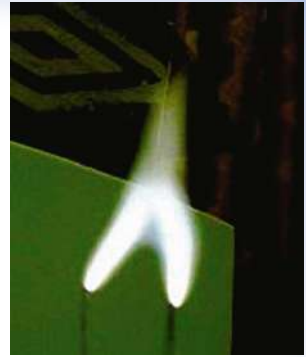
Іскровий розряд виникає за високої напруги між електродами в повітрі (мал. 1.61) і має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних смужок, що відгалужуються від тонкого каналу.

Під час іскрового розряду газ йонізують ударом прискорені сильним електричним полем електрони, що виникають в окремих місцях у проміжку між електродами внаслідок природної йонізації повітря.

За допомогою іскрового розряду можна обробляти деталі з тугоплавких металів, тому що велика енергія цього розряду виділяється в малому об'ємі за дуже малий інтервал часу. Тому теплообміну між зоною розряду і навколишнім середовищем практично немає. У місці розряду температура металу різко підвищується, і відбувається його випаровування.

Плазма — це газ у стані з високим ступенем йонізації. Плазма, наприклад, утворюється в позитивному стовпі тліючого розряду і в головних каналах іскрового розряду. У нейтральній плазмі концентрація електронів і позитивних йонів однакова.

Концентрація носіїв струму в плазмі невелика, але велика їхня рухливість, тому електропровідність плазми велика. За характером електропровідності плазма уподібнюється до металів, особливо за високої температури. За дуже високої



Мал. 1.58



Мал. 1.59



Мал. 1.60



Мал. 1.61

температури (близько кількох мільйонів градусів) атоми повністю йонізуються — розщеплюються на електрони і ядра.

У природі плазма трапляється в космічних тілах. Надра зірок і Сонця складаються з водневої плазми. Завдяки своїм специфічним властивостям плазму розглядають як четвертий стан речовини.

Штучно плазма створюється у тліючому газовому розряді, газорозрядних лампах, мас-спектрометрах, термоядерному синтезі, під час роботи йонних двигунів, генераторів тощо. Зокрема, плазму застосовують у термоелектронних і магнітоплазmodинамічних (МПД) генераторах — перетворювачах тепла безпосередньо в електричну енергію (минаючи перетворення в механічну).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чому за звичайних умов газ є діелектриками?
2. Поясніть, чому під час нагрівання чи опромінення газу рентгенівськими або ультрафіолетовими променями газ стає провідником?
3. Чому під час нагрівання газу він йонізується?
4. З припиненням дії йонізатора газ знову стає діелектриком. Чому?
5. Який газовий розряд називають самостійним? Несамостійним?
6. Опишіть процес виникнення електричної дуги.
7. Які ви знаєте види газових розрядів?
8. Коли виникає коронний розряд?
9. Що таке плазма?



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

48



*Василь
Петров*

- Блискавка — досить часте явище на Землі. Як підраховали вчені, щодня на земній кулі відбувається близько 44 000 гроз або приблизно одна гроза через кожні 2 с. Грози найчастіше бувають у другій половині дня. Тривалість більшості гроз — близько 1 год. Однак у тропіках і горах вони іноді тривають до 12–13 год. Найбільшу кількість грозових днів — 220 на рік — зафіксовано на острові Ява. У місті Санта-Марія (штат Каліфорнія в США) гроза відбувається не частіше ніж один раз на 2 роки. Щодня на земній кулі спалахує близько 8 млн блискавок.

- Вольтів стовп і батарея відкрили можливості для широких експериментів із сильним електричним струмом. Багато вчених виготовляли такі джерела струму і проводили з ними цікаві досліди.

- У 1802 р. професор Петербурзької медико-хірургічної академії **Василь Петров** (1761–1834) сконструював найпотужнішу батарею того часу. Вона складалася із 4200 мідних і цинкових кружків, укладених у чотири дерев'яних ящики. Приєднавши мідною дротиною до полюсів батареї два вугільних стержні (електроди), учений наблизив стержні один до одного і побачив, що між ними раптом спалахнула яскрава дуга. Вона освітила лабораторію, поміщені в неї шматки металу дуже швидко стали плавитися. Так було відкрито **електричну дугу**.

- Спосіб зварювання металів за допомогою електричної дуги запропонував у 1881 р. уродженець с. Мостового Миколаївської області винахідник **Микола Бенардос** (1842–1905).

Він запатентував загалом близько 100 винаходів у галузі транспорту та енергетики. Так, учений сконструював вугільні електроди різних форм та комбіновані електроди (вуглець–метал); запропонував спеціальне пристосування для зварювання у вертикальному положенні; уперше використав електромагніт для закріплення деталей, що зварюються; створив кілька конструкцій зварювальних



*Микола
Бенардос*

напівавтоматів та автоматів; розробив способи підводного зварювання та різання металів, зварювання в газовому струмені, точкового і шовного контактного зварювання.

§ 13. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ

Можливість управляти рухом заряджених частинок у вакуумі за допомогою зовнішніх електричних і магнітних полів слугує основою для роботи електронно-променевих трубок та інших електровакуумних приладів.

Вакуумом називають розріджений газ, концентрація молекул у якому така мала, що вони не стикаються одна з одною.

Тому вакуум є ідеальним ізолятором. Однак якщо внести у вакуум вільні заряджені частинки, наприклад електрони, то він стає провідником струму. При цьому рухом вільних зарядів у вакуумі легко управляти, тому вони не стикаються з молекулами розрідженого газу.

Прилади, у яких електричний струм проходить через вакуум, називають електровакуумними.

Джерелом заряджених частинок для вакууму може бути поверхня металу, нагрітого до високих температур (1500–2500 °С). За таких температур частина вільних електронів металу володіє енергією, достатньою для того, щоб розірвати всі наявні зв'язки та залишити поверхню металу. Це явище, що нагадує випаровування молекул з поверхні рідини, називають **термоелектронною емісією**.

Найпростішим електровакуумним приладом є вакуумний діод — пристрій, що пропускає струм тільки в одному напрямку (мал. 1.62). Зазвичай вакуумний діод — це скляна лампа, усередині якої створено вакуум, розміщено вольфрамову нитку — катод і металевий циліндр — анод. Щоб нагріти вольфрамову нитку діода, через неї пропускають струм, і в результаті термоелектронної емісії поряд з розжареною ниткою з'являється хмара електронів. Тому якщо діод підключити до джерела струму, з'єднавши нитку з його негативним полюсом, а циліндр — з позитивним, то електрони з хмари навколо нитки будуть рухатися до циліндра і через діод піде струм. Протилежне підключення — нитка до позитивного полюса джерела струму, а циліндр до його негативного — не спричинить струму, тому поле всередині діода буде відштовхувати електрони від циліндра. Отже, у вакуумному діоді електрони можуть рухатися тільки в одному напрямку — від гарячого катода до холодного анода. Вакуумні діоди використовують для перетворення змінного струму в постійний.

Електричне поле може не тільки спричиняти рух заряджених частинок у вакуумі, як це відбувається в діоді, а й змінювати траєкторію цього руху.

Оскільки електрони у вакуумі не відчувають жодних зіткнень, їхня швидкість в електровакуумних приладах може досягати дуже великих значень. Легко порахувати, що у вакуумному діоді, між анодом і катодом якого прикладено напругу 100 В, електрони розганяються до 6,106 м/с, що в мільярди разів більше, ніж швидкість їхнього упорядкованого руху в металах. Під час гальмування електронів їхня кінетична енергія може переходити в енергію випромінювання (наприклад, рентгенівського), теплову та інші форми енергії.

Розглядаючи питання електричного струму у вакуумі, потрібно звернути увагу на явище термоелектронної емісії.



Мал. 1.62

Термоелектронна емісія — явище, зумовлене тепловим рухом вільноту електронів за межі речовини.

Термоелектронна емісія суттєва для функціонування вакуумних ламп, у яких електрони випромінюються негативно зарядженим катодом. Для збільшення емісії катод зазвичай підігривається ниткою розжарювання.

Під час нагрівання металу енергетичний розподіл електронів в зоні провідності змінюється. З'являються електрони з енергією, що перевищує рівень Фермі (значення електрохімічного потенціалу за нульової температури). Незначна кількість електронів може набути енергію, яка перевищує роботу виходу. Такі електрони (термоелектрони) можуть вийти за межі металу, у результаті чого виникає емісія електронів. Значення струму термоелектронної емісії залежить від температури катода, роботи виходу та властивостей поверхні. Детальніше ми розглянемо це в розділі 3.

Значення струму емісії найбільше залежить від температури катода. Однак зі збільшенням температури різко зростає швидкість випаровування матеріалу катода і скорочується строк його служби. Тому катод повинен працювати у строго визначеному інтервалі робочих температур. Нижній поріг визначається можливістю отримання бажаної емісії, а верхній — випаровуванням або плавленням матеріалу.

Суттєво впливає на значення струму емісії зовнішнє електричне поле, яке діє біля поверхні катода. Це явище отримало назву ефекта Шотткі. (Вириванню електронів з металу перешкоджає потенційний бар'єр, який утворюється за рахунок електричних сил. Зниження цього бар'єра при збільшенні прикладеного зовнішнього електричного поля називають **ефектом Шотткі**). На електрон, що виходить з катода, за наявності зовнішнього електричного поля діють дві сили — електричного тяжіння, яка повертає електрон назад, і зовнішнього поля, що пришвидшує електрон у напрямку від поверхні катода. Отже, зовнішнє електричне поле зменшує потенційний бар'єр, унаслідок чого знижується робота виходу електронів із катода і збільшується електронна емісія.

Вплив зовнішнього прискорювального поля особливо сильно проявляється у напівпровідникових катодах з поверхневим покриттям оксидами лужноземельних металів. Напівпровідникові катоди мають шорстку поверхню, тому значно зростає напруженість зовнішнього електричного поля біля нерівностей поверхні, що спричиняє інтенсивніший ріст струму емісії.

50



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Який газ називають вакуумом?
2. Що таке термоелектронна емісія?
3. Чому вакуумний діод пропускає струм тільки в одному напрямку?
4. Що таке термоелектронна емісія?



Схарактеризуйте та порівняйте умови виникнення електричного струму в різних середовищах.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Чи втрачає свою теплову енергію електрон під час зіткнення з йонами ґратки металу?

Розв'язання

Ні. Він втрачає тільки незначну кінетичну енергію, якої він набув при напрямленому русі в електричному полі.

2. Дистильована вода навіть після подвійної перегонки трохи проводить струм. Як це пояснити?

Розв'язання

Дуже мала частина молекул води дисоційована, і утворені йони H^+ та OH^- спричиняють невелику провідність води.

3. Яка провідність напівпровідникового матеріалу вища — власна чи домішкова?

Розв'язання

Домішкова (за тих невисоких температур, за яких використовують більшість напівпровідникових пристроїв та елементів схем).

4. Унаслідок проходження електричного струму крізь розчин мідного купоросу на катоді виділилося 52,8 г міді. Який заряд пройшов крізь електрод, якщо електрохімічний еквівалент міді дорівнює $0,33 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл?

Розв'язання

Щоб визначити заряд, який пройшов крізь електрод, скористаємося формулою: $q = It$.

У формулі, що виражає закон Фарадея $m = kIt$, замінимо добуток It на q і одержимо вираз для заряду: $q = m/k$.

Підставивши значення фізичних величин, отримаємо: $q = 160$ нКл.

5. Чому електричний струм у газах назвали *електричним розрядом*?

Розв'язання

Тому що під час проходження струму крізь газ між двома різнойменно зарядженими тілами ці тіла розряджаються.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

1.78. Як вплине на середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному провіднику збільшення сили струму в ньому в k разів?

1.79. Чи однакова потужність електроплитки в таких випадках: а) на ній стоїть посудина з холодною водою; б) посудини немає?

1.80. Чи витрачається енергія електричного струму на електролітичну дисоціацію?

1.81. Який йон має найбільшу рухомість у розчині електроліту?

1.82. Чи виконується закон Джоуля–Ленца під час проходження струму через розчин електроліту?

1.83. Чи можна користуватися законом Ома для обчислення значень сили струму в розчині електролітів?

1.84. До Германію додали невелику кількість атомів Арсену. Що і чому є основними носіями зарядів у такому напівпровіднику?

1.85. Магній і Телур за температури 20°C мають питомі опори відповідно $0,04$ і 5000 Ом \cdot м. Яка із цих речовин є напівпровідником?

1.86. Чому полярне сьйво можна спостерігати тільки у верхніх шарах земної атмосфери?

1.87. У діоді електрон підлітає до анода зі швидкістю 8 Мм/с. Визначте анодну напругу.

1.88. Чому опір електролітів зменшується з підвищенням температури?

1.89. Чому для гальванічного покриття виробу найчастіше застосовують нікель і хром?

1.90. Чому саме водні розчини солей, кислот і лугів є провідниками?

1.91. Коли в посудині з електролітом, де є носії струму обох знаків, струму немає?

1.92. Чому електроліт у розчині чи розплаві є електрично нейтральний, хоча він містить величезну кількість йонів обох знаків?

1.93. Чому під час проходження струму крізь електроліт на електродах виділяється чиста речовина, що входить до складу електроліту?

1.94. Чому електропровідність напівпровідників вимірюють при слабкому освітленні, майже у темряві?

1.95. Чому між вугільними електродами за невисокої напруги виникає газовий розряд — електрична дуга?

1.96. Чому для «запалювання» електричної дуги на її електроди подають високу напругу, а для підтримання струму в дузі така напруга не потрібна?

1.97. Чому електроскоп, розміщений недалеко від полум'я свічки, дуже швидко розряджається?

1.98. Коли виникає коронний розряд?

1.99. Чому особливо небезпечно доторкатися до дротів зі струмом мокрими руками?

1.100. Як утворюється блискавка між грозовою хмарою та поверхнею Землі?

1.101. Гроза застала вас у полі. Неподалік росте високе дерево з могутньою кроною. Чи варто бігти до нього, щоб сховатися від дощу?

1.102. Провідники, що з'єднують громовідвід (блискавковідвід) із заземленою пластиною, виявилися розірваними. Чи зможе такий громовідвід захистити від блискавки?

Рівень Б

1.103. З міді виготовили провідники різного перерізу, але однакової довжини й маси. Порівняйте їхні опори.

1.104. Амперметр вимірює силу струму в електроплитці з відкритою спіраллю. Чи зміниться його покази, якщо сильно подути зверху на: а) амперметр; б) електроплитку?

1.105. Чи може надпровідник проводити струми великого значення?

1.106. До посудини з електролітом прикладено сталу напругу. Чи залежить сила струму в ній від температури?

1.107. Чи є обмеження на напругу, яку ми повинні прикласти до посудини з підкисленою водою, щоб розкласти воду на водень і кисень?

1.108. З якою метою металеві труби водовідводів приєднують до від'ємного полюса джерела струму?

1.109. Якщо заряджену скляну паличку потримати над запаленою спиртівкою, то вона швидко втратить свій заряд. Чому?

1.110. До кінців кола, що складається з послідовно увімкнених термістора та резистора опором 750 Ом, подали напругу 20 В. За кімнатної температури сила струму в колі була 10 мА. Коли термістор занурили в гарячу воду, сила струму стала 20 мА. У скільки разів змінився опір термістора?

1.111. Який питомий опір повинна мати домішка алюмінію в кремнії (за масою, у відсотках), щоб концентрація дірок у ньому становила 5 см^{-3} ? Припустити, що в утворенні дірки бере участь кожен атом Алюмінію.

1.112. У розчині Аргентум (I) нітрату внаслідок проходження заряду 1 Кл на катоді виділяється 1,118 мг срібла. Визначте, яка маса срібла виділиться внаслідок проходження електричного заряду 500 Кл.

1.113. Під час електролізу розчину цинк сульфату виділилося 2,45 г цинку. Визначте електрохімічний еквівалент цього металу, якщо крізь електроліт протягом 60 хв проходить електричний струм 2 А.

1.114. Якою була сила струму під час електролізу розчину мідного купоросу, якщо за 50 хв на катоді виділилося 1,98 г міді?

1.115. Найбільшу кількість електрики, яку одержують під час розрядження акумулятора або гальванічного елемента, називають ємністю і вимірюють в ампер-годинах. Визначте, якої сили струм проходив крізь лужний акумулятор ємністю 42 А·год під час його заряджання протягом 2,8 год.

1.116. Електролізом добуто 3,3 кг міді. Скільки срібла можна одержати, якщо пропустити крізь відповідний електроліт такий самий заряд?

1.117. Крізь розчин сірчаної кислоти пройшло $2 \cdot 10^6$ Кл електрики, щоб виділений під час електролізу воднем заповнити за нормальних умов повітряну кулю. Який вантаж зможе підняти ця куля? Електрохімічний еквівалент водню дорівнює 0,0104 мг/Кл.

Є над чим замислитися

1.118. У мідному провіднику об'ємом 6 см^3 під час проходження по ньому постійного струму за 1 хв виділилося 216 Дж теплоти. Обчисліть напруженість електричного поля в провіднику.

1.119. Унаслідок електролізу сірчаноокислотного цинку протягом 1 год виділилося 2,448 г цинку. Напруга в мережі, до якої під'єднується електролітична ванна, на 6 В більша за ту, яка потрібна для нормального режиму у ванні. Який опір провідника, з'єданого послідовно з ванною для зменшення напруги до потрібного значення?

1.120. Йонізатор щосекунди утворює в 1 см^3 повітря $5 \cdot 10^5$ одновалентних йонів. Визначте роботу, потрібну для створення в 225 см^3 повітря вказаної концентрації йонів за час лікувального сеансу тривалістю 15 хв. Потенціал йонізації атомарного водню 13,6 В.

§ 14. ВЗАЄМОДІЯ СТРУМІВ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ

Ви вже знаєте, що між нерухомими електричними зарядами діють сили, які визначаються за законом Кулона. Ця взаємодія відбувається так: кожний із зарядів створює електричне поле, поле одного заряду діє на другий заряд і навпаки. Проте між електричними зарядами можуть діяти сили й іншої природи. Взаємодії між провідниками зі струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами, називають **магнітними**.

Учення про магніти та їхню взаємодію тривалий час розвивалося відокремлено, як одна з галузей науки, аж поки низка відкриттів і теоретичних досліджень у XIX ст. не довела органічний зв'язок магніту з електрикою.

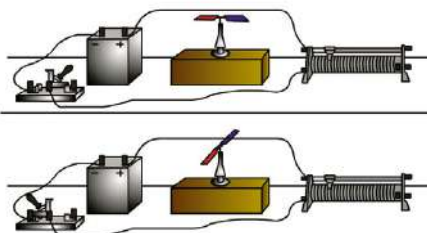
Одним з фундаментальних доведень єдності електричних і магнітних явищ є результат дослідів **Ганса-Крістіана Ерстеда** (1777–1851), датського фізика, який у 1820 р. виявив, що магнітна стрілка змінює своє положення поблизу провідника зі струмом (мал. 1.63).

Очевидним було те, що причиною цього є електричний струм — напрямлений рух заряджених частинок у провіднику.

Магнітні явища хоча й пов'язані з електричними, проте не тотожні їм.

Це також підтверджується дослідями. Якщо взяти два довгі паралельні провідники і приєднати їх до джерела струму, то ми побачимо, що провідники, по яких проходить струм у різних напрямках, відштовхуються один від одного (мал. 1.64, а), а якщо у провідниках струм проходить в одному напрямку, вони притягуються один до одного (мал. 1.64, б).

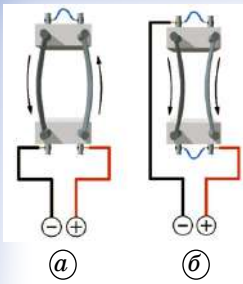
Електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне



Мал. 1.63



Ганс-Крістіан Ерстед



Мал. 1.64

поле, яке діє на струм у другому провіднику. Поле, створене електричним струмом другого провідника, діє на перший.

Отже, подібно до того, як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, існує електричне поле, у просторі, що оточує струми, існує поле, яке називають **магнітним**.

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 — це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.

Магнітне поле має такі особливості, які відрізняють його від інших полів: магнітне поле завжди пов'язане з рухом заряджених частинок або тіл; магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки або тіла.

Ви вже знаєте, що два провідники зі струмом взаємодіють один з одним. Це явище пояснюється тим, що сила, яка діє на кожний з провідників, зумовлена магнітним полем, створеним струмом другого провідника. Тому зрозуміло, що коли ми помістимо провідник зі струмом у магнітне поле, наприклад у поле постійного магніту, то на нього діятиме сила. Перевіримо це на досліді. Замкнувши коло, пропустимо струм по вільно підвішеному провіднику, що перебуває в магнітному полі підковоподібного магніту. Ми помітимо, що провідник почне рухатися (мал. 1.65).



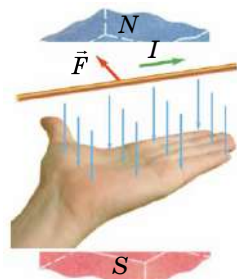
Мал. 1.65

Якщо ж забрати магніт, то провідник зупиниться. Отже, з боку магнітного поля на провідник зі струмом діє сила так само, як діє сила з боку магнітного поля на магнітну стрілку. Змінюючи напрямок струму або напрямку силових ліній магнітного поля, ми помічаємо, що змінюється і напрямок руху провідника, а отже, і напрямок сили, що діє на провідник.

Напрямок сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, можна визначити, використовуючи правило лівої руки.

Руку розміщують так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а чотири пальці збігалися з напрямком струму у провіднику, тоді великий палець, відведений на 90° , покаже напрямок сили, що діє на провідник (мал. 1.66).

Рух провідника зі струмом у магнітному полі дуже широко застосовується в техніці: в електродвигунах, у вимірювальних приладах з котушкою, що обертається, і в багатьох інших пристроях.



Мал. 1.66



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

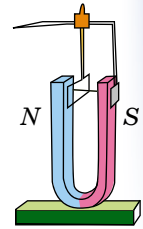
1. Які взаємодії називають магнітними і в чому їхня відмінність від електростатичних взаємодій?
2. Які досліди підтверджують існування магнітного поля?
3. Які сили називають магнітними?
4. Що таке магнітне поле?
5. Як визначити напрямок руху провідника зі струмом у магнітному полі?



Розкрийте вплив магнітного поля на живі організми.

§ 15. ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. ПОТІК МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Електричне поле характеризується векторною величиною — напруженістю електричного поля. Потрібна величина, що характеризує магнітне поле кількісно. Характеристику магнітного поля називають *вектором магнітної індукції* і позначають літерою B . Спочатку ми розглянемо лише напрямок вектора \vec{B} . З курсу фізики 9-го класу ви знаєте, що магнітне поле створюється як електричним струмом, так і постійними магнітами. Якщо між полюсами підковоподібного магніту підвісити на гнучких дротах рамку зі струмом, то вона повертатиметься доти, доки її площина не встановиться перпендикулярно до ліній, які напрямлені від північного полюса до південного (мал. 1.67).



Мал. 1.67

Отже, дія магнітного поля є дією, що орієнтує рамку зі струмом. Це можна використати для визначення напрямку вектора магнітної індукції.

За напрямком вектора магнітної індукції беруть напрямок від південного полюса S до північного N стрілки, яка вільно встановлюється в магнітному полі. Цей напрямок збігається з напрямком додатної нормалі до замкнутого контуру зі струмом (мал. 1.68, а).

Додатна нормаль, якщо її порівняти зі свердликом, напрямлена в той бік, куди пересувається свердлик з правою нарізкою, якщо його обертати в напрямку струму в рамці (мал. 1.68, б).

Маючи рамку зі струмом або магнітну стрілку, можна визначити напрямок вектора магнітної індукції в будь-якій точці поля. У магнітному полі прямолінійного провідника зі струмом магнітна стрілка встановлюється по дотичній до кола (мал. 1.69).

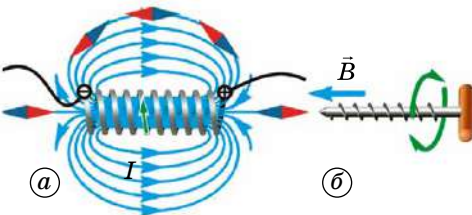
Площина кола перпендикулярна до провідника, а його центр лежить на осі провідника. Напрямок вектора магнітної індукції встановлюють за допомогою правила свердлика. Правило свердлика формулюють так:

якщо напрямок поступального руху свердлика збігається з напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки свердлика збігається з напрямком вектора магнітної індукції.

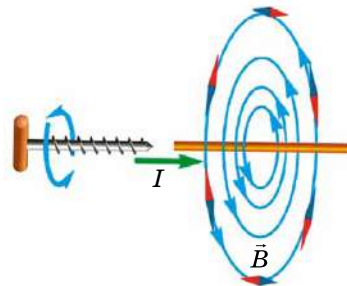
Подібно до того як електричні поля графічно зображають за допомогою електричних силових ліній, магнітні поля зображають за допомогою ліній магнітної індукції (або магнітних силових ліній).

Лінії магнітної індукції — це уявні лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямком вектора \vec{B} у цій точці.

Лінії магнітної індукції можна зробити «видимими» за допомогою залізних ошурок. Якщо на скляну пластинку, крізь яку пропущено пря-



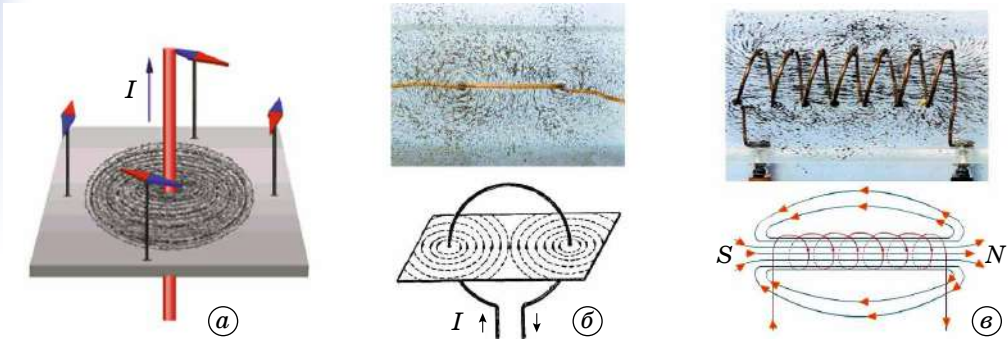
Мал. 1.68



Мал. 1.69

мий провідник зі струмом, насипати залізних ошукрок і злегка постукати по пластинці, то вони розмістяться вздовж силових ліній (мал. 1.70).

З дослідів випливає, що лінії магнітної індукції прямого провідника зі струмом є концентричними колами, які лежать у площині, перпендикулярній до напрямку струму. Центри цих кіл розташовані на осі провідника. За допомогою залізних ошукрок можна отримати зображення ліній магнітної індукції провідників зі струмом будь-якої форми (мал. 1.70).



Мал. 1.70

Лінії магнітної індукції завжди замкнені та охоплюють провідники зі струмами.

56

Це відрізняє їх від ліній напруженості електростатичного поля. Магнітні поля називають вихровими. Напрямок ліній магнітної індукції пов'язаний з напрямком струму в провіднику. Напрямок силових ліній магнітного поля, що створюється провідником зі струмом, визначають за правилом свердлика.

Якщо гвинт з правою різьбою вкручувати в напрямку струму, то напрямок обертання ручки гвинта буде збігатися з напрямком ліній магнітної індукції.

Магнітне поле називають однорідним, якщо вектори магнітної індукції в усіх його точках однакові ($\vec{B} = \text{const}$).

Прикладом однорідного магнітного поля може бути поле всередині соленоїда — котушки, довжина якої значно більша за її діаметр (мал. 1.70, в). Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні, і їхня щільність скрізь однакова.

З'ясуємо, від чого залежить сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі. Це нам потрібно для того, щоб дати визначення модуля вектора магнітної індукції.

Горизонтально підвішений провідник перебуває в полі постійного підковоподібного магніту. Поле магніту зосереджено в основному між полюсами, тому магнітна сила діє практично лише на частину провідника завдовжки Δl , розміщеного безпосередньо між полюсами. Силу вимірюють за допомогою спеціального динамометра, пов'язаного з провідником. Вона напрямлена горизонтально і перпендикулярно до провідника і ліній магнітної індукції. Збільшуючи силу струму в 2 рази, можна помітити, що й сила, яка діє на провідник, також збільшується в 2 рази. Візьмемо ще один магніт і в 2 рази збільшимо розміри області, де існує магнітне поле, і тим самим у 2 рази збільшимо довжину частини провідника, на яку діє магнітне поле. При цьому сила також збільшиться в 2 рази. І, нарешті, сила залежить від кута, утвореного вектором \vec{B} з провідником. У цьому можна впевнитися, змінюючи нахил підставки, на якій встановлено магніти, так, щоб змінився кут між провідником і лініями магнітної

індукції. Сила досягне максимального значення \vec{F}_{max} , коли вектор магнітної індукції буде перпендикулярним до провідника.

Отже, максимальна сила, що діє на відрізок провідника завдовжки Δl , по якому проходить струм силою I , прямо пропорційна добутку сили струму на довжину відрізка Δl :

$$\vec{F}_{max} \sim \Delta l.$$

Цей дослідний факт можна використати для визначення модуля вектора магнітної індукції. Дійсно, оскільки $\vec{F}_{max} \sim \Delta l$, то відношення $\frac{\vec{F}_{max}}{I\Delta l}$ не залежатиме від сили струму в провіднику, від довжини відрізка провідника. Саме тому це відношення може характеризувати магнітне поле в тому місці, де перебуває відрізок провідника.

Модулем вектора магнітної індукції називають відношення максимальної сили, що діє з боку магнітного поля на відрізок провідника зі струмом, до добутку сили струму на довжину цього відрізка:

$$B = \frac{F_{max}}{I\Delta l}.$$

Одиницею магнітної індукції в СІ є одна тесла (1 Тл): 1 Тл = 1 Н/1 А · 1 м. Цю одиницю названо на честь відомого сербського електротехніка Ніколи Тесли (1857–1943).

Однією з характеристик вектора магнітної індукції є її потік. Магнітний потік позначають літерою Φ . Розглянемо плоский елемент поверхні площею ΔS , розміщений в однорідному магнітному полі (мал. 1.71).

57

Магнітним потоком Φ крізь поверхню S називають фізичну величину, яка визначається добутком B_n (проекції вектора магнітної індукції на нормаль до поверхні) і площею цієї поверхні:

$$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha,$$

де α — кут між перпендикуляром до площини \vec{n} і вектором індукції \vec{B} .

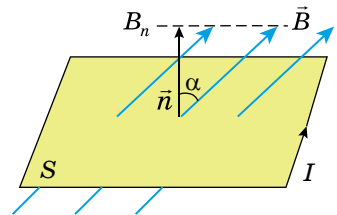
Оскільки $B_n = B \cos \alpha$ — величина скалярна, то скаляром є і магнітний потік. **Магнітний потік Φ характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять крізь цю поверхню.**

Для однорідного поля і плоскої поверхні, що перпендикулярна до вектора B , $B_n = B = \text{const}$, маємо:

$$\Phi = BS.$$

Одиницею магнітного потоку в СІ є **один вебер (1 Вб)**.

1 вебер — потік через плоску поверхню площею 1 м², розміщену перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля, індукція якого дорівнює 1 Тл: 1 Вб = 1 Тл · 1 м².



Мал. 1.71



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Дайте означення модуля вектора магнітної індукції.
2. Що таке лінії магнітної індукції?
3. Що таке магнітний потік?
4. Які одиниці індукції магнітного поля і магнітного потоку в СІ?

§ 16. СИЛА АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА

Одним з проявів магнітного поля є його силова дія на рухомі електричні заряди та провідники зі струмом. У 1820 р. **Анрі-Марі Ампер** (1775–1836) установив закон, який визначає силу, що діє на відрізок провідника зі струмом у магнітному полі.

Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, то Ампер вивчав поведінку рухомих дротяних замкнених контурів різної форми. Він установив, що на провідник зі струмом, вміщений в однорідне магнітне поле, індукція якого \vec{B} , діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника Δl , силі струму I , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля \vec{B} :

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де α — кут між напрямком струму в провіднику і напрямком вектора \vec{B} . Цей вираз називають **законом Ампера**, а силу — **силою Ампера**. Ця сила матиме максимальне значення при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Якщо провідник розміщено уздовж ліній магнітної індукції, то ця сила дорівнюватиме нулю.

Напрямок сили Ампера визначається за допомогою правила лівої руки, з яким ви ознайомилися раніше (див. мал. 1.67).



Анрі-Марі
Ампер



Генріх
Лоренц

Як ми вже з'ясували, магнітне поле взаємодіє лише з провідниками, через які проходить струм, і не впливає на провідники без струму. Це свідчить про те, що магнітне поле діє не на матеріал провідника, а на заряджені частинки (електрони чи йони), які в ньому переміщуються. У такому випадку сила Ампера є результируючою всіх сил, які діють на окремі рухомі заряджені частинки.

Визначимо силу, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі. Нехай на провідник завдовжки l , по якому проходить струм силою I і який міститься в магнітному полі з індукцією \vec{B} , діє сила $F_A = BIl \sin \alpha$. Але сила струму визначається за формулою $I = evS$. Тоді $F_A = evSBl \sin \alpha$, де добуток Sl — об'єм провідника, $N = nSl$ — кількість заряджених частинок, які рухаються в цьому провіднику. Тоді силу, яка діє на одну рухому частинку, можна визначити, поділивши силу F_A , яка діє на всі частинки, на загальну кількість рухомих заряджених частинок N :

$$F_{\text{л}} = \frac{F_A}{N} = evB \sin \alpha.$$

Отже, сила, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, пропорційна заряду частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля:

$$F_{\text{л}} = evB \sin \alpha.$$

Цю формулу вперше одержав голландський фізик **Генріх Лоренц** (1853–1928), і тому її називають формулою Лоренца, а силу, яка обчислюється за цією формулою, називають **силою Лоренца**.

З формули випливає, що сила Лоренца залежить від кута між напрямком руху зарядженої частинки і напрямком вектора індукції магнітного поля. Магнітне поле не діє на нерухомі заряджені частинки ($F_{\text{л}} = 0$ при $v = 0$) і на частинки, які рухаються вздовж ліній індукції поля ($\sin \alpha = 0$). Сила Лоренца буде максимальною, якщо частинка влітає в магнітне поле

перпендикулярно до ліній його індукції. У цьому випадку $F_{\text{Л}} = evB$. Якщо поле однорідне ($B = \text{const}$), то заряджена частинка описуватиме коло (мал. 1.72), оскільки рух під дією сталої сили, напрямленої під прямим кутом до швидкості руху, згідно з другим законом динаміки, іншим бути не може. Напрямок сили Лоренца, як і сили Ампера, визначається за правилом лівої руки:

якщо ліву руку розмістити так, щоб складова магнітної індукції \vec{B} , перпендикулярна до швидкості руху заряду, входила в долоню, а випрямлені чотири пальці були напрямлені за рухом позитивного заряду (проти руху негативного), то відігнутий на 90° великий палець покаже напрямок сили Лоренца $F_{\text{Л}}$, яка діє на заряд, вміщений у магнітне поле (мал. 1.73).

Потрібно пам'ятати, що це справджується для позитивно заряджених частинок. Якщо визначається напрямком сили Лоренца, що діє на електрон (чи іншу негативно заряджену частинку), то застосовуючи правила, потрібно змінювати напрямок швидкості руху на протилежний.

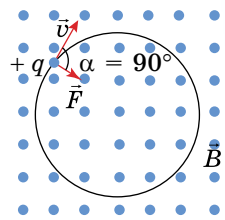
Дія сили Лоренца застосовується в багатьох приладах і технічних установках. Так, зміщення електронного променя, що «малює» зображення на екрані дисплея комп'ютера, здійснюється магнітним полем спеціальних котушок, у яких проходить електричний струм, що змінюється за певним законом. У наукових дослідженнях використовуються так звані циклічні прискорювачі заряджених частинок, у яких магнітне поле потужних електромагнітів утримує заряджені частинки на колових орбітах.

Принципи дії електричних двигунів пов'язаний із силою Ампера. Розглянемо це на прикладі колекторного двигуна.

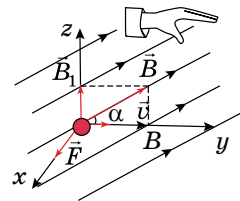
Робота колекторних двигунів ґрунтується на фізичному явищі — втягуванні або виштовхуванні провідника з електричним струмом у магнітному полі. Щоб провідник зі струмом безперервно рухався між полюсами магніту, йому надають форми рамки (мал. 1.74), на обидва боки якої надають діяти одночасно, але в протилежних напрямках: один бік рамки втягуватиме, а другий — виштовхуватиме.

Через півоберта рамка зупиниться. А щоб вона і далі оберталась у тому самому напрямку, у цей момент треба змінити напрямок струму в рамці, тобто поміняти місцями кінці дротів, що підводять струм від джерела.

Для автоматичної зміни напрямку струму в рамці встановлено спеціальний перемикач — колектор. Його виготовлено із двох напівкруглих латунних пластин. До пластин притиснуто ковзні графітові контакти (щітки), через які до рамки надходить електричний струм. У промислових колекторних електродвигунах рамку із дротів намотують у пази, вирізані в залізного осерді. Залізо підсилює магнітне поле, яке діє на рамку. Ту частину двигуна, де намотано рамки, називають якорем, або ротором. Оскільки обмоток на якорі кілька, то й колектор складається з багатьох ізольованих одна від одної і від вала двигуна латунних пластин. Колектор жорстко закріплено на



Мал. 1.72



Мал. 1.73



Мал. 1.74

валу якоря. До колектора притискуються за допомогою пружин графітові щітки. Графіт для щіток і латунь для колектора вибрані тому, що під час обертання ротора ці матеріали мало стираються, а отже, і довший термін їх використання.



Мал. 1.75

Під час роботи двигуна рух якоря передається валу, а з нього — безпосередньо робочим органом споживача.

Охолодження електродвигуна забезпечує вентилятор, крильчатку якого закріплено на валу.

Зовнішній вигляд колекторного двигуна може бути різним (мал. 1.75).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Дайте означення сили Ампера.
2. Як визначається сила Лоренца?
3. За якими правилами визначається напрямок сили Ампера і сили Лоренца? Що потрібно при цьому враховувати?
4. Який принцип дії колекторного двигуна?



РОБОТА У ГРУПАХ

Об'єднайтеся в групи та виконайте проект на тему «Роль сили Ампера і сили Лоренца в техніці».



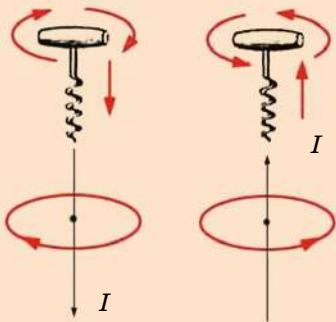
ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- **«Правило свердлика».** На малюнку 1.76 схематично проілюстровано «правило свердлика», яке відкрив Дж. Максвелл. Гвинт рухається вниз за годинниковою стрілкою (з точки зору спостерігача, який дивиться в напрямку поступального руху). Такий самий напрямок має магнітний потік, що спричиняє колдовий струм.

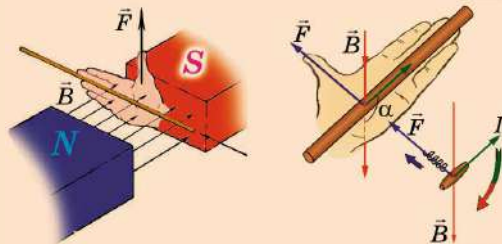
- **«Правила правої та лівої руки».** До двох правил, які відкрили Ампер («правило плавця») та Максвелл («правило свердлика») англійський вчений, фізик та електротехнік **Д. Флемінг** додав два інших: «правила правої та лівої руки» для визначення напрямку струму, магнітного поля і напрямку руху провідника під впливом магнітного поля.

На малюнку 1.77 подано схему, що ілюструє ці два правила Флемінга.

Напрямок руху провідника визначається за «правилом лівої руки» (двигун), напрямок електрорушійної сили, індукованої у замкнутому контурі при його переміщенні в магнітному полі, визначається за «правилом правої руки» (генератор).



Мал. 1.76



Мал. 1.77



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Які із заряджених космічних частинок з більшою чи меншою швидкістю руху, що пролітають поблизу екваторіальної площини Землі, найближче проникають до її поверхні? Чому?

Розв'язання

Оскільки радіус кола, яке описує заряджена частинка в магнітному полі, $r \sim v$, то найближче до Землі підлетять найшвидші частинки.

2. Прямий дрід завдовжки 10 см, у якому проходить струм 0,5 А, розміщений в однорідному магнітному полі перпендикулярно до силових ліній. Визначте індукцію магнітного поля, якщо воно діє на дрід силою 2,6 мН.

Розв'язання

Сила, з якою однорідне магнітне поле діє на прямий провідник, визначається за формулою: $F_A = BIl \sin \alpha$.

Звідси визначимо $B = \frac{F_A}{Il \sin \alpha}$. Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо $B = 52$ мТл.

3. Протон, проходячи прискорюючу різницю потенціалів 400 В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл і став рухатися по колу. Визначте радіус кола, по якому він рухався.

Розв'язання

На заряджену частинку, яка влетіла в магнітне поле діє сила Лоренца $F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha$.

За умовою задачі протон рухається по колу, тоді сила Лоренца є доцентровою силою $F = \frac{mv^2}{2}$. Отже, $qvB = \frac{mv^2}{2}$, звідки $R = \frac{mv}{qB \sin \alpha}$.

Протон отримав швидкість, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів. За законом збереження енергії, робота, яку виконує поле при переміщенні протона, дорівнює кінетичній енергії, набутий протоном, тобто $A = E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$. А робота сил електричного поля при переміщенні заряду визначається за формулою $A = qU$. Тоді $qU = \frac{mv^2}{2}$, звідки $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$.

Отже, радіус кола, по якому рухався протон, визначимо за формулою:

$$R = \frac{\sqrt{2qUm}}{qB \sin \alpha}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо $R = 1,45$ см.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

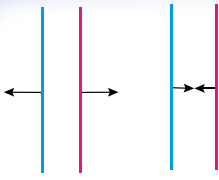
Рівень А

1.121. Як напрямлено струм у проводах, коли сили взаємодії напрямлені так, як на малюнку 1.78?

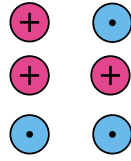
1.122. Як взаємодіють паралельні струми, напрямлені так, як зображено на малюнку 1.79?

1.123. Позначте знаками «+» та «-» полюси джерела струму, яке живить соленоїд, щоб спостерігалася взаємодія як на малюнку 1.80.

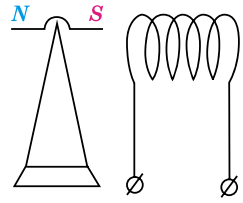
1.124. Яка індукція магнітного поля, що діє силою 50 мН на провідник



Мал. 1.78



Мал. 1.79



Мал. 1.80

завдовжки 5 см, у якому проходить струм силою 2,5 А, напрямлений перпендикулярно до ліній магнітної індукції?

1.125. Яка довжина активної частини провідника, якщо при силі струму в ньому 4 А на нього діє силою 0,2 Н магнітне поле, індукція якого 0,5 Тл? Напрямок струму і поля взаємно перпендикулярні.

1.126. Провідник завдовжки 40 см помістили в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Якої сили струм проходить у провіднику, якщо на нього діє магнітне поле із силою 0,8 Н та індукцією 1 Тл?

1.127. Яка сила діє на провідник завдовжки 10 см в однорідному магнітному полі? Магнітна індукція поля становить 2,6 Тл, а сила струму у провіднику дорівнює 12 А. Кут між напрямком струму і лініями індукції: 1) 90° ; 2) 30° .

1.128. На провідник завдовжки 50 см із струмом силою 20 А, розміщений в однорідному магнітному полі, що має магнітну індукцію 0,1 Тл, діє сила 0,5 Н. Визначте кут між напрямком струму в провіднику і вектором магнітної індукції.

1.129. Який магнітний потік пронизує плоску поверхню площею 50 см^2 при індукції поля 0,4 Тл, якщо ця поверхня: а) перпендикулярна до вектора індукції поля; б) розташована до вектора індукції під кутом 45° ; 30° ?

1.130. Магнітний потік у середині контуру, площа поперечного перерізу якого 60 см^2 , становить 0,3 мВб. Визначте індукцію поля всередині контуру. Вважати, що поле однорідне.

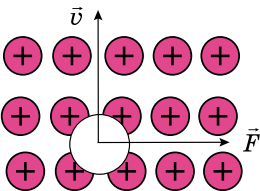
1.131. Визначте магнітний потік, що пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 60 см і завширшки 25 см, якщо магнітна індукція в усіх її точках дорівнює 1,5 Тл, а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до цієї площини кут 90° .

1.132. Визначте знак заряду частинки за напрямком її руху і напрямком сили Лоренца (мал. 1.81 і 1.82).

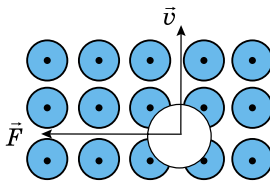
1.133. Швидкість електрона e напрямлена до нас (мал. 1.83). У якому напрямку відхилиться електрон під дією магнітного поля? Дайте відповідь на це запитання, якщо швидкість електрона напрямлена в протилежний бік; лінії магнітної індукції напрямлені в протилежний бік.

1.134. Яка сила діє на протон, що рухається зі швидкістю 10 Мм/с у магнітному полі з індукцією 0,2 Тл перпендикулярно до ліній індукції?

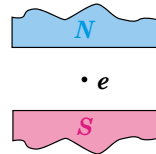
1.135. Електрон рухається у вакуумі в однорідному полі, магнітна індукція якого $5 \cdot 10^{-3}$ Тл, зі швидкістю $1 \cdot 10^4$ км/с, напрямленою перпендикулярно до ліній індукції. Визначте силу, що діє на електрон.



Мал. 1.81



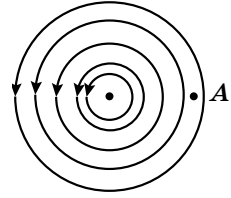
Мал. 1.82



Мал. 1.83

Рівень Б

1.136. На малюнку 1.84 зображено магнітне поле прямого струму. а) Який напрямок має струм у провіднику? б) Чи є поле в точці A ? в) Який напрямок має вектор магнітної індукції у будь-якій точці поля? г) Визначте напрямки сил, які діють у цьому полі на полюси магнітної стрілки.



Мал. 1.84

1.137. Чим відрізняється магнітне поле від електростатичного?

1.138. Чому струмінь розплавленого металу, якщо пропускати крізь нього струм, звужується (зменшується площа поперечного перерізу)? Як можна застосувати це явище в металургії?

1.139. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямку проходять струми I_1 і I_2 . Визначте індукцію магнітного поля в точці A , яка лежить на продовженні прямої, що сполучає провідники на відстані S від другого провідника. Вважати, що обидва провідники містяться у вакуумі.

1.140. Струм силою I , що проходить у кільці з мідного дроту перерізом S , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля, що дорівнює B . Яка різниця потенціалів між кінцями провідника, що утворює кільце?

1.141. Для переміщення на $0,25$ м провідника завдовжки $0,4$ м в однорідному магнітному полі, індукція якого $1,25$ Тл, було виконано роботу $0,25$ Дж. Якої сили струм проходив у провіднику, якщо він рухався перпендикулярно до поля?

1.142. У горизонтально розміщеному провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А. Визначте індукцію (модуль і напрямок) магнітного поля, у якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.

1.143. Який магнітний потік пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 50 см і завширшки 30 см, коли магнітна індукція становить 2 Тл, а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до площини кут 90° , 45° , 0° ?

1.144. Електрон, який має швидкість $1,9 \cdot 10^7$ м/с, влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до напрямку його руху. Індукція магнітного поля становить $1,2 \cdot 10^{-3}$ Тл. Визначте радіус кривизни траєкторії електрона і його доцентрове прискорення.

1.145. Траєкторія електрона є дугою кола радіусом 10 см. Індукція магнітного поля $1 \cdot 10^{-2}$ Тл. Визначте швидкість руху електрона і період його обертання.

1.146. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого 4 мТл. Визначте період обертання електрона.

Є над чим замислитися

1.147. По дротяній рамці, що має форму правильного шестикутника, іде струм 2 А. При цьому в центрі рамки утворюється магнітне поле напруженістю 33 А/м. Знайдіть довжину дроту, з якого виготовлено рамку.

1.148. Провідник, що має довжину 1 м і масу 10 г, підвісили на тонких дротиках. Під час проходження в ньому струму 2 А він відхилився в однорідному вертикальному полі так, що дротики утворили кут 30° з вертикаллю. Яка індукція магнітного поля?

1.149. Протон влітає в однорідне магнітне поле так, що вектор швидкості спрямований під кутом 30° до ліній індукції поля і рухається по спіралі радіуса $1,5$ см. Індукція магнітного поля $0,1$ Тл. Визначте кінетичну енергію протона.

1.150. Пройшовши прискорюючу різницю потенціалів 2 кВ, електрон влітає в однорідне магнітне поле індукцією $2 \cdot 10^4$ Тл і рухається в ньому по колу. Визначте радіус кола, по якому рухається електрон.

§ 17. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Як ви вже знаєте, електричне поле створюється електричними зарядами, а магнітне поле — рухомими зарядами, тобто електричним струмом. Між ними існує дуже тісний взаємозв'язок. Магнітне поле, що змінюється в часі, породжує електричне поле, а змінне електричне поле породжує магнітне. Без цього зв'язку між полями різноманітність виявів електромагнітних сил не була б такою широкою, якою вона є насправді. Не існувало б ані радіохвиль, ані світла.

Перший вирішальний крок у відкритті нових властивостей електромагнітних взаємодій зробив Майкл Фарадей. Він був упевнений в єдиній природі електричних і магнітних явищ. Завдяки цьому фізик зробив відкриття, на якому ґрунтується будова всіх генераторів електростанцій світу, які перетворюють механічну енергію в енергію електричного струму. Це відкриття було зроблено в 1831 р. й отримало назву **явище електромагнітної індукції**.

Явище електромагнітної індукції — це виникнення електричного струму в замкнутому провідному контурі, який або розміщено нерухомо в змінному магнітному полі, або переміщується в постійному магнітному полі так, що кількість ліній магнітної індукції, які перетинають контур, змінюється.

Явище електромагнітної індукції Фарадей досліджував за допомогою двох ізольованих одна від одної дрітятих спіралей, намотаних на дерев'яні котушки (мал. 1.85). Одну спіраль було з'єднано з гальванічною батареєю, а другу — з гальванометром, який реєструє слабкі струми. У моменти замикання та розмикання кола першої спіралі стрілка гальванометра в колі другої спіралі відхилялась.

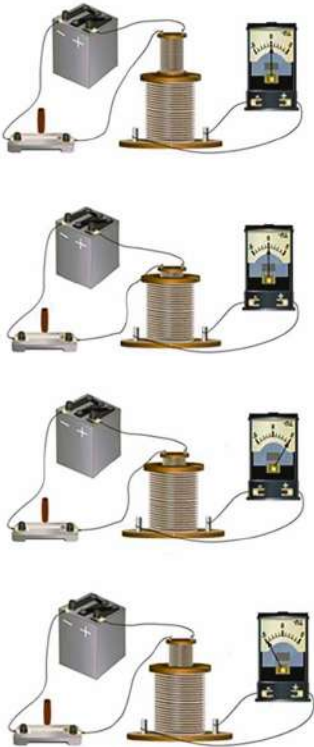
Виконавши безліч дослідів, Фарадей встановив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється із часом потік індукції магнітного поля.

Виконавши безліч дослідів, Фарадей встановив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється із часом потік індукції магнітного поля.

Струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції, називають індукційним.

Індукційний струм у котушці з металевого дроту виникає також під час зміни сили струму в другій котушці, магнітне поле якої пронизує першу котушку. Індукційний струм виникає також під час руху котушки відносно нерухомого постійного магніту. Якщо з'єднана з гальванометром котушка рухається повільно в однорідному полі, то індукційний струм не виникає, бо кількість силових ліній, що перетинають котушку, весь час залишається незмінною.

Поява електричного струму в замкнутому контурі під час зміни магнітного поля, яке його пронизує, свідчить про дію в контурі сторонніх сил неелектростатистичної природи або про виникнення ЕРС індукції. Явища електромагнітної індукції кількісно описують на основі



Мал. 1.85

встановлення зв'язку між ЕРС індукції і магнітним потоком. Ця величина залежить від значень вектора не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским замкненим контуром.

Причина виникнення індукційного струму полягає перш за все в тому, що в замкнутому контурі спочатку виникає ЕРС. А вже потім під її впливом у контурі, опір якого R , проходить індукційний струм — такий,

якого потребує закон Ома для повного кола $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$. Досліди 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. Отже, $I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ тільки тому, що ЕРС індукції $\mathcal{E}_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Закон електромагнітної індукції сформульовано саме для ЕРС, оскільки за такого формулювання він виражає суть явища, незалежного від властивостей провідників, у яких виникає індукційний струм. Згідно із законом електромагнітної індукції:

ЕРС індукції в замкнутому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, що обмежена контуром:

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

65

Ця формула описує фундаментальний закон природи — **основний закон електромагнітної індукції**, його ще називають **законом Фарадея**.

Під час проведення дослідів з електромагнітної індукції можна помітити, що стрілка приладу відхиляється то в один бік, то в другий, що свідчить про різні напрямки індукційного струму (мал. 1.86, а, б).

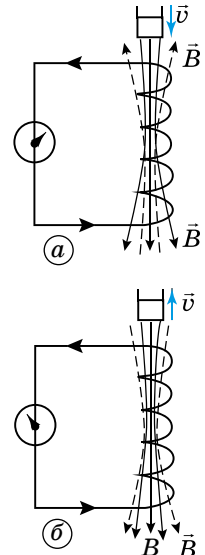
Російський учений **Емілій Ленц** застосував до явища електромагнітної індукції закон збереження і перетворення енергії і сформулював правило:

індукційний струм, що виникає в замкнутому контурі, протидіє зміні магнітного потоку, який збуджує цей струм.

Користуючись правилом Ленца можна визначити напрям індукційного струму. Правило Ленца є виявом закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах. Енергія індукційного струму в провіднику дорівнює тій роботі, що виконується з подолання протидії магнітного поля, створеного індукційним струмом.

Застосуємо це правило до закону електромагнітної індукції.

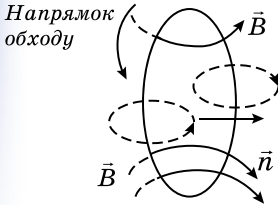
На малюнку 1.87 зображено замкнений контур. Додатним вважатимемо напрям обходу контура проти руху годинникової стрілки. Перпендикуляр до контура \vec{n} утворює правий гвинт з напрямком обходу. Нехай магнітна індукція B напрямлена вздовж перпендикуляра до контура



Мал. 1.86

і із часом збільшується. Тоді $\Phi > 0$ і $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.

Згідно з правилом Ленца індукційний струм створює магнітний потік $\Phi' < 0$. Силкові лінії магнітного поля індукційного струму зображено на малюнку 1.87 штрихом. Отже, цей струм 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 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$



Мал. 1.87

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. Оскільки змінюється магнітний потік у котушці, що складається з N однакових витків провідника, то загальна ЕРС індукції буде в N разів більшою від ЕРС індукції в окремому контурі:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

66

Це рівняння може набувати й іншого вигляду залежно від характеру зміни магнітного потоку. Для випадку нестационарного магнітного поля, коли вектор індукції магнітного поля змінюється із часом за незмінних площі контуру та його орієнтації ($S = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$):

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta BS}{\Delta t} \cos \alpha.$$

У разі зміни орієнтації поля ($\vec{B} = \text{const}$) або зміни орієнтації контура в стаціонарному полі ($S = \text{const}$):

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\Delta t},$$

де α_1 і α_2 — кути між перпендикуляром до контура і вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Якщо магнітне поле стаціонарне ($\vec{B} = \text{const}$), а орієнтація контуру незмінна ($\alpha_2 = \text{const}$), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контуру, її розраховують за формулою:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos \alpha,$$

де S_1 і S_2 — площі контура на початку і наприкінці, наприклад, руху ділянки контуру.

Закон Фарадея дав змогу пояснити виникнення вихрових струмів. Вихрові струми, струми Фуко, названі на честь Леона Фуко, вихрові індукційні струми, які виникають у масивних провідниках при зміні магнітного потоку, який їх пронизує. Струми Фуко виникають під дією змінного електромагнітного поля і за своєю фізичною природою нічим не відрізняються від індукційних струмів, що виникають у лінійних провідниках.

Оскільки електричний опір провідників малий, то сила струмів Фуко може досягати великих значень. Згідно з правилом Ленца вони вибира-

ють у провіднику такий напрямок, щоб протистояти причині, яка їх спричиняє. Тому в сильному магнітному полі провідники, які рухаються, витримують сильне гальмування, яке пояснюється взаємодією струмів Фуко з магнітним полем. Цей ефект застосовується для гасіння коливань рухливих частин гальванометрів, сейсмографів тощо.

Теплова дія струмів Фуко використовується в індукційних печах: у котушку, яка живиться від високочастотної батареї великої сили, поміщають тіло-провідник, у якому виникають вихрові струми, які розігрівають його до плавлення.

У багатьох випадках струми Фуко небажані, шкідливі. Щоб уникнути їх, наприклад, якоря трансформаторів набирають з тонких пластин. З повою феритів ці провідники стали виготовляти суцільними.

Явище електромагнітної індукції широко використовується в сучасній техніці, побуті.

Наприклад, в аеропорту в рамках-металошукачах (мал. 1.88). Якщо під час проходження пасажирки чи пасажирки через таку рамку спрацьовує сигнал, це означає що людина має металеві предмети, які змінюють магнітне поле рамки.

У швидкісних поїздах на повітряній подушці (мал. 1.89) традиційні металеві колісні пари замінено повітряними підйомними подушками, а звичайні залізничні колії — напрямною доріжкою з покриттям подібним до асфальту. Так усувається тертя під час кочення і забезпечується дуже висока ефективність, а також спрощується інфраструктура, потрібна для закладання нової лінії.

Мікрохвильова піч є одним з найпопулярніших побутових електроприладів. На відміну від інших пристроїв (наприклад, духовки або печі), у мікрохвильовій печі розігрів продуктів відбувається не з поверхні, а в більшій частині об'єму. Радіохвилі на частоті 2,450 ГГц глибоко проникають майже в усі харчові продукти, унаслідок чого час підігріву або приготування їжі значно скорочується.

Магнітні матеріали застосовують для запису інформації. Магнітний запис — спосіб запису електричних сигналів на шарі оксиду заліза чи іншому магнітному матеріалі, нанесеному на немагнітну основу: тонку пластикову стрічку, алюміній, скло тощо.

Під час запису електричний сигнал від джерела сигналу подається на електромагнітну голівку, яка намагнічує магнітне покриття носія відповідно до частоти й амплітуди підведеного сигналу. Імпульси можуть бути звуковими, візуальними або нести цифрову інформацію (для комп'ютера, мал. 1.90).

Під час відтворення носій пропускання через ту саму або іншу голівку, і остаточна намагніченість магнітного шару носія індукує в голівці електричний сигнал, який далі підсилюється.

Для аналогових сигналів різної частоти (аудіо- або відеосигналів) сигнал під час запису та зчитування підлягає спотворенню, яке компенсує нерівномірність амплітудно-частотної характеристики тракту передачі сигналу та носія.



Мал. 1.88



Мал. 1.89



Мал. 1.90



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте правило Ленца.
3. Що таке індукційний струм?
4. У чому полягає закон електромагнітної індукції?
5. Що таке вихрові струми? Як вони виникають і де застосовуються?



Покажіть, що явище електромагнітної індукції є основою розвитку електротехніки.

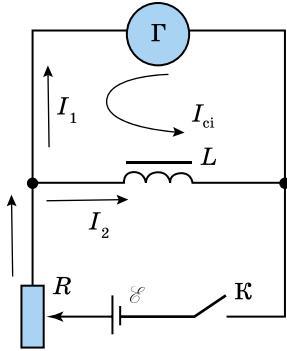
§ 18. ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СТРУМУ. ГУСТИНА ЕНЕРГІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Явище електромагнітної індукції спостерігається в усіх випадках, коли змінюється магнітний потік через контур. Проте якщо провідник зі струмом перебуває у власному магнітному полі і якщо це поле змінюється, то в провіднику має збуджуватися ЕРС індукції. Власне магнітне поле такого провідника залежить від сили струму в ньому, тому в разі зміни сили струму в колі в провіднику збуджується ЕРС.

Виникнення ЕРС у провіднику під час зміни сили струму в ньому самому називають самоіндукцією.

Розглянемо коло (мал. 1.91), яке складається з батареї ЕРС, реостата R , котушки індуктивності L , гальванометра Γ і ключа K .

Якщо коло замкнене, то по гальванометру Γ і котушці індуктивності L проходить електричний струм. У момент розмикання кола стрілка гальванометра різко відхиляється у протилежний бік. Причина цього в тому, що, коли коло розмикається, магнітний потік у котушці зменшується, створюючи в ній ЕРС самоіндукції. Струм самоіндукції I_{ci} за правилом Ленца перешкоджає спаданню магнітного потоку, тобто він напрямлений у котушці так само, як і спадний струм I_2 . Цей струм повністю проходить через гальванометр, але за напрямком, протилежним до напрямку I_1 .

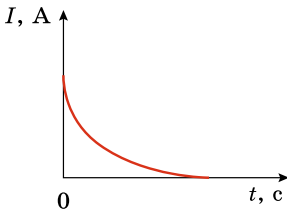


Мал. 1.91

Явище виникнення індукваного струму в колі внаслідок зміни струму в ньому називають *самоіндукцією*.

Самоіндукція — це окремий випадок явищ електромагнітної індукції.

Графік зміни сили струму в колі в момент розмикання показано на малюнку 1.92. Струм поступово зменшується від значення I , яке було перед розмиканням, до нуля, нагріваючи при цьому провідники. Якщо б обмотка котушки була виготовлена з надпровідного матеріалу і закорочена тим самим провідником, то струм у колі існував би нескінченно довго.



Мал. 1.92

Оскільки самоіндукція — окремий випадок явища електромагнітної індукції, закон Фарадея можна застосовувати і для визначення ЕРС самоіндукції. Пригадаємо, що магнітний потік через площу, обмежену контуром струму, пропорційний силі струму. Дійсно, $\Phi = BS$, а магнітна індук-

ція поля, створюваного струмом, пропорційна в усіх випадках силі струму, тобто $B \sim I$. Отже:

$$\Phi = LI,$$

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

Коефіцієнт L називають *індуктивністю провідника*, або його *коефіцієнтом самоіндукції*.

Індуктивність провідника в даному середовищі визначається його розмірами і формою. Індуктивність прямолінійного провідника незначна, проте вона збільшується, якщо з нього зробити виток. Індуктивність котушки збільшується пропорційно кількості її витків.

Запишемо формулу для обчислення ЕРС самоіндукції:

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

Якщо форма контуру не змінюється, то коефіцієнт самоіндукції L є сталим, тоді $\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

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

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

яка визначається ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі в разі зміни сили струму на 1 А за 1 с.

За одиницю індуктивності в СІ прийнято один **генрі (1 Гн)**. З формули видно, що **1 генрі — це індуктивність провідника, у якому при зміні сили струму на 1 А за 1 с виникає ЕРС самоіндукції 1 В: 1 Гн = 1 В · 1 с/1 А.**

ЕРС самоіндукції, яка виникає під час замикання і розмикання кола, у деяких випадках може бути досить значною. Що більша індуктивність кола, то більша ЕРС і сила струму самоіндукції. Ось чому в разі вимикання рубильників, які розмикають електричні кола з потужними електромагнітами, електродвигунами, трансформаторами та іншими пристроями з великою індуктивністю, між їхніми контактами пролітає електрична іскра. Вона іноді може перейти в дуговий розряд і зіпсувати рубильник. Причиною цього є виникнення в колі такої великої ЕРС самоіндукції, що між контактами рубильника пробивається повітряний проміжок. Для розмикання таких кіл користуються масляними вимикачами і вживають інших застережних заходів.

Магнітне поле нерозривно пов'язане з електричним струмом: воно виникає, змінюється і зникає зі зміною сили струму. Отже, під час замикання кола частина енергії джерела струму завжди витрачається на створення магнітного поля. Тому воно повинно мати енергію, що дорівнює роботі, витраченій струмом на його створення. Саме енергією магнітного поля пояснюється явище електромагнітної індукції, зокрема самоіндукції. У разі замикання кола із джерелом постійної ЕРС сила струму не відразу досягає максимального значення (яке визначається законом Ома), а певний час збільшується, оскільки частина енергії джерела витрачається в цей час на створення магнітного поля. Досягнувши максимального значення, сила струму в колі вже не змінюється. При цьому постійним стає і магнітне поле струму, його енергія також не буде змінюватися. Джерело струму витрачає енергію лише на підтримання постійної сили струму, і ця частина енергії перетворюється у внутрішню енергію провідників, тобто витрачається на їхнє нагрівання. Під час розмикання кола магнітне поле струму зникає, однак згідно із законом збереження енергії

його енергія перетворюється в енергію струму самоіндукції, який підсилює струм, що вимикають.

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

Енергію магнітного поля котушки індуктивності можна знайти, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується із часом за лінійним законом. У цьому разі ЕРС самоіндукції має таке постійне значення:

$$\mathcal{E}_{\text{ci}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t},$$

де t — час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від початкового значення I до 0.

За цей час у колі проходить електричний заряд $q = \frac{I}{2} t$. При цьому робота електричного струму $A = q \mathcal{E}_{\text{ci}} = \frac{It}{2} \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}$.

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: $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$.

Для характеристики магнітного поля використовують фізичну величину — **густину енергії**.

70

Густина енергії магнітного поля визначається за формулами:

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2},$$

де ω — густина енергії магнітного поля; μ_0 — магнітна проникність речовини у вакуумі; μ — магнітна проникність речовини; B — магнітна індукція; H — напруженість магнітного поля.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке самоіндукція?
2. У який момент іскрить рубильник: під час замикання чи розмикання кола? Чому?
3. Що таке індуктивність?
4. Назвіть одиницю індуктивності.
5. Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?
6. Як визначається енергія магнітного поля? Густина енергії магнітного поля?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Вертикальний залізний циліндр, підвішений на динамометрі, намагнітили так, щоб його північний полюс був зверху. Циліндр розмістили на однаковій відстані від екватора: перший раз у північній півкулі, другий — у південній. Коли покази динамометра були більшими?

Розв'язання

Перший раз, тому що напрямок сили тяжіння збігається з напрямком складової притягання циліндрика магнітним полем Землі.

2. Який заряд пройде через поперечний переріз замкненого провідника опором 10 Ом зі зміною магнітного потоку від 35 до 15 мВб?

Розв'язання

Зі зміною магнітного потоку в провіднику виникає ЕРС індукції

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}.$$

Оскільки провідник замкнений, то в ньому буде проходити струм силою

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}.$$

Разом із цим сила струму дорівнює зміні заряду за одиницю часу:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}. \text{ Звідси } \Delta q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо: $\Delta q = 2 \text{ мКл}$.

3. Котушку дуже малого опору та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму, ЕРС якого 15 В і дуже малий внутрішній опір. Через який інтервал часу сила струму в котушці досягне значення 50 А ?

Розв'язання

За законом Ома для повного кола $\mathcal{E} = I(R + r)$, 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 визначається за формулою $\mathcal{E}_2 = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Враховуючи попередні співвідношення, отримаємо $\mathcal{E}_2 = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r)$. За умовою

задачі опори R і r дуже малі, тому $\mathcal{E}_1 - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$ або $\mathcal{E}_1 = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Звідки мож-

на визначити швидкість зміни струму $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_1}{L}$, а потім — час, потрібний

для збільшення сили струму до значення 50 А : $t = \frac{IL}{\mathcal{E}_1}$.

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо: $t = 10 \text{ с}$.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

1.151. Що станеться, коли до екрана телевізора, який працює, піднести магніт? Поясніть.

1.152. Чому полярне саяво спостерігається в основному в полярних районах земної кулі?

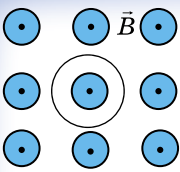
1.153. Чому корпус компаса виготовляють з пластмаси, латуні, алюмінію, але не із заліза?

1.154. Чому механічні годинники не рекомендується зберігати поблизу приладів, які містять електромагніти?

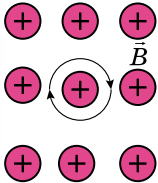
1.155. Магнітна індукція у бруску металу дорівнює $0,75 \text{ Тл}$, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює $0,0375 \text{ Тл}$. Яку відносну магнітну проникність має метал?

1.156. Якої форми прагне набути замкнений провідник, по якому проходить струм?

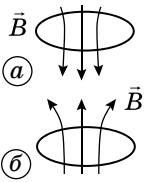
1.157. В однорідному магнітному полі поступально рухається провідний контур. Чи виникає ЕРС індукції у контурі, якщо магнітне поле: а) однорідне; б) неоднорідне?



Мал. 1.93



Мал. 1.94



Мал. 1.95

1.158. Як взаємодіють сусідні витки соленоїда, коли по них проходить струм?

1.159. У замкненому витку дроту, що має опір $2 \cdot 10^{-2}$ Ом, миттєве значення індукційного струму становить 5 А. Яка ЕРС індукції?

1.160. Прямий провідник завдовжки 35 см перетинає однорідне магнітне поле зі швидкістю 6 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Сам провідник також перпендикулярний до ліній магнітної індукції. Визначте індукцію магнітного поля, якщо між кінцями провідника виникає різниця потенціалів 12 мВ.

1.161. Визначте різницю потенціалів, яка виникає між кінцями крил літака під час горизонтального польоту зі швидкістю 1200 км/год, якщо розмах крил 40 м, а вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл.

1.162. Провідне кільце міститься в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до площини кільця. Який напрямок має індукційний струм під час збільшення магнітної індукції (мал. 1.93)?

1.163. Провідне кільце перебуває в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до кільця (мал. 1.94). Збільшується чи зменшується магнітна індукція, якщо індукційний струм має напрямок, як на малюнку?

1.164. Визначте напрямок сил, які діють на провідне кільце (мал. 1.95), якщо індукція магнітного поля: а) збільшується; б) зменшується.

1.165. За 2,5 мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.

1.166. У контурі провідника за 0,3 с магнітний потік змінився на 0,06 Вб. Яка швидкість зміни магнітного потоку? Яка ЕРС індукції в контурі?

1.167. Магнітний потік, що пронизує контур провідника, рівномірно змінився на 0,6 Вб так, що ЕРС індукції стала дорівнювати 1,2 В. Визначте час, протягом якого змінювався магнітний потік.

1.168. Визначте індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму 50 А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції 20 В.

1.169. З якою швидкістю змінюється сила струму в котушці індуктивністю 120 мГн, якщо в ній виникає ЕРС самоіндукції 6 В?

1.170. У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія магнітного поля, коли сила струму зменшиться вдвічі?

1.171. По обмотці соленоїда індуктивністю 0,2 Гн проходить струм силою 10 А. Визначте енергію магнітного поля соленоїда.

1.172. Струм якої сили має проходити в обмотці дроселя з індуктивністю 0,5 Гн, щоб енергія дорівнювала 10 Дж?

Рівень Б

1.173. Якщо в магнітне поле потрапить електрон, вектор швидкості якого перпендикулярний до напрямку магнітного поля, то він рухатиметься по коловій траєкторії. Доведіть це.

1.174. У мас-спектрометрі одноразово йонізована частинка рухається зі швидкістю 956 км/с по колу діаметром 20 см в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,1 Тл. Визначте масу частинки.

1.175. Учителем виконала дослід: запаленим сірником розжарила голку і наблизилася її до стрілки компаса. Результат дослідження поясніть.

1.176. Визначте магнітну проникність нікелю, коли відомо, що магнітний потік Φ_1 , який пронизує його переріз, у 2,4 раза менший від магнітного потоку Φ_2 , який пронизує такий самий переріз сталі. Магнітна проникність сталі 670.

1.177. У скільки разів підсилиться магнітне поле всередині котушки зі струмом, якщо в котушку увести сталеве осердя?

1.178. Між полюсами магніту рухається провідник. За напрямком його руху і напрямком індукованої в ньому ЕРС визначте полюси магніту (мал. 1.96).

1.179. Між полюсами магніту рухається провідник (мал. 1.97). Визначте напрямок індукованої у провіднику ЕРС.

1.180. Замкнений виток дроту міститься біля провідника зі струмом (мал. 1.98). Чи буде виникати у провіднику струм, якщо: а) обертати виток навколо осі, що проходить через провідник; б) обертати навколо осі, паралельної провіднику; в) обертати навколо осі, перпендикулярної до провідника; г) рухати поступально паралельно провіднику; д) рухати поступально перпендикулярно до провідника?

1.181. На паралельні горизонтальні рейки подано напругу, і по провіднику AB (мал. 1.99) проходить струм силою I . Під дією магнітного поля провідник рухається з прискоренням a . Визначте індукцію магнітного поля, якщо площа поперечного перерізу провідника дорівнює S , а густина матеріалу провідника ρ . Тертя не враховувати.

1.182. Поясніть, чому нагрівається шматок металу в магнітному полі, яке швидко змінюється.

1.183. У замкненому витку, виготовленому з алюмінієвої дротини завдовжки 10 см з поперечним перерізом $1,4 \text{ мм}^2$, магнітний потік зменшується від 10 до 5 мВб упродовж 5 с. Яка сила струму, індукованого у витку?

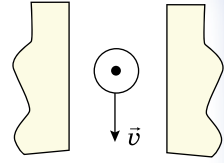
1.184. Магнітний потік через кожен із 50 однакових витків котушки становить 100 мВб. Під час його рівномірного зменшення упродовж 10 мс у котушці виникає ЕРС 200 В. До якого значення зменшується магнітний потік?

1.185. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 30 мОм за 2 с змінюється на 12 мВб. Яка сила струму, що проходить у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?

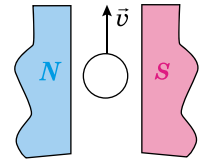
1.186. Котушка, яка має 1000 витків, розміщена в магнітному полі. Магнітний потік, що пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?

1.187. Під час збільшення сили струму в котушці від 1 до 2 А упродовж 10 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 20 В. Яка індуктивність котушки? Який магнітний потік пронизує котушку в момент часу, коли сила струму становить 1,5 А, якщо вона має 200 щільно намотаних витків?

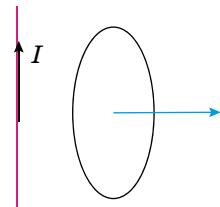
1.188. Котушка, опір якої становить 50 Ом, а індуктивність — 0,001 Гн, розміщена в магнітному полі. Під час рівномірної зміни магнітного поля потік через котушку збільшився на 1000 Вб, і сила струму у котушці збільшилася на 0,1 А. Який заряд пройшов за цей час по котушці?



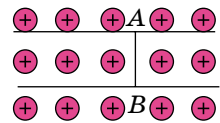
Мал. 1.96



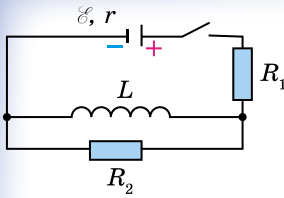
Мал. 1.97



Мал. 1.98



Мал. 1.99



Мал. 1.100

1.189. Котушка, яка має 1000 витків, розміщена в магнітному полі. Магнітний потік, який пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?

1.190. Під час зміни сили струму в котушці, індуктивність якої 0,11 Гн, у 5,13 раза енергія магнітного поля змінилася на 16,2 Дж. Визначте початкові значення енергії та сили струму.

1.191. Соленоїд завдовжки 50 см і діаметром 0,8 см має 20000 витків мідного дроту і перебуває під постійною напругою. Визначте час, протягом якого в обмотці соленоїда виділиться така кількість теплоти, яка дорівнюватиме енергії магнітного поля в соленоїді.

1.192. Який заряд пройде через резистор R_2 (мал. 1.100) після розмикання ключа? ЕРС джерела $B = 12$ В, внутрішній опір $r = 1,5$ Ом, індуктивність котушки $L = 0,2$ Гн, опори резисторів $R_1 = 7,5$ Ом і $R_2 = 3$ Ом. Опором котушки можна знехтувати.

Є над чим замислитися

1.193. Горизонтальний металевий стержень завдовжки 50 см обертається навколо вертикальної осі, що проходить через його середину. Частота обертання стержня 120 об/хв. Яка різниця потенціалів виникає між кінцями стержня, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл?

1.194. Зі зміною сили струму від 2 до 14 А магнітний потік у котушці, яка має 800 витків, збільшується від 600 мкВб до 3 мВб. Яка індуктивність котушки? Яка середня ЕРС самоіндукції виникає в котушці, якщо зміна сили струму відбувається впродовж 160 мс?

1.195. Провідний стержень завдовжки 50 см помістили в магнітне поле індукцією 2 Тл перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Кінці стержня сполучені гнучким дротом, що міститься поза полем. Опір кола 2,5 Ом. Яку потужність треба розвивати, щоб рухати стержень під кутом 30° до ліній магнітної індукції зі швидкістю 10 м/с?

74



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Чи можуть силові лінії електричного поля: а) дотикатися; б) перетинатися; в) бути замкненими?

2. Чи однаково швидко зменшується напруженість поля з віддаленням від: а) точкового заряду; б) системи з двох таких самих різнойменних зарядів, розміщених поряд?

3. Як залежить від вибору точки відліку: а) потенціал певної точки поля; б) різниця потенціалів двох точок?

4. Як точковий заряд діє на мильні бульбашки в повітрі та на повітряні бульбашки у воді?

5. Чи зміниться ємність плоского конденсатора, якщо одна з його пластин зміститься паралельно?

6. Які параметри впливають на максимальну робочу напругу конденсатора?

7. Яке з'єднання конденсаторів — послідовне чи паралельне — більше «боїться» пробою?

8. Чи можна підняти однією рукою сучасний конденсатор ємністю кілька фарад?

9. Щоб збільшити силу струму в колі удвічі, учень увімкнув послідовно замість одного два елементи з однаковою ЕРС. Чи досяг він мети?

10. Два провідники різних опорів вмикають у коло одного й того самого джерела постійного струму: один раз послідовно, другий — паралельно. Чи однакові ККД джерела будуть в обох випадках, якщо внутрішній опір джерела дуже малий і ним можна знехтувати?

11. Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження слід розуміти?

12. З виразу для модуля сили Лоренца отримайте вираз для модуля сили Ампера.

13. Є два види сталі: одна з великою залишковою індукцією, друга — з порівняно незначною. Яка з них більше придатна для виготовлення постійних магнітів, а яка для осердь трансформаторів? Чому?

14. Замкнений контур провідника рухається в неоднорідному магнітному полі вздовж ліній магнітної індукції поля. Доведіть, що ЕРС індукції в цьому випадку не дорівнює нулю.

15. Чи залежить ЕРС індукції в рухомому провіднику, що перетинає лінії магнітної індукції, від його опору? А сила струму? Чому?

16. 100 % сірчана кислота — рідина неелектропровідна. Проте розчин її у воді є хорошим провідником струму. З'ясуйте причину цього явища.

17. Що — електрони чи йони — більш ефективні в процесі утворення лавин заряджених частинок під час ударної йонізації, яка супроводжує електричний розряд у газах? Чому?

18. Чи будуть змінюватися під дією електричного поля імпульс і кінетична енергія дірок, як і електронів? Чому?

Що я знаю і вмю робити

● Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

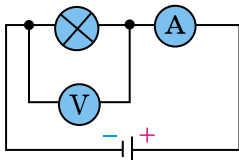
1. Яка вода — холодна чи та, що кипить, краще проводить струм?
2. Чи змінюється провідність розчинів електролітів від зниження їхньої температури?
3. Чи можна застосовувати електричну дугу для зварювання металів під водою?
4. Чи можна виготовити напівпровідниковий діод таким малим, щоб його не можна було побачити неозброєним оком?

● Я знаю, як застосувати закони фізики

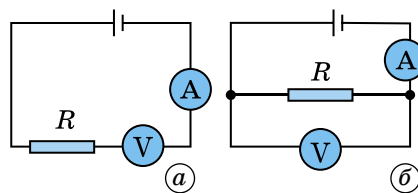
5. Чи виконуватиметься закон Ома для ділянки кола, опір якої пропорційний прикладеній напрузі?
6. За яких умов для сили струму, що проходить між двома електродами, розділеними газом, справджується закон Ома?
7. Який з видів самостійного розряду в газі можна описати законом Ома для зв'язку напруги і сили струму?

● Я вмю використовувати схеми електричних кіл

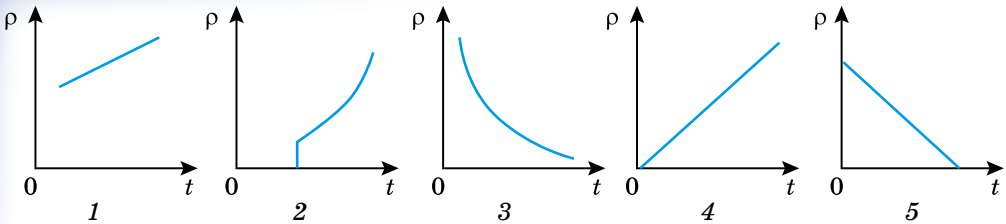
8. Вольтметр показує напругу 12 В, амперметр — силу струму 1,2 А. Яку потужність споживає лампочка (мал. 1.101)?
9. Як правильно виміряти значення невідомого опору, маючи вольтметр, амперметр і джерело ЕРС з відомим внутрішнім опором (мал. 1.102)?



Мал. 1.101



Мал. 1.102



Мал. 1.103

● **Я вмію читати графіки**

10. На якому графіку (мал. 1.103) зображено залежність питомого опору металевого провідника від температури за дуже низьких температур?

● **Я знаю, як потрібно розв'язувати задачі**

11. Конденсатор ємністю 6 мкФ, заряджений до напруги 400 В, з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 19 мкФ. Якою стала напруга на конденсаторах?

12. Заряд плоского конденсатора дорівнює 17,7 нКл, площа обкладок — 10 см², відстань між ними — 3,5 мм. Конденсатор заповнено слюдою. Визначте енергію електричного поля в конденсаторі.

13. Батарею з двох послідовно з'єднаних елементів з ЕРС 2 В і внутрішнім опором 0,5 Ом кожний замкнуто на резистор опором 3 Ом. Визначте потужність струму в резисторі.

76

14. Якої площі поперечного перерізу треба взяти нікеліновий дріт завдовжки 20 м, щоб виготовити з нього нагрівник на 220 В, за допомогою якого можна нагріти 2 л води від 20 °С до кипіння за 10 хв при ККД 80 %?

● **Я вмію використовувати співвідношення між фізичними величинами під час розв'язування фізичних задач**

15. До кінців прямолінійного мідного провідника з площею поперечного перерізу 2 мм² прикладено напругу 6 В. Визначте найбільшу силу, з якою однорідне магнітне поле індукцією 100 мТл може діяти на цей провідник.

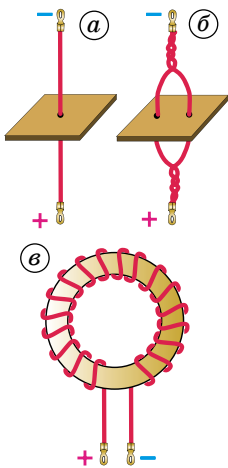
16. Яку роботу виконує однорідне магнітне поле індукцією 20 мТл під час переміщення в ньому прямого провідника завдовжки 50 см на відстань 10 см, якщо по ньому проходить струм силою 10 А? Переміщення відбувається в напрямку дії сили Ампера, а провідник весь час утворює з вектором магнітної індукції кут 30°.

17. Магнітний потік через кожні 100 однакових витків котушки становить 200 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 5 мс у котушці виникає ЕРС 400 В. До якого значення зменшується магнітний потік?

18. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 100 мОм за 5 с змінюється на 20 мВб. Яка сила струму, що проходить у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?

● **Я знаю, які є спектри магнітних полів, і вмію їх малювати**

19. На малюнку 1.104, а показано прямий провідник, що проходить через картонний екран, площина якого перпендикулярна до провідника. На малюнку 1.104, б жилу провідника розділено на дві гілки, що також проходять через екран. На малюнку 1.104, в зображено тороїдальне дерев'яне осердя, що має суцільну обмотку.



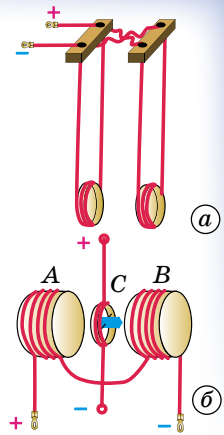
Мал. 1.104

Намалюйте в зошитах спектри магнітних полів прямого і розділеного провідника в площинах екранів і картину магнітного поля тороїдальної обмотки в площині малюнка.

● Я знаю, як взаємодіють між собою провідники зі струмом

20. На малюнку 1.105 показано котушки, кінці обмоток яких досить довгі і закріплені в спеціальних затискачах. З'єднання кінців котушок із джерелом струму показано на малюнку 1.105, а. Визначте характер взаємодії котушок і намалюйте в зошитах схеми їхніх магнітних полів.

21. На малюнку 1.105, б зображено дві котушки А і В. Між котушками підвішено на тонких гнучких провідниках котушку С. Усередині цієї котушки закріплено стрілку. Визначте положення цієї стрілки під час виникнення струму в усіх котушках.



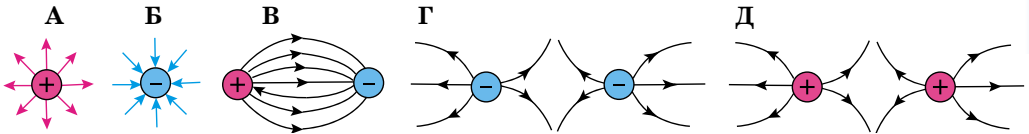
Мал. 1.105



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант 1

1. На якому з малюнків електричне поле точкових зарядів зображено НЕправильно?



77

2. Скільки електронів утворює заряд $0,0016$ Кл?

А $2 \cdot 10^{18}$ Б $1,5 \cdot 10^{19}$ В $5 \cdot 10^{18}$ Г $3 \cdot 10^{19}$ Д $1 \cdot 10^{16}$

3. Визначте різницю потенціалів між двома точками електростатичного поля, якщо під час переміщення між ними заряду 4 мкКл сили поля виконали роботу 1 мДж.

А $0,004$ В Б 250 В В 25 В Г 4 кВ Д $2,5$ В

4. Установіть відповідність між назвами одиниць фізичних величин і їхніми позначеннями.

А U	1 фарад
Б q	2 вольт
В E	3 кулон
Г C	4 ньютон на кулон

5. Лампочка електричного ліхтарика працює від акумулятора. Усередині акумулятора...

А сторонні та кулонівські сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками

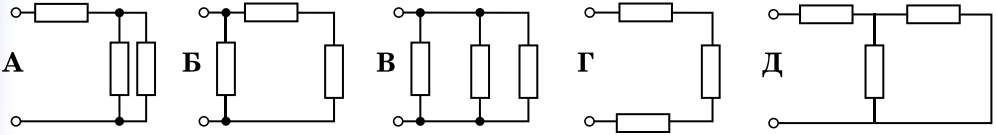
Б сторонні та кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками

В сторонні сили виконують додатну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — від'ємну

Г сторонні сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками, а кулонівські сили — додатну

Д тільки кулонівські сили виконують від'ємну роботу над зарядженими частинками

6. На якому з малюнків показано послідовне з'єднання трьох провідників?



7. Яка сила струму в електричній лампочці, якщо через її спіраль за 5 хв проходить заряд 135 Кл?

- А 4,5 А Б 0,45 А В 9 А Г 0,9 А Д 100 А

8. В обмотці електричного двигуна, опір якої 0,75 Ом, сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

- А 15 Дж Б 300 Дж В 18 кДж Г 18 Дж Д 30 кДж

9. Установіть відповідність між співвідношеннями та фізичними поняттями.

А $R = \rho \frac{l}{S}$

1 закон Ома для повного кола

Б $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

2 ЕРС джерела струму

В $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$

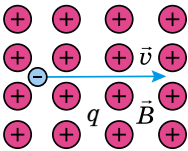
3 опір n послідовно з'єднаних провідників

Г $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$

4 опір провідника

10. При силі струму 1,6 А на катоді за 10 хв відкладалася мідь масою 0,316 г. Визначте електрохімічний еквівалент міді.

- А $3,04 \cdot 10^6$ кг/Кл Б $3,3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл В $3,94 \cdot 10^6$ кг/Кл
Г $3,94 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл Д $3,94 \cdot 10^7$ кг/Кл



11. Визначте напрямок сили Лоренца, яка діє з боку магнітного поля на рухомий негативний заряд q . Вектор магнітної індукції напрямлений від нас, перпендикулярно до площини малюнка, вектор швидкості руху заряду лежить у площині малюнка.

- А униз Б угору В управо Г уліво Д до нас

12. Провідник, по якому проходить струм силою 5 А, розміщений у магнітному полі індукцією 10 мТл. Кут між напрямком сили струму і вектором магнітної індукції поля — 60° . Визначте довжину провідника, якщо поле діє на нього із силою 20 мН.

- А 0,12 м Б 120 см В 0,46 м Г 4,6 см Д 0,46 см

13. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин та їхніми назвами.

- А індуктивність 1 Н
Б магнітна індукція 2 Вб
В магнітний потік 3 Гн
Г сила Лоренца 4 Тл

14. В однорідному магнітному полі, що змінюється, розміщена нерухома дротяна рамка. Виберіть правильне твердження.

А якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини рамки, у рамці виникає індукційний струм

Б якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини рамки, магнітний потік через площину рамки весь час дорівнює нулю

В ЕРС індукції в рамці залежить тільки від площі рамки

Г індукційний струм у рамці виникає за будь-якого положення рамки

Д ЕРС індукції в рамці не залежить від площі рамки

15. Якщо розімкнути ключ у колі живлення потужного електромагніту, спостерігається сильна іскра. Що її спричиняє?

А ЕРС джерела струму

Б ЕРС самоіндукції в котушці електромагніту

В хаотичний рух вільних електронів у провідниках

Г електростатичне поле

Д електричні заряди

16. Укажіть формулу для визначення магнітного потоку.

$$\text{А } \mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{Б } L = \frac{\Phi}{I} \quad \text{В } W = \frac{LI^2}{2} \quad \text{Г } \mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \quad \text{Д } \Phi = BS \cos \alpha$$

17. Як потрібно змінити індуктивність контуру для того, щоб за незмінного значення сили струму в ньому енергія магнітного поля зменшилася в 4 рази?

А збільшити у 2 рази

Б зменшити у 2 рази

В збільшити в 4 рази

Г зменшити в 4 рази

Д збільшити у 8 разів

18. Котушка має 200 однакових витків. Магнітний потік, який пронизує витки котушки при силі струму 8 А, дорівнює 3 мВб. Яка енергія магнітного поля котушки?

А 24 Дж

Б 4 Дж

В 5 Дж

Г 1,2 Дж

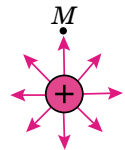
Д 2,4 Дж

Варіант 2

1. У точці M електричного поля позитивного точкового заряду перебуває електрон. У якому напрямку почне рухатися електрон, якщо його початкова швидкість дорівнює нулю?

А від заряду Б перебуватиме в стані спокою В до заряду

Г навколо заряду Д по спіралі від заряду



2. Визначте силу кулонівської взаємодії двох електронів, що містяться на відстані 1 м.

А $23 \cdot 10^{-28}$ Кл Б $2,3 \cdot 10^{-27}$ Кл В $2,3 \cdot 10^{-29}$ Кл Г $2,3 \cdot 10^{-28}$ Кл Д $2,3 \cdot 10^{-20}$ Кл

3. Кулька, що має заряд $+2 \cdot 10^{-6}$ Кл, у гасі притягує до себе заряджену пилінку із силою 4 мН. Визначте заряд пилінки, якщо відстань між нею і кулькою 2 см.

А 0,19 нКл Б 1,9 нКл В $-0,19$ нКл Г $-1,9$ нКл Д $-0,19$ мКл

4. Установіть відповідність між співвідношеннями та фізичними поняттями.

A $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon R^2}$ 1 напруженість електричного поля

B $E = \frac{U}{\Delta d}$ 2 ємність плоского конденсатора

B $W = \frac{cU^2}{2}$ 3 закон Кулона

Г $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ 4 енергія електричного поля

5. Якими носіями електричних зарядів створюється струм у металах?

A вільними електронами і позитивними йонами

B позитивними і негативними йонами

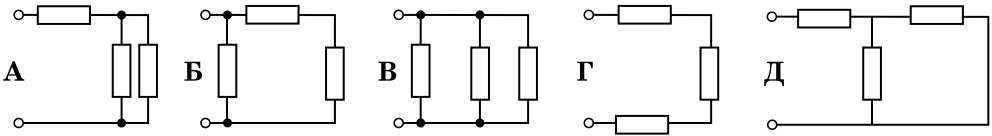
B вільними електронами

Г негативними йонами

Д позитивними йонами

6. Укажіть паралельне з'єднання трьох провідників.

80



7. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі і дорівнює 2 А. Визначте внутрішній опір джерела.

A 0,1 Ом

B 1 Ом

B 10 Ом

Г 100 Ом

Д 0,01 Ом

8. У школі одночасно світиться 40 ламп по 60 Вт, 20 ламп по 100 Вт і 11 ламп по 40 Вт. Визначте силу струму в спільній частині кола для напруги 220 В.

A 2 А

B 5,6 А

B 10 А

Г 56 А

Д 22 А

9. Установіть відповідність між фізичними величинами і їхніми одиницями.

A сила струму 1 Ом

B ЕРС 2 А

B опір 3 Кл

Г електричний заряд 4 В

10. Що таке електролітична дисоціація?

A процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони під впливом електричного поля полярних молекул води

B процес розпаду молекул розчиненої речовини на окремі йони внаслідок проходження струму через електроліт

B розпад молекул розчиненої речовини під впливом електричного поля, яке створює джерело струму

Г явище руху позитивних і негативних іонів електроліту в протилежні боки під впливом електричного поля

Д процес проходження струму в електроліті

11. Чому при дуговому розряді для проходження струму через газовий проміжок не потрібно високої напруги?

А є вільні заряджені частинки

Б наявність вільних електричних зарядів забезпечується високою температурою

В електроди йонізують навколо себе газ

Г наявність носіїв заряду забезпечується електронною емісією

12. Фізичну величину, що характеризує магнітні властивості речовини, називають...

А магнітною індукцією

Б діелектричною проникністю середовища

В магнітним потоком

Г магнітним полем

Д магнітною проникністю середовища

13. Яке співвідношення є математичним записом модуля сили Лоренца?

А $F = q\mathcal{E}$ Б $F = qvB \sin \alpha$ В $F = BIl \sin \alpha$ Г $F = \mu N$ Д $F = ma$

14. Яка сила діє на відрізок провідника завдовжки 10 см в однорідному магнітному полі індукцією 0,1 Тл, якщо сила струму у провіднику 1 А, а кут між напрямком струму та силовими лініями магнітного поля становить 60°?

А 0,866 Н Б 8,66 Н В 8,66 мН Г 5 мН Д 5 Н

15. Установіть відповідність між співвідношеннями та фізичними поняттями.

А $F = qvB \sin \alpha$ 1 магнітна проникність середовища

Б $\mu = \frac{B}{B_0}$ 2 сила Ампера

В $\Phi = BS \cos \alpha$ 3 сила Лоренца

Г $F = BIl \sin \alpha$ 4 магнітний потік

16. У нерухомій дротяній рамці, що розміщена в магнітному полі, виникає індукційний струм. Виберіть правильне твердження.

А сила струму максимальна, коли магнітний потік через рамку не змінюється

Б сила струму прямо пропорційна опорі рамки

В що повільніше змінюється магнітний потік через рамку, то сила струму більша

Г якщо площа рамки паралельна лініям індукції магнітного поля, магнітний потік через рамку дорівнює нулю

Д що швидше змінюється магнітний потік через рамку, то менша сила струму

17. За 2,5 мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.

А 2 В Б 4 В В 0,2 В Г 0,4 В Д 20 В

18. Визначте швидкість зміни магнітного потоку в соленоїді з 1000 витків під час збудження в ньому ЕРС індукції 150 В.

А 15 Вб/с Б 0,15 Вб/с В 1,5 Вб/с Г 0,25 Вб/с Д 25 Вб/с

Розділ 2

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

Ми живемо у світі, де відбуваються різноманітні коливання, в усіх напрямках поширюються механічні й електромагнітні хвилі. Без них ми б нічого не бачили, не чули б, не могли б слухати радіо, дивитися передачі по телевізору. Сьогодні важко уявити, як люди раніше обходилися без радіо- та мобільного зв'язку. У цьому розділі ви ознайомитеся з фізичними основами, які описують коливання і хвилі.

§ 19. КОЛИВАЛЬНИЙ РУХ. ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

82

Як ви вже знаєте з попередніх класів, коливаннями або коливальними рухами називають такі види механічного руху чи зміни стану системи, які періодично повторюються в часі. Наприклад, механічні коливання тіла на пружині, коливання маятників, коливання струн, вібрації фундаментів будівель, електромагнітні коливання в коливальному контурі.

За фізичною природою коливання поділяють на механічні та електромагнітні, за характером коливань — на вільні, вимушені та автоколивання. Хоча коливання досить різноманітні за своєю фізичною природою, але вони мають спільні закономірності й описуються однотипними математичними методами.

Коливання притаманні всім явищам природи. Пульсують зорі й обертаються планети Сонячної системи, у земній атмосфері та йоносфері циркулюють потоки заряджених і нейтральних частинок, вітри збуджують коливання і хвилі на поверхні водойм. Усередині будь-якого живого організму безперервно відбуваються процеси, які ритмічно повторюються, наприклад биття серця.

Світло — це також коливання, але електромагнітні. За допомогою електромагнітних коливань, які поширюються в просторі, можна здійснювати радіозв'язок, радіолокацію, передавати телевізійні передачі, а також лікувати деякі хвороби.

Наведені приклади механічних і електромагнітних коливань з першого погляду мають мало спільного. Проте під час їх дослідження було виявлено цікаву закономірність: різні за фізичною природою коливання описуються однаковими математичними рівняннями, що значно полегшує їх вивчення.

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

Серед усіх різноманітних форм коливань важливе місце належить **гармонічним коливанням**. Гармонічні коливання — це найпростіші періодичні коливання. Більшість коливань, які трапляються на практиці, складні. З курсу математики відомо, що будь-яке складне періодичне коливання є сумою найпростіших гармонічних коливань (гармонік). Гармонічні коливання — єдиний тип коливань, форма яких не спотворюється у процесі відтворення.

Коливання, під час яких величини, що їх описують, змінюються із часом за законом синуса або косинуса, називають гармонічними.

Переконаємося в цьому за допомогою кульки, яка ковзає вздовж осі Ox , під дією сили пружності пружини $F = -kx$.

Коливання кульки можна розглядати як проекцію колового руху кульки (мал. 2.1) на вісь Ox . Нехай A — рухомий радіус допоміжного кола, що відповідає найбільшому відхиленню кульки від положення рівноваги x_{max} . Якщо обертати кульку по колу з такою кутовою швидкістю ω , щоб проекція її руху збігалася з рухом кульки під дією сили пружності пружини, то її миттєве положення буде визначатися рівністю $x = x_{max} \cos \varphi$.

Під час обертання рухомого радіуса зі сталою кутовою швидкістю ω кут φ між радіусом і віссю Ox збільшується прямо пропорційно до часу: $\varphi = \omega t$.

Проекція x рухомого радіуса на вісь Ox змінюватиметься за законом:

$$x = x_{max} \cos \varphi = x_{max} \cos \omega t.$$

Аналогічно можна також порівняти коливання тіні кульки, закріпленої на диску, який обертається зі сталою кутовою швидкістю ω , і кульки пружинного маятника (мал. 2.2). Можна підібрати таку швидкість обертання диска, що рух тіні кульки на екрані повністю збігатиметься з рухом кульки пружинного маятника. Так само можна показати, що проекція рухомого радіуса диска OM на вертикальний діаметр змінюватиметься за законом:

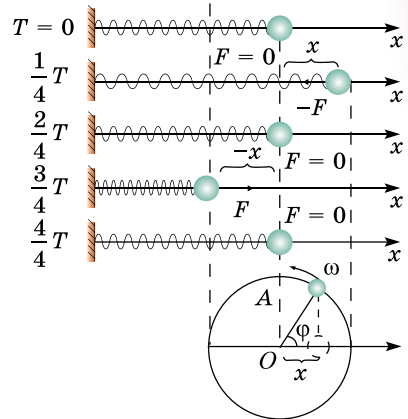
$$x = x_{max} \sin \varphi = x_{max} \sin \omega t.$$

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

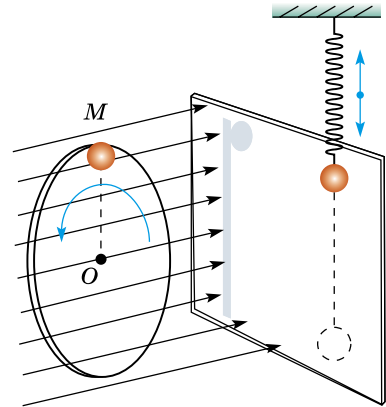
Таким чином, у зазначених випадках координата тіла, яке здійснює вільні коливання, змінюється із часом за законом синуса або косинуса. Графіком залежності координати тіла від часу відповідно до $x = x_{max} \cos \omega t$ є косинусоїда, зображена на малюнку 2.3.

Важливою характеристикою коливального руху є **амплітуда**.

Амплітудою гармонічних коливань називають модуль найбільшого зміщення тіла (коливальної системи) від положення рівноваги.

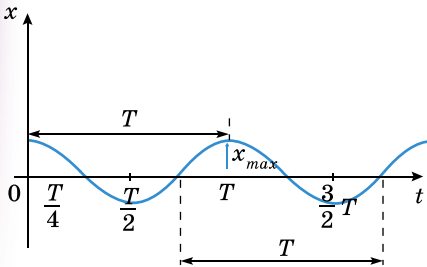


Мал. 2.1



Мал. 2.2

Амплітуда може мати різні значення залежно від того, наскільки ми зміщуємо тіло від положення рівноваги в початковий момент часу, і від того, яка швидкість надається при цьому тілу. Іншими словами, амплітуда визначається початковими умовами і дорівнює множнику біля синуса чи косинуса функції, який відповідає цьому коливальному процесу.



Мал. 2.3

При заданій амплітуді гармонічних коливань координата коливного тіла в будь-який момент часу однозначно визначається аргументом косинуса (або синуса) $\varphi = \omega t$.

Величину φ , яка стоїть під знаком косинуса або синуса, називають фазою коливань, що описуються цими функціями.

84

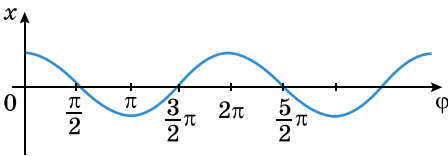
Одиницею фази є **радіан** або градус.

Від фази залежить значення не лише координати, а й швидкості, і прискорення, що змінюються також за гармонічним законом. Тому можна сказати, що **при заданій амплітуді фаза визначає стан коливальної системи у будь-який момент часу.**

Оскільки $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то $\varphi = \omega t = 2\pi \frac{t}{T}$. Відношення $\frac{t}{T}$ показує, яка частина періоду пройшла від початку коливань.

Будь-якому значенню часу, вираженому в частинах періоду, відповідає значення фази, виражене в радіанах.

Наприклад, коли пройде час $t = \frac{T}{4}$ (чверть періоду), то $\varphi = \frac{\pi}{2}$.



Мал. 2.4

На графіку можна зобразити залежність координати коливної точки не від часу, а від фази. На малюнку 2.4 показано ту саму косинусоїду, що й на малюнку 2.3, але на горизонтальній осі відкладено різні значення фази φ .

Ви вже знаєте, що для гармонічних коливань координата тіла змінюється із часом відповідно до закону косинуса або синуса. Проте при цьому слід врахувати поняття фази.

Синус відрізняється від косинуса лише зсувом аргументу на півперіод (на $\frac{\pi}{2}$): $\cos \varphi = \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right)$. Тому для опису гармонічних коливань замість формули $x = x_{max} \cos \omega t$ можна використати формулу $x = x_{max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Через інтервал часу, що дорівнює періоду T , тобто зі збільшенням аргументу косинуса на ωT рух повторюється і косинус набуває попереднього значення. З математики ви знаєте, що найменший період косинуса 2π . Отже, $\omega T = 2\pi$, звідки $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

Таким чином, величина ω — це кількість коливань тіла, але не за одну секунду, а за 2π секунд. Її називають **циклічною, або коловою, частотою.**

Проте при цьому початкова фаза, тобто значення фази в момент $t = 0$, дорівнюватиме не нулю, а $\frac{\pi}{2}$. Зазвичай коливання тіла на пружині (або

маятнику) збуджують, виводячи його з положення рівноваги, а потім відпускають. У початковий момент зміщення від положення рівноваги є максимальне, тому описувати коливання зручніше формулою $x = x_{max} \cos \omega t$, використовуючи косинус.

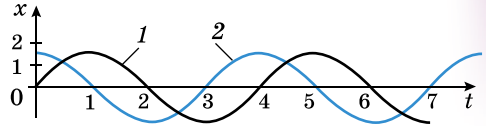
Інша річ, коли коливання тіла, що перебуває у стані спокою, збуджують короткочасним поштовхом. Тоді в початковий момент координата дорівнює нулю, і коливання зручніше описувати формулою з використанням синуса $x = x_{max} \sin \omega t$, тому що при цьому початкова фаза дорівнює нулю.

Коливання, описані рівняннями

$$x = x_{max} \sin \omega t \text{ і } x = x_{max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

різняються між собою лише фазами. Різниця фаз (зсув фаз) цих коли-

вань дорівнює $\frac{\pi}{2}$. На малюнку 2.5



Мал. 2.5

показано графіки залежності координат від часу для двох гармонічних коливань, зсунутих за фазою на $\frac{\pi}{2}$. Графік 1 відповідає коливанням, що

відбуваються відповідно до закону синусоїди $x = x_{max} \sin \omega t$, а графік 2 — коливанням, що відбуваються відповідно до закону косинусоїди

$$x = x_{max} \cos \omega t = x_{max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Щоб визначити різницю фаз двох коливань, їх треба записати через одну тригонометричну функцію (косинус або синус). У гармонічних коливаннях координати тіла його швидкість і прискорення також змінюються гармонічно. Проекція швидкості на вісь Ox має такий вигляд:

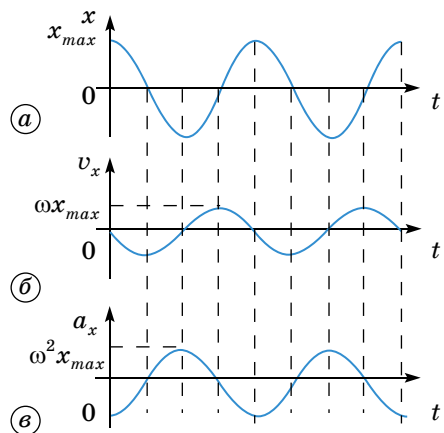
$$v_x = -\omega x_{max} \sin \omega t = \omega x_{max} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Швидкість під час гармонічних коливань змінюється із часом гармонічно, але коливання швидкості випереджають за фазою коливання координати на $\frac{\pi}{2}$.

У момент, коли координата дорівнює нулю (момент проходження положення рівноваги), модуль швидкості — максимальний, і, навпаки, швидкість дорівнює нулю, коли координата максимальна за модулем (мал. 2.6, а, б). Максимальне значення швидкості за модулем, тобто амплітуду v_{max} коливань швидкості, можна записати через амплітуду зміщення у вигляді $v_{max} = \omega x_{max}$.

Проекція прискорення на вісь Ox :

$$a_x = \omega^2 x_{max} \cos(\omega t + \pi).$$



Мал. 2.6

Під час гармонічних коливань прискорення змінюється гармонічно. Амплітуда прискорення $a_{max} = \omega^2 x_{max}$.

За фазою коливання прискорення випереджають коливання координати на π .

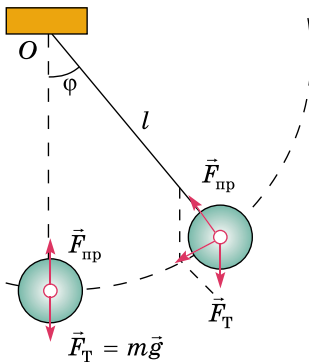
Прискорення і координата за модулем набувають максимального значення одночасно, але мають протилежні знаки. У такому разі кажуть, що коливання відбуваються у протифазі (мал. 2.6, а, в).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що називають коливальним рухом?
2. Яким явищем природи притаманні коливальні рухи?
3. Які коливання називають гармонічними?
4. Як пов'язана циклічна частота коливань з періодом?
5. Що таке амплітуда коливань?
6. Що таке фаза коливань? Різниця фаз?
7. Як змінюється із часом швидкість у гармонічних коливаннях?
8. Як пов'язані прискорення та координата в гармонічних коливаннях?

§ 20. МАТЕМАТИЧНИЙ І ПРУЖИННИЙ МАЯТНИКИ. ПЕРІОД КОЛИВАНЬ МАЯТНИКІВ



Мал. 2.7

З попередніх класів ви знаєте, що **математичним маятником** вважають точкове тіло, підвішене на нерозтяжній і невагомій нитці. **Математичний маятник** — це поняття абстрактне, тому що розміри кульки набагато менші за довжину нитки, цими розмірами можна нехтувати і розглядати кульку як матеріальну точку. Розтягом нитки також можна нехтувати, оскільки він дуже малий. Можна нехтувати і масою нитки порівняно з масою кульки.

Отже, з певним наближенням математичним маятником можна вважати кульку, підвішену на нитці (мал. 2.7). Рівняння руху математичного маятника має вигляд $a = -\frac{g}{l}x$.

Разом із цим, розглядаючи рух проекції тіла, яке рівномірно обертається по колу, можна записати: $a = -\omega^2 x$. Прирівню-

ючи ці рівняння, отримаємо $\omega^2 = \frac{g}{l}$. Проте $\omega = \frac{2\pi}{T}$, тоді $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$, звідки

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

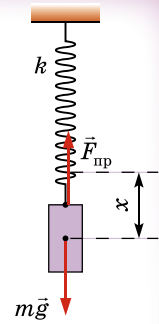
Цю формулу для визначення періоду коливань математичного маятника вивів і перевіряв на дослідах голландський фізик **Крістіан Гюйгенс** (1629–1695), тому її часто називають **формулою Гюйгенса**.

Період коливань математичного маятника залежить лише від прискорення вільного падіння в даному місці Землі і від довжини маятника. Період не залежить від амплітуди коливань і від маси підвішеного тягарця. Це легко перевірити на дослідах з різними маятниками. Слід лише пам'ятати, що розміри тягарця мають бути малими порівняно з довжиною підвісу і що малим має бути також кут відхилення маятника від вертикалі. З формули Гюйгенса можна легко експериментально визначити при-

скорення вільного падіння. Для цього треба виміряти довжину маятника і період його коливань.

Залежність періоду коливань математичного маятника від прискорення вільного падіння використовується для точних вимірювань прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Річ у тому, що прискорення вільного падіння у різних точках земної поверхні на одній географічній широті є неоднаковим і залежить, хоча й незначно, від густини порід, з яких складаються верхні шари земної кори.

На практиці ще використовують так звані пружинні маятники (мал. 2.8), період яких визначається за формулою: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, де m — маса тягарця; k — жорсткість пружини.



Мал. 2.8



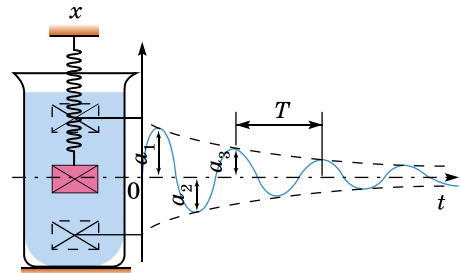
ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яку коливальну систему називають математичним маятником?
2. Від чого залежить період коливань математичного маятника?
3. Як і чому зміниться період коливання залізної кульки, підвішеної на нитці, якщо під нею помістити магніт?
4. Яку коливальну систему називають пружинним маятником?

§ 21. ВІЛЬНІ ТА ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

Розглядаючи гармонічні коливання, ми нехтували втратами механічної енергії у коливальних системах, тобто розглядали ідеальні випадки. Проте в реальних системах втрати механічної енергії завжди існують. Вони спричинені наявністю тертя, опору середовища, утворенням механічних хвиль тощо. Тому **амплітуда коливань у реальних системах з часом зменшується, і коливання, зрештою, припиняються**. Наприклад, з часом припиняються коливання тягарця на пружині чи гойдалці, якщо їх час від часу не підштовхувати. Якщо в коливальній системі тіло вивести зі стану рівноваги і відпустити, то воно здійснюватиме так звані **вільні коливання**, які **завжди є згасаючими**. У розглянутих випадках вільних коливань тіла припускалося, що тіло, яке коливається, не зустрічає на своєму шляху жодних перешкод. За таких ідеальних умов його гармонічні коливання можуть тривати необмежено довго. За реальних умов руху тіла, яке здійснює вільні коливання, завжди перешкоджають різні опори, які сповільнюють коливання і сприяють їхньому затуханню. Наприклад, тертя коливного тіла по інших тілах, до яких воно дотикається внаслідок нерівності поверхонь. Згасання коливань настає також через опір повітря, води чи іншого середовища, у якому здійснюються коливання. Тертя між частинками пружного тіла (пружин, ресор), яке є джерелом відновлювальної сили пружності, також сприяє затуханню вільних коливань.

Розглянемо докладніше випадок, коли тіло коливається в середовищі, що чинить протидію його руху. На тіло з боку середовища діє сила, що залежить від швидкості руху тіла і напрямлена в бік, протилежний до напрямку руху тіла. Прикладом може бути тягарець, підвішений на пружині в посудині з рідиною (мал. 2.9).



Мал. 2.9

Якщо опір рідини великий порівняно з відновлювальною силою пружності, то коливальний рух тіла в такому середовищі взагалі неможливий. Тіло, виведене з положення рівноваги, прагне зайняти положення спокою, підходячи до цього положення поступово, без коливань. Якщо сила опору мала порівняно із силою пружності, то тіло, виведене з положення рівноваги, почне здійснювати в рідині затухаючий коливальний рух. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що амплітуда затухаючих коливань із часом зменшується. Важливо зауважити, що невеликий опір середовища мало змінює період власних коливань тіла, однак інтенсивно гасить ці коливання.

Згасання коливань у багатьох випадках — бажане та корисне явище, в інших — небажане й шкідливе. У першому випадку згасання коливань намагаються створити та підтримувати за допомогою відповідних механізмів і пристосувань. У другому випадку, навпаки, усувають згасання засобами, які зменшують вплив тертя й опору середовища, використанням змащення, заміни тертя ковзання тертям кочення за допомогою роликових підшипників тощо.

Вимушеними коливаннями вважають коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили.

Наприклад, можна взяти в руку книжку і здійснювати нею вимушені коливання. На книжку з боку руки діятиме зовнішня періодична сила. Однак у таких вимушених коливаннях немає нічого особливого і цікавого. Інша річ, коли зовнішня періодична сила діє на тіло, яке може самостійно здійснювати вільні коливання (такі коливання завжди згасають). Прикладом цих коливань можуть бути хитання дерев під дією вітру.

У коливальних системах можуть виникнути також автоколивання — незгасаючі коливання, які можуть існувати в будь-якій системі за відсутності змінної зовнішньої дії, причому амплітуда і період коливань визначаються властивостями самої системи. Цим автоколивання відрізняються від вимушених коливань, амплітуда і період яких визначаються характером зовнішньої дії (префікс «авто» і вказує на те, що коливання виникають у самій системі, а не нав'язуються зовнішньою дією). Автоколивання відрізняються і від вільних коливань (наприклад, коливань вільно підвішеного маятника) тим, що: 1) вільні коливання поступово затухають; 2) їхня амплітуда залежить від первинного «поштовху», що створює ці коливання. Прикладами автоколивань є коливання, що здійснюються маятником годинника, коливання струни в смичкових або стовпа повітря у духових музичних інструментах.

Автоколивання — коливання, амплітуда і період яких залежать від властивостей самої системи і не залежать від початкових умов, наприклад від початкового запасу енергії.

Системи, у яких можливі автоколивання, називають автоколивальними.

Втрати енергії в автоколивальній системі компенсуються лише надходженням енергії від джерела. Важливим є те, що автоколивальна система сама регулює надходження енергії від джерела і підтримує встановлений режим коливань.

Якщо тіло в момент початку дії змушувальної сили було нерухомим, то спочатку амплітуда його коливань поступово збільшується, а через певний час досягає максимального значення і далі вже не збільшується.

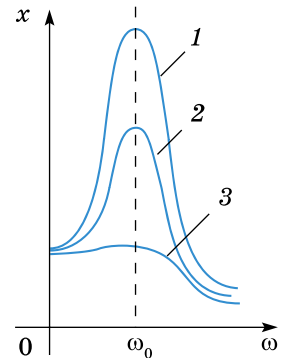
Коли частота змушувальної сили збігається із частотою коливань тіла, на яке ця сила діє, то при цьому амплітуда коливань досягає максимального значення, яке в багато разів може перевищувати амплітуду вільних коливань. Таке явище називають резонансом. В ідеальному випадку, коли

в системі немає опору, резонанс настає, якщо частоти змушувальної сили і вільних коливань системи збігаються. Амплітуда коливань при цьому нескінченно збільшується. Під час резонансу створюються найсприятливіші умови для передавання енергії від зовнішнього джерела періодично змінної сили до коливальної системи, у якій можуть виникати вільні коливання. У коливальній системі, де не виникають вільні коливання, резонанс не спостерігається.

Амплітуда вимушених коливань під час резонансу залежить не лише від значення зовнішньої змушувальної сили, а й від тертя в коливальній системі. Зі збільшенням зовнішньої сили збільшується й амплітуда вимушених коливань. Вона набуває під час резонансу такого значення, для якого додатна робота зовнішньої сили повністю компенсує втрати енергії системою внаслідок тертя. Очевидно, що менше тертя в коливальній системі, то більшою буде амплітуда вимушених коливань для однієї й тієї самої зовнішньої сили. Залежність амплітуди вимушених коливань від частоти для трьох коливальних систем з різними силами тертя і для однакової амплітуди зовнішньої сили показано на малюнку 2.10.

Крива 1 відповідає системі з мінімальною силою тертя, крива 2 — із середньою, а крива 3 — з максимальною. Із цих графіків видно, що менше тертя в системі, то сильніше збільшується амплітуда вимушених коливань з наближенням системи до резонансу. Якщо тертя мале, то резонанс чітко виражений, а якщо велике — нечітко. Коли частота змін змушувальної сили в системі далека від резонансної, то амплітуда коливань мала і майже не залежить від сили опору в системі. Якщо тертя таке велике, що не виникають вільні коливання, то резонанс взагалі не спостерігається.

У багатьох випадках резонанс є корисним явищем. Резонанс використовують у різноманітних типах частотомірів. Особливо важливу роль він відіграє у радіотехніці. Однак трапляються випадки, коли резонанс треба не допускати, оскільки його неврахування може призводити до певних ускладнень, навіть до катастроф. Так, у Манчестері 60 осіб зруйнували міст через річку Ірвель, у якому виникли резонансні коливання під дією вітру. У 1850 році зруйнувався Анжерський підвісний міст, коли по ньому крокував батальйон французької піхоти чисельністю 500 осіб, при цьому 226 осіб загинуло.



Мал. 2.10



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

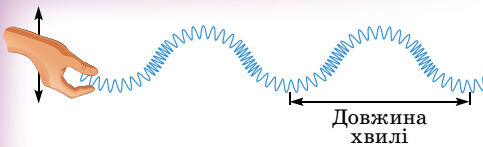
1. Яка відмінність між вільними і вимушеними коливаннями?
2. У чому полягає явище резонансу?
3. Зобразіть і поясніть графіки залежності амплітуди вимушених коливань від частоти змін змушувальної сили для двох значень сили опору.



Знайдіть у додаткових джерелах або Інтернеті історичні факти шкідливих наслідків резонансу.

§ 22. ПОШИРЕННЯ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

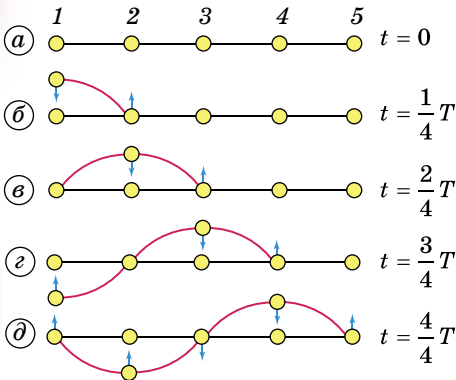
Поширення коливань у середовищі називають хвильовим процесом. Важливо зазначити, що поширення хвиль не супроводжується перенесенням частинок середовища, — вони лише коливаються навколо положень



Мал. 2.11



Мал. 2.12



Мал. 2.13

T. Усі точки середовища пов'язані між собою пружними силами. Тому коливання точки 1 спричиняє коливання точки 2, що, у свою чергу, спричиняє коливання точки 3 і т. д. — у пружному середовищі поширюється хвиля.

Під час коливань у середовищі, наприклад у твердому тілі, виникають пружні сили (відбувається деформація зсуву). Через чверть періоду точка 1 відхилиться на максимальну відстань від положення рівноваги і почне рухатися вниз. У цей час точка 2 починає рухатися вгору (мал. 2.13, б). Ще через чверть періоду зміщення точки 2 буде максимальним, а точка 3 почне рухатися вгору (мал. 2.13, в). Точка 1 у цей момент досягне положення рівноваги, набуде максимальної швидкості і продовжуватиме рухатися вниз. Наступні фази процесу за один період ілюструє малюнок 2.13, г, д. Якщо енергія коливань не зменшуватиметься, то й коливання поширюватимуться далі. У разі поширення поздовжньої хвилі точки пружного середовища також здійснюють коливання щодо своїх положень рівноваги, але при цьому коливання їх відбуваються в тому самому напрямку, у якому поширюється хвиля, тому під час поширення поздовжньої хвилі спостерігаються згущення і розрідження частинок середовища, у якому хвиля поширюється.

На малюнку 2.14 показано основні параметри, якими характеризують періодичну синусоїдальну хвилю. Вищі точки хвильового руху називають **гребенями**, а нижчі — **западинами**. Амплітуда — це максимальна висота гребеня чи глибина западини, виміряна відносно нульового рівня (або положення рівноваги); повний розмах коливань від гребеня до западини дорівнює подвійній амплітуді.

рівноваги. Проте з хвилею переноситься енергія, яка поширюється у просторі від джерела коливань.

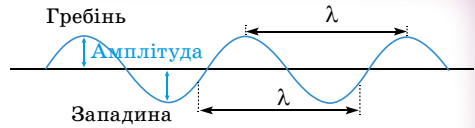
Напрямок поширення хвилі називають променем. Залежно від напрямку коливань частинки щодо напрямку поширення хвилі розрізняють хвилі **поперечні** й **поздовжні**.

Коли хвиля рухається по пружині, припустимо, зліва направо, ділянки пружини коливаються вгору і вниз, тобто в напрямку, перпендикулярному (або поперечному) до руху самої хвилі (мал. 2.11). Таку хвилю називають **поперечною**.

Однак не всяка хвиля є поперечною. Коливання можуть відбуватися і вздовж напрямку поширення хвилі. Тоді хвилю називають **поздовжньою**. У поздовжній хвилі частинки середовища коливаються в тому самому напрямку, у якому поширюється хвиля. Поздовжні хвилі легко спостерігати в м'якій розтягнутій пружині, почергово стискаючи і розтягуючи один її кінець (мал. 2.12). Розглянемо процес утворення поперечної хвилі (мал. 2.13).

Першій точці надається коливальний рух зовнішньою періодичною силою, що має період коливань

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



Мал. 2.14

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

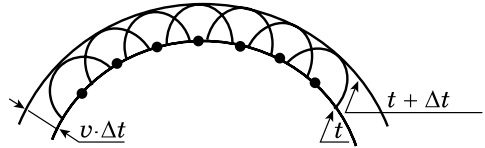
Швидкістю хвилі v називають швидкість переміщення гребеня хвилі.

Швидкість хвилі слід відрізнити від швидкості частинок самого середовища. За період, протягом якого хвиля здійснює одне коливання, тобто опускається з гребеня в западину і знову піднімається на гребінь,

хвиля просунеться на відстань λ , і її швидкість дорівнюватиме $v = \frac{\lambda}{T}$.

Загальний принцип, який описує хвильові явища, уперше сформулював сучасник Ньютона голландський учений Крістіан Гюйгенс. За цим принципом кожна точка середовища, до якої дійшло збурення, сама стає джерелом вторинних хвиль. Для того щоб, знаючи положення хвильової поверхні в момент часу t , знайти її положення в наступний момент часу $t + \Delta t$, треба кожну точку хвильової поверхні розглядати як джерело вторинних хвиль. **Поверхня, дотична до всіх вторинних хвиль, є хвильовою поверхнею в наступний момент часу** (мал. 2.15). Цей принцип однаково підходить для опису поширення будь-яких хвиль: звукових, світлових тощо.

Для механічних хвиль принцип Гюйгенса має наочне тлумачення: частинки середовища, до яких доходять коливання, у свою чергу, коливаючись, надають руху сусіднім частинкам середовища, з якими вони взаємодіють.



Мал. 2.15

За допомогою принципу Гюйгенса встановили закони, яким підпорядковуються хвилі, що відбиваються від межі двох середовищ.

1. Кут відбивання хвилі дорівнює куту падіння хвилі.

2. Падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр, проведений у точку падіння, лежать в одній площині (закон відбивання хвиль).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яку хвилю називають поперечною, яку — поздовжньою?
2. Що називають довжиною хвилі?
3. Чи однакою є довжина хвиль тієї самої частоти в різних середовищах?
4. У чому полягає принцип Гюйгенса?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Як зміниться період вертикальних коливань тягарця, що висить на двох однакових пружинах, якщо послідовне з'єднання пружин замінити паралельним?

Розв'язання

Період коливань тягарця на пружині $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, де k — жорсткість пружини, яка визначається відношенням сили, що зумовила видовження пружини, до цього видовження: $k = \frac{F}{x}$.

Якщо послідовно з'єднано дві однакові пружини, які розтягуються силою F_1 , то жорсткість системи $k = \frac{F_1}{F} = \frac{F}{2x} = \frac{k}{2}$, оскільки довжина кожної з пружин збільшується на x . При паралельному з'єднанні однакових пружин сила F_2 , потрібна для збільшення довжини обох пружин на x , має бути в два рази більша від F , отже, $k_2 = \frac{F_2}{x} = \frac{2F}{x} = 2k$.

У випадку послідовного з'єднання пружин $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$, а у випадку паралельного — $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$. Звідси $\frac{T_1}{T_2} = 2$. Період зменшиться удвічі.

2. Матеріальна точка масою 5 г виконує гармонічні коливання частотою 0,5 Гц. Амплітуда коливань 0,03 м. Визначте: а) швидкість точки в момент часу, коли її зміщення дорівнює 1,5 см; б) максимальну силу, яка діє на точку; в) повну енергію точки, яка здійснює коливання.

Розв'язання

1) Рівняння зміщення точки, яка здійснює коливання, має вигляд

$$x = x_{max} \sin(\omega t + \varphi).$$

Швидкість руху точки змінюється за гармонічним законом $v = x_{max}\omega \cos(\omega t + \varphi)$. Знаючи, що $\varphi = 0$, отримаємо $x = x_{max} \sin \omega t$; $v = x_{max}\omega \cos \omega t$.

Щоб виразити швидкість через зміщення, потрібно виключити із цих рівнянь час. Для цього піднесемо ці рівняння до квадрата, перше рівняння поділимо на x_{max}^2 , друге — на $x_{max}^2\omega^2$ і додамо їх. Отримаємо:

$$\frac{x^2}{x_{max}^2} + \frac{v^2}{x_{max}^2\omega^2} = 1 \quad \text{або} \quad \frac{x^2}{x_{max}^2} + \frac{v^2}{4\pi^2\nu^2 x_{max}^2} = 1.$$

Із цього рівняння визначимо $v = \pm 2\pi\nu\sqrt{x_{max}^2 - x^2}$. Підставивши значення фізичних величин, одержимо $v = \pm 0,082$ м/с. Знак «+» відповідає випадку, коли точка віддаляється від положення рівноваги, знак «-» відповідає руху точки до положення рівноваги.

2) Силу, яка діє на точку, визначимо за другим законом Ньютона $F = ma$. Прискорення точки, яка коливається, дорівнює $a = -x_{max}\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = 4\pi^2\nu^2 x_{max} \sin(\omega t + \varphi)$. Тоді силу, яка діє на точку, визначимо за формулою $F = -4\pi^2\nu^2 m x_{max} \sin(\omega t + \varphi)$, звідки $F_{max} = -4\pi^2\nu^2 m x_{max}$. Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $F_{max} = 1,48 \cdot 10^{-3}$ Н.

3) Повна енергія точки, що коливається, дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергій, які має точка в довільний момент часу. У момент часу, коли кінетична енергія досягає максимального значення, потенці-

альна енергія дорівнює нулю. Тому повна енергія точки дорівнює максимальній кінетичній енергії $W_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2}$.

Максимальна швидкість визначається за формулою $v_{max} = 2\pi\nu x_{max}$, тоді повна енергія буде дорівнювати $W = W_{max} = 2\pi^2 m\nu^2 x_{max}^2$. Підставивши значення фізичних величин, отримаємо $W = 2,22 \cdot 10^{-5}$ Дж.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

2.1. Є камертони на 50, 126 і 440 Гц. Визначте період коливань кожного камертона.

2.2. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням $x = \sin(628t + 2)$?

2.3. Визначте зміщення кульки за 0,05 с, яка здійснює коливання за законом $x = 5 \sin 600t$.

2.4. Чим відрізняються один від одного коливальні рухи, графіки яких зображено на малюнку 2.16?

2.5. Який період коливань має маятник завдовжки 9,8 м, якщо його можна вважати математичним?

2.6. Маятник завдовжки 150 см за 300 с робить 125 коливань. Визначте прискорення вільного падіння.

2.7. Який період вільних коливань пружинного маятника, якщо маса вантажу 0,8 кг, а жорсткість пружини 20 Н/м?

2.8. Визначте частоту коливань вантажу масою 400 г, який підвішено до пружини жорсткістю 160 Н/м.

2.9. Визначте масу вантажу, який на пружині, що має жорсткість 250 Н/м, робить 20 коливань за 16 с.

2.10. Визначте період і частоту вільних коливань математичного маятника завдовжки 5 м.

2.11. Причеплена до пружини гиря коливається вертикально з амплітудою 4 см. Визначте повну енергію коливань гирі, якщо коефіцієнт жорсткості пружини становить 1 кН/м.

2.12. Щоб допомогти водію витягти автомобіль, який застряг у багнюці, кілька людей «розгойдують» автомобіль, причому поштовхи, як правило, виконують за командою. Чи має значення, через які інтервали часу подається команда?

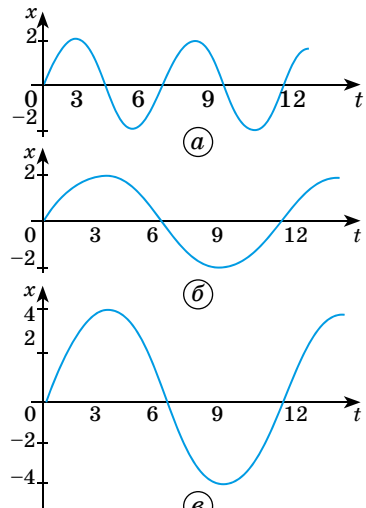
2.13. У яких середовищах поширюються поздовжні і поперечні хвилі? Чому?

2.14. Довжина хвилі дорівнює 0,1 м, а швидкість її поширення 0,5 м/с. Визначте період коливань.

2.15. Довжина хвилі 10 м, період коливань 2,5 с. Яка швидкість поширення хвилі?

2.16. Швидкість поширення хвилі 20 м/с, її довжина 40 м. Яка частота коливань?

2.17. Хвиля із частотою 600 Гц поширюється зі швидкістю 320 м/с. Яка довжина хвилі?



Мал. 2.16

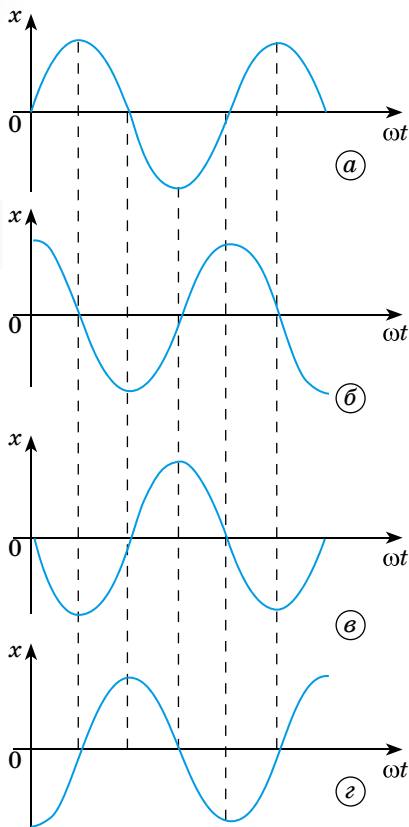
Рівень Б

2.18. За 1 хв виконується 180 гармонічних коливань, амплітуда яких становить 7 см, а початкова фаза дорівнює $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, \pi$. Запишіть рівняння таких коливань.

2.19. Визначте зміщення точки при гармонічному коливанні через $0,25$ періоду після його початку; через $0,6$ періоду після його початку. Початкова фаза дорівнює нулю.

2.20. Амплітуда гармонічного коливання точки дорівнює 10 см, а частота 20 Гц. Визначте швидкість і прискорення точки в момент часу $\frac{1}{120}$ с; $\frac{1}{80}$ с; $\frac{1}{40}$ с.

2.21. Маленьке тіло робить коливання, що описуються рівнянням $x = 2 \sin(\cos \omega t + 0,5)$. Визначте амплітуду, період, початкову фазу коливань, а також максимальні значення швидкості та прискорення тіла.



Мал. 2.17

якщо вантаж починає коливатися з крайнього положення.

2.28. Щоб відвести гойдалку з людиною, яка сидить на ній, на великий кут, потрібно прикласти значну силу. Чому розгойдати гойдалку до того самого відхилення значно легше?

2.29. Хлопчик несе на коромислі відра з водою, період власних коливань яких $0,8$ с. За якої швидкості руху вода почне сильно вихлюпуватись, якщо довжина кроку хлопчика дорівнює 60 см?

2.22. Визначте за графіками (мал. 2.17) початкову фазу кожного коливального руху. Запишіть рівняння кожного руху, якщо $x_{max} = 5$ см; $\nu = 10$ Гц.

2.23. Амплітуда коливань 10 см, а частота $0,5$ Гц. Запишіть рівняння залежності $x = x(t)$ і побудуйте його графік. Визначте фазу і зміщення через $1,5$ с. Через який час зміщення буде $7,1$ см?

2.24. Частинка здійснює гармонічні коливання за законом синуса з періодом 3 с, амплітудою 2 см і початковою фазою, що дорівнює 0 . Запишіть рівняння коливань і побудуйте його графік. Встановіть, у які моменти часу протягом першого коливання точка може перебувати на відстані 1 см від положення рівноваги.

2.25. Годинник, маятник якого завдовжки дорівнює 1 м, поспішає за добу на 15 хв. Як треба змінити довжину маятника, щоб годинник показував точний час?

2.26. До динамометра причепили вантаж, і покажчик опустився на $2,5$ см. Після цього вантаж трохи відтягнули донизу і відпустили. Утворилися коливання навколо положення рівноваги. Яка частота коливань?

2.27. Вантаж масою $0,2$ кг, що висить на пружині, здійснює коливання з амплітудою 5 см. Визначте період коливань вантажу, якщо для видовження пружини на 1 см потрібна сила 2 Н. Запишіть рівняння цього гармонічного коливання,

2.30. Повз спостерігачку, що стоїть на березі річки, за 6 с пройшло 4 гребені хвиль. Відстань між першим і четвертим гребенем 12 м. Визначте період коливань частинок води, швидкість поширення та довжину хвилі.

2.31. Рибалка помітив, що за 10 с поплавок здійснив на хвилях 20 коливань, а відстань між сусідніми гребенями хвиль 1,2 м. Яка швидкість поширення хвиль?

2.32. Від падіння каменя на поверхні води виникли хвилі. Чи далеко від спостерігача впав камінь, якщо відстань між сусідніми гребенями 0,5 м і за 5 с до спостерігача дійшло 20 хвиль?

2.33. Дівчинка, перебуваючи на березі моря, визначила, що відстань між гребнями хвиль 12 м. Крім того, вона підрахувала, що за 75 с повз неї пройшло 16 гребнів. Визначте швидкість поширення хвиль.

2.34. Визначте відстань між сусідніми точками хвилі, що перебувають в однакових фазах, якщо швидкість поширення хвилі 330 м/с, а частота коливань 256 Гц.

2.35. По поверхні води поширюється хвиля зі швидкістю 2,4 м/с при частоті коливань 2 Гц. Яка різниця фаз у точках, що лежать на одному промені і віддалені одна від одної на 90 см?

Є над чим замислитися

2.36. Поперечна хвиля завдовжки 20 м поширюється вздовж пружного шнура зі швидкістю 10 м/с. Максимальне відхилення точок шнура 2 см. Визначте фазу коливань, зміщення і швидкість точки, яка міститься на відстані 48,3 м від джерела хвилі в момент часу 5 с.

2.37. Точка здійснює коливання за законом $x = x_{max} \sin \omega t$. У деякий момент зміщення точки дорівнювало 5 см. Коли фаза коливань збільшилась удвічі, зміщення стало 8 см. Визначте амплітуду коливань.

2.38. Коливання точки відбуваються за законом $x = x_{max} \cos(\omega t + \varphi)$. У деякий момент зміщення точки дорівнює 5 см, її швидкість 20 см/с, прискорення дорівнює 80 см/с². Визначте амплітуду, циклічну частоту, період коливань і фазу в розглядуваний момент часу.

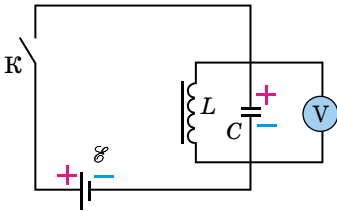
§ 23. КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР. ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

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

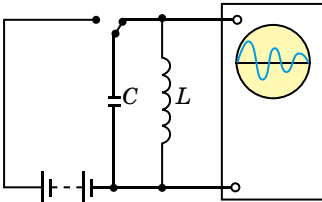
Найпростішою установкою, у якій досить просто можна створювати електромагнітні коливання, є електричне коло, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C (мал. 2.18).

Щоб можна було легко спостерігати за змінами напруги на обкладках конденсатора, до них приєднано вольтметр V . Коливання мають бути досить повільними. Тому в такій установці використовують котушку значної індуктивності і конденсатор великої ємності, вольтметр з нульовою поділкою посередині шкали.

Якщо замкнути ключ K , то конденсатор C зарядиться від джерела постійного струму \mathcal{E} і вольтметр покаже напругу на його обкладках. Після від'єднання джерела живлення від досліджуваного кола, вольтметр показує наявність коливань напруги, які швидко припиняються. Значення і знак напруги на обкладках конденсатора змінюються, що свідчить про періодичну перезарядку обкладок конденсатора.

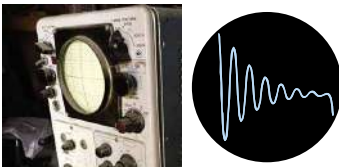


Мал. 2.18



Мал. 2.19

96



Мал. 2.20

Таким чином, можна дійти висновку: якщо систему вивести зі стану рівноваги (зарядити конденсатор від стороннього джерела), то після від'єднання джерела в колі відбудуватимуться коливання напруги.

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

Спостерігати і досліджувати електромагнітні коливання зручно за допомогою електронного осцилографа (мал. 2.19). Зарядимо конденсатор C від джерела постійного струму і замкнемо його на котушку індуктивності L , паралельно якій увімкнено електронний осцилограф. На екрані одержимо криву залежності заряду (або сили струму в колі) від часу — осцилограму коливань заряду (або сили струму). Амплітуда цих коливань швидко зменшується, тобто коливання швидко згасають (мал. 2.20).

Розглянуті електромагнітні коливання отримали назву власних (вільних) коливань, оскільки вони здійснюються вільно, тобто без впливу зовнішньої сили. Частоту вільних коливань називають власною частотою коливального контуру. Власні коливання є затухаючими, їхня амплітуда із часом зменшується. Причиною затухання є те, що енергія струму перетворюється у внутрішню енергію провідів (оскільки вони мають опір) і витрачається на випромінювання електромагнітних хвиль.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що називають коливальним контуром?
2. Намалуйте схему установки, у якій можна спостерігати електромагнітні коливання.
3. Який прилад дає можливість спостерігати електромагнітні коливання?

§ 24. ГАРМОНІЧНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. ЧАСТОТА ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ КОНТУРУ

Розглянемо механізм виникнення коливань у коливальному контурі. Щоб отримати вільні коливання в механічній коливальній системі, потрібно надати цій системі енергію від зовнішнього джерела. У процесі коливань ця енергія періодично перетворюється з потенціальної в кінетичну, і навпаки. Щоб коливальний контур вивести зі стану електричної

рівноваги, цій коливальній системі потрібно також надати певну енергію. Розглянемо послідовні стадії коливального процесу в ідеалізованому контурі, опір якого дуже малий $R \approx 0$. Для виникнення в контурі коливань конденсатор попередньо заряджають, надаючи його обкладкам заряди $\pm q$. Тоді в початковий момент часу $t = 0$ (мал. 2.21, а) між обкладками конденсатора виникає електричне поле, енергія якого: $W_e = \frac{q^2}{2C}$.

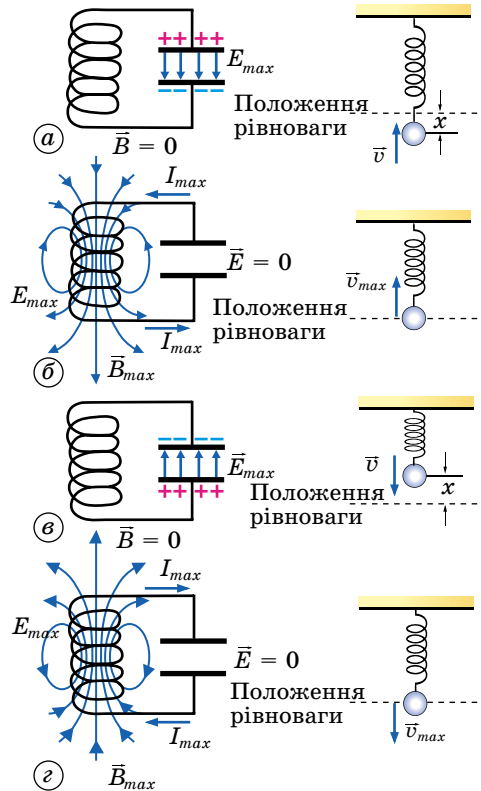
Якщо конденсатор замкнути на котушку індуктивності, то він почне розряджатися і в контурі виникне зростаючий із часом струм I . Отже, енергія електричного поля конденсатора буде зменшуватися, а енергія магнітного поля котушки — збільшуватися.

Вважаючи, що $R \approx 0$, то відповідно до закону збереження енергії повна енергія контуру буде мати вигляд: $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$, тому що енергія на нагрівання провідників у такому коливальному контурі не витрачається. У момент часу $t = \frac{T}{4}$, коли конденсатор повністю розрядиться,

енергія електричного поля зменшиться до нуля, а енергія магнітного поля, а отже, і сила струму, досягне найбільшого значення (мал. 2.21, б). Починаючи із цього моменту часу сила струму в контурі буде зменшуватися, отже, почне слабшати магнітне поле котушки й індукований у ній струм, який проходить у тому самому напрямку, що й струм розрядки конденсатора. Конденсатор почне перезаряджатися, при цьому виникне електричне поле, яке намагатиметься послабити силу струму, який зрештою зменшиться до нуля, а заряд на обкладках конденсатора досягне максимуму (мал. 2.21, в). Далі ті самі процеси почнуть відбуватися у зворотному напрямку (мал. 2.21, г), і система до моменту часу $t = T$ повернеться в початковий стан (мал. 2.21, а). Після цього розглянутий цикл розрядки і зарядки конденсатора почне повторюватися.

Якби втрат енергії не було, то в контурі відбувалися б періодичні незатухаючі коливання, тобто періодично змінювалися (коливалися) б заряд q на обкладках конденсатора, напруга U на конденсаторі і сила струму I , який проходить через котушку індуктивності.

Отже, у контурі виникають електричні коливання з періодом T , причому протягом першої половини періоду струм проходить в одному напрямку, протягом другої половини — у протилежному. Коливання супроводжуються перетвореннями енергій електричних і магнітних полів.



Мал. 2.21

Електричні коливання в коливальному контурі можна порівняти з механічними коливаннями пружинного маятника (мал. 2.21), які супроводжуються перетвореннями потенціальної і кінетичної енергії маятника.

У цьому випадку потенціальна енергія маятника $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ аналогічна до енергії електричного поля конденсатора $W_{\text{к}} = \frac{q^2}{2C}$, кінетична енергія маятника $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ — енергії магнітного поля котушки $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$, а швидкість руху маятника — до сили струму в контурі.

Роль інерції маятника буде зводитися до самоіндукції котушки, а роль сили тертя, яка діє на маятник, — до опору контуру.

Перейдемо тепер до кількісної теорії процесів у коливальному контурі. Визначимо період (або частоту) вільних електричних коливань. Виходячи з аналогії між вільними механічними і електричними коливаннями, можна відразу записати вираз для частоти і періоду вільних електричних коливань. Оскільки у формулі циклічної частоти вільних

коливань тягарця на пружині $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — величина k аналогічна до $\frac{1}{C}$, а m — до індуктивності L , то і частота вільних електричних коливань має дорівнювати $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

98 Для періоду вільних коливань у контурі можна записати:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Цю формулу називають **формулою Томсона** на честь англійського фізика, який її вперше вивів.

Отримані результати правильні. Проте вважати їх строго доведеними не можна. Треба показати, що рівняння, яке описує електричні коливання в контурі, з математичного боку не відрізняється від рівняння, яке описує вільні механічні коливання. Лише після цього можна стверджувати, що механічні й електричні коливання підпорядковані тим самим кількісним законам.

Як відомо, координата в механічних коливаннях, коли в початковий момент ($t = 0$) відхилення від положення рівноваги максимальне, змінюється із часом за гармонічним законом: $x = x_{\text{max}} \cos \omega_0 t$.

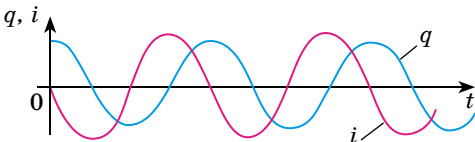
За таким самим законом змінюється із часом заряд конденсатора:

$$q = q_{\text{max}} \cos \omega_0 t,$$

де q_{max} — амплітуда коливань заряду. Гармонічно коливається і сила струму:

$$i = I_{\text{max}} \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right),$$

де $I_{\text{max}} = q_{\text{max}} \omega_0$ — амплітуда коливань сили струму. Коливання сили стру-



Мал. 2.22

му зміщені за фазою на $\frac{\pi}{2}$ щодо коливань заряду (мал. 2.22) і, подібно до коливань швидкості руху тягарця на пружині, випереджають за фазою на $\frac{\pi}{2}$ коливання координати.

Дійсно, унаслідок енергетичних втрат коливання будуть затухаючими. Що більший опір R , то більшим буде період коливань. Коливання напруги будуть описуватися за таким законом: $u = U_{max} \cos \omega_0 t$.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Проведіть аналогію між електромагнітними і механічними коливаннями.
2. Запишіть рівняння гармонічного коливання заряду, сили струму і напруги в коливальному контурі.
3. За якою формулою визначають власну частоту вільних електромагнітних коливань?

§ 25. ВИМУШЕНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС

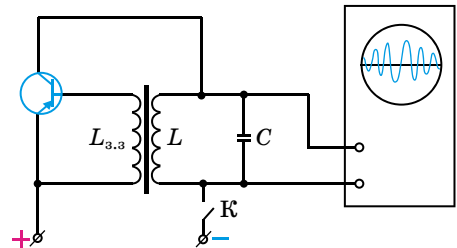
Вільні коливання, які ми вже розглянули, є певною ідеалізацією. Реальний коливальний контур завжди чинить певний опір електричному струму. Тому частина наданої контуру енергії безперервно перетворюється у внутрішню енергію проводів, а частина енергії випромінюється в навколишній простір. Це означає, що вільні електромагнітні коливання в контурі практично завжди є згасаючими. Що більший опір контуру, то швидше відбувається затухання. Якщо опір контуру дуже великий, коливання можуть і не виникнути — конденсатор розрядиться, а перезарядження його не відбудеться.

Особливо важливі і широко застосовуються автоколивання — незатухаючі коливання, які підтримуються в коливальній системі завдяки постійному зовнішньому джерелу енергії, причому властивості цих коливань визначаються самою системою.

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

Існує багато автоколивальних систем як з електронними лампами, так і з транзисторами. На малюнку 2.23 показано спрощену схему електричної автоколивальної системи — автогенератора електромагнітних коливань на транзисторі. Коливальний контур LC увімкнено до джерела постійної ЕРС послідовно з транзистором. В емітер — базове коло транзистора — увімкнута котушка $L_{з.з}$, індуктивно зв'язана з коливальним контуром. Цю котушку називають **котушкою зворотного зв'язку**. Паралельно коливальному контуру увімкнено електронний осцилограф для спостереження електромагнітних коливань. Генератор живиться від джерела постійної напруги.

Розглянуті вище коливання відбувалися із частотами, які визначаються параметрами самої коливальної системи. Щоб у реальній коливальній системі отримати незатухаючі коливання, треба компенсувати втрати енергії.



Мал. 2.23

Коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється, називають *вимушеними електромагнітними коливаннями*.

Для того щоб у коливальному контурі виникали вимушені коливання, треба до контуру підвести зовнішню ЕРС, яка періодично змінюється за гармонічним законом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{max} \cos \omega_0 t.$$

Якщо в якому-небудь коливальному контурі весь час діє генератор змінного струму, то ЕРС генератора збуджуватиме в цьому контурі змінний електричний струм із частотою коливання ЕРС генератора.

Частота цих вимушених коливань взагалі не збігається із частотою власних (вільних) коливань контуру.

Якщо ця зовнішня змінна ЕРС має постійну амплітуду, то і вимушені коливання в контурі відбуватимуться з постійною амплітудою, тобто будуть незатухаючими.

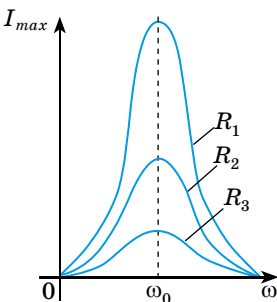
Таким чином, у коливальному контурі можуть існувати два типи коливань: власні коливання, частота яких визначається властивостями самого контуру, його індуктивністю і ємністю, та вимушені коливання, частота яких визначається дією ЕРС і може бути довільною.

При зближенні частоти власних коливань контуру і частоти ЕРС, що діє в контурі, спостерігається збільшення струму в контурі, а коли настає збіг частот, опір контуру стає найменшим, а сила струму стає найбільшою. Такий випадок є особливо важливим, його називають резонансом.

100

Якщо різко зростає амплітуда вимушених коливань, коли частота їх наближається до частоти власних коливань системи, називають резонансом:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$



Мал. 2.24

Залежність амплітуди сили струму від частоти для різних опорів показано на малюнку 2.24. Одночасно зі збільшенням сили струму під час резонансу різко зростають напруги на конденсаторі та котушці індуктивності, які при малому активному опорі в багато разів перевищують зовнішню напругу.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. За яких умов в електричному колі виникають вимушені електричні коливання?
2. Що таке автоколивання?
3. За яких умов виникає електричний резонанс?
4. У чому відмінність автоколивань від вимушених коливань і вільних коливань?



Підготуйте мультимедійну презентацію на тему «Роль автоколивань у техніці».

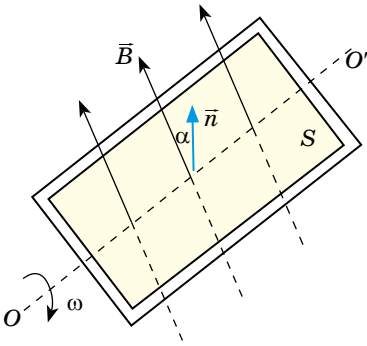
§ 26. ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ВИРОБНИЦТВО, ПЕРЕДАЧА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Якщо електричне коло під'єднати до джерела змінної ЕРС, то на електрони в провіднику почне діяти змінна сила, яка примусить їх переміщуватися. При цьому рух електронів буде точно повторювати характер змін ЕРС.

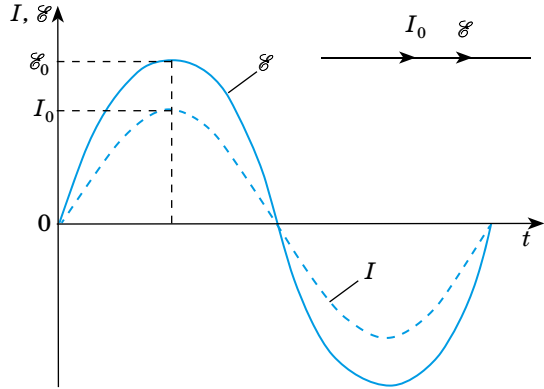
Змінний струм — це, по суті, вимушені коливання електричних зарядів у провіднику під дією прикладеної змінної ЕРС.

Змінний струм за характером змін сили струму може бути найрізноманітнішим. Найбільш важливими є струми, сила яких змінюється за гармонічним законом (за законом синуса чи косинуса).

Розглянемо замкнений контур площею S в однорідному магнітному полі, індукція якого B . Контур рівномірно обертається навколо осі OO' з кутовою швидкістю ω (мал. 2.25).



Мал. 2.25



Мал. 2.26

Магнітний потік, який пронизує контур, визначається за формулою $\Phi = BS \cos \alpha$, де α — кут між перпендикуляром \vec{n} до площини контуру і вектором B .

У процесі рівномірного обертання контуру кут повороту α змінюється із часом за законом $\alpha = \omega t$, а магнітний потік, який пронизує контур, за законом $\Phi = BS \cos \alpha$.

У замкненому контурі виникає ЕРС індукції $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$, значення якої у певний момент часу буде визначатися за формулою: $\mathcal{E}_i = \omega BS \sin \alpha$.

Як випливає з формули ЕРС індукції, що виникає в замкненому контурі, який рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, змінюється із часом за законом синуса (мал. 2.26).

ЕРС індукції максимальна при $\sin \omega t = 1$, тобто при $\alpha = \omega t = \frac{\pi}{2}$.

Величину $\mathcal{E}_{max} = \omega BS$ називають амплітудним значенням ЕРС індукції.

Якщо такий контур замкнути на зовнішнє коло, то по колу проходить струм, сила і напрямок якого змінюються.

Миттєве значення змінного струму, що проходить активним опором R , визначимо за законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{R} \sin \omega t = I_{max} \sin \omega t,$$

де I_{max} — амплітудне значення сили струму.

Інтервал часу T , протягом якого змінна ЕРС здійснює одне повне коливання, називають **періодом змінного струму**.

Кількість повних коливань, які здійснюються за 1 с, називають **частотою змінного струму ν** .

Проходячи в колі електричний струм виявляє теплову, магнітну, механічну та інші дії. У кожному випадку ця дія залежить від сили струму. У разі проходження постійного струму кількість теплоти, що виділяється у провіднику, пропорційна квадрату сили струму. Для змінного струму, абсолютне значення якого змінюється від нуля до амплітудного значення, потрібно знати деякий еквівалент постійного струму, який виявляв би таку саму дію, як і змінний струм. Такий еквівалент встановлюють за тепловою дією. Під час проходження постійного струму в провіднику, опір якого R , за час t виділяється кількість теплоти: $Q = I^2 R t$.

Силу змінного струму, при проходженні якого крізь резистор того самого опору R протягом часу t виділяється така сама кількість теплоти Q , називають **діючою або ефективною**.

Тобто можна стверджувати, що **діюче значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, що виділяє в провіднику таку саму кількість теплоти, як і змінний струм за той самий час**.

Запишемо відповідні співвідношення між ефективним і амплітудним значеннями сили змінного струму.

Величину, що дорівнює квадратному кореню із середнього значення квадрата сили струму, називають **діючим значенням сили змінного струму (ефективне)**: $I_{\text{еф}} = \sqrt{i^2} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.

$$I_{\text{еф}} = \sqrt{i^2} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Величину, що дорівнює квадратному кореню із середнього значення квадрата напруги, називають **діючим значенням напруги змінного струму (ефективне)**: $U_{\text{еф}} = \sqrt{u^2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

$$U_{\text{еф}} = \sqrt{u^2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

У колі змінного струму амперметр і вольтметр показують не максимальні (амплітудні) і не миттєві значення сили струму і напруги, а ефективні (діючі). Наприклад, якщо $U_{\text{еф}} = 220 \text{ В}$, то $U_0 = \sqrt{2} \cdot 220 \text{ В} = 311 \text{ В}$.

Для одержання миттєвих значень сили змінного струму і напруги користуються осцилографом.

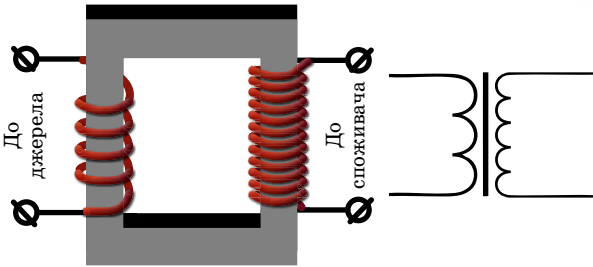
Однією з важливих переваг змінного струму над постійним є те, що силу струму і напругу змінного струму можна в найширших межах перетворювати (трансформувати) без істотних втрат потужності. Для зменшення витрат електричної енергії в лініях електропередач силу струму в них зменшують, а напругу збільшують до сотень тисяч і більше вольт, а в місцях споживання електроенергії напругу знижують до необхідних значень (сила струму при цьому відповідно збільшується).

Трансформатор — прилад, призначений для перетворення параметрів змінного струму, що складається з виготовленого з м'якого феромагнетика осердя замкненої форми, на якому встановлено дві обмотки — первинну і вторинну.

Уперше трансформатор сконструював у 1878 р. російський учений **Павло Яблочков** (1847–1894), а на початку ХХ ст. його вдосконалили професор **Семен Усатий** (1875–1944) і професор Київського університету **Михайло Доливо-Добровольський** (1861–1919).

Трансформатор складається із замкненого осердя з феромагнетика, на якому розміщують дві (інколи більше) котушки в вигляді обмоток з дроту. Одну обмотку, яку вмикають у джерело змінної напруги, називають первинною, другу обмотку, до якої приєднують «навантаження», що споживає енергію, називають вторинною (мал. 2.27).

Робота трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Розглянемо принцип його дії. Нехай на вхід трансформатора подається змінна напруга U_1 . В осерді трансформатора виникає змінний магнітний



Мал. 2.27

потік, який пронизує і первинну, і вторинну обмотки трансформатора. У первинній і вторинній обмотках відповідно виникають ЕРС самоіндукції:

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } \mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де N_1 і N_2 — кількість витків первинної і вторинної обмоток.

Визначимо напруги на вході і виході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - \mathcal{E}_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } U_2 = I_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де R_1 і R_2 — відповідно опори первинної і вторинної обмоток трансформатора; I_1 і I_2 — сили струмів, які проходять по первинній і вторинній обмотках.

Розглянемо випадок, коли вторинна обмотка розімкнена, тобто $I_2 = 0$ (холостий хід). Технічні трансформатори конструюють так, щоб виконувалась умова $I_1 R_1 \ll \mathcal{E}_1$, тобто обмотки трансформатора мають невеликий активний опір, але велику індуктивність. Поділивши почленно одне на одне

рівняння напруг, отримаємо: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

Напруга на кінцях первинної обмотки трансформатора так відноситься до напруги на кінцях його вторинної обмотки, як кількість витків первинної обмотки відноситься до кількості витків вторинної обмотки. Це відношення називають **коефіцієнтом трансформації**: $k = \frac{N_1}{N_2}$.

Якщо $k > 1$, то трансформатор буде знижувальним, якщо $k < 1$ — підвищувальним.

Трансформатор перетворює змінний електричний струм так, що відношення сили струму до напруги приблизно однакове в первинній і вторинній обмотках.

За допомогою трансформатора знижують значення сили струму і збільшують напругу під час передавання електричної енергії. Це сприяє зниженню теплових втрат ($Q = I^2 R t$ — закон Джоуля–Ленца). Враховуючи, що потужність сили струму визначається добутком напруги і сили струму, таке зменшення сили струму не змінить переданої потужності.

Передавання електроенергії на великі відстані здійснюють при напругах у кілька сотень тисяч вольтів. Генератори потужних електростанцій виробляють силу струму напругою від 6 до 20 кВ.

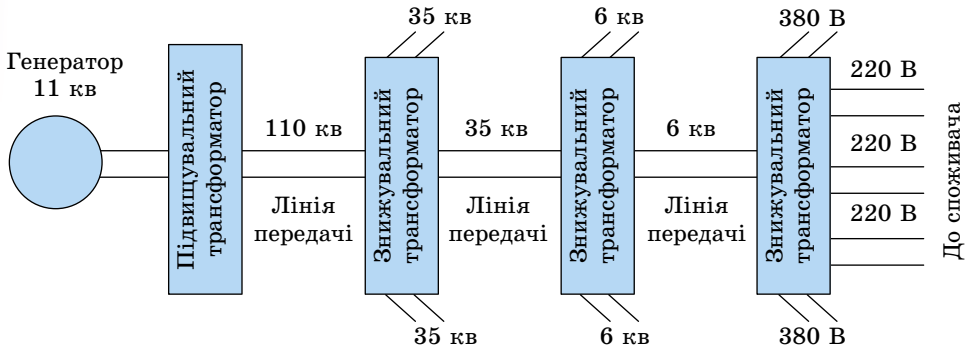
Перші генератори було створено в 50-х роках XIX ст., а вже в 70-х роках почалося їхнє промислове виробництво. Тепер рівень виробництва і споживання енергії — найважливіший показник розвитку продуктивних сил суспільства. Головне значення при цьому має електроенергія —

найуніверсальніша і найзручніша для використання форма енергії.

Електроенергію в Україні виробляють на теплових (ТЕС і ТЕЦ), гідро- (ГЕС), атомних (АЕС) і вітрових (ВЕС) електростанціях.

Джерелом енергії на ТЕС і ТЕЦ (теплоелектроцентрально) є вугілля, газ, торф, мазут тощо, на ГЕС — потенціальна енергія води, піднятої греблею, на АЕС — ядерне паливо, розміщене в тепловидільних елементах (ТВЕЛ) ядерного реактора, на ВЕС — енергія вітру.

Для передавання електроенергії від електростанцій використовують трансформатори для підвищення напруги до кількох сотень кіловольтів. На місцях споживання електроенергії за допомогою трансформаторів напругу зменшують (мал. 2.28).



Мал. 2.28

Сучасна цивілізація не може існувати без широкого використання електроенергії. Порушення постачання електроенергією великого міста внаслідок аварії паралізує його життя.

Понад 90 % енергії, яку споживає людство, отримують від спалювання вугілля, нафти, газу. Для цього використовують теплові електростанції, на яких хімічна енергія палива перетворюється в електричну. За рахунок згоряння палива відбувається нагрівання води, перетворення її в пару і нагрівання пари. Струмінь пари високого тиску спрямовується на роторні лопаті парової турбіни і примушує їх обертатися. Ротор турбіни обертає ротор генератора електричного струму. Генератор змінного струму перетворює механічну енергію в енергію електричного струму.

Змінний струм від генератора по провідниках надходить до споживачів, де електрична енергія перетворюється в інші види енергії. За допомогою електродвигуна змінного струму енергія електромагнітних коливань перетворюється в механічну енергію, а в лампах розжарювання, у спіралях електронагрівальних приладів електрична енергія змінного струму перетворюється у внутрішню енергію. Електричну енергію широко застосовують у промисловості, сільському господарстві, на транспорті тощо.

Сучасна електроенергетика має чимало проблем, зумовлених високою вартістю пального, негативним впливом на екологію тощо. Так, гідроенергетичні технології мають багато переваг, але є й значні недоліки. Приміром, дощові сезони, низькі водні ресурси під час засухи можуть серйозно впливати на кількість виробленої енергії. Це може стати значною проблемою там, де гідроенергія складає значну частину в енергетичному комплексі країни. Будівництво гребель є причиною багатьох проблем: переселення мешканців, пересихання природних русел річок, замулення водосховищ, водних суперечок між сусідніми країнами, значної вартості цих проектів. Будівництво ГЕС на рівнинних річках призводить до затоплення великих

територій. Значна частина площі водойм, що утворюються, — мілководдя. У літній час під впливом сонячної радіації в них активно розвивається водяна рослинність, відбувається так зване цвітіння води.

Зміна рівня води, яка подекуди доходить до повного висушування, призводить до загибелі рослинності. Греблі перешкоджають міграції риб. Багатокаскадні ГЕС уже зараз перетворили річки на низку озер, де виникають болота. У цих річках гине риба, а навколо них змінюється мікроклімат, ще більше руйнуючи природні екосистеми.

Щодо шкідливості ТЕС, то під час згоряння палива в теплових двигунах виділяються шкідливі речовини: закис вуглецю, сполуки азоту, сполуки свинцю, а також виділяється в атмосферу значна кількість теплоти. Крім того, застосування парових турбін на ТЕС потребує відведення великих площ під ставку, у яких охолоджується відпрацьована пара. Щорічно у світі спалюється 5 млрд тонн вугілля і 3,2 млрд тонн нафти, це супроводжується викидом в атмосферу $2 \cdot 10^{10}$ Дж теплоти. В атмосферу щорічно викидається 20–30 млрд тонн оксиду Карбону. За таких темпів до середини століття середня температура на Землі підвищиться на кілька градусів, що призведе до непередбачених глобальних кліматичних змін.

Реальний радіаційний вплив АЕС на природне середовище є набагато (у 10 і більше разів) меншим від припустимого. Якщо врахувати екологічну дію різноманітних енергоджерел на здоров'я людей, то серед невідновлюваних джерел енергії ризик від працюючих АЕС мінімальний як для працівників, діяльність яких пов'язана з різними етапами ядерного паливного циклу, так і для населення. Глобальний радіаційний внесок атомної енергетики на всіх етапах ядерного паливного циклу нині становить близько 0,1 % природного фону і не перевищить 1 % навіть при найінтенсивнішому її розвитку в майбутньому.

Серйозним недоліком атомної енергетики є радіоактивність використуваного палива і продуктів його поділу. Це вимагає створення захисту від різного типу радіоактивного випромінювання, що значно підвищує вартість енергії, яку виробляють АЕС. Крім того, ще одним недоліком АЕС є теплове забруднення води, тобто її нагрівання.

Новітні дослідження спрямовані переважно на вироблення електричної енергії за рахунок енергії вітру. Споруджуються ВЕС переважно постійного струму. Вітряне колесо приводить у рух динамо-машину — генератор електричного струму, який одночасно заряджає паралельно з'єднані акумулятори.

Біомаса — це відходи сільськогосподарського виробництва (тваринництва, переробної промисловості). Основною сировиною для виробництва біогазу є гній, який доставляють на біогазові станції. Головним продуктом біогазової станції є суміш горючих газів (90 % суміші — метан). Цю суміш постачають на установки для вироблення теплоти, на електростанції.

Тепловий потік сонячного випромінювання, який сягає Землі, дуже великий. Він більш як у 5000 разів перевищує сумарне використання всіх видів паливно-енергетичних ресурсів у світі.

Серед переваг сонячної енергії — її вічність і виняткова екологічна чистота. Сонячна енергія надходить на всю поверхню Землі, лише полярні райони планети страждають від її нестачі. Тобто практично на всій земній кулі лише хмари та ніч заважають користуватися нею постійно. Така загальнодоступність робить цей вид енергії неможливим для монополізації на відміну від нафти і газу.



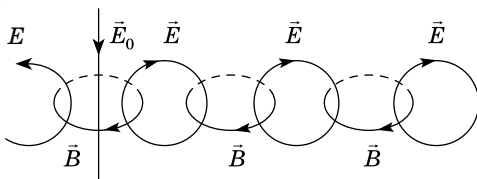
ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке змінний струм? Якими законами він описується?
2. Що таке амплітудне значення ЕРС індукції?

3. Який принцип роботи генераторів змінного струму?
4. Як визначається ЕРС індукції, що виникає в генераторі?
5. Із чого складається трансформатор і яке його призначення?
6. На якому фізичному явищі ґрунтується робота трансформатора?
7. Як визначити коефіцієнт трансформації?
8. Де використовують трансформатори?
9. Де виробляється електроенергія і як вона передається до споживача?
10. Які проблеми сучасної енергетики?

§ 27. ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

У 60-х роках XIX ст. Максвелл розробив теорію електромагнітного поля, за якою змінне електричне поле породжує змінне магнітне. Ці поля мають вихровий характер: силові лінії поля, яке породжує, концентровано охоплені силовими лініями поля, що породжується. Унаслідок цього утворюється система «переплєтених» між собою електричних і



Мал. 2.29

магнітних полів. Деяке уявлення про характер змінного електромагнітного поля може дати малюнок 2.29, який є ніби миттєвим знімком цього поля.

Пряма лінія \vec{E}_0 відображає первинне змінне електричне поле, кола \vec{B} у горизонтальній площині — це вторинні змінні магнітні поля, а кола \vec{E} у вертикальній площині — вторинні змінні електричні поля.

Магнітне поле виникає навколо провідників, у яких проходять струми. Силові лінії магнітного поля завжди замкнені, звідси випливає, що електричні струми, які породжують магнітне поле, також мають бути замкненими.

Щоб переконатися в цьому, розглянемо випадок, коли в електричне коло увімкнено конденсатор. Між обкладками конденсатора заряди переміщуватися не можуть. Це призводить до того, що лінії струму обриваються біля поверхні обкладок конденсатора, струм провідності, який проходить по провіднику, що з'єднує обкладки конденсатора, роз'єднується. Якщо напруга джерела струму змінна, то при замиканні ключа K (мал. 2.30) конденсатор поперемінно заряджається і розряджається, у колі проходить струм, лампочка, увімкнена в це коло, світиться. Це свідчить про те, що лінії струму замкнені.

Між обкладками конденсатора змінний електричний заряд створює змінне електричне поле, яке Максвелл назвав **струмом зміщення**.

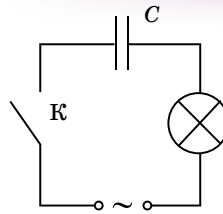
Струм зміщення — змінне електричне поле, як і струм провідності, породжує магнітне поле, силові лінії якого завжди замкнені.

Отже, електричне і магнітне поля взаємозв'язані. Зміна одного з них породжує друге. Ці поля — прояв єдиного електромагнітного поля.

Взаємозв'язок електричного і магнітного полів обумовлює поширення електромагнітного поля в просторі. Уявімо, що у провіднику проходить змінний електричний струм. Тоді навколо цього провідника існує змінне магнітне поле \vec{B} (мал. 2.31). Це поле, у свою чергу, створює змінне електричне поле \vec{E} в сусідніх ділянках простору. Потім змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, яке знову спричиняє появу змінного електричного поля тощо. Отже, поширюючись на нові ділянки простору, електромагнітне поле переміщується з областей, де воно щой-

но існувало. Швидкість поширення електромагнітного поля дорівнює приблизно 300 000 км/с.

Таким чином, електромагнітне поле може існувати самостійно, не будучи зв'язаним із зарядами і струмами. Це переконливий доказ матеріальності електромагнітного поля. У матеріальності електромагнітного поля переконує і той факт, що воно має певну енергію.



Мал. 2.30



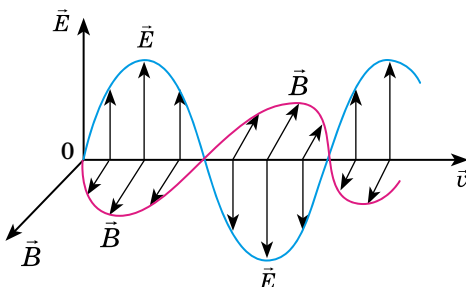
Мал. 2.31

Поширення у просторі електромагнітного поля, у якому напруженість електричного й індукція магнітного полів змінюються періодично, називають електромагнітною хвилею.

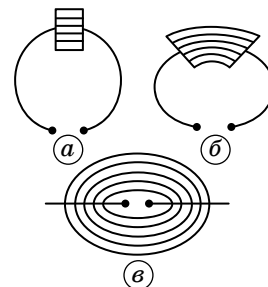
Вектори напруженості \vec{E} і магнітної індукції \vec{B} в електромагнітній хвилі в будь-якій точці простору завжди взаємно перпендикулярні, оскільки лінії напруженості електричного поля охоплюють лінії індукції магнітного поля. Крім того, вони перпендикулярні й до напрямку поширення хвиль. Отже, електромагнітні хвилі — поперечні. Гармонічна електромагнітна хвиля графічно зображається у вигляді двох синусоїд, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах (мал. 2.32). Одна синусоїда відображає коливання вектора напруженості \vec{E} електричного поля, а друга — вектора індукції \vec{B} магнітного поля (обидва вектори коливаються в однаковій фазі).

Як уже зазначалося раніше, джерелом електромагнітних хвиль може бути будь-який електричний коливальний контур або провідник, у якому проходить змінний електричний струм, оскільки для утворення електромагнітних хвиль потрібно створити в просторі змінне електричне поле (струм зміщення) або відповідно змінне магнітне поле. Випромінювальна здатність джерела електромагнітних хвиль визначається його формою, розмірами і частотою коливань. Щоб випромінювання було помітним, потрібно збільшити об'єм простору, у якому створюється змінне електромагнітне поле. Тому для одержання електромагнітних хвиль не придатні закриті коливальні контури, оскільки в них електричне поле зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне — усередині котушки індуктивності.

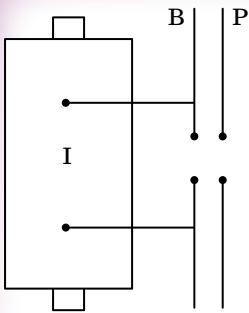
Німецький фізик **Генріх Герц** (1857–1894) у своїх дослідах, зменшуючи число витків котушки і площу пластин конденсатора, а також розсовуючи їх (мал. 2.33, а, б), здійснив перехід від закритого коливального контуру до відкритого коливального контуру (вібратор Герца). Він складається з двох стержнів, розділених іскровим проміжком (мал. 2.33, в). Якщо в закритому коливальному контурі змінне електричне поле зосереджене всередині конденсатора (мал. 2.33, а), то у відкритому — воно заповнює навколишній простір (мал. 2.33, в), що істотно підвищує інтенсивність електромагнітного випромінювання.



Мал. 2.32



Мал. 2.33



Мал. 2.34

Коливання в такій системі підтримуються за рахунок джерела ЕРС, увімкненого до обкладок конденсатора, а іскровий проміжок застосовується для того, щоб збільшити різницю потенціалів, до якої в початковий момент часу заряджаються обкладки конденсатора.

Для отримання електромагнітних хвиль вібратор Герца В під'єднували до індуктора I (мал. 2.34). Коли напруга на іскровому проміжку досягала пробивного значення, виникала іскра, яка замикала обидві половини вібратора, і в ньому виникали вільні затухаючі коливання. При зникненні іскри контур розмикався і коливання припинялися. Потім індуктор знову заряджав конденсатор, виникала іскра і в контурі знову спостерігалися коливання

і т.д. Для реєстрації електромагнітних хвиль Герц використовував інший вібратор, який назвав резонатором Р, що мав таку саму частоту власних коливань, як і випромінювальний вібратор. Коли електромагнітні хвилі досягали резонатора, то в його зазорі виникала електрична іскра.

Для одержання незатухаючих коливань потрібно створити автоколивальну систему, яка б забезпечувала подачу енергії із частотою, що дорівнює частоті власних коливань контуру. Тому в 20-х роках минулого сторіччя перейшли до генерування електромагнітних хвиль за допомогою електронних ламп. Лампові генератори давали змогу одержувати коливання заданої (практично будь-якої) потужності і синусоїдальної форми.

Приймання електромагнітних хвиль здійснюється за допомогою таких самих відкритих коливальних контурів — вібраторів або антен, подібних до випромінювального контуру. Під дією змінного електричного поля електромагнітної хвилі у приймальному контурі виникають електромагнітні коливання. Для їхнього якісного приймання потрібно, щоб приймальний коливальний контур був настроєний у резонанс з передавальним контуром. Тобто щоб власна частота коливань контуру приймальної антени була близькою до частоти коливань контуру передавальної антени. Настроювання приймального контуру в резонанс здійснюється конденсатором змінної ємності або котушкою змінної індуктивності.

108



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що називають електромагнітним полем? Чи можуть електричні і магнітні поля існувати відокремлено одне від одного?
2. Що називають електромагнітною хвилею?
3. Як орієнтовані вектори E і B один відносно одного в електромагнітній хвилі?
4. Що є джерелом електромагнітних хвиль?
5. Як побудовано вібратор Герца, який принцип його дії?
6. Як здійснюється приймання електромагнітних хвиль?

§ 28. ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

Електромагнітні хвилі поглинаються, відбиваються і заломлюються, як і всі інші види хвиль. Це легко спостерігати.

Радіотехнічні пристрої дають змогу провести наочні досліди з метою виявлення властивостей електромагнітних хвиль. При цьому найкраще використовувати хвилі сантиметрового діапазону, що їх випромінює спеціальний генератор надвисокої частоти (НВЧ).

Електромагнітні хвилі випромінює рупорна антена в напрямку осі рупора-гучномовця. Приймальна антена, яка має вигляд такого самого рупора,

уловлює хвилі, що поширюються вздовж його осі. Загальний вигляд установки показано на малюнку 2.35. Рупори розміщують один проти одного і після увімкнення звуку розміщують різні діелектричні тіла. При цьому помічають зменшення гучності.



Мал. 2.35

Це свідчить про те, що електромагнітні хвилі поглинаються.

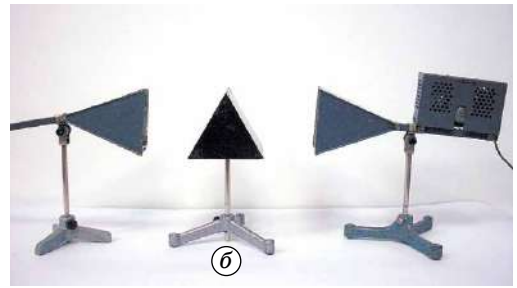
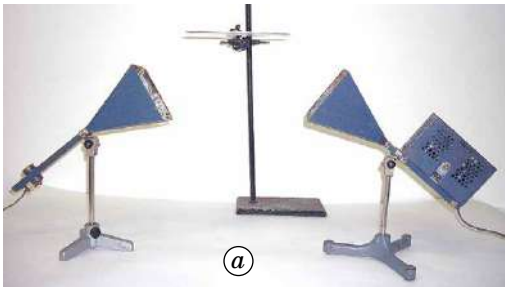
Якщо діелектрик замінити металевою пластинкою, то хвилі не досягатимуть приймача внаслідок відбивання. Звуку не буде чути. Відбивання відбувається під кутом, що дорівнює куту падіння, як і у випадку світлових і механічних хвиль. Щоб переконатися в цьому, рупори розміщують під однаковими кутами до великого металевого листа (мал. 2.36, а). Звук зникає і тоді, коли забрати лист або повернути його.

Електромагнітні хвилі відбиваються.

Електромагнітні хвилі змінюють свій напрямок (заломлюються) на межі діелектрика. Це можна виявити за допомогою великої трикутної призми з парафіну. Рупори встановлюють під кутом один до одного, як і тоді, коли демонстрували відбивання. Металевий лист замінюють призмою (мал. 2.36, б). Забираючи призму або повертаючи її, спостерігають зникнення звуку.

Електромагнітні хвилі заломлюються.

109



Мал. 2.36

Електромагнітні хвилі — поперечні. Це означає, що вектори \vec{E} і \vec{B} хвилі електромагнітного поля перпендикулярні до напрямку її поширення. Коливання напруженості електричного поля хвилі, яка виходить з рупора, відбуваються в певній площині, а коливання вектора магнітної індукції — у перпендикулярній до неї площині. Хвилі з певним напрямком коливань називають **поляризованими**. На малюнку 2.32 показано поляризовану хвилю. Приймальний рупор з детектором приймає тільки поляризовану в певному напрямку хвилю. Це можна виявити, повернувши передавальний або приймальний рупор на 90° . Звук при цьому зникне.

Поляризацію спостерігають, розміщуючи між генератором і приймачем решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 2.37). Решітку ставлять так, щоб стержні були



Мал. 2.37

горизонтальні або вертикальні. В одному з положень, коли електричний вектор паралельний стержням, у них збуджуються струми, унаслідок чого решітка відбиває хвилі подібно до суцільної металевої пластини. Якщо вектор E перпендикулярний до стержнів, то струми в них не збуджуються й електромагнітна хвиля проходить.

Більше властивостей електромагнітних хвиль розглянемо, вивчаючи оптику.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що являє собою електромагнітне поле?
2. Як утворюються і поширюються електромагнітні хвилі?
3. Назвіть властивості електромагнітних хвиль, які ви знаєте.



Дослідіть вплив електромагнітного поля на організм людини.

§ 29. ПРИНЦИПИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ, ТЕЛЕБАЧЕННЯ ТА СТЬЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Радіозв'язок — передача та прийом інформації за допомогою радіохвиль, які поширюються в просторі без проводів.

Принцип радіозв'язку такий: змінний електричний струм високої частоти, створений у передавальній антені, спричиняє в навколишньому просторі швидко змінюване електромагнітне поле, що поширюється у вигляді електромагнітної хвилі. Досягаючи приймальної антени, електромагнітна хвиля спричиняє в ній змінний струм тієї самої частоти, на якій працює передавач.

Для здійснення радіотелефонного зв'язку потрібно використовувати високочастотні коливання, інтенсивно випромінювані антеною. Для передачі звуку ці високочастотні коливання змінюють за допомогою електричних коливань низької частоти (цей процес називають модуляцією).

У приймачі з модульованих коливань високої частоти виділяються низькочастотні коливання (цей процес називають детектуванням). Добутий у результаті детектування сигнал відповідає тому звуковому сигналу, який діяв на мікрофон передавача. Після підсилення коливання низької частоти можуть бути перетворені на звук.

Найпростіша система радіотелеграфного зв'язку, яку запропонували **Гульєльмо Марконі** (1874–1937) і **Олександр Попов** (1859–1905), широко застосовувалася понад 20 років. Полягала вона у відправці серій згасаючих електромагнітних коливань, добутих у коливальному контурі з іскровим розрядником. Цю систему істотно поліпшили після винайдення генератора незатухаючих електромагнітних коливань. Увімкнувши в коло генератора телеграфний ключ, можна було передавати сигнали з коротких і більш тривалих імпульсів електромагнітних хвиль.

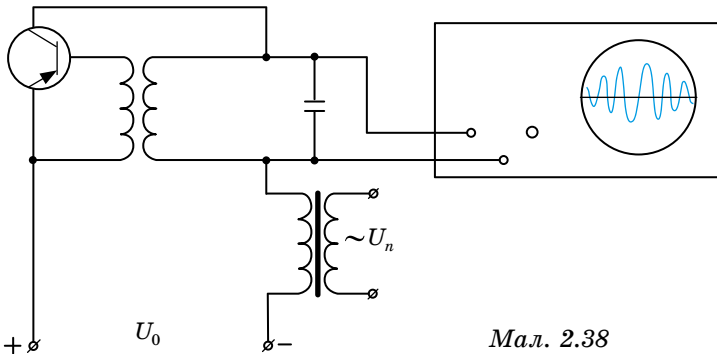
Здійснити передачу мови і музики, тобто радіотелефонний зв'язок, виявилось значно важче. Річ у тім, що коливання звукової частоти — це порівняно повільні коливання (від 100 Гц до кількох тисяч герц). А ми знаємо, що інтенсивність випромінювання електромагнітних хвиль низької частоти дуже мала. Виникає суперечність. З одного боку, високочастотні хвилі добре випромінюються, але не містять потрібної інформації (мова або музика) і в приймальній антені збуджують чисто гармонічні коливання, тобто дають інформацію лише про те, працює передавач чи ні. З іншого боку, електромагнітні коливання низької (звукової) частоти кола мікрофона містять потрібну інформацію, але дуже слабо випромінюються.

Ця суперечність була розв'язана так. Для передачі енергії електромагнітної хвилі використовують високочастотні коливання, а коливання низької частоти застосовують лише для зміни високочастотних коливань,

або, як прийнято говорити, для їх модуляції. На приймальній станції з цих складних коливань за допомогою спеціальних методів знову виділяють коливання низької частоти, які після підсилення подають на гучномовець. Цей процес виділення інформації з прийнятих модульованих коливань отримав назву демодуляції, або детектування коливань.

Модуляцію коливань можна здійснювати, змінюючи їхню амплітуду, частоту або фазу. Розглянемо найпоширеніший вид модуляції — амплітудну. Амплітуду коливань електромагнітної хвилі змінюють відповідно до низькочастотного (звукового) коливального процесу, який передається разом з електромагнітною хвилею.

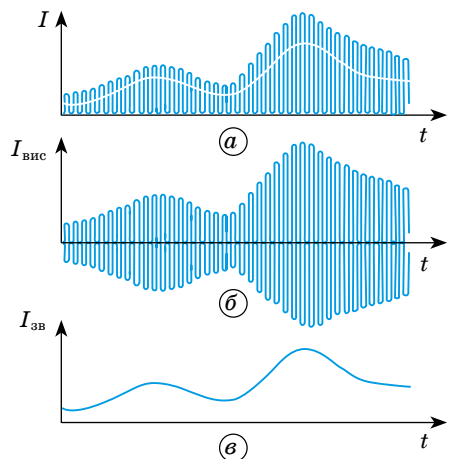
Для здійснення амплітудної модуляції електромагнітних коливань у радіотехніці опрацьовані різні способи. Одним з них є зміна напруги джерела енергії автогенератора. Для цього достатньо увімкнути послідовно з джерелом постійної напруги U_0 джерело, напруга якого U_n змінюється за певним законом (мал. 2.38).



Мал. 2.38

У місці приймання сигналів під впливом електромагнітної хвилі передавача в антені приймача збуджуються модульовані струми високої частоти, тожонні струмам в антені передавача, але слабші. Однак ці струми не придатні для безпосереднього одержання сигналу. Якщо, скажімо, під час радіотелефонної передачі ми направимо їх, навіть після попереднього підсилення, у гучномовець чи телефон, то не почуємо жодного звука. Це станеться, по-перше, тому, що телефонна мембрана має велику масу і не може здійснювати такі швидкі коливання з помітною амплітудою. По-друге, і це головне, коли б ми і скористалися малоінерційним телефоном (що можна зробити), то отримали б хвилі частотою 105–108 Гц, тоді як наше вухо розрізняє звуки лише за частоти, яка не перевищує 16 000–20 000 Гц.

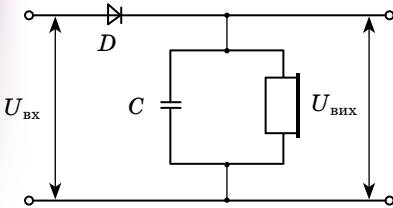
Тому з модульованих високочастотних коливань у приймачі потрібно виділити низькочастотні звукові коливання. Це роблять так. Модульовані коливання спочатку пропускають через вакуумний чи напівпровідниковий діод — випрямляють їх. Графік коливань сили струму в колі діода матиме вигляд, як на малюнку 2.39, а. Цей струм є сумою випрямлених струмів: високочастотного (мал. 2.39, б) і струму звукової частоти (мал. 2.39, в).



Мал. 2.39

Оскільки ці струми сильно відрізняються за частотою, їх можна легко відокремити один від одного. Для цього досить увімкнути в коло діода таке розгалуження, щоб одна гілка становила великий опір для високо-частотних струмів і малий для низькочастотних, а друга — навпаки, малий опір для високочастотних і великий для струмів звукової частоти. Таким розгалуженням є паралельне з'єднання конденсатора й навантаження (телефона) (мал. 2.40).

Струми високої частоти пройдуть переважно через конденсатор, а низької — через телефон. Отже, найпростіший демодулятор складається з діода, телефона і конденсатора. Мембрана телефона коливатиметься так само, як мембрана мікрофона, і ми почуємо звук, виголошений перед мікрофоном. Невеликі пульсації струмів високої частоти помітно не впливають на коливання мембрани і не сприймаються на слух.



Мал. 2.40

Процес модуляції полягає в зміні одного або кількох параметрів високочастотного (ВЧ) коливання за законом, переданого повідомлення (низькочастотного коливання).

На цьому ґрунтуються два різних види радіомовлення: передані з амплітудною модуляцією та передані із частотною модуляцією. У разі амплітудної модуляції змінюється амплітуда високочастотних коливань (ВЧ) відповідно до зміни сигналу, який модулюється. У разі частотної модуляції — частота ВЧ коливань.

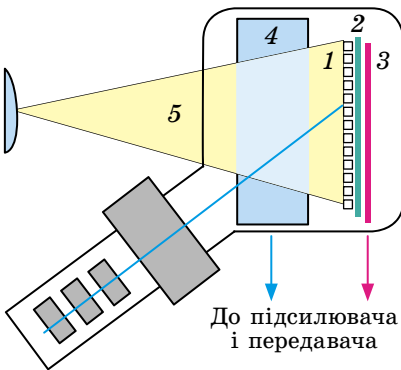
Детектування — процес виділення низькочастотних (звукових) коливань із прийнятих модульованих коливань високої частоти.

У найпростішому приймачі детектування здійснюється так: спочатку ВЧ коливання випрямляються, а потім виділяється низькочастотна обвідна високочастотних імпульсів.

Для телебачення, як і для радіозв'язку, також потрібні передавач і приймач, принцип дії яких найпростіший, як і радіопередавачів і приймачів, але замість мікрофона і гучномовця використовують **відеокамеру** і **відеомонітор**. У ХХ ст. ці пристрої були вакуумними (електронно-променевими), а зараз — напівпровідникові.

В **електронно-променевій відеокамері** (мал. 2.41) мозаїчний екран 1 утворений декількома мільйонами ізольованих одне від одного зерен срібла, покритих цезієм. Вони розміщуються на слюдяній пластинці 2, приклеєній до металевої пластинки 3. Падаюче на зерна світло 5 здатне «вибивати» з них електрони, які «стікають» по колектору 4.

Залежно від яскравості світла кожне зерно набуває більшого або меншого позитивного заряду. Заряди всіх зерен мозаїки «описують» зображення. Елементи зліва внизу відеокамери створюють **скануючий електронний промінь**. Послідовно попадаючи на зерна, промінь віддає свої електрони на місце вибитих світлом. Відбувається «перезарядка» — зерна змінюють заряди з «+» на «-». Зауважимо, що зерна разом з металевою пластинкою 3 утворюють велику кількість мікроскопічних конденсаторів. При їхній послідовній перезарядці в зовнішньому колі між металевою пластинкою 3 і колектором 4 виникає змінний струм — відеосигнал.



Мал. 2.41

В електронно-променевому відеомоніторі для перетворення відеосигналу в зображення також використовують електронний промінь. Його інтенсивність (потік електронів) змінюється відповідно до відеосигналу. Потрапляючи на мозаїчний екран, який складається із **зерен речовини люмінофора**, електрони спричиняють їхнє свічення. Воно продовжується деякий час, доки промінь «оббігає» інші зерна на екрані, що ми і сприймаємо як відеозображення.

У цих приладах електронні промені сканують екрани синхронно із частотою 25 Гц, тобто пробігають їх одночасно 25 разів за секунду (рядок за рядком, подібно до читання книжки). Це дає змогу передавати і приймати швидко змінюване зображення.

У напівпровідниковій відеокамері мозаїчний екран (матриця) утворений кількома мільонами «електронних карманів» у кремнієвій пластині *p*-типу, над якою розміщені керуючі електроди. Якщо на них подати позитивний заряд, то в кремнієвій пластині під електродом карман «відкривається», і в ньому накопичуються звільнені під дією світла електрони. Відповідно, дірки, утворені на місцях звільнення електронів, відтісняються електричним полем у товщину пластини. Кількість електронів, які накопичилися в кармані, залежить від яскравості падаючого на нього фрагмента зображення. Заряди всіх карманів у сукупності «описують» зображення.

Під дією керуючих сигналів особливого мікропроцесора здійснюється послідовне «зчитування» заряду карманів. Як показано на малюнку, у момент «захоплення» зображення заряд змінюється тільки на першому електроді. Потім цей заряд переключується на наступний електрод, і електрони переміщуються в сусідній карман.

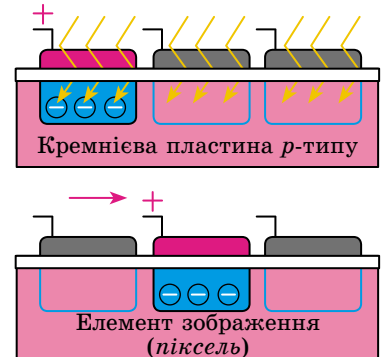
І так далі, до краю екрана, де розміщуються додаткові електроди, на які й «перетікає» відеосигнал.

У напівпровідниковому відеомоніторі (мал. 2.42) для перетворення відеосигналу в світлове зображення застосовують шар «рідких кристалів». Він розміщений між особливими напівпрозорими плівками з мозаїчною сіткою з керуючих електродів. Мікропроцесор по чергово розподіляє відеосигнал на всі елементи мозаїки. Електричні поля, що виникають між електродами, змушують кристали кожного фрагмента мозаїки по-різному повертатися в шарові рідини. Залежно від цього змінюється кількість світла, яке пропускається кожним елементом мозаїки. У результаті ми бачимо зображення, яке складається з окремих точок — пікселів.

До кінця ХХ ст. на заміну чорно-білому телебаченню прийшло кольорове. Його основні принципи залишилися попередніми: мозаїчний екран у передавачі і приймачі, послідовне сканування електронним променем або мікропроцесором елементів мозаїки для формування відеосигналу або світлового зображення, передача відеосигналу радіохвилями. Ускладнилася лише мозаїка екранів: кожний її елемент було замінено на червоно-зелено-синю тріаду елементів, здатну передавати всі відтінки кольорів.

З розвитком системи радіотелефонного зв'язку виникла проблема — обмеженість частотного ресурсу. Тобто телефони з близькими робочими каналами стали створювати перешкоди один одному.

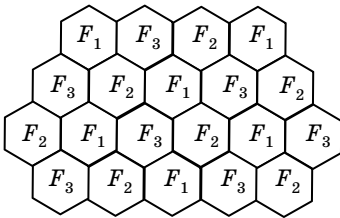
У середині 1940-х років дослідний центр Bell Laboratories запропонував ідею розбиття всієї обслуговуючої території на невеликі ділянки, які стали називатися стільниками (від англ. *cell* — «комірка», «стільник») (мал. 2.43).



Мал. 2.42

Кожний стільник повинен обслуговуватися передавачем з обмеженим радіусом дії і фіксованою частотою. Це дало б змогу без взаємних перешкод використовувати ту саму частоту повторно в іншому стільнику.

Для оптимального розділення території на стільники можуть бути використані тільки три геометричні фігури: трикутник, квадрат і шестикутник. Найбільше підходить у цьому випадку шестикутник, тому що якщо антену з круговою діаграмою направленості встановити в його центрі, то буде забезпечено доступ майже до всього стільника.



Мал. 2.43

Кожний стільник, якому виділяється своя смуга частот, обслуговується базовою станцією, яка складається з передавача, приймача і модуля управління. Суміжні стільники використовують різні частоти, щоб уникнути інтерференції або перехресних перешкод. У той самий час стільники, що розміщені на великій відстані один від одного, можуть використовувати однакові смуги частот. Отже, основний принцип стільникового зв'язку — повторне використання частот у несуміжних стільниках.

Коли телефон перебуває в режимі очікування, його прийомне налаштування постійно сканує всі канали системи. Для виклику абонента всіма базовими станціями передається сигнал виклику. Стільниковий телефон абонента, який здійснює виклик, при отриманні цього сигналу відповідає по вільному

каналу управління. Базові станції, що прийняли сигнал відповіді, передають інформацію про його параметри в центр комутації, який переключаче розмову на ту базову станцію, де зафіксовано максимальний рівень сигналу стільникового радіотелефона абонента, що здійснює виклик.

Під час набору номера стільниковий телефон займає один з вільних каналів, рівень сигналу базової станції у якому на цей момент максимальний. З віддаленням абонента від базової станції або у зв'язку з погіршенням умов поширення радіохвиль рівень сигналу зменшується, що веде до погіршення якості зв'язку. Поліпшення якості зв'язку досягається шляхом автоматичного переключення абонента на інший канал зв'язку.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Поясніть, як здійснюється радіозв'язок.
2. Які принципи роботи телебачення?
3. Як здійснюється стільниковий зв'язок?



Дослідіть, як працює супутникове та кабельне телебачення.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Коливальний контур, що складається з повітряного конденсатора з двома пластинами по 200 см^2 кожна і котушки індуктивністю 10^{-6} Гн , резонує на довжині хвилі 40 м . Визначте відстань між пластинами конденсатора.

Розв'язання

Скориставшись формулою ємності плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$,

визначимо $d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C}$. Невідому ємність C визначимо з формули Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$, де T виразимо через довжину хвилі λ і швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі c : $T = \frac{\lambda}{c}$.

Врахувавши попередні співвідношення, отримаємо

$$d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C} = \frac{4\pi^2 \varepsilon\varepsilon_0 L S}{T^2} = \frac{4\pi^2 \varepsilon\varepsilon_0 L S c^2}{\lambda^2}.$$

Підставляючи значення відомих фізичних величин, маємо $d = 4 \cdot 10^{-4}$ м.

2. Різниця потенціалів на обкладках конденсатора в коливальному контурі змінюється за законом $u = 80 \cos 10^4 \pi t$, В. Ємність конденсатора дорівнює 10^{-8} Ф. Визначте період коливань контуру, індуктивність контуру, довжину хвилі, що відповідає цьому контуру.

Розв'язання

У загальному вигляді закон зміни різниці потенціалів на обкладках конденсатора можна записати так: $u = U_{max} \cos \omega t$. За умовою задачі маємо $\omega = 10^4 \pi$. Тоді $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{10^4 \pi}$; $T = 2 \cdot 10^{-4}$ с. Індуктивність визначимо з формули Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$, $L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}$; $L = 0,1$ Гн.

А довжину хвилі, що відповідає цьому контуру, визначимо із співвідношення $\lambda = cT$, $\lambda = 6 \cdot 10^4$ м.

3. Напруга на кінцях ділянки кола, по якому проходить змінний струм, змінюється із часом за законом $u = U_{max} \cos \omega t$, В. У момент часу $t = \frac{T}{6}$ напруга дорівнює 10 В. Визначте амплітуду напруги та циклічну частоту, якщо період коливань становить 0,01 с.

Розв'язання

Циклічна частота визначається за формулою $\omega = \frac{2\pi}{T}$, тому $\omega = 628$ с⁻¹.

Миттєве значення напруги в момент $t = \frac{T}{6}$ можна визначити так:

$$u = U_{max} \cos \frac{2\pi T}{T} \frac{1}{6} = U_{max} \cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} U_{max}.$$

Звідси $U_{max} = 2U$. Отже, $U_{max} = 20$ В.

4. Що трапиться, коли вийняти осердя та увімкнути обмотку трансформатора в мережу з напругою, на яку він розрахований?

Відповідь: У цьому випадку згорить первинна обмотка.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

2.39. Коливальний контур містить конденсатор ємністю 800 пФ і котушку індуктивністю 2 мкГн. Який період власних коливань контуру?

2.40. Коливальний контур складається з лейденських банок загальною електроємністю $6 \cdot 10^{-3}$ мкФ та котушки індуктивністю 11 мкГн. Визначте частоту електромагнітних коливань у контурі.

2.41. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом $q = 2 \sin 2 \cdot 10^9 \omega t$, мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?

2.42. Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом $i = 0,25 \sin 10^5 \omega t$, А. Визначте амплітудне значення сили струму та період електромагнітних коливань у контурі.

2.43. Як зміниться період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність котушки зменшити у 2 рази і в стільки само разів збільшити ємність контуру?

2.44. Чому для зв'язку з космічними станціями використовують ультракороткохвильове (УКХ) радіовипромінювання?

2.45. Генератор УВЧ працює на частоті 150 МГц. Яка довжина хвилі електромагнітного випромінювання?

2.46. На якій частоті судна передають сигнал біді, коли за міжнародною угодою радіохвиля повинна мати довжину 600 м?

2.47. Ємність коливального контуру радіоприймача 20 пФ, а індуктивність його котушки 350 нГн. На яку довжину хвилі налаштовано радіоприймач?

2.48. Визначте період та частоту змінного струму, кутова частота якого дорівнює 100 л Гц.

2.49. ЕРС генератора змінного струму змінюється за законом $\mathcal{E} = 310 \sin 100\pi t$, В. Визначте амплітуду ЕРС, частоту та період її зміни, а також ЕРС у момент часу 0,035 с.

2.50. Сила струму на ділянці кола змінюється за законом $i = 10 \sin 400\omega t$, А. Визначте амплітудне значення сили струму, період і частоту зміни сили струму, а також силу струму в момент часу 1,25 мс.

2.51. Чим знижувальний трансформатор відрізняється від підвищувального? Чи можна знижувальний трансформатор використати як підвищувальний?

2.52. Трансформатор у режимі холостого ходу споживає з електромережі потужність, хоч і досить малу. На що вона витрачається?

2.53. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга на ній дорівнює 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?

2.54. Первинна обмотка ненавантаженого трансформатора перебуває під напругою 220 В. Напруга на вторинній обмотці, що має 450 витків, становить 660 В. Який коефіцієнт трансформації в цьому випадку? Яка кількість витків у первинній обмотці?

2.55. По лінії електропередач передається потужність 15 кВт. Сила струму в лінії 10 А, а втрати потужності на нагрівання проводів становлять 2 %. Який опір проводів лінії?

2.56. Втрати потужності у двопровідній лінії опором 2 Ом становлять 2 %. У лінію передається потужність 2,5 кВт. Які втрати напруги на провадах лінії?

2.57. Від трансформаторної підстанції передається потужність 5 кВт. Сила струму в лінії електропередач при цьому становить 25 А. Який ККД лінії електропередач, якщо її опір 0,5 Ом?

Рівень Б

2.58. Увімкнений у коливальний контур повітряний конденсатор заповнений парафіном, діелектрична проникність якого дорівнює 2. У скільки разів змінилася частота вільних електромагнітних коливань у контурі?

2.59. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшити в 10 разів, а індуктивність котушки зменшити в 5 разів?

2.60. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10 мГн і плоского конденсатора з обкладками площею 5 см^2 кожна, розділених парафіновим папером завтовшки 100 мкм. Яка частота вільних електромагнітних коливань у контурі? Діелектрична проникність парафінового паперу дорівнює 2,2.

2.61. Напряга на конденсаторі коливального контуру під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $u = 50 \cos 10^3 \omega t$, В. Ємність конденсатора 1 мкФ. Яке амплітудне значення заряду конденсатора? Який період коливань у контурі? Яка індуктивність котушки?

2.62. Сила струму в коливальному контурі під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $i = 0,2 \sin 10^3 \omega t$, А. Індуктивність котушки 0,15 Гн. Визначте період коливань у контурі, ємність конденсатора та амплітудне значення напруги на конденсаторі.

2.63. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму — 40 мА. Визначте енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму в 2 рази менше, ніж амплітудне значення.

2.64. Чому електромережа змінного струму практично не випромінює електромагнітних хвиль (випромінювання можна вловити лише безпосередньо біля проводів мережі)?

2.65. Котушка коливального контуру радіоприймача має індуктивність 200 мкГн. Приймач налаштований на хвилю завдовжки 250 м. Яка ємність конденсатора коливального контуру радіоприймача?

2.66. Коливальний контур радіоприймача настроєний на довжину хвилі 300 м. Яка індуктивність коливального контуру, якщо його ємність 500 пФ?

2.67. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні дротяної рамки в однорідному магнітному колі є синусоїда. Як зміниться вигляд графіка, якщо частота обертання рамки збільшиться вдвічі?

2.68. Електроплитку можна живити як змінним, так і постійним струмом. Чи однаково розжарюється спіраль плитки, якщо в обох випадках вольтметри показали однакові напруги?

2.69. Визначте значення ЕРС, яка індукується в рамці площею 100 см^2 , що обертається із частотою 50 Гц у магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. Запишіть закон зміни ЕРС, що індукується в рамці, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до ліній індукції магнітного поля.

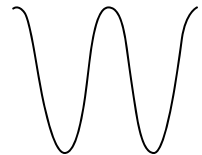
2.70. Скільки витків має рамка площею 500 см^2 , якщо під час обертання її із частотою 1200 об/хв у магнітному полі з індуктивністю 100 мТл у ній індукується ЕРС, амплітудне значення якої дорівнює 63 В. Запишіть закон зміни ЕРС, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до ліній індукції.

2.71. На малюнку 2.44 показано графік змінного струму частотою 1 кГц. Яка частота розгортки графіка?

2.72. Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$, Вб. У якому положенні була рамка в початковий момент часу? Який вигляд має залежність ЕРС індукції від часу? Яка частота обертання рамки? Визначте максимальні значення ЕРС та магнітного потоку.

2.73. З якою метою у трансформаторах котушки первинної і вторинної обмоток одягають на замкнене феромагнітне осердя?

2.74. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 8 увімкнуто в мережу з напругою 220 В. Опір вторин-



Мал. 2.44

ної обмотки 2 Ом, а сила струму в ній 2 А. Визначте ЕРС, індуковану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.

2.75. Підвищувальний трансформатор має коефіцієнт трансформації 0,5. Навантаження споживає потужність 190 Вт при силі струму 0,44 А. Опір вторинної обмотки дорівнює 30 Ом. Яка напруга підведена до первинної обмотки, якщо її опір досить малий? Яку потужність споживає трансформатор?

2.76. Теплова електростанція на виробництво електроенергії 1 кВт/год витрачає умовне паливо масою 320 г. Який ККД електростанції? Питома теплота згоряння умовного палива 29 МДж/кг.

2.77. Електростанція передає потужність 2 ГВт під напругою 500 кВ. Визначте опір лінії електропередачі, якщо її ККД 96 %.

2.78. Місцева електростанція передає в лінію потужність 500 кВт. Які втрати потужності в лінії і який її ККД, якщо вона працює під напругою 20 кВ, а її опір 20 Ом?

Є над чим замислитися

2.79. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 1 мГн, повітряного конденсатора, що має дві обкладки у вигляді дисків діаметром 20 см, кожна розміщена на відстані 1 см одна від одної. Визначте період вільних електромагнітних коливань у контурі. Якою буде сила струму в котушці в момент, коли енергія її магнітного поля становитиме 75 % від максимальної енергії електричного поля конденсатора за умови, що амплітудне значення напруги в контурі 10 В?

2.80. Напруга на електроплитці опором 60 Ом змінюється за законом $u = 308 \cos 100\pi t$, В. За яким законом змінюється сила струму, що проходить через плитку? За який інтервал часу воду об'ємом 2 л можна нагріти на цій плитці від 20 до 100 °С, якщо ККД плитки 40 %?

2.81. Струм у колі змінюється із часом за законом $i = I_{max} \sin(\omega t - \pi/3)$, А. Визначте циклічну частоту і амплітуду сили струму, якщо період змінного струму 0,02 с. Відомо, що через час 5 мс від початку коливань сила струму в колі була 0,25 А.

2.82. Трансформатор живиться від мережі з напругою 380 В. Первинна обмотка трансформатора має 1320 витків. Вторинна обмотка опором 0,2 Ом навантажена опором 3,6 Ом, який споживає потужність 360 Вт. Яка ЕРС індукується у вторинній обмотці? Яка сила струму в первинній обмотці? Який ККД трансформатора?

2.83. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється за законом $i = 200 \cos 5 \cdot 10^9 \pi t$, мА. Ємність конденсатора контуру 100 пФ. Яка довжина хвилі електромагнітного випромінювання контуру? Яка індуктивність котушки, увімкненої в контур?

§ 30. РОЗВИТОК ПОГЛЯДІВ НА ПРИРОДУ СВІТЛА. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕОРІЯ СВІТЛА

Світло відіграє надзвичайно важливу роль у нашому житті. Так, до 80 % інформації про навколишній світ людина одержує за допомогою зору.

Оптика — розділ фізики, що вивчає явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль видимого діапазону та їхню взаємодію з речовиною. Останнім часом до об'єктів вивчення оптики також належать електромагнітні хвилі інфрачервоного та ультрафіолетового діапазонів.

Перші уявлення про природу світла виникли ще в Давній Греції та Єгипті. Серед безлічі теорій того часу були і зовсім примітивні, і дуже близькі до сучасних. Наприклад, деякі вчені того часу вважали, що з очей виходять тонкі шупальця, які осягають предмети, унаслідок чого й вини-

кають зорові відчуття. Близькою до сучасних можна вважати теорію Демокріта, який уявляв світло як потік частинок, що мають певні фізичні властивості, за винятком кольору, відчуття якого є наслідком входу світла в око.

Наприкінці XVII ст. майже одночасно виникли *корпускулярна теорія* Ісаака Ньютона і *хвильова теорія* нідерландського фізика Крістіана Гюйгенса.

Згідно з корпускулярною теорією Ньютона світло — це потік частинок (корпускул), що випускаються світними тілами, причому рух світлових корпускул підпорядковується законам механіки. Так, відбивання світла Ньютон пояснював пружним відбиванням корпускул від поверхні, на яку падає світло. А заломлення світла — зміною швидкості корпускул унаслідок їх притягування до частинок заломлюючого середовища. Ця теорія приводила до хибного висновку, що швидкість поширення світла в середовищах є більшою, ніж у вакуумі. До того ж ця теорія не могла пояснити, чому світлові пучки, перетинаючись у просторі, не впливають один на одного.

Однак експериментальні дослідження світла, які виконав Ньютон, аж до XIX ст. залишалися настільки унікальними, що його монографія «Оптика» (1704 р.) була основним джерелом для написання всіх підручників того часу. Ньютону належить теорія кольору, відповідно до якої біле світло є сумішшю всіх кольорів, а предмети здаються кольоровими, оскільки відбивають одні складові білого кольору інтенсивніше, ніж інші.

«Трактат про світло» Гюйгенса (1690 р.) увійшов в історію науки як перша наукова праця з хвильової оптики.

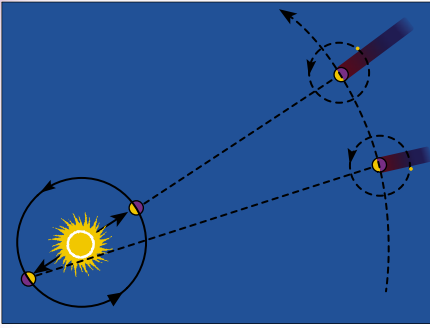
Згідно з хвильовою теорією Гюйгенса світло — це хвилі, що поширюються у світовому ефірі — гіпотетичному пружному середовищі, яке заповнює весь світовий простір, а також проміжки між дрібними частинками тіл. Вважаючи світло поздовжньою механічною хвилею, Гюйгенс обґрунтував явища відбивання і заломлення світла, принцип незалежності світлових променів, частково розглянув питання кольору. Вчений сформулював принцип поширення світлової хвилі, відомий сьогодні як принцип Гюйгенса. Він полягає в тому, що кожна точка середовища, до якої дійшли коливання, сама стає джерелом вторинних хвиль.

Сукупність усіх точок простору, яких досягає світлова хвиля в певний момент часу, називають **хвильовою поверхнею** (хвильовим фронтом). Промені, що задають напрямок поширення хвилі, перпендикулярні до хвильової поверхні. Знаючи положення хвильової поверхні в момент часу і, користуючись принципом Гюйгенса, можна знайти її положення в наступний момент часу.

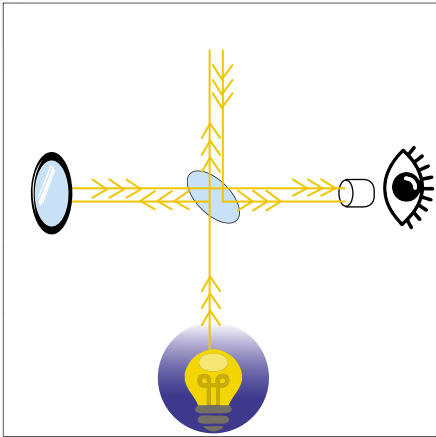
Хвильову теорію світла підтримали видатні вчені: М. В. Ломоносов і Л. Ейлер, однак, незважаючи на це, до кінця XVIII ст. загально визнаною залишалася корпускулярна теорія Ньютона. Так тривало до початку XIX ст., поки не з'явилися роботи англійського фізика **Томаса Юнга** (1773–1829) і французького фізика **Огюстена Жана Френеля** (1788–1827). Учені, досліджуючи світло, спостерігали явища, характерні лише для хвиль: явище огинання світлом перешкоди (дифракція) та явище посилення та послаблення світла при накладанні світлових пучків (інтерференція). З того часу в науці стала переважати хвильова теорія Гюйгенса.

Важливу роль у з'ясуванні природи світла відіграло дослідне визначення швидкості його поширення.

Першим швидкість поширення світла зміг виміряти данський астроном **Олаф Ремер** (1644–1710) у 1676 р. Спостерігаючи за супутником Юпітера Іо, астроном помітив, що супутник входить у тінь Юпітера через кожні 42 год 28 хв (мал. 2.45). Але протягом півроку, коли Земля, обертаючись навколо Сонця, віддалялася від Юпітера, затемнення супутника відбувалося з дедалі більшим запізненням. Ремер дійшов висновку, що



Мал. 2.45



Мал. 2.46

таке запізнення пояснюється збільшенням відстані, яку долає світло, поширюючись від супутника до Землі. Знаючи діаметр орбіти Землі та час запізнення, учений визначив швидкість поширення світла.

Швидкість поширення світла вимірювали і в межах земної поверхні. Щоб з'ясувати ідею подібних вимірювань, розглянемо метод, який застосував американський учений **Альберт Майкельсон** (1852–1931).

Для проведення дослідів фізик вибрав дві гірські вершини в Каліфорнії, відстань між якими ретельно виміряли. На вершині гори Маунт-Вільсон було встановлено джерело світла, від якого світло падало на оптичну систему із дзеркальними гранями (мал. 2.46). Відбившись від грані, світло потрапляло на систему дзеркал, розташовану на горі Сан-Антоніо, поверталось до призми й, відбившись від її іншої грані, потрапляло в зорову трубу. Коли за допомогою двигуна дзеркальній призмі надавали обертального руху, зображення джерела світла в зоровій трубці зникало й знову з'являлося за певної швидкості обертання призми.

Зрозуміло, що таке могло відбутися тільки за умови, що за час проходження світла до дзеркала й назад призма поверталася на $1/8$ оберту. Знаючи кількість

обертів призми за секунду та відстань між вершинами, Майкельсон визначив, що швидкість поширення світла дорівнює $(299\,796 + 4)$ км/с.

За допомогою сучасної лазерної техніки швидкість поширення світла у вакуумі визначена з точністю до 1,2 м/с: $c = 299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с.

У 60-х роках XIX ст. Дж. Максвелл створив теорію електромагнітного поля, одним з наслідків якої було встановлення можливості існування електромагнітних хвиль. За розрахунками, швидкість поширення електромагнітних хвиль дорівнювала швидкості поширення світла. На основі своїх теоретичних досліджень Максвелл дійшов висновку, що світло — це окремий випадок електромагнітних хвиль. Після дослідів Герца жодних сумнівів щодо електромагнітної природи світла не залишилось.

Електромагнітна теорія світла дала змогу пояснити багато оптичних явищ. Однак уже на початку XX ст. з'ясувалося, що цієї теорії недостатньо для пояснення явищ, які виникають під час взаємодії світла з речовиною. До них, насамперед, належать процеси поглинання й випромінювання світла, явище фотоелектричного ефекту тощо. Ці явища можна пояснити тільки з позицій квантової теорії світла, згідно з якою світло випромінюється, поширюється та поглинається речовиною не безперервно, а скінченними порціями — квантами. Кожний окремий квант світла має властивості частинки, а сукупність квантів поводить себе подібно до хвилі. Така двоїста природа світла (та й будь-якої частинки) отримала назву **корпускулярно-хвильовий дуалізм**. У сучасній фізиці квантові уявлення не суперечать хвильовим, а поєднуються на основі квантової механіки й квантової електродинаміки.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що являє собою світло відповідно до гіпотези Демокріта?
2. Хто є засновником корпускулярної теорії світла? Які її основні положення?
3. Які оптичні явища не можна було описати в межах корпускулярної теорії світла?
4. Хто є засновником хвильової теорії світла? Які її основні положення? Які недоліки?
5. Чому у встановленні природи світла значну роль відіграло визначення швидкості поширення світла? Як її було визначено?
6. Що пояснює електромагнітна теорія світла?
7. У чому сутність корпускулярно-хвильового дуалізму?

§ 31. ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. ЕФЕКТ ДОПЛЕРА

Досі ми розглядали поширення світла в якомусь одному середовищі (звичай — у повітрі). Проте світло може переходити з одного середовища в інше: сонячне світло зараз доходить до нас через віконне скло, освітлює дно неглибоких водоймищ. Виявляється, що такі переходи світла спричиняють багато цікавих явищ.

Що ж відбувається, коли світловий промінь падає під певним кутом на межу поділу двох прозорих середовищ? Такий промінь «ділиться» на два: перший (відбитий) промінь повертається до першого середовища, а другий переходить через межу та потрапляє до іншого середовища. При цьому цей промінь змінює напрямок поширення. Тому його називають заломленим, а явище — заломленням.

Спочатку з'ясуємо, що таке різні середовища для світла. Сьогодні відомо, що головна відмінність між двома оптичними середовищами — це різні швидкості поширення світла. Найбільшу швидкість світло має у вакуумі (тобто у просторі, де практично немає частинок речовини). Ця швидкість дорівнює приблизно 300 000 км/с. Розігнатися до такої швидкості не може жодне фізичне тіло! А в прозорій речовині швидкість світла завжди менша, ніж у вакуумі.

Швидкість поширення світла різна в різних середовищах. Унаслідок цього промінь змінює свій напрямок коли переходить із одного середовища в інше. Наприклад, у воді швидкість поширення світла в 1,33 раза менша, ніж у вакуумі, а у склі — \approx у 1,6 раза. Часто вживають термін «оптична густина середовища». Що менша швидкість поширення світла в даному середовищі, то більша його оптична густина.

Повітря має більшу оптичну густину, ніж вакуум, оскільки в повітрі швидкість поширення світла дещо менша, ніж у вакуумі. Оптична густина води менша, ніж оптична густина алмазу, оскільки швидкість світла у воді більша, ніж в алмазі.

Що більше відрізняються оптичні густини двох середовищ, то більше заломлюється світло на межі їхнього поділу. Інакше кажучи, що більше змінюється швидкість поширення світла на межі поділу двох середовищ, то сильніше воно заломлюється.

Якщо джерело світла і спостерігач рухаються одне відносно одного, частота світла, що сприймає спостерігач, не збігається із частотою джерела світла. Це явище має назву **ефект Доплера**.

Світлові хвилі поширюються в однорідному середовищі зі сталою швидкістю, яка залежить тільки від властивостей середовища. Проте довжина хвилі і частота світла можуть істотно змінюватися під час руху джерела світла і спостерігача.

Нехай частота коливань світла ν_0 , його швидкість поширення v , отже $\lambda = \frac{v}{\nu_0}$.

Якщо приймач рухається зі швидкістю v' до джерела світла, тоді швидкість поширення світла відносно приймача $u = v + v'$, а оскільки довжина світлової хвилі є сталою, то за одиницю часу до рухомого приймача прийде більша кількість хвиль, ніж до нерухомого, тому:

$$\nu' = \frac{v + v'}{\lambda} = \nu_0 \frac{v + v'}{v} = \nu_0 \left(1 + \frac{v'}{v} \right).$$

Звідки видно, що частота сприйнятих коливань буде більшою, ніж випромінювана джерелом.

Якщо приймач рухається зі швидкістю v' від джерела світла, то, аналогічно міркуючи, одержимо $\nu' = \nu_0 \left(1 - \frac{v'}{v} \right)$, тобто в цьому випадку приймач реєструє меншу частоту, ніж випромінює джерело.

Розглянемо випадок, коли джерело світла рухається відносно середовища зі швидкістю u , а приймач — нерухомий.

Якщо джерело світла наближається до приймача, то за період коливань хвиля поширюється на відстань νT , а джерело світла за цей час переміститься на відстань uT . При цьому довжина хвилі $\lambda' = \nu T - uT = (v - u)T$,

тому приймач реєструє частоту: $\nu' = \frac{\nu}{\lambda'} = \frac{\nu}{(v - u)T} = \nu_0 \frac{1}{1 - \frac{u}{v}}$, більшу за час-

тоту випромінювання.

Коли джерело світла віддаляється від приймача, то частота зменшується: $\nu' = \nu_0 \frac{1}{1 + \frac{u}{v}}$. Під час одночасного руху джерела та приймача можна

використовувати зведену формулу: $\nu' = \nu_0 \frac{1 \pm \frac{v'}{v}}{1 \mp \frac{u}{v}} = \nu_0 \frac{v \pm v'}{v \mp u}$.

Якщо приймач чи джерело світла рухаються не вздовж прямої, що сполучає їх, то ефект Доплера визначається проєкціями швидкостей руху на напрямок цієї прямої.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Ефект Доплера використовують в радіолокації для розпізнавання рухомих об'єктів (літаків, на фоні нерухомих (гір, хмар)). За червоним зміщенням світла від астрономічних об'єктів, вимірюється їхня швидкість і розраховується відстань до них. Поліція використовує ефект Доплера для визначення швидкості автомобілів шляхом випромінювання довжини хвилі відбитого від них радіосигналу.
- Ефект Доплера широко використовують в медицині. На базі ефекту створено комп'ютерні комплекси ультразвукової доплерографії. Зміна характеристик ультразвуку при проходженні через судини дає змогу визначити стан кровообігу в поверхневих і внутрішніх судинах.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як поширюється світло в різних середовищах?
2. У чому полягає ефект Доплера?

§ 32. ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

Явище розкладання білого світла на спектр за допомогою призми було відоме досить давно, але пояснити це явище зміг лише Ньютон. Учених, які займалися оптикою, цікавила природа світла. Ньютон же, вивчаючи явище розкладання білого світла на спектр, дійшов висновку, що біле світло є складним, тобто складається із суми простих кольорових променів.

Ньютон працював з простою установкою. На малюнку 2.47 показано дослід Ньютона із встановлення явища дисперсії світла (1754). У вікні затемненої кімнати було зроблено маленький отвір, через який проходив вузький пучок сонячного світла. На шляху сонячного світла стояла призма, а за призмою — екран. На ньому спостерігали спектр, тобто видовжене зображення круглого отвору, нібито складене з багатьох кольорових кружечків. При цьому найбільше відхилення мали фіолетові промені — один кінець спектра і найменше відхилення — червоні — другий кінець спектра.



Мал. 2.47

Але цей дослід ще не був переконливим доведенням того, що біле світло складне й існують прості промені. Хоча він і давав змогу дійти висновку, що, проходячи через призму, біле світло не розкладається на прості промені, а змінюється, як вважало багато дослідників до Ньютона.

Для того щоб довести, що біле світло складається із простих кольорових променів і розкладається на них при проходженні через призму, Ньютон провів інший дослід. В екрані, на якому спостерігався спектр, також було зроблено маленький отвір, через який пропускали вже світло, що мало певний колір (так званий монохроматичний пучок світла). На шляху цього пучка Ньютон ставив нову призму, а за нею новий екран. *Що спостерігалося на цьому новому екрані?* Дослід показав, що цей пучок світла відхилявся призмою як єдине ціле під визначеним кутом. Повертаючи першу призму, Ньютон пропускав через отвір екрана кольорові промені різних ділянок спектра.

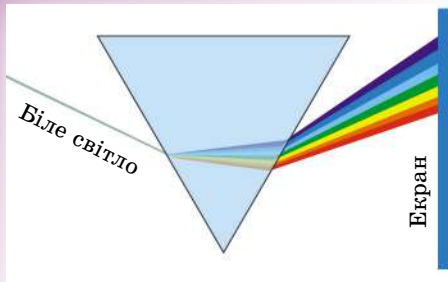
В усіх випадках вони не розкладалися другою призмою, а лише відхилялися на визначений кут, різний для променів різного кольору.

Отже, фізик дійшов висновку, що біле світло розкладається на кольорові промені, які є простими і не розкладається призмою. Для кожного кольору показник заломлення має своє значення.

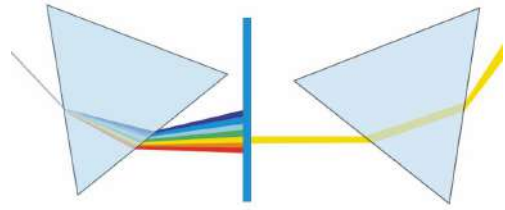
Таким чином, прості промені є незмінними. Вони являють собою ніби атоми світла, подібно до атомів речовини. Цей висновок узгоджувався з корпускулярною теорією світла. Дійсно, незмінні атоми світла, прості промені, є потоком і однорідних частинок, які, потрапляючи у наше око, формують відчуття певного кольору. Суміш з різнорідних світлових частинок є білим світлом. Проходячи через призму біле світло розкладається. Призма сортує світлові частинки, відхиляючи їх на різний кут відповідно до їхньої колірності.

З точки зору хвильової теорії на той час було складно пояснити відкриття Ньютона, тому що теорія поширення хвиль ще не була розроблена. Розуміння того, що колір визначається періодом світлової хвилі, прийшло набагато пізніше.

Якщо уважно придивитися до проходження світла через трикутну



Мал. 2.48



Мал. 2.49

призму, то можна побачити, що розкладання білого світла починається відразу ж, як тільки світло переходить з повітря в скло (мал. 2.48).

Середовища, у яких спостерігається явище дисперсії, називають диспергуючими.

Якщо на шляху будь-якого кольорового пучка, що виходить з призми, поставити ще одну призму, то він пройде через призму без зміни, не розкладаючись (мал. 2.49).

Про що свідчить явище дисперсії? 1) Біле світло є складним, про це свідчить і явище дифракції. Під час вивчення явища дифракції було встановлено, що довжини хвиль і їхні частоти різні для кожного кольору.

2) Швидкості хвиль, з яких складається біле світло, різні. Дійсно, з досліду випливає, що для показників заломлення справджується нерівність: $n_{\text{ч}} < n_{\text{о}} < n_{\text{ж}} < n_{\text{з}} < n_{\text{б}} < n_{\text{с}} < n_{\text{ф}}$.

Але показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в повітрі до швидкості світла у склі. Тому показники заломлення кольорових променів можна записати через їхні швидкості: $n_{\text{ч}} = \frac{c}{v_{\text{ч}}}$; ... ; $n_{\text{ф}} = \frac{c}{v_{\text{ф}}}$.

Підставивши знайдені значення показників заломлення в попередню нерівність, отримаємо $v_{\text{ч}} > v_{\text{о}} > \dots > v_{\text{ф}}$.

Отже, з явища дисперсії випливає, що хвилі, які входять до складу білого світла, у речовині поширюються з різними швидкостями: з найбільшою швидкістю поширюються хвилі, які ми сприймаємо як червоне світло, і з найменшою — хвилі, які ми сприймаємо як фіолетове світло.

Проте наше сприйняття кольору залежить від довжини хвилі, а отже, і від частоти коливань. Таким чином, швидкість поширення світлових хвиль залежить від їхньої частоти.

Об'єднуючи сказане про дисперсію світла, можна дати таке визначення:

дисперсією хвиль називають залежність їхньої швидкості від частоти.

Залежність фазової швидкості хвиль від їхньої частоти виявляється в тому, що показник заломлення хвиль також залежить від частоти. А це, у свою чергу, свідчить про те, що на межі з диспергуючим середовищем біле світло розкладається на його складові хвилі.

А чи залежить швидкість світла у вакуумі від частоти коливань?

Уявімо, що у вакуумі на значній відстані від нас розміщено потужне джерело світла, яке періодично закривається непрозорою ширмою, і відкривається. Якщо всі світлові хвилі незалежно від частоти коливань поширюються у вакуумі з однаковою швидкістю, то ми маємо побачити, що світло, яке випромінюється далеким джерелом, миготить, але його

колір не змінюється. Якщо світлові хвилі різної частоти у вакуумі поширюються з різними швидкостями, то колір джерела має змінюватися.

Розглянемо це докладніше. Припустимо, що у вакуумі з найбільшою швидкістю поширюються хвилі червоного світла, а з найменшою — хвилі фіолетового світла. У такому разі після того, як ширма відкріє джерело світла, до нас першими дійдуть хвилі червоного світла і ми побачимо джерело червоним. Потім, у міру того як наших очей досягатимуть хвилі інших частот, забарвлення джерела змінюватиметься і, нарешті, стане таким, яким воно є насправді. Після того як ширма закриє джерело світла, до нас першими перестануть доходити хвилі червоного світла, а потім фіолетового. Отже, колір джерела змінюватиметься від дійсного до фіолетового, після чого джерела не буде видно.

За невеликої різниці у швидкостях поширення хвиль описаний ефект, якщо він відбувається, може бути помітний тільки тоді, коли дуже велика відстань між джерелом і спостерігачем. Тому в лабораторних умовах здійснити описаний вище дослід не можливо, оскільки всі земні відстані для нього малі. Проте можна скористатися астрономічними спостереженнями за подвійними зорями. *Подвійна зоря* — це дві зорі, що обертаються навколо їхнього загального центра мас. Кожна з них періодично затуляє від спостерігача світло від іншої зорі. Проте в телескоп зміни кольору цих зір не спостерігається. Якби швидкість поширення світла у вакуумі залежала від частоти, то після виходу зорі з тіні повинен був би змінюватися її колір.

Отже, у вакуумі швидкість поширення світлових хвиль не залежить від частоти коливань.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як можна спостерігати явище дисперсії світла?
2. Що таке дисперсія?
3. Про що свідчить дослід Ньютона з трикутною призмою?
4. Яке середовище називають диспергуючим?
5. Чи спостерігається дисперсія світла при проходженні через вакуум?

125

§ 33. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

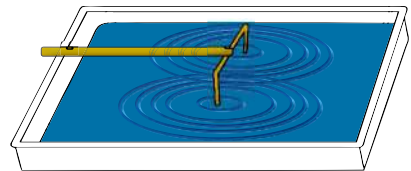
Ми розглядали одну хвилю, що поширюється від джерела. Але дуже часто в середовищі одночасно поширюється кілька різних хвиль. *Що ж відбувається в місцях, де хвилі накладаються одна на одну?*

Якщо дві хвилі на воді зустрічаються в одному місці гребенями, то в цьому місці збурення води посилюється. Якщо, навпаки, гребінь однієї хвилі зустрічається із западиною іншої, то поверхня води не збурюється.

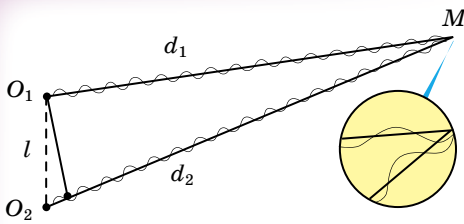
У кожній точці середовища коливання, спричинені двома хвилями, додаються. Результуюче зміщення будь-якої частинки середовища — це сума зміщень, які б створювала кожна з хвиль, поширюючись без іншої.

Додавання у просторі двох (або кількох) хвиль, коли відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань у різних точках простору, називають інтерференцією.

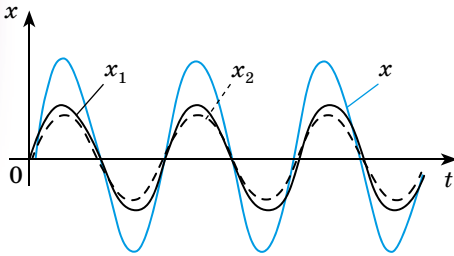
З'ясуємо, за яких умов можлива інтерференція хвиль. Для цього розглянемо детальніше накладання хвиль на поверхні води. Наприклад, можна одночасно збудити дві колові хвилі у ванні за допомогою двох кульок, прикріплених до стержня, який гармонічно коливається (мал. 2.50). Тоді у будь-якій точці M на поверхні води



Мал. 2.50



Мал. 2.51



Мал. 2.52

у цьому випадку гребені (або западини) обох хвиль збігатимуться.

На малюнку 2.52 зображено залежність від часу зміщень x_1 і x_2 , спричинених двома хвилями, коли $\Delta d = \lambda$. Різниця фаз коливань дорівнює нулю (або 2π , бо період синуса — 2π). Унаслідок додавання цих коливань виникає результуюче коливання x із подвоєною амплітудою.

Амплітуда коливань середовища в даній точці буде максимальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює цілому числу довжин хвиль:

$$\Delta d = k\lambda,$$

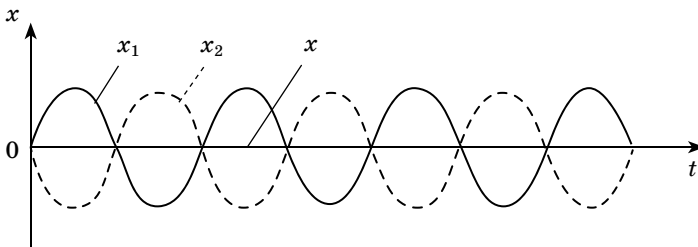
де $k = 0, 1, 2, \dots$ Цю умову називають умовою максимумів.

А що буде, коли на відріжку Δd вміщується половина довжини хвилі? Очевидно, що друга хвиля відстає від першої на половину періоду. Різниця фаз дорівнюватиме π , тобто коливання відбуватимуться в протифазі. Унаслідок додавання цих коливань амплітуда результуючого коливання дорівнює нулю, і в розглядуваній точці коливання відсутні (мал. 2.53). Те саме спостерігається, якщо на відріжку вміщується будь-яке непарне число півхвиль.

Амплітуда коливань середовища в даній точці буде мінімальною, якщо різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в цій точці, дорівнює непарному числу півхвиль:

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

Якщо різниця ходу $\Delta d = d_2 - d_1$ має проміжне значення між λ і $\lambda/2$, то й амплітуда результуючого коливання набуває деякого проміжного значення

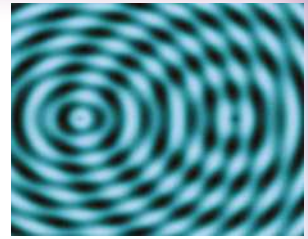


Мал. 2.53

(мал. 2.51) додаватимуться коливання, спричинені двома хвилями (від джерел O_1 і O_2). Амплітуди коливань, які збудили в точці M ці обидві хвилі, будуть різні, тому що хвилі проходять різні шляхи d_1 і d_2 . Проте якщо відстань l між джерелами значно менша від цих шляхів ($l \ll d_1$ і $l \ll d_2$), то обидві амплітуди можна вважати майже однаковими.

Результат додавання хвиль, які приходять у точку M , залежатиме від різниці фаз між ними. Якщо хвилі проходять різні відстані d_1 і d_2 , то вони мають різницю ходу $\Delta d = d_2 - d_1$. Коли різниця ходу дорівнює довжині хвилі λ , це означає, що друга хвиля запізнюється порівняно з першою на один період (якраз за період хвиля проходить шлях, що дорівнює довжині хвилі). Отже, у

між подвоєною амплітудою і нулем. Але найважливішим є те, що **амплітуда коливань у будь-якій точці не змінюється із часом**. На поверхні води виникає певний розподіл амплітуд коливань, який називають **інтерференційною картиною** (мал. 2.54).



Мал. 2.54

Щоб отримати стійку інтерференційну картину, джерела хвиль повинні мати однакову частоту і фази їхніх коливань мають збігатися або відрізнятися на деяку сталу (незалежну від часу) величину. Різниця фаз коливань обох джерел має лишатися незмінною. Джерела, які відповідають цим умовам, називають **когерентними**. Когерентними називають і утворені ними хвилі. Тільки після додавання когерентних хвиль спостерігається стійка інтерференційна картина.

Якщо різниця фаз коливань джерел непостійна, то різниця фаз коливань, збуджуваних двома хвилями в будь-якій точці середовища, змінюватиметься. Тому й амплітуда результуючих коливань змінюється із часом. Унаслідок цього максимумами і мінімумами переміщуються у просторі, інтерференційна картина стає розмитою.

Інтерференція властива хвильовим процесам будь-якої природи. Можна, зокрема, спостерігати інтерференцію звуку. Велике значення інтерференції полягає в тому, що коли в процесі вивчення якогось явища буде виявлено інтерференцію, це означатиме, що маємо справу з хвильовим рухом.

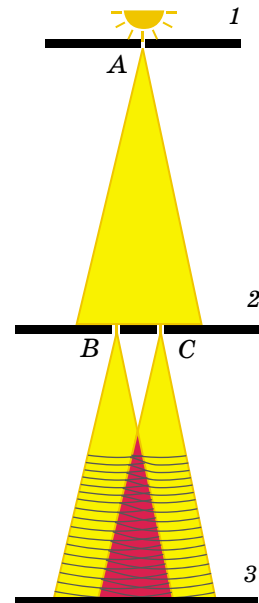
Повширюючись у просторі, хвилі переносять енергію. *Що ж відбувається із цією енергією тоді, коли хвилі гасять одна одну?* Може, вона перетворюється в інші форми і в мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Нічого подібного. Мінімум у цій точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди не надходить зовсім. **Унаслідок інтерференції енергія перерозподіляється у просторі**. Вона розподіляється нерівномірно на всіх ділянках середовища, а концентрується в максимумах і тому зовсім не надходить у мінімумах.

У 1802 р. Томас Юнг провів дослід (у добре затемненій кімнаті), у якому спостерігав інтерференцію світла.

Схему дослідів наведено на малюнку 2.55. Світло від Сонця падало на ширму 1, у якій був отвір А у вигляді щілини. Світло від освітленої щілини падало на ширму 2, у якій зробили дві вузькі щілини В і С. Оскільки вони були розміщені симетрично відносно щілини А, то світло від щілини А до них доходило одночасно. Отже, і щілини В і С були когерентними джерелами світла, від них світло падало на екран 3. При цьому на екрані спостерігалася така картина: краї екрана були слабо освітлені, а в середині екрана, де пучки світла від щілин накладалися один на одного, спостерігалася чергування кількох світлих (веселкових) і темних смуг, що свідчило про інтерференцію світла.

Завдяки досліді Юнга можна стверджувати, що світло має хвильові властивості.

Якщо в цьому досліді замість двох щілин, що освітлюються одним джерелом світла, узяти два незалежних джерела світла (наприклад, дві лампи розжарювання), то явище інтерференції не спостерігатиметься. *Чому?*



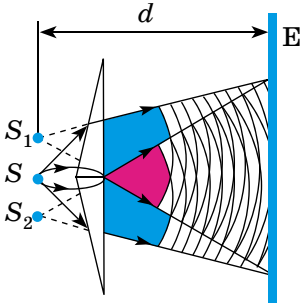
Мал. 2.55

Ви вже знаєте, що інтерферують тільки когерентні хвилі. При інтерференції двох когерентних хвиль з однаковими амплітудами x_{max} амплітуда результуючих коливань буде максимальною і дорівнюватиме $2x_{max}$ у точках, різниця фаз у яких становить нуль або різниця ходу для яких — парне число півхвиль. У тих точках, у яких різниця фаз або різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль, хвилі гасять одна одну й амплітуда результуючої хвилі дорівнює нулю.

Хвилі, що випромінюються звичайними джерелами, не є когерентні: у них різні початкові фази. Тому в кожній точці простору амплітуда результуючої хвилі хаотично і швидко змінюється. Оскільки нашому оку властива інерційність і воно реєструє лише середні значення амплітуд, то інтерференційна картина в цьому випадку не спостерігається.

Огюст Френель запропонував спосіб отримання двох когерентних систем світлових хвиль від одного джерела світла. Суть цього способу полягає в розділенні однієї світлової хвилі на дві когерентні. При накладанні цих хвиль Френель спостерігав їхню інтерференцію.

В одному зі своїх дослідів учений розділяв світлову хвилю від джерела S (мал. 2.56) за допомогою двох тонких скляних призм, склеєних основою. Таку призму називають **біпризмою Френеля**. Основу біпризми розміщують паралельно яскраво освітленій щілині. Як і в досліді Юнга, інтерференційна картина спостерігалася на екрані E .



Мал. 2.56

Якщо щілину освітлювати монохроматичним (одноколірним) світлом, то всі світлі смуги інтерференційної картини будуть мати той самий колір. Якщо щілину освітлювати білим світлом, то інтерференційна картина буде різноколірною, тобто у кожній світлій смузі спостерігатиметься плавний перехід кольорів від червоного до фіолетового.

Дослід. Якщо ми отримаємо на дротяному каркасі плівку мильного розчину і спрямуємо на нього світловий пучок від проекційного апарата, то побачимо на плівці кольорове забарвлення. Коли на шляху світлового пучка поставити червоний світлофільтр, то замість кольорових смуг ми побачимо одноколірні червоні смуги, розділені темними смугами. Картина нагадує інтерференційні смуги, отримані за допомогою дзеркал Френеля. Якщо червоний світлофільтр замінити на зелений, то світлі смуги будуть зеленими. Це наводить на думку, що спостережуване явище є результатом інтерференції світла.

Які ж два світлові пучки інтерферують у цьому випадку? Очевидно, що світло, падаючи на плівку, відбивається від передньої і задньої поверхонь цієї плівки. При цьому між пучками, відбитими від передньої і задньої поверхонь, виникає різниця ходу, яка залежить від товщини плівки та матеріалу, з яким плівка стикається.

Якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль, то відбудеться підсилення відбитої хвилі, а якщо різниця ходу дорівнює половині хвилі або непарному числу півхвиль, то відбудеться послаблення відбитої хвилі.

Явище інтерференції світла широко використовують у техніці. Одне з таких застосувань — «просвітлена» оптика. Відполірована поверхня скла відбиває приблизно 4% світла, що падає на неї. Сучасні оптичні прилади складаються з великої кількості деталей, виготовлених зі скла. Проходячи через кожну з них, світло ослаблюється на 4%. Загальні втрати світла в об'єктиві фотоапарата становлять приблизно 25%, у призматичному біноклі і мікроскопі — 50%.

Для зменшення світлових втрат в оптичних приладах усі скляні деталі,

через які проходить світло, покривають плівкою товщиною в чверть світлової хвилі, показник заломлення якої менший за показник заломлення скла.

Явище інтерференції використовують для контролю якості оброблювальної поверхні.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке інтерференція?
2. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини.
3. Які хвилі називають когерентними?
4. Зобразіть схему досліду Юнга і поясніть його результати.
5. Намалюйте схему досліду Френеля і поясніть його хід і результати.
6. На дротяному каркасі отримали мильну плівку товщиною $\lambda/4$. Поясніть, як і яка інтерференційна картина утворюється в цьому випадку.
7. З якою метою лінзи оптичних приладів покривають спеціальною плівкою?



Використовуючи літературні джерела або інтернет-ресурси, з'ясуйте, як контролюють якість поверхонь деталей за допомогою інтерферометрів.

§ 34. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Ви ознайомилися з хвилями, які поширюються в однорідному середовищі. Тепер з'ясуємо, що відбувається з хвилями, коли їх спрямовують на перешкоду, наприклад на тверду стінку.

Застосовуючи принцип Гюйгенса (с. 91), переконуємося, що огинати перешкоди можуть будь-які хвилі.

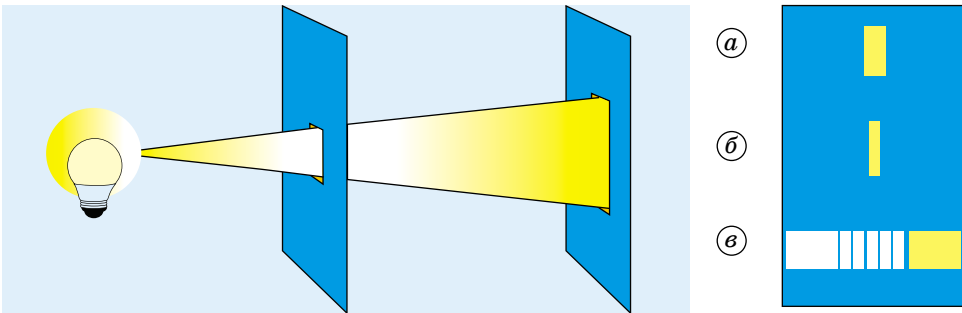
129

Відхилення від прямолінійного поширення хвиль, огинання хвилями перешкод називають *дифракцією* (віл лат. *diffractus* — «розламаний»).

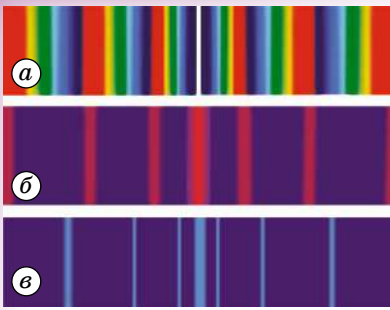
Дифракційні явища легко спостерігати, коли розміри перешкоди порівнянні з довжиною хвилі. Проте довжина світлової хвилі дуже мала, тому огинання перешкод дуже незначне і спостерігати його можна лише за спеціальних умов.

Для спостереження дифракції світла потрібно брати або дуже маленькі перешкоди, або проводити спостереження на дуже великих відстанях, щоб були помітні невеликі відхилення світлових хвиль від прямолінійного поширення біля країв перешкод. Крім того, приміщення, у якому відбуваються досліди зі спостереження дифракції світла, має бути добре затемнене, оскільки дифракційні картини мають незначну освітленість.

Дослід. У добре затемненому приміщенні перед яскравим точковим джерелом світла, розміщеним у пристрої з отвором 10–12 мм, поставимо непрозору ширму з прямокутною щілиною, ширину якої можна змінювати (мал. 2.57, а–в). Якщо ширина щілини 1–2 мм, то на екрані видно яскраву



Мал. 2.57

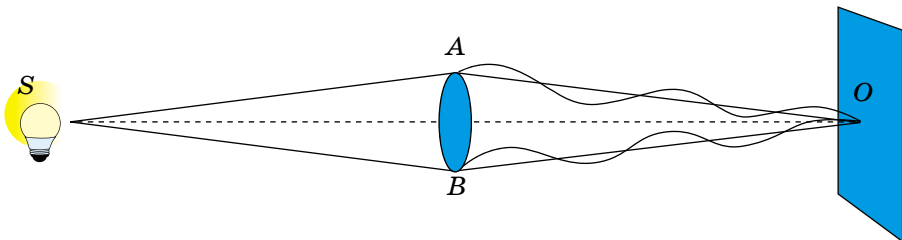


Мал. 2.58

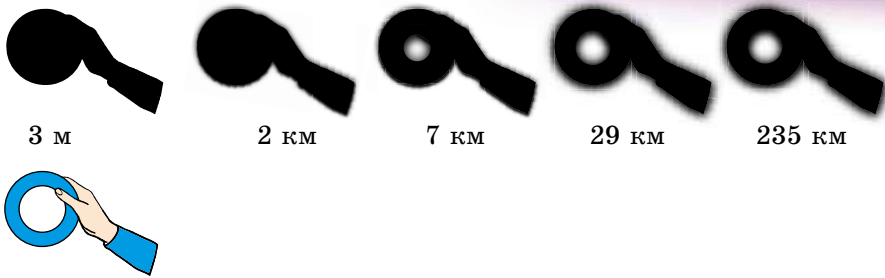
якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними (мал. 2.58, б, в). Дослід з дифракції світла на щілині можна продемонструвати інакше. У добре затемненому довгому приміщенні встановимо точкове джерело світла. Приблизно на відстані 15 м від джерела поставимо непрозору для світла ширму, у якій зробимо щілину завширшки 2–3 мм. Якщо позаду щілини на відстані 10–15 см поставити екран, то на ньому буде видно чітку освітлену смужку. Віддаляючи поступово екран від щілини, помітимо, що чіткість контурів світлої смужки поступово послаблюється, її освітленість стає меншою і нерівномірною: у середині — більшою, а біля країв — меншою. На відстані 15–20 м від щілини на екрані праворуч і ліворуч від освітленої смужки, як і в попередньому досліді, з'являються ледь помітні кольорові смуги, які краще помітні, коли джерело світла потужніше. Якщо перед джерелом світла поставити світлофільтр, то кольорові смуги стають одноколірними.

Нехай невеликий плоский диск освітлюють точковим джерелом світла (джерело світла, розміри світної поверхні якого значно менші за відстані від джерела до предмета і від предмета до екрана), яке розміщене на осі, проведеній перпендикулярно до центра диска (мал. 2.59). Як тільки світло від джерела дійде до країв диска, кожна точка, що розміщена біля краю диска, за принципом Гюйгенса–Френеля стане самостійним центром коливань і випромінюватиме вторинні хвилі. Оскільки відстані від джерела світла до країв диска однакові, то всі вторинні хвилі, що поширюються від країв диска, матимуть однакові фази.

Та частина вторинних хвиль, яка поширюється симетрично падаючій хвилі (на мал. 2.59 їх позначено променями AO і BO), приходить у точку O на екрані в одній фазі, і, інтерферуючи, хвилі підсилюють одна одну. У центрі тіні O має спостерігатися світла пляма. Уперше цього висновку дійшов французький учений Сімеон Пуассон (1781–1840), який рецензував працю Френеля про дифракцію світла, яку той подав на здобуття премії Паризької академії наук. Недостатньо ретельно поставивши дослід, Пуассон не виявив світлої плями в центрі тіні і на цій підставі зробив висновок, що теорія Френеля помилкова.



Мал. 2.59



Мал. 2.60

Домінік Араго (1786–1853), будучи також членом комітету з премій, вирішив перевірити результати досліду Пуассона. Поставивши дослід більш ретельно, він виявив світлу дифракційну пляму, яка отримала ім'я Пуассона.

Дуже в оригінальній постановці дослід з дифракції світла на диску виконав професор **Володимир Аркад'єв** (1884–1953). Він виготовив зменшену плоску модель руки, яка тримає тарілку. Освітивши модель світлом від точкового джерела світла, він сфотографував тінь від тарілки на екрані. Коли модель була на невеликій відстані від екрана, на ньому було видно чітку тінь (мал. 2.60). Зі збільшенням відстані від моделі до екрана тінь усе гірше передавала контури руки і тарілки. Нарешті, на деякій відстані в центрі тіні від тарілки з'явилася світла пляма (на мал. наведено різні відстані з урахуванням масштабу моделі).

Дифракційна картина в описаному досліді зі щілиною не має достатньої різкості. Це пов'язано з тим, що через вузьку щілину проходить мало світла. Дифракційна картина буде яскравою і добре помітною, якщо на пластинку нанести багато паралельних однакових щілин, на однакових відстанях одна від одної. Така сукупність щілин отримала назву **дифракційної ґратки**.

Суму ширини a однієї щілини і ширини b однієї непрозорої смужки між щілинами називають **сталю ґратки**, або її **періодом** (мал. 2.61).

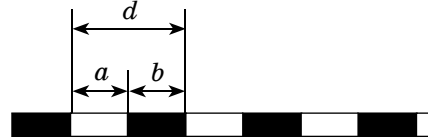
Сталу ґратки позначають літерою d : $d = a + b$.

Сьогодні для наукових цілей використовують дифракційні ґратки, у яких на 1 мм налічується 300, 1200, 1800 і 2400 штрихів. Зі збільшенням числа щілин на одиницю ширини ґратки поліпшується чіткість і правильність дифракційних спектрів.

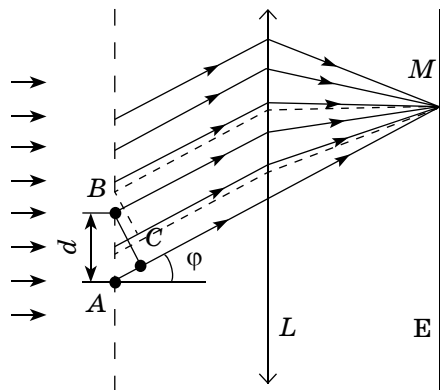
Розглянемо основні питання елементарної теорії дифракційної ґратки.

Нехай на ґратку падає плоска монохроматична хвиля завдовжки λ (мал. 2.62).

Вторинні джерела в щілинах створюють світлові хвилі, які поширюються в усіх напрямках. Знайдемо умову, за якої хвилі, що виходять зі щілин, підсилюють одна одну. Для цього розглянемо хвилі, які поширюються в напрямку, що позначається кутом φ . Різниця ходу між хвилями від країв



Мал. 2.61



Мал. 2.62

сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка AC . Якщо на цьому відрізку вміщується ціле число довжин хвиль, то хвилі від усіх щілин складаються одна з одною і підсилюють одна одну. З $\triangle ABC$ можна визначити катет AC : $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$. Максимуми спостерігатимуться під кутом φ , що визначається з умови: $d \sin \varphi = k\lambda$, де $k = 0, 1, 2, \dots$. Ці максимуми називають **основними**.

Слід мати на увазі, що коли виконується умова $d \sin \varphi = k\lambda$, то підсилюються не тільки хвилі, що виходять з нижніх країв щілин, а й хвилі, що виходять з усіх інших точок щілин. Кожній точці в першій щілині відповідає точка в другій щілині на відстані d . Тому різниця ходу вторинних хвиль, що виходять із цих точок, дорівнює $k\lambda$, і ці хвилі взаємно підсилюються.

За ґраткою стоїть збиральна лінза L , у фокальній площині якої встановлено екран E . Лінза фокусує хвилі, що напрямлені паралельно, в одній точці M , у якій хвилі додаються, підсилюючи одна одну. Кути φ , які відповідають умові $d \sin \varphi = k\lambda$, визначають місце максимумів на екрані E .

Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає $k = 0$) залежить від довжини хвилі, то ґратка розкладає біле світло на спектр (мал. 2.58, а). Що більше значення λ , то далі від центрального максимуму (мал. 2.58, б, в) той чи інший максимум, що відповідає певній довжині хвилі. Кожному значенню k відповідає свій спектр.

За допомогою дифракційної ґратки можна точно виміряти довжину хвилі. Якщо період ґратки відомо, то визначення довжини хвилі зводиться до вимірювання кута φ , який відповідає напрямку на максимум.

Наші вії з проміжками між ними — це приклад грубої дифракційної ґратки. Якщо подивитися, примружившись, на яскраве джерело світла, можна виявити веселки кольори. Біле світло розкладається внаслідок дифракції навколо вії.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке дифракція?
2. Які труднощі трапляються під час проведення дифракційних дослідів і як можна їх уникнути?
3. Як можна спостерігати дифракцію на щілині? Чому дифракційна картина в цьому досліді недостатньо чітка?
4. У чому полягав дослід Аркад'єва?
5. Що таке дифракційна ґратка і чим визначається її якість?
6. Що таке основні максимуми? Яка їхня умова?

§ 35. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

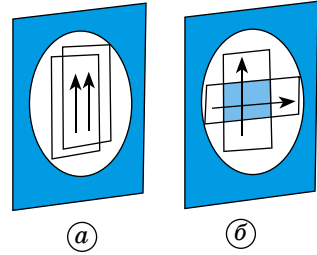
Явища інтерференції і дифракції світла свідчать про хвильові властивості світла. Вони властиві і поперечним, і поздовжнім хвилям. Для встановлення природи світлових хвиль важливо з'ясувати, якими вони є — поздовжніми чи поперечними.

Засновники хвильової оптики Томас Юнг і Огюст Френель довго вважали, що світлові хвилі поздовжні, як і звукові. У той час світлові хвилі розглядалися як пружні хвилі в ефірі, що заповнює простір і проникає в усі тіла. Поперечні хвилі можуть поширюватися лише в твердому тілі. *Але як можуть рухатися тіла в твердому ефірі, не зазнаючи опору?* Адже ефір не повинен чинити опір руху тіл. Інакше не справджувався б закон інерції.

Проте поступово збиралось дедалі більше фактів, які не можна було пояснити, вважаючи світлові хвилі поздовжніми. Під тиском цих фактів Френель зрештою змушений був визнати, що світлові хвилі поперечні, хоча з погляду теорії механічного ефіру як носія світлових хвиль це здавалося дуже дивним.

Дослід. Встановимо дві пластини, вирізані певним чином з кристала турмаліну, одну за одною і спроектуємо їх на екран. Повертаючи один з кристалів навколо осі, зазначимо, що освітленість екрана в місці перетину зображень кристалів мінятиметься і при певному положенні кристала, що повертається, екран стане зовсім темним (мал. 2.63).

Цей результат можна пояснити так. Світло, що випускає лампа розжарювання, не поляризоване. Пройшовши крізь перший кристал турмаліну, світло стає **плоскополяризованим**. Цей кристал турмаліну є поляризатором світла. Другий кристал турмаліну слугує аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло лише за певної орієнтації кристала щодо площини поляризації (мал. 2.63, а). Якщо аналізатор повернути на 90° , то вже поляризоване світло він практично не буде пропускати (мал. 2.63, б).



Мал. 2.63

Окрім турмаліну, такі властивості має кварцева пластинка, вирізана певним чином з кристала.

Прозорі півки, що можуть слугувати поляризаторами і аналізаторами світла, отримали назву *поляроїди*.

Сьогодні розроблено методи виробництва простих і зручних поляроїдів.

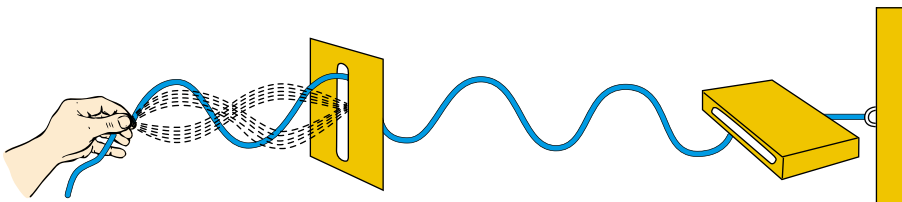
Площину, яка пропускає максимальне поляризоване світло, називають *площиною пропускання поляроїда*.

Поляризація властива тільки поперечним хвилям. Якщо хвилі поляризуються, то вони є поперечними. Поздовжні хвилі не поляризуються. **Явище поляризації світла свідчить про те, що світлові хвилі є поперечними.**

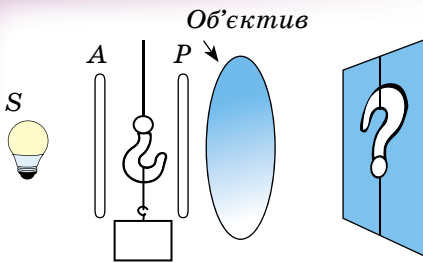
Неважко побудувати просту наочну механічну модель розглядуваного явища. Можна утворити поперечну хвилю в гумовому шнурі так, щоб коливання швидко змінювали свій напрямок у просторі. Це є аналогом природної світлової хвилі. Пропустимо тепер шнур крізь вузький дерев'яний ящик (мал. 2.64). З коливань різних напрямків ящик «виділить» коливання в одній певній площині. Тому з ящика виходить поляризована хвиля. Якщо на її шляху поставити ще один такий самий ящик і розмістити його під кутом 90° до першого, то коливання через нього не пройдуть. Хвиля повністю погаситься.

Поляризоване світло широко застосовують у наукових дослідженнях і в техніці. У багатьох випадках доводиться плавно регулювати освітлення того або іншого об'єкта. Поставивши перед джерелом світла поляризатор і аналізатор, можна, поволі повертаючи аналізатор, плавно змінювати освітлення об'єкта від максимального до повної темноти.

Поляроїди використовують для гасіння дзеркально відбитих відблисків, наприклад фотографуючи картини, скляні і фарфорові вироби тощо. Світло відблисків частково поляризоване. Якщо помістити поляроїд між дже-



Мал. 2.64



Мал. 2.65

релом світла і віддзеркалювальною поверхнею, то відблиски можна зовсім погасити.

Поляріоди широко застосовують в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях діапазону оптичного випромінювання (наприклад, для захисту очей водіїв від засліплюючої дії фар зустрічних авто).

У будівельній і машинобудівній техніці явище поляризації використовують для вивчення напруги, що виникає в окремих вузлах споруд і машин. Цей метод дослідження назвали фотопружним. Суть його в такому. З прозорого матеріалу (наприклад, з органічного скла) виготовляють точну копію деталі, напругу в якій треба вивчити. Потім цю модель ставлять між аналізатором A і поляризатором P , освітлюють і проєктують на екран (мал. 2.65). Оскільки недеформована пластинка органічного скла оптично однорідна, то на екрані видно лише її контури. При деформації моделі оптична однорідність органічного скла порушиться, і на екрані з'явиться барвиста картина напруги, що виникла в деталі.

Поляризацію використовують в декоративних цілях. Наприклад, під час театральних постановок, у геології та інших галузях науки і техніки.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як можна виявити поляризацію світла?
2. Про що свідчить явище поляризації світла?



Дослідіть основні застосування явища поляризації світла в науці і техніці.

§ 36. ОСНОВНІ ФОТОМЕТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ

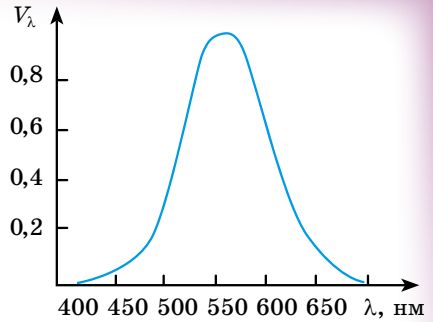
Світло як вид матерії переносить певну енергію, яку називають світловою, або променистою. Ця енергія в процесі взаємодії світла з речовиною може перетворюватися в інші види енергії — внутрішню, хімічну, електричну. Дія світла на око, фотопластинку, фотоплівку чи будь-який інший об'єкт характеризується передусім значенням переданої енергії. У практичній світлотехніці вимірювання фотометричних величин здебільшого здійснюється способом порівняння світлових впливів на око людини. Таке вимірювання має суб'єктивний характер. Ним не можна обмежитися, бо, скажімо, тіло за температури до 700 К може бути дуже потужним джерелом інфрачервоного випромінювання, відігравати важливу роль у виробничих процесах, але за зоровими відчуттями належати до нульових джерел світла, оскільки воно невидиме. Тому у фотометрії доводиться користуватися подвійними одиницями фізичних величин: енергетичними і візуальними, що ґрунтуються на зорових відчуттях.

До найважливіших фотометричних величин належать: потік променистої енергії P , світловий потік Φ , сила світла I , яскравість B , світність джерела R , освітленість E .

Кількість енергії, що переноситься світлом через будь-яку поверхню за

одиницю часу, називають *поток*ом променистої енергії: $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$.

Потік променистої енергії має розмірність потужності, його можна виміряти за часом і кількістю теплоти, яку отримує тіло при повному поглинанні світла. Чутливість ока до світла різної довжини хвилі характеризується особливою величиною, яку називають функцією видності. Значення функції видності V_λ для світлової хвилі завдовжки 555 нм приймають таким, що дорівнює одиниці. Для інших довжин світлових хвиль воно менше від одиниці і визначається за кривою видності, затвердженою Міжнародною комісією з освітлення. З графіка (мал. 2.66) видно, що потік світла довжиною хвилі 510 нм або 610 нм має бути вдвічі потужнішим, ніж потік світла довжиною хвилі 555 нм, щоб зорові відчуття від них були однаковими.



Мал. 2.66

Світловий потік — це потік променистої енергії, оцінюваний за зоровим відчуттям.

За світловим потоком роблять висновок про рівень зорового збудження, що зумовлюється світлом даної потужності і спектрального складу. Одиницею світлового потоку Φ є **1 люмен (1 лм)**. У фотометрії для спрощення означень ряду величин користуються поняттям точкового джерела світла. Під точковим розуміють таке джерело світла, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанню до місця спостереження. Це ізотропне джерело, випромінювання якого в усіх напрямках однако. Користуються також тілесними кутами, вираженими встерадіанах. Стерадіан (ср) — центральний тілесний кут, що спирається на частину сферичної поверхні, площа якої дорівнює квадрату радіуса сфери.

Люмен — світловий потік, який випромінюється точковим джерелом світла силою 1 кандела в тілесний кут, що дорівнює 1 стерадіан. Світловий потік, що випромінюється точковим джерелом в будь-який тілесний кут, $\Phi = I\Omega$, де I — сила світла точкового джерела; Ω — тілесний кут. Повний світловий потік точкового джерела $\Phi = 4\pi I$.

Сила світла — характеристика джерела світла.

Сила світла — величина, що визначає за зоровими відчуттями енергію випромінювання точкового джерела в тілесний кут, що дорівнює 1 стерадіан, за одиницю часу.

Інакше кажучи, сила світла вимірюється світловим потоком, що випромінюється в тілесний кут, який дорівнює 1 стерадіан, тобто $I = \frac{\Phi}{\Omega}$. Одиницею сили світла в СІ є **1 кандела (1 кд)**.

Яскравість. Характеристикою випромінювання протяжних джерел світла в даному напрямку є яскравість. Яскравість B визначається відношенням сили світла в заданому напрямку до проекції світної поверхні на площину, перпендикулярну до цього напрямку: $B = \frac{I}{S}$, де I — сила світла джерела S в перпендикулярному напрямку.

Світність — це характеристика протяжного джерела світла за густиною випромінювання його поверхні. Вона визначається сумарним світловим потоком, що випромінюється з одиниці світної поверхні в усіх напрямках: $R = \frac{\Phi}{S}$. Одиницею світності в СІ є **1 люмен на метр квадратний (1 лм/1 м²)**.

Освітленість. Освітленість є характеристикою поверхні, на яку падає світло. Освітленість визначається світловим потоком, що падає на одиницю площі освітлюваної поверхні, тобто $E = \frac{\Phi}{S}$.

Вважаючи, що $\Phi = 1$ лм, $S = 1$ м², отримуємо одиницю освітленості 1 лм/м², або 1 люкс (1 лк). Якщо довільно зорієнтована поверхня S освітлюється точковим джерелом світла S_0 , то $S = \frac{S_0}{\cos \alpha} = \frac{r^2 \Omega}{\cos \alpha}$. Підставивши вираз S у формулу освітленості, матимемо $E = \frac{\Phi \cos \alpha}{r^2 \Omega} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$. Ця фор-

мула виражає два закони освітленості Ламберта: 1) освітленість поверхні, створювана точковим джерелом світла, обернено пропорційна квадрату відстані від джерела; 2) освітленість поверхні прямо пропорційна косинусу кута падіння світла.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які фотометричні величини ви знаєте?
2. Як вони поділяються відносно їхніх одиниць?
3. Сформулюйте означення фотометричних величин.
4. Назвіть закони освітленості Ламберта.

136



Дослідіть, як впливає освітленість довколишнього середовища на працездатність людини.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Для визначення довжини світлової хвилі використовували дифракційну ґратку, період якої 0,01 мм. Перше дифракційне зображення на екрані отримали на відстані 11,8 см від центрального зображення і на відстані 2 м від ґратки. Визначте довжину світлової хвилі.

Розв'язання

Умову максимуму дифракційної картини від ґратки записуємо так:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

d — стала ґратки; $\sin \varphi = \frac{h}{l}$; k — порядок спектра (у нашому випадку $k = 1$), отже $\lambda = d \frac{h}{l}$. Підставивши значення відомих величин, маємо $k = 5,9 \cdot 10^{-7}$ м.

2. На дифракційну ґратку, яка має $n = 500$ штрихів на 1 мм, нормально падає біле світло. Спектр проєктується на екран лінзою, розміщеною біля ґратки. Визначте довжину спектра першого порядку на екрані, якщо відстань від лінзи до екрана $L = 4$ м. Межі видимого світла: $\lambda_{\text{ч}} = 780$ нм, $\lambda_{\text{ф}} = 400$ нм.

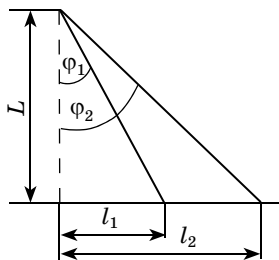
Розв'язання

Запишемо рівняння дифракційної ґратки для випадку дифракції фіолетових і червоних променів:

$$d \sin \varphi_1 = k\lambda_{\text{ф}}; \quad d \sin \varphi_2 = k\lambda_{\text{ч}}.$$

Через те що кути φ_1 і φ_2 малі, то у випадку спектра першого порядку можна прийняти (мал. 2.67):

$$\sin \varphi_1 \approx \text{tg} \varphi_1 = \frac{l_1}{L}; \quad \sin \varphi_2 \approx \text{tg} \varphi_2 = \frac{l_2}{L}.$$



Мал. 2.67

Отже, $\frac{dl_1}{L} = k\lambda_\Phi$; $\frac{dl_2}{L} = k\lambda_\Psi$, тоді довжина спектра

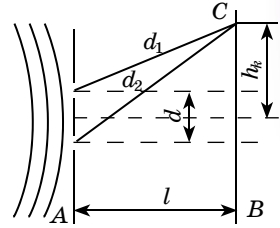
$$\Delta l = l_2 - l_1 = \frac{kL}{d}(\lambda_\Psi - \lambda_\Phi) = knL(\lambda_\Psi - \lambda_\Phi); \Delta l = 76 \text{ см.}$$

3. На екран (мал. 2.68) від точкового джерела, яке міститься від нього на значній відстані, падає світло довжиною хвилі 560 нм. В екрані є дві паралельні щілини на відстані 1 мм одна від одної. Визначте відстань між двома сусідніми смугами інтерференційних максимумів, які спостерігають на екрані B , розміщеному паралельно екрану A на відстані 2 м від нього.

Розв'язання

У деякій точці C екрана буде максимум освітленості (інтерференційний максимум) при виконанні умови $d_2 - d_1 = k\lambda$, де $k = 0, 1, 2, \dots$ — цілі числа.

З малюнка 2.68 видно, що $d_1^2 = l^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2$,
 $d_2^2 = l^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2$, де h_k — відстань k -ї світлої смуги від центра екрана.



Мал. 2.68

Віднявши від першого рівняння друге, отримаємо $d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d$, або $(d_2 + d_1)(d_2 - d_1) = 2h_k d$.

Оскільки $d \ll D$, то $d_2 + d_1 \approx 2l$. Отже, $d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{l}$.

Враховуючи, що $d_2 - d_1 = k\lambda$, можна записати $k\lambda \approx \frac{h_k d}{l}$. Звідси знаходимо відстань k -ї світлої смуги від центра екрана $h_k \approx \frac{k\lambda l}{d}$.

Відстань між сусідніми смугами дорівнює: $\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda l}{d}$.

Підставляючи числові значення величин, маємо $\Delta h = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,1 \text{ мм}$.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

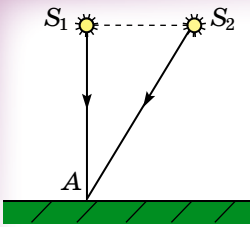
2.84. Чому поверхня мильної бульбашки забарвлена кольорами веселки? Відповідь проілюструйте малюнком.

2.85. Чому тільки досить вузький світловий пучок після проходження крізь призму дає спектр, а в широкого пучка забарвленими виявляються лише краї?

2.86. Два когерентних пучки світла, які мають довжину хвилі 0,4 мкм, перетинаються. Що можна спостерігати в точці їхнього перетину, для якої різниця ходу хвиль дорівнює 0,5 мкм, максимум чи мінімум коливань?

2.87. Визначте кут відхилення зеленого світла довжиною хвилі 550 нм у спектрі другого порядку, отриманому за допомогою дифракційної ґратки з періодом 20 мкм.

2.88. Кут відхилення променів фіолетового світла довжиною світлової хвилі 435 нм у дифракційному спектрі першого порядку дорівнює $2^\circ 30'$. Який період дифракційної ґратки?



Мал. 2.69

2.89. Два когерентних джерела S_1 і S_2 , що мають довжину хвилі $0,5$ мкм, розміщені на відстані 2 мм одне від одного (мал. 2.69), а екран — на відстані 2 м від S_1 . Що можна спостерігати в точці A екрана — світло чи темряву?

2.90. Білий промінь світла падає на бічну грань призми під кутом 0° . Чи матимемо на екрані спектр?

2.91. Щоб отримати на екрані спектр випромінювання лампи, її розжарювали поступово за допомогою реостата. Які зміни при цьому відбувалися на екрані?

2.92. Знаючи швидкість поширення світла у вакуумі, визначте швидкість поширення світла у воді та склі.

2.93. Визначте силу світла точкового джерела, повний світловий потік якого дорівнює 1 лм.

2.94. Який світловий потік точкового джерела світла, що має силу 5 кд?

2.95. Визначте силу світла точкового джерела, розміщеного у вершині тілесного кута $0,6$ ср, якщо всередині цього кута поширюється світловий потік 240 лм.

2.96. Світловий потік, який становить $0,02$ лм, падає паралельно на поверхню площею 5 см². Яка її освітленість?

Рівень Б

2.97. Скільки довжин хвиль монохроматичного випромінювання частотою 400 ТГц поміщається на відрізьку 1 м?

2.98. З якою швидкістю поширюється світло у воді, якщо при частоті 600 ТГц довжина хвилі дорівнює $0,51$ мкм?

2.99. Яку приблизно товщину має плівка мильної бульбашки в місцях, де вона здається блакитною?

2.100. Екран розміщено на відстані 1 м від дифракційної ґратки. Освітлюючи її червоним світлом довжиною хвилі 650 нм, відстань між двома максимумами першого порядку на екрані дорівнює 26 см. Визначте період дифракційної ґратки.

2.101. За допомогою дифракційної ґратки з періодом 5 мкм дифракційний максимум першого порядку отримано на відстані 60 мм від центрального. Відстань від ґратки до екрана 50 см. Світло падає на ґратку паралельно. Яка довжина світлової хвилі?

2.102. Під час туману навколо ліхтарів можна спостерігати кольорові кільця. Чим спричинене це явище? Поясніть його.

2.103. Дно ставка не можна бачити через відбите світло. Як можна усунути відбите світло і побачити дно?

2.104. Чи можна зробити так, щоб краплі ртуті не блищали, коли на них дивитися крізь поляроїд?

2.105. Чи змінюється швидкість, довжина хвилі, частота коливань, коли світло переходить з повітря у скло? Як?

2.106. На дифракційну ґратку завдовжки 10 мм, що має 2000 штрихів, нормально падає монохроматичне світло довжиною хвилі 450 нм. Який кут між напрямками спостереження максимумів першого і другого порядків?

2.107. Яку ширину має весь дифракційний спектр першого порядку, отриманий на екрані, віддаленому на $1,5$ м від дифракційної ґратки з періодом 10 мкм? Довжини світлових хвиль лежать у межах від 380 до 760 нм.

2.108. Назвіть способи отримання дифракційного та дисперсійного спектрів.

2.109. Чому в ясний сонячний день небо блакитного кольору, а вранці на сході і ввечері на заході може бути оранжево-червоного кольору?

2.110. Чому ртутні лампи ультрафіолетового випромінювання виготовляють не зі скла, а з кварцу? Чому під час горіння кварцевих ламп відчувається запах озону?

2.111. Обчисліть, який світловий потік проходить крізь поверхню площею 20 см^2 , віддалену на 5 м від точкового джерела світла, сила якого 100 кд . Вважати, що промені падають перпендикулярно до поверхні.

2.112. Який світловий потік падає на поверхню стола, якщо його середня освітленість 9500 лк , а площа $1,6 \text{ м}^2$?

2.113. Розжарена чавунна заготовка, діаметр якої 10 см , а довжина 40 см , створює на відстані 5 м у напрямку, перпендикулярному до осі заготовки, освітленість, яка дорівнює 1 лк . Визначте силу світла і яскравість у цьому напрямку.

2.114. Визначте силу точкового джерела світла, якщо воно міститься в центрі сфери, радіус якої 85 см , і на поверхню цієї сфери площею $1,5 \text{ м}^2$ випромінює світловий потік 360 лм . Який повний світловий потік, що випромінює це джерело?

2.115. Сила світла лампи розжарювання при номінальній потужності 100 Вт дорівнює 100 кд . Якщо лампа горить з недорозжарюванням, споживаючи потужність тільки 80 Вт , сила світла становить 65 кд . Визначте світлову віддачу (світловий потік на 1 Вт) у цих режимах роботи.

Є над чим замислитися

2.116. У досліді Юнга фіолетовий світлофільтр ($\lambda_1 = 400 \text{ нм}$) замінимо на червоний ($\lambda_2 = 650 \text{ нм}$). Як при цьому зміниться інтерференційна картина на екрані?

2.117. Який завширшки весь дифракційний спектр першого порядку, отриманий на екрані, віддаленому на $1,5 \text{ м}$ від дифракційної ґратки з періодом 10 мкм ? Довжини світлових хвиль лежать у межах від 380 до 760 нм ?

2.118. Визначте середню силу світла лампи розжарювання потужністю 120 Вт , якщо її світлова віддача 13 лм/Вт .

2.119. У скільки разів збиральна лінза збільшує на одиницю площі потужність світла, що надходить від Сонця?

§ 37. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА ЯК ГРАНИЧНИЙ ВИПАДОК ХВИЛЬОВОЇ. ЗАКОНИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ

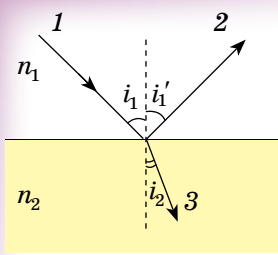
Розділ оптики, у якому закони поширення світла розглядаються на основі уявлень про світлові промені, називають **геометричною оптикою**. Під світловими променями розуміють перпендикулярні до хвильових поверхонь лінії, вздовж яких поширюється потік світлової енергії. Світловий промінь — це абстрактне математичне поняття, а не фізичний образ. Геометрична оптика є лише граничним випадком **хвильової оптики**.

Учення про явища поширення, відбивання та заломлення світла (геометрична оптика) — феноменологічна, тобто описова, наука. Геометрична оптика не вивчає природу явищ, а описує закони поширення світла, на основі узагальнених емпіричних даних. Це вчення зародилося у глибоку давнину. Вважається, що закони прямолінійного поширення світла в одному прозорому середовищі та дзеркального відбивання сформулював ще **Евклід** (365–270 рр. до н. е.).

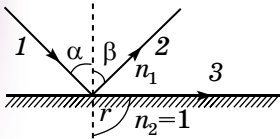
Французький математик та філософ **Рене Декарт** (1596–1650) і голландський математик **Вілеброрд Снел** (**Снеліус**) (1580–1626) експериментально і теоретично вивчили закони поведінки світлових променів на межі поділу двох середовищ. У 1660 р. французький математик **П'єр Ферма** (1601–1665) сформулював принцип, з якого і впливали всі закони геометричної оптики.

Основу геометричної оптики складають такі закони:

1. Закон прямолінійного поширення світла: **світло в оптично однорідному середовищі поширюється прямолінійно.**



Мал. 2.70



Мал. 2.71

2. Закон незалежності світлових пучків: світлові пучки від різних джерел при накладанні діють незалежно один від одного і не впливають один на одного.

3. Закон відбивання світла: падаючий на межу поділу двох оптично неоднорідних середовищ промінь 1, відбитий промінь 2 і перпендикуляр, проведений до межі поділу в точці падіння, лежать в одній площині. Кут i_1' відбивання променя від межі поділу двох середовищ дорівнює куту i_1 падіння променя (мал. 2.70).

4. Закон заломлення світла: падаючий на межу поділу двох оптично неоднорідних середовищ промінь 1, заломлений в друге середовище промінь 3 і перпендикуляр, проведений до межі поділу в точці падіння, лежать в одній площині (мал. 2.70). Відношення синуса кута i_1 падіння до синуса кута i_2 заломлення променя є величиною сталою для двох даних середовищ, визначається відношенням швидкості v_1 поширення світла в першому середовищі до швидкості v_2 поширення світла в другому середовищі називають відносним показником заломлення n_{21} другого середовища відносно першого:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

Показник заломлення n даного середовища відносно вакууму називають абсолютним показником заломлення середовища, який визначається відношенням швидкості c ($\sim 300\,000$ км/с) поширення світла у вакуумі до швидкості v поширення світла в середовищі:

$$n = \frac{c}{v}.$$

5. Повне відбивання світла. Коли світло поширюється з оптично більш густого середовища в менш густе ($n_2 > n_1$), то, якщо збільшується кут падіння, збільшується й кут заломлення. Коли кут падіння досягає значення $\pi/2$, такий заломлений промінь поширюється вздовж межі двох середовищ. При подальшому збільшенні кута падіння промінь у друге (тобто менш густе) середовище не переходить і повністю відбивається в перше середовище. Це явище називають повним відбиванням. Кут падіння $\alpha_{\text{гп}}$, при якому все світло почне повністю відбиватися в перше середовище, називають граничним кутом повного відбивання.

Застосувавши закони заломлення, розглянемо проходження світла з речовини з показником заломлення n_1 в повітря ($n_2 = 1$) (мал. 2.71).

За формулами $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n_1$; $\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n_{2,1}$, якщо $n_2 = 1$ і $r = \frac{\pi}{2}$, то при явищі

повного відбивання маємо:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{гп}}}{\sin \frac{\pi}{2}} = \frac{1}{n_1}, \text{ звідки } \sin \alpha_{\text{гп}} = \frac{1}{n_1}.$$

У загальному випадку $\sin \alpha_{\text{гп}} = n_{21}$.

Граничний кут повного внутрішнього відбивання можна визначити, якщо відомі показники заломлення двох середовищ. Явище повного внутрішнього відбивання можна спостерігати в природі: яскравий блиск крапель роси, сніжинок, бурульок. Це явище використовують в оборотних і поворотних призмах. На принципі повного відбивання світла функціонують **волокнисті світловоди** (мал. 2.72) — пристрої, що використовуються у волоконній оптиці.

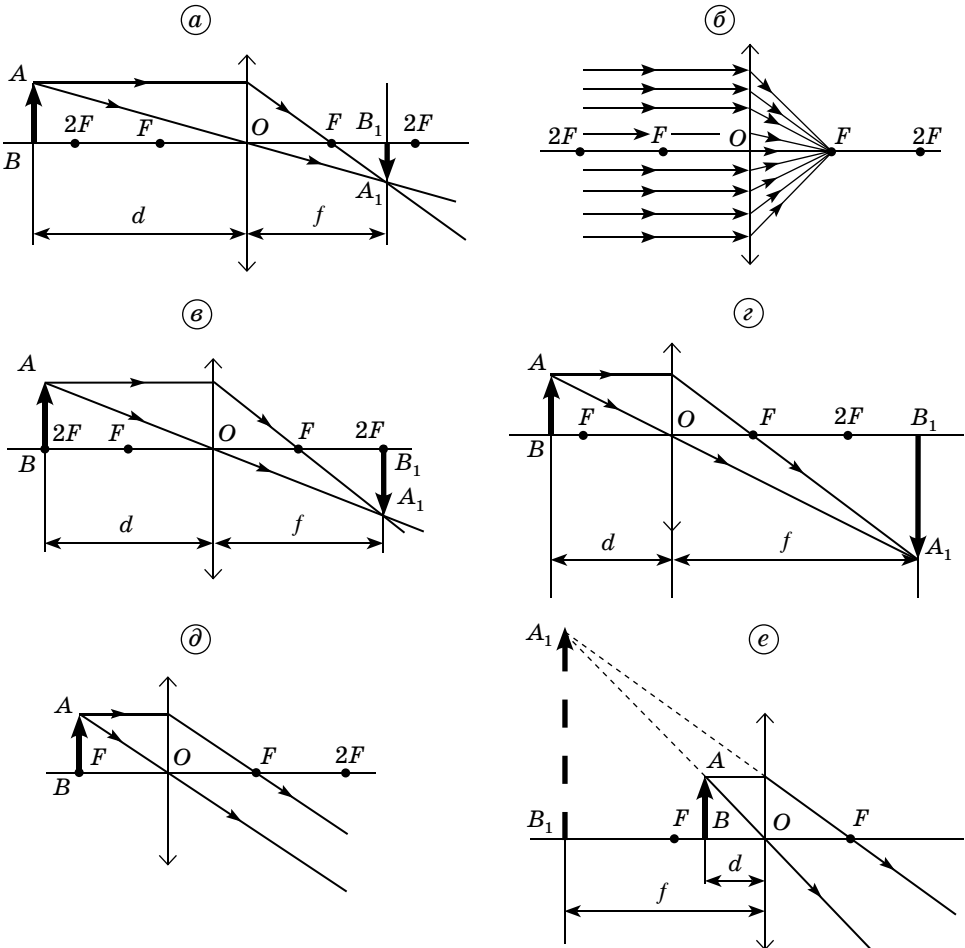


Мал. 2.72

Зображення предмета в лінзі є сукупністю зображень окремих його точок. Тому для побудови зображення предмета досить знайти зображення його крайніх точок.

Типові випадки побудови зображень A_1B_1 предмета AB у збиральній лінзі наведено на малюнку 2.73.

Відстань d від предмета до лінзи є більшою ніж $2F$ (мал. 2.73, *a*). У цьому випадку предмет і його зображення містяться по різні боки лінзи, а відстань f від лінзи до зображення є більшою від фокусної відстані F і меншою ніж $2F$. **Зображення предмета буде дійсним, оберненим і зменшеним.**



Мал. 2.73

У частковому випадку, якщо предмет міститься на нескінченно великій відстані від лінзи ($d = \infty$), то його зображення буде у вигляді точки в головному фокусі F лінзи (мал. 2.73, б). Відстань d від предмета до лінзи дорівнює $2F$ (мал. 2.73, в). Предмет і його зображення містяться по різні боки лінзи, а відстань $f = 2F$. Тоді зображення предмета буде дійсним, оберненим і таких самих розмірів.

Відстань d від предмета до лінзи є більшою від F , але меншою від $2F$ (мал. 2.73, г). Таке розміщення предмета перед лінзою даватиме його зображення по іншій бік лінзи, а відстань f буде більшою від $2F$. У цьому випадку зображення предмета буде дійсним, оберненим і збільшеним.

Предмет міститься в головному фокусі лінзи, тобто $d = F$ (мал. 2.73, д).

У цьому випадку промені від кожної точки предмета після заломлення поширюються паралельними пучками. Це значить, що зображення предмета має бути нескінченно великим і на великій відстані від лінзи, що практично рівносильне відсутності зображення.

Відстань від предмета до лінзи менша від головної фокусної відстані F (мал. 2.73, е). Зображення предмета буде уявним, прямим і збільшеним.

Побудову зображення предмета в розсіювальній лінзі наведено на малюнку 2.74. Розсіювальна лінза завжди дає уявне, зменшене і пряме зображення предмета. Відстань f від зображення предмета до лінзи завжди менша, ніж відстань d від предмета до лінзи.

Для графічної побудови зображення предмета в сферичному дзеркалі використовують промені побудови (мал. 2.75, напрямки яких після відбивання відомі):

1. Промінь, що проходить до дзеркала через його центр, після відбивання проходить по тій самій прямій у протилежному напрямку.

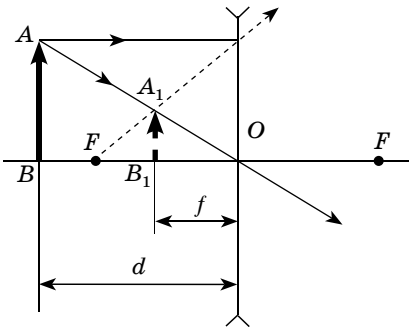
2. Промінь, паралельний головній оптичній осі, після відбивання проходить через головний фокус.

3. Промінь, що проходить до дзеркала через головний фокус, після відбивання проходить паралельно головній оптичній осі.

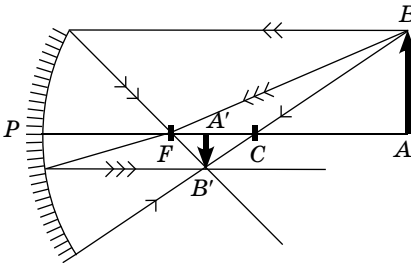
На малюнку 2.75 зображено сферичне вгнуте дзеркало і хід променів у ньому. Для сферичного опуклого дзеркала хід променів зображено на малюнку 2.76.

Сферичні дзеркала широко використовуються на практиці: у прожекторних ліхтарях, у прожекторах, астрономічних трубах. Крім сферичних використовують також параболічні, еліптичні та гіперболічні дзеркала, які в окремих умовах дають змогу усунути або істотно зменшити сферичну аберрацію.

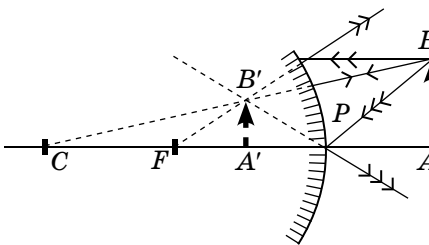
Точку тонкої лінзи, через яку проходять усі світлові промені без заломлення, називають оптичним центром лінзи (мал. 2.77).



Мал. 2.74



Мал. 2.75



Мал. 2.76

Хоча око людини і не являє собою тонку лінзу, у ньому є точка, через яку світлові промені проходять практично без заломлення, тобто оптичний центр ока.

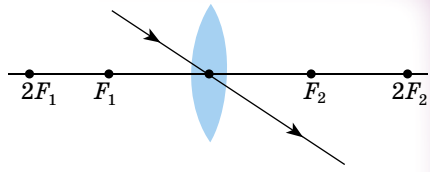
Оптичний центр ока O міститься всередині кришталіка (мал. 2.78, а). Відстань h від оптичного центра до сітківки ока називають **глибиною ока**, для нормального ока — 15 мм.

Кут φ , під яким видно предмет з оптичного центра ока O , називають **кутом зору**.

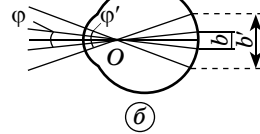
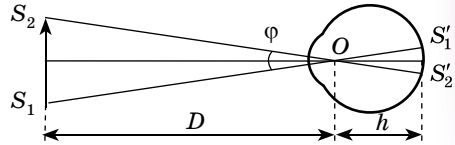
Мінімальний кут зору, під яким видно дві точки роздільно, складає приблизно $1'$ (мінута). Це кут, під яким видно відрізок завдовжки 1 см на відстані 34 м від ока.

Сітківка ока людини містить безліч фоторецепторів. Тому 2 точки об'єкта, які розміщені досить близько одна до одної, що їхні зображення на сітківці потрапляють на один фоторецептор, сприймаються оком як одна точка.

Наближаючи предмет до ока (мал. 2.78, б), ми збільшуємо кут зору ($\varphi' > \varphi$). При збільшенні кута зору збільшуються розміри зображення предмета на сітківці ($b' > b$), і ми отримуємо можливість детально роздивитися дрібні деталі. Однак досить близько наблизити предмет ми не зможемо, оскільки здатність ока до акомодації обмежена. Для нормального ока відстань найкращого зору становить 25 см. Для короткозорого ока ця відстань є меншою. Тому короткозорі люди розміщують предмети ближче до ока для того, щоб бачити предмет під більшим кутом зору.



Мал. 2.77



Мал. 2.78



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Сформулюйте закони геометричної оптики.
2. Що таке повне внутрішнє відбивання?
3. Де використовуються світловоди?
4. Назвіть хід основних променів, які використовуються для побудови зображень за допомогою лінз і дзеркал.
5. Що таке кут зору?



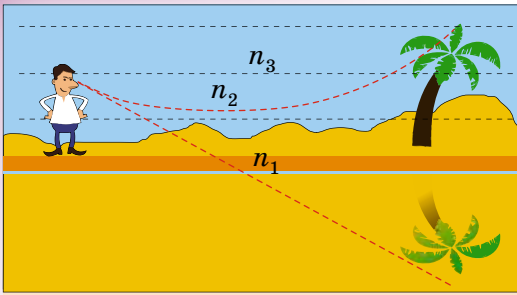
Розкрийте історичні аспекти виготовлення лінз та їхнього використання в практичних цілях.



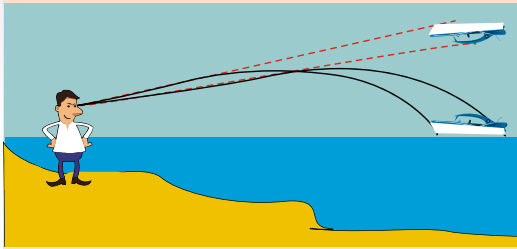
ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- **Міраж** (франц. *mirage*, лат. *mirare* — «поглянь на дивовижу») або **марев** — явище аномальної рефракції світла в атмосфері, при якому крім предметів з'являються також їхні уявні зображення — результат внутрішнього відбивання в атмосфері.

У пустелях через особливості рельєфу і циркуляцію повітря міражі спостерігаються частіше, ніж в інших місцях. Утворення міражів пояснюється тим, що промені світла заломлюються при переході з одного середовища в інше. Зокрема, міражі виникають при переході між шарами повітря, що мають різну температуру



Мал. 2.79



Мал. 2.80

та відповідну густину і достатньо різку межу. У результаті заломлення променів далекі об'єкти видаються зміщеними або видно їхні віддзеркалення. Щоб утворився міраж, обов'язково має бути чисте небо та яскраве освітлення від Сонця або Місяця. Міражі бувають нижні, верхні, складні (фата-моргана).

- **Нижній міраж** (мал. 2.79) спостерігається при зниженні температури з висотою над перегрітою рівною поверхнею: часто пустелею або асфальтованою дорогою. Сонячні промені нагрівають поверхню, від якої нагрівається нижній шар повітря. Він, у свою чергу, спрямовується вгору, замінюючись новим, який нагрівається і так само прямує вгору. Світлові промені завжди викривляються від теплих шарів у бік холодніших.

Зображення неба за нижнього міража створює ілюзію води на поверхні. Тому дорога, що йде вдаль у спекотний літній день, здається мокрою.

- **Верхній міраж** (мал. 2.80), або міраж дальнього виду, спостерігається над холодною земною поверхнею при підвищенні температури повітря зі збільшенням висоти. Промені світла, що йдуть від предметів на Землі, дугоподібно викривляються і повертаються вниз. За таких умов можна побачити предмети за горизонтом. Зображення може бути перевернутим і сприйматися як зависле в повітрі. Іноді такі міражі бувають подвійними, коли одночасно спостерігаються пряме й перевернуте зображення.

Верхній міраж трапляється рідше, ніж нижній, але частіше буває стабільнішим, оскільки холодне повітря не має тенденції рухатися вгору, а тепле — вниз.



Мал. 2.81

- **Фата-моргана** (мал. 2.81) — оптичне явище в атмосфері, що складається з кількох форм міражів. При цьому віддалені предмети видно багато разів і з різноманітними викривленнями, змінами розміру. Він виникає, тому що залежно від висоти температура то збільшується, то зменшується. Таку назву цей вид міражів отримав від імені міфічної чаклунки Моргани, яка обманувала мандрівників прирмними видіннями.

§ 38. ОПТИЧНІ ПРИЛАДИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

За своїм призначенням оптичні прилади поділяють на дві групи: 1. Прилади для розгляду дрібних об'єктів (лупа, мікроскоп). 2. Прилади для розгляду віддалених об'єктів (зорові труби, біноклі, телескопи).

Лу́па — короткофокусна збиральна лінза (фокусна відстань 10–100 мм), яку використовують для розгляду дрібних предметів (мал. 2.82). Як правило, лупу розміщують поближче до ока, а предмет між лінзою і її головним фокусом — поблизу останнього (мал. 2.83).

Збільшення лупи визначають за формулою: $k = \frac{d_0}{F}$, де d_0 — відстань найкращого зору ($d_0 = 25$ см); F — фокусна відстань лінзи.

Приклад. Визначимо збільшення лупи при фокусній відстані 0,25 мм.

Згідно з попередньою формулою: $k = \frac{25 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1000$. З формули

$k = \frac{d_0}{F}$ випливає, що за допомогою лупи можна отримати досить велике

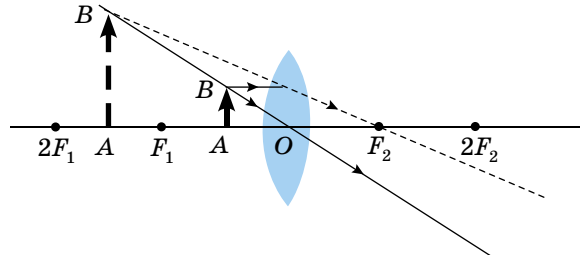
збільшення. Для цього здавалося б потрібно лише зменшити фокусну відстань лупи. А використовувати лінзи з малою фокусною відстанню, а отже, і з малим діаметром, складно. Тому лупи зі збільшенням у понад 40 разів практично не використовують.

Для отримання більших збільшень використовують **оптичний мікроскоп** (мал. 2.84). Оптична система мікроскопа складається з двох основних частин: об'єктива і окуляра. Оптична система мікроскопа побудована так, що через окуляр розглядається не сам предмет, а його дійсне, збільшене зображення, яке отримане за допомогою об'єктива.

Невеликий предмет B розміщують перед об'єктивом (короткофокусною збиральною лінзою) на відстані d ($F < d < 2F$), поблизу головного фокуса об'єктива F_1 (мал. 2.85). За допомогою об'єктива отримують дійсне,



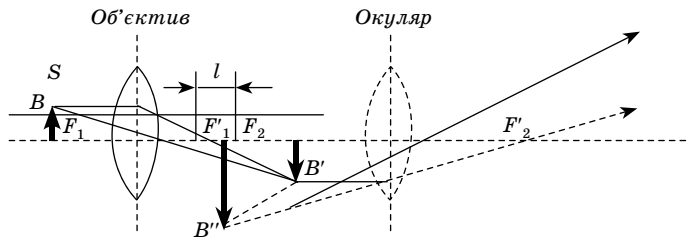
Мал. 2.82



Мал. 2.83



Мал. 2.84



Мал. 2.85



Мал. 2.86

обернене, збільшене зображення B' . Це зображення слугує предметом для окуляра. Зображення B' розміщене між окуляром і його головним фокусом F_2 , поблизу останнього. Через окуляр зображення B' розглядається як через лупу. Утворене зображення B'' є уявним, оберненим відносно предмета B і збільшеним.

Збільшення мікроскопа обчислюють за формулою: $k = k_{об} \cdot k_{ок}$, де $k_{об}$ — збільшення об'єктива; $k_{ок}$ — збільшення окуляра. Оптичний мікроскоп дає збільшення у 3000 разів.

У **бінокулярному мікроскопі** (мал. 2.86) використовують стереоскопічний ефект, що дає змогу сприймати зображення об'ємно.

Зорова труба — оптичний прилад, призначений для розгляду віддалених предметів (мал. 2.87).

Складається зорова труба з об'єктива і окуляра. Об'єктив і окуляр є складними оптичними системами, але для спрощення вважатимемо їх тонкими лінзами. Об'єктив зорової труби має бути збиральною системою, а окуляр може бути і збиральною, і розсіювальною системою.

Зорову трубу з розсіювальним окуляром називають **трубою Галілея**, а зорову трубу із збиральним окуляром — **трубою Кеплера**.

Зорова труба збільшує розміри зображення віддаленого предмета на сітківці ока, діючи так, ніби предмет «наблизився» до ока. Таким чином, зорова труба збільшує кут зору.

Труба Галілея, яку використовують у театральному біноклі, утворює пряме зображення.

Труба Кеплера дає обернене зображення, а тому, якщо її використовують у наземних спостереженнях, то потрібно використовувати ще оборотні призми. Прикладом такого застосування є польовий бінокль (мал. 2.88). Перевагою труби Кеплера перед трубою Галілея є те, що в ній є дійсне проміжне зображення, у площині якого можна розмістити вимірювальну шкалу.

Телескопи. Уперше зорову трубу в астрономічних дослідженнях використав Галілео Галілей у 1610 р. Телескоп Галілея мав збільшення у 32 рази.

Телескопи, сконструйовані за типом зорової труби Кеплера, називають **рефракторами**.

У телескопі-рефракторі (мал. 2.89) світлові промені від небесного тіла потрапляють в об'єктив. Відстань від Землі до світила є досить великою порівняно з фокусною відстанню лінзи, що зображення світила отримується



Мал. 2.87

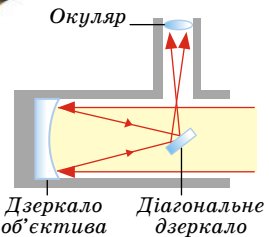
146

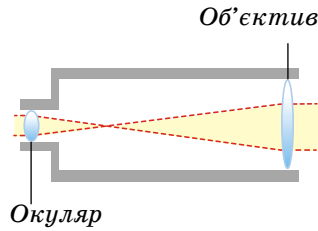


Мал. 2.88



Мал. 2.89





Мал. 2.90



Мал. 2.91

у головному фокусі лінзи об'єктива. Зображення світила буде дійсним, оберненим, зменшеним. Це зображення розглядається в окуляр як через лупу.

Поряд з телескопами-рефракторами використовують дзеркальні телескопи — **рефлектори**.

На сферичне дзеркало телескопа-рефлектора (мал. 2.90) падають світлові промені від небесного тіла. Відстань від Землі до світила є досить великою порівняно з фокусною відстанню дзеркала, що зображення світила отримується в головному фокусі дзеркала. Зображення світила буде дійсним, оберненим і зменшеним. Для того щоб зручно було розглядати це зображення, поблизу головного фокуса дзеркала розміщують невелике плоске дзеркало, яке повертає світлові промені. Зображення, яке утворює сферичне дзеркало, розглядається в окуляр як через лупу.

Найбільшим телескопом-рефлектором в Україні є дзеркальний телескоп імені Г. А. Шайна (мал. 2.91). Він розміщений у Кримській астрофізичній обсерваторії, діаметр його дзеркала становить 2,64 м. На момент створення телескопа (1960) він був найбільший у Європі і третій у світі.

У 1990 р. на навколосезну орбіту було виведено американський оптичний телескоп Габбл. Дані, які збирає телескоп, спочатку накопичуються на його борту, а потім передаються на Землю.

147



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Хто вивчав закони геометричної оптики?
2. Сформулюйте основні закони геометричної оптики.
3. Розкажіть, як потрібно будувати зображення за допомогою лінз і дзеркал.
4. Які оптичні прилади ви знаєте і де їх використовують?



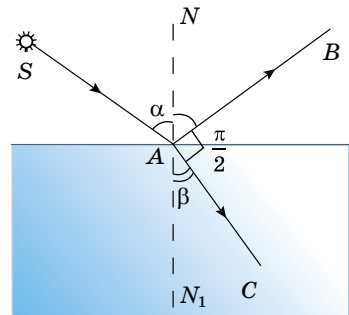
РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Світловий промінь з повітря падає на скляну пластинку так, що заломлений і відбитий промені взаємно перпендикулярні. Визначити кут падіння (мал. 2.92).

Розв'язання

Сума кутів, які складають розгорнутий кут NaN_1 : $\angle NAB + \angle BAC + \angle CAN_1 = \pi$.

За законом відбивання $\angle NAB = \alpha$, а за умовою заломлений і відбитий промені взаємно перпендикулярні, $\angle BAC = \gamma = \frac{\pi}{2}$.



Мал. 2.92

Тоді $\alpha + \frac{\pi}{2} + \beta = \pi$, звідки $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$. За законом заломлення: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$.

Але $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} = \operatorname{tg} \alpha$, тоді $\operatorname{tg} \alpha = n$, звідки $\alpha = \operatorname{arctg} n = \operatorname{arctg} 1,5 \approx 56^\circ$.

Відповідь: 56° .

2. На відстані 15 см від двоопуклої лінзи, оптична сила якої 10 дптр, поставлено перпендикулярно до оптичної осі предмет заввишки 2 см. Визначте положення та висоту зображення. Побудуйте хід променів, предмета і зображення.

Розв'язання

Оскільки в умові задачі не сказано, яке виходить зображення, то, щоб визначити положення зображення, потрібно визначити, де міститься предмет — за подвійною фокусною відстанню, або між подвійною фокусною відстанню і фокусом лінзи, або між фокусом і оптичним центром

лінзи. Враховуючи, що $D = \frac{1}{F}$, знаходимо $F = \frac{1}{D} = \frac{1}{10} = 0,1$ м. Звідси випливає, що предмет міститься між фокусом і подвійним фокусом лінзи.

Для побудови зображення точки B достатньо знати точку перетину двох променів — променя 1 і променя 2 (мал. 2.93).

Розташування зображення можна знайти за формулою лінзи. Позначимо $OA = d$ (відстань від центра лінзи — точки O до точки A головної оптичної осі, у якій розміщено предмет), а $OA' = f$ (відстань від центра лінзи до точки A' головної оптичної осі, де міститься зображення). У цьому ви-

падку $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$. Звідки $f = \frac{d}{Dd - 1}$;
 $f = 0,3$ м.

Висоту зображення знаходимо з подібності трикутників OAB і $OA'B'$:

$\frac{OA}{OA'} = \frac{AB}{A'B'}$, або $\frac{d}{f} = \frac{h}{H}$, де висоту предмета позначимо як $AB = h$, а висоту зображення $A'B' = H$. Тоді $H = \frac{fh}{d}$; $H = 0,04$ м.

Відповідь: 0,04 м.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

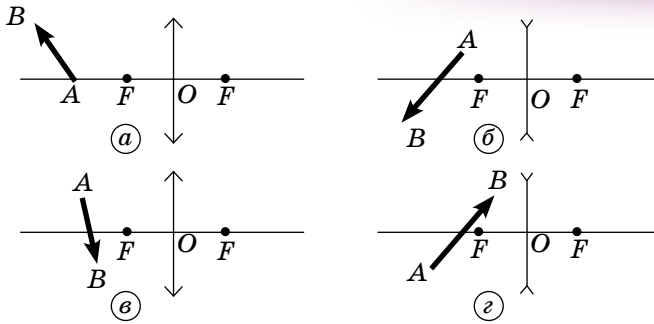
Рівень А

2.120. Промінь світла переходить з повітря у скло. Кут заломлення дорівнює 27° . Який кут падіння променя? Показник заломлення скла — 1,7.

2.121. Кут падіння променя з повітря на поверхню води складає 60° , а кут заломлення — 40° . Який показник заломлення води? Який кут падіння променя, якщо кут заломлення дорівнює 45° ?

2.122. Граничний кут повного відбивання для спирту — 47° . Визначте показник заломлення спирту.

2.123. Як у сонячний день можна визначити фокусну відстань збиральної лінзи, маючи лише лінійку?



Мал. 2.94

2.124. Побудуйте зображення предмета в лінзі (мал. 2.94 а, б, в, г) й схарактеризуйте його.

2.125. На якій відстані від лінзи з оптичною силою 4 дптр слід розмістити предмет, щоб його зображення отримати на відстані 20 см від неї? Яке збільшення лінзи в цьому випадку?

2.126. Студентка, зріст якої 170 см, стоїть на відстані 5 м від фотоапарата. Її зображення на фотоплівці — заввишки 17 мм. Яка фокусна відстань об'єктива фотоапарата?

Рівень Б

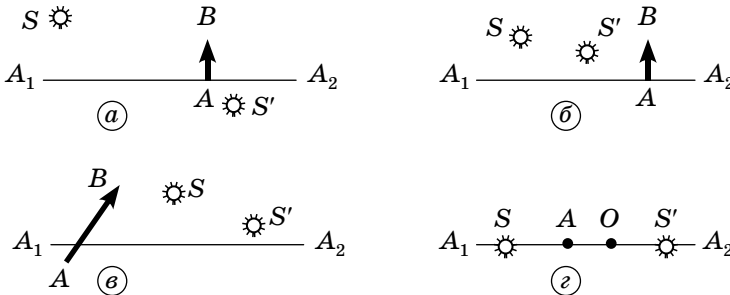
2.127. Хлопчик з дівчинкою намагаються влучити палицею в камінь, який лежить на дні струмка завглибшки 40 см. Вони прицілюються палицею вздовж напрямку зору, який утворює з поверхнею води кут 60° . На якій відстані від каменя палиця увіткнеться в дно? Показник заломлення води $4/3$.

149

2.128. Промінь падає під кутом 30° до поверхні скляної пластини завтовшки 2 см. Визначте бічне зміщення променя після проходження пластини. Показник заломлення скла — 1,5.

2.129. Під яким кутом до горизонту аквалангістка під водою бачить Сонце, що заходить за обрій?

2.130. На малюнку 2.95 пряма A_1A_2 — головна оптична вісь лінзи. Знаючи положення світної точки S і положення її зображення S' у лінзі, визначте положення лінзи, її фокусів та побудуйте зображення предмета AB .



Мал. 2.95

2.131. Предмет заввишки 5 см розміщений на відстані 10 см від розсіювальної лінзи з оптичною силою 5 дптр. На скільки зміняться розміри зображення, якщо предмет відсунути від лінзи ще на 10 см?

2.132. Предмет розміщений на відстані 25 см від розсіювальної лінзи з оптичною силою -2 дптр. Куди і на яку відстань слід пересунути предмет, щоб розміри його зображення зменшились удвічі?

2.133. Вважайте, що фокусна відстань лінзи дорівнює відстані від площин лінзи до зображення лампи, яка розміщена далеко. На якій відстані має розміщуватися лампа, щоб знайдена таким чином фокусна відстань відрізнялася від дійсної менше ніж на 1%?

Є над чим замислитися

2.134. Промінь падає під кутом 60° на скляну пластину заввишки 2 см з паралельними гранями. Визначте зміщення променя, який вийшов із пластини. Яким буде зміщення, якщо промінь під таким самим кутом падає на цю саму скляну пластину, розміщеному у воді?

2.135. Предмет, розміщений на відстані 20 см від фокуса розсіювальної лінзи, дає зображення на відстані 10 см від нього. Яка фокусна відстань і яка оптична сила лінзи?

2.136. Уздовж головної оптичної осі збиральної лінзи з фокусною відстанню 10 см рухаються по різні боки лінзи назустріч один одному два світлячки. Швидкість світлячків однакова: 2 м/с. Через який час перший світлячок зустрінеться із зображенням другого, якщо в початковий момент вони були на відстані $l_1 = 20$ см і $l_2 = 30$ см від лінзи?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Чи змінюється напрямок сили пружності під час невеликих вертикальних коливань пружинного маятника? Поясніть відповідь.

150

2. Математичний маятник здійснює гармонічні коливання в якійсь інерціальній системі відліку (ІСВ). Чи будуть ці коливання гармонічними у будь-якій іншій ІСВ?

3. Обґрунтуйте твердження: згасаючі коливання не гармонічні.

4. За рахунок яких сил — зовнішніх чи внутрішніх — відбувається коливання системи під час резонансу? Чи тих і тих?

5. У які моменти першого півперіоду коливань у контурі ЕРС самоіндукції в ньому сягає максимальних значень?

6. Конденсатор електричного контуру зарядили від джерела більшої напруги. Що зміниться в коливаннях аналогічної механічної системи?

7. Яка характеристика для електромагнітних хвиль величина залишається незмінною при проходженні світла через середовище?

8. Обґрунтуйте, виходячи із законів заломлення світла, чому промені, які падають перпендикулярно до межі поділу двох середовищ, не повинні заломлюватися.

9. Відхилення світлових променів у тонкій тригранній призмі пропорційне її куту заломлення. З огляду на це, встановіть, що сильніше заломлює світло — край чи середина лінзи.

10. Поясніть, чому явище інтерференції переконливо доводить, що світло — це типово хвильовий процес.

11. Як впливає число штрихів дифракційної ґратки на відстань між світлими смугами і на їхні розміри в спектрі ґратки?

12. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?

13. Коричневий колір відсутній у суцільному спектрі. Як виникає цей колір?

14. Чи буде повністю поляризованим заломлене в прозорому діелектрику світло, якщо встановлено, що відбитий промінь поляризується повністю, коли він із заломленим променем утворює кут 90° ?

15. Чи правильне твердження: «у природі світла виявляється корпускулярно-хвильовий дуалізм»? Поясніть чому.

Що я знаю і вмю робити

● Я знаю, якими фізичними величинами описуються коливання

1. Яку амплітуду, період, частоту і початкову фазу мають гармонічні коливання, задані рівнянням $x = \sin(628t + 2)$?

2. Яка довжина математичного маятника, період коливань якого 1 с?

3. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом $q = 2 \sin 2 \cdot 10^9 \omega t$, мкКл. Визначте частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?

4. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється із часом за законом $i = 100 \cos 6 \cdot 10^9 t$, мА. Яка довжина хвилі його випромінювання?

● Я вмю пояснювати фізичні явища і процеси

5. Як слід змінити індуктивність котушки коливального контуру для збільшення періоду вільних електромагнітних коливань?

6. У чому відмінність поширення радіохвиль на Місяці й на Землі?

7. Де зосереджена енергія електричного поля під час електромагнітних коливань у коливальному контурі?

● Я знаю, що таке коливальний контур і для чого він призначений

8. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 400 пФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Визначте амплітудне значення сили струму під час вільних електромагнітних коливань, якщо амплітудне значення напруги дорівнює 500 В.

9. Параметри двох коливальних контурів такі: $C_1 = 160$ пФ, $L_1 = 5$ мГн і $C_2 = 100$ пФ, $L_2 = 4$ мГн. На скільки слід змінити ємність C_2 , щоб частота вільних електромагнітних коливань у них стала однаковою?

● Я знаю, що таке радіоз'язок

10. Телевізійний ретранслятор встановлено на супутнику, який рухається по коловій орбіті на висоті 36 000 км над поверхнею Землі. Супутник розміщено на одній вертикалі з прийнятною антеною, яку, у свою чергу, розміщено поблизу антени передавача. За який інтервал часу сигнал поширюється від телецентру до телевізора?

● Я знаю, що таке електромагнітні коливання

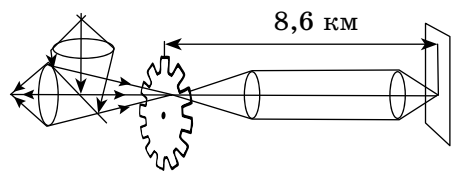
11. Чому спіраль електричної лампи (мал. 2.96) здійснює коливання?

● Я знаю, як проводилися історичні досліді

12. В історичному досліді Фізо (мал. 2.97) на визначення швидкості поширення світла відстань між колесом, яке мало 720 зубців, і дзеркалом дорівнює 8633 м. Світло вперше зникло, коли частота обертання зубчастого колеса становила $12,67 \text{ с}^{-1}$. Яке значення швидкості поширення світла отримав Фізо?



Мал. 2.96



Мал. 2.97

13. У досліді Юнга фіолетовий світлофільтр ($\lambda_1 = 400$ нм) замінимо на червоний ($\lambda_2 = 650$ нм). Як при цьому зміниться інтерференційна картина на екрані?

● **Я вмію виконувати досліди**

14. Закоптіть скло і голкою проведіть лінію завдовжки 1–2 см. Подивіться через отриману щілину на нитку електричної лампи, розмістивши щілину паралельно нитці лампи. Наближаючи і віддаляючи скло від ока, знайдіть таке його положення, при якому помітне явище дифракції. Щілину можна вирізати в чорному папері. Ширина щілини має бути близько 0,5 мм.

15. Змінюючи температуру нитки електричної лампи, спостерігайте за спектром випромінюваного нею світла.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант 1

1. Математичний маятник має період коливань 2ω с. Визначте його довжину.

А 1 м Б 2 м В 5 м Г 9,8 м Д 11,2 м

2. Як зміниться хід (період і частота) годинника з маятником на металевому стержні при значному підвищенні температури?

А збільшиться період, зменшиться частота
 Б збільшиться період і частота
 В зменшиться період і частота
 Г зменшиться період, збільшиться частота
 Д правильної відповіді немає

3. Визначте максимальне значення швидкості і прискорення, якщо рівняння коливань має вигляд: $x = 0,2 \cos\left(3t + \frac{\pi}{2}\right)$.

А 0,6 м/с; 0,2 м/с²
 Б 0,2 м/с; 1,8 м/с²
 В 0,6 м/с; 1,8 м/с²
 Г 1,8 м/с; 1,8 м/с²
 Д 0,6 м/с; 2 м/с²

4. Сила струму в котушці індуктивності змінюється за законом $i = 0,01 \cos\left(6\pi t \frac{\pi}{4}\right)$. Визначте період коливань у цьому контурі.

А 6ω с Б 1 с В 0,33 с Г 0,66 с Д ω с

5. Установіть відповідність між співвідношеннями та фізичними величинами.

А $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 1 закон Ома для змінного струму

Б $\omega = \frac{1}{LC}$ 2 період коливань

В $W = \frac{LI^2}{2}$ 3 циклічна частота коливань

Г $W = \frac{q^2}{2C}$ 4 енергія магнітного поля

Д $I_d = \frac{U_d}{Z}$ 5 енергія електричного поля

6. Миттєве значення ЕРС $\mathcal{E} = 100 \sin 800 \pi t$, В. Визначте амплітуду, частоту, період і фазу коливань, якщо $U = 50$ В.

А $\mathcal{E}_{max} = 100$ В; $\nu = 800$ Гц; $T = \frac{1}{800}$ с; $\varphi = 8\pi t$

Б $\mathcal{E}_{max} = 50$ В; $\nu = 400$ Гц; $T = \frac{1}{400}$ с; $\varphi = \pi t$

В $\mathcal{E}_{max} = 100$ В; $\nu = 400$ Гц; $T = \frac{1}{400}$ с; $\varphi = \frac{\pi t}{6}$

Г $\mathcal{E}_{max} = 50$ В; $\nu = 800$ Гц; $T = \frac{1}{800}$ с; $\varphi = \frac{\pi t}{12}$

7. Генератор змінного струму складається з...

А замкненої рамки, постійного магніту

Б ротора, статора

В ротора, статора, щітки

Г ротора, статора, щіток, кілець

Д ротора, статора, щіток, напівкілець

8. Параболічні антени радіотелескопів та станцій зв'язку із супутниками — великі споруди, які сягають 100 м у діаметрі. На якій властивості електромагнітних хвиль ґрунтується фокусування радіохвиль такою антеною?

А поглинання в діелектрику

Б відбивання від провідника

В заломлення на межі двох середовищ

Г поляризація при проходженні крізь речовину

9. Світло — це...

А одночасно хвиля і потік частинок масою m

Б електромагнітна хвиля

В потік фотонів

Г одночасно електромагнітна хвиля і потік фотонів

Д потік частинок масою m

10. Визначте абсолютний показник заломлення середовища, якщо кут падіння променів у повітрі 45° , а кут заломлення в середовищі 30° .

А 2 Б $\frac{\sqrt{2}}{2}$ В $\sqrt{2}$ Г $\frac{2}{\sqrt{2}}$ Д $2\sqrt{2}$

11. Дифракційна ґратка має 40 штрихів на 1 мм. Четвертий максимум відхилений на 6° від точки центра екрана. Визначте довжину хвилі світла. Якому кольору відповідає така довжина хвилі?

А 523 нм, зеленому Б 653 нм, жовтому

В 710 нм, червоному Г 1024 нм, червоному

12. Максимум інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу дорівнює...

А k Б $\left(k + \frac{1}{2}\right)$ В $(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ Г $k\frac{\lambda}{2}$ Д $3k\frac{\lambda}{2}$

Варіант 2

1. Маса тягарця 100 г, а рівняння його коливального руху $x = 0,25 \sin\left(10t + \frac{\pi}{6}\right)$. Визначте жорсткість пружини та зміщення в момент часу $t = 0$ с.

- А 100 Н/м; 0,125 м
- Б 10 Н/м; 0,125 м
- В 10 Н/м; 0,25 м
- Г 100 Н/м; 0,25 м
- Д 25 Н/м; 0,1 м

2. Під час виконання лабораторної роботи з визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника учениця зафіксувала, що маятник завдовжки 1 м за 200 с зробив 100 коливань. Визначте, яке значення прискорення вільного падіння отримала при цьому учениця.

- А 9,86 м/с² Б 9,86 м/с² В 9,83 м/с² Г 10 м/с² Д 9,79 м/с²

3. Запишіть закон зміни швидкості, якщо координата змінюється за законом $x = 0,3 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$.

А $v = 1,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$

Б $v = 1,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$

В $v = 0,5 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$

Г $v = 1,5 \sin\left(5t - \frac{\pi}{2}\right)$

Д $v = 0,5 \cos\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$

4. Визначте власну частоту коливань у контурі, у якому заряд змінюється за законом $q = 10^{-6} \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$.

- А 3ω Гц
- Б 3 Гц
- В 2,5 Гц
- Г 1,5 Гц
- Д 3,5 Гц

5. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин та фізичними величинами.

- | | |
|------------------|---------|
| А електроємність | 1 герц |
| Б індуктивність | 2 фарад |
| В сила струму | 3 генрі |
| Г заряд | 4 ампер |
| Д частота | 5 кулон |

6. Яка величина, характерна для електромагнітних хвиль, залишається незмінною при проходженні світла через середовище?

- А частота хвилі Б довжина хвилі В швидкість поширення хвилі
Г усі величини суттєво змінюються

7. Вторинна обмотка трансформатора використовується для...

- А створення змінного магнітного поля
Б індукування струму
В нагрівання
Г охолодження
Д під'єднання до споживача

8. Електричне коло складається з послідовно з'єднаних конденсатора C , котушки індуктивності L та вимикача, що дає змогу замкнути коло. Конденсатор зарядили до напруги U . Що буде відбуватись у колі, якщо вимикач замкнути?

- А конденсатор плавно розрядиться
Б виникнуть незагугаючі електромагнітні коливання
В виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда і період яких поступово зменшуються
Г виникнуть електромагнітні коливання, амплітуда яких поступово зменшується, а період залишається сталим
Д правильної відповіді немає

9. Дифракція світла — це...

- А огинання перешкод
Б інтерференція хвиль
В огинання перешкод, співмірних з довжиною хвилі
Г відбивання від перешкод
Д проникнення через перешкоди

10. Плоскополяризованим називають світло, якщо коливання вектора...

- А \vec{E} відбуваються в одній площині
Б \vec{E} змінюються по колу
В \vec{E} відбуваються в різних площинах
Г \vec{E} відбуваються в різних площинах
Д \vec{E} і \vec{B} відбуваються в різних площинах

11. Визначте порядок максимуму інтерференційної картини, що її дає дифракційна ґратка періодом 0,02 мм, якщо кут заломлення — 0,06, а довжина хвилі — $6 \cdot 10^{-7}$ м.

- А 1 Б 0 В 2 Г 3 Д 20

12. Визначте фокусну відстань лінзи, якщо її оптична сила 10 дптр.

- А 0,1 см Б 10 см В 1 м Г 0,01 м Д 0,15 м



Розділ 3

КВАНТОВА ФІЗИКА

Ми живемо в дивному світі, у якому відбуваються різноманітні явища і процеси, які супроводжуються випромінюванням і поглинанням світла. За допомогою приладів отримуємо різноманітні спектри, на основі яких можемо визначити склад речовини планет, зірок тощо. Явище фотоефекту ми можемо використувати у практичних цілях, що підтверджує швидке впровадження сонячних батарей у промисловості та побуті. Завдяки атомній фізиці ми отримуємо електричну енергію, яка вкрай потрібна для розвитку сучасних технологій.

Фізичну сутність таких явищ і процесів ми розглянемо в цьому розділі.

156

§ 39. КВАНТОВІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА. ПОСТУЛАТИ БОРА

З 9-го класу ви знаєте, що англійський фізик Резерфорд у 1911 р. експериментально довів існування в атомі позитивно зарядженого ядра. Учений припустив, що атом складається із центрального ядра, у якому зосереджена майже вся маса атома і весь його позитивний заряд. Навколо ядра, як планети навколо Сонця, рухаються окремі електрони. Число електронів у кожному атомі таке, що їхній сумарний негативний заряд дорівнює позитивному заряду ядра, тому в цілому атом нейтральний. Ця модель будови атома отримала назву **планетарна**.

Дослід Резерфорда, звичайно, нічого не говорив про рух електронів. Але оскільки статична модель атома, що складається з позитивного ядра і електронів, неможлива (електрони притягнуться до позитивного ядра!), фізик припустив, що електрони рухаються навколо ядра.

Подальше вивчення планетарної моделі атома Резерфорда показало, що в рамках класичної фізики вона суперечить ряду відомих експериментальних фактів.

Перша суперечність полягає в тому, що, згідно з теорією Максвелла, будь-який електричний заряд, що рухається прискорено, повинен безперервно випромінювати електромагнітні хвилі. Електрони, які обертаються навколо ядра, рухаються із доцентровим прискоренням і, отже, повинні безперервно випромінювати електромагнітні хвилі у той час, як у нормального стані атоми не випромінюють.

Другою суперечністю є те, що повсякденний досвід свідчить про стійкість атомів. Проте внаслідок випромінювання електромагнітних хвиль енергія електронів має безперервно зменшуватися, вони повинні наближатися до ядра і врешті-решт «впасти» на нього. Розрахунки показують, що

процес «падіння» електронів на ядро має завершитися за 10^{-8} с. Таким чином, факт тривалого існування атомів несумісний з планетарною моделлю атома Резерфорда, якщо її розглядати з позиції класичної електродинаміки.

Ці суперечності свідчать про те, що класична електродинаміка і механіка Ньютона непридатні для пояснення явищ в атомі.

Тому видатний датський фізик **Нільс Бор** (1885–1962) у 1913 р. запропонував новий підхід до пояснення випромінювання світла атомами, який засновано на квантових уявленнях **Макса Планка** (1858–1947).

Бор залишив планетарну модель, але доповнив її положеннями, які, хоча й суперечать класичній електродинаміці Максвелла, проте відповідають дослідним даним. Ці положення назвали **постулатами Бора**, їх можна сформулювати так.

1. Атоми, незважаючи на те, що електрони в них рухаються з прискоренням, можуть тривалий час міститися в станах, у яких вони не випромінюють.

Ці стани отримали назву **стаціонарний, або дозволений, стан**.

У кожному із стаціонарних станів атом може мати тільки строго певну енергію: E_1, E_2, E_3, \dots

Цим енергіям відповідають, як виявилось, стаціонарні, або дозволени, орбіти електронів, радіуси яких відносяться як квадрати натуральних чисел: $R_1 : R_2 : R_3 : \dots = 1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots$

2. Атом може переходити з одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан. Під час переходу атома з m -го стаціонарного стану з більшою енергією в n -й стан з меншою енергією атом випромінює. Частота випромінювання визначається формулою:

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h},$$

де h — стала Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,136 \cdot 10^{-15}$ еВ·с.

Для переходу атома зі стаціонарного стану з меншою енергією в стаціонарний стан з більшою енергією атому потрібно передати порцію (квант) енергії: $E = E_m - E_n = h\nu$.

Стан атома, якому відповідає найменша енергія E_1 , називають основним станом, а стани, яким відповідають вищі енергії (E_2, E_3, \dots), — збудженими.

Існування в атомі стаціонарних станів з різними енергіями отримало блискуче експериментальне підтвердження у 1913 р. у дослідях, які провели **Джеймс Франк** (1882–1964) і **Геріх Герц** (1857–1894).

Якщо постулати Бора справджуються, то при зіткненні з електроном атом повинен забирати енергію не від будь-яких електронів, а лише від тих, які в момент зіткнення мають кінетичну енергію, що дорівнює різниці енергій

атома в двох його стаціонарних станах: $\frac{m_e v^2}{2} = E_m - E_n$.

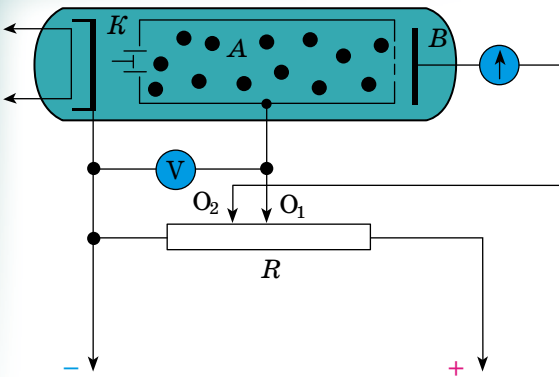
У цьому випадку зіткнення атома з електроном буде непружним. Зіткнення атома з електронами, енергія яких менша за $E_m - E_n$, повинно відбуватися без передачі енергії атому (пружне зіткнення).

Якщо постулати Бора не справджуються, то зіткнення атома з електронами завжди має супроводжуватися передачею енергії.

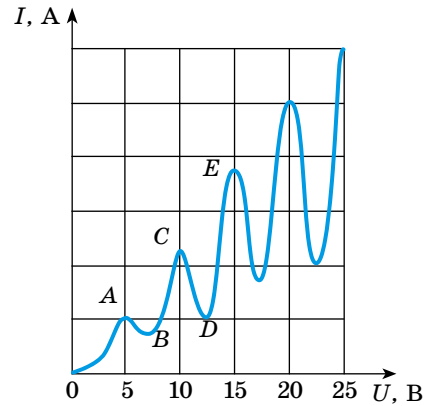
У своїх дослідях Франк і Герц «обстрілювали» електронами атоми ртуті. Для цього з посудини, у якій була крапелька ртуті (мал. 3.1), ретельно



Джеймс Франк



Мал. 3.1



Мал. 3.2

відкачували повітря. Простір усередині трубки було заповнено в основному розрідженою паровою ртуті. Джерелом електронів слугував підігрівний катод K . Прискорюючу напругу U підводили до ділянки катод K — циліндр A , що є в цьому випадку анодом. Прискорюючу напругу можна було регулювати за допомогою потенціометра R . Набута електронном в

158

прискорюючому полі кінетична енергія дорівнює роботі поля: $\frac{m_e v^2}{2} = eU$.

Усередині циліндра електричного поля немає, і електрони, що влітають у нього, рухаються за інерцією зі сталою швидкістю, але можуть стикатися з атомами ртуті.

Оскільки циліндр має досить велику довжину, то електрон під час руху в ньому неодмінно зазнає принаймні одного зіткнення з атомом. Для того щоб встановити, якими є зіткнення електронів з атомами — пружними або непружними, Франк і Герц застосували експериментальний метод, що отримав назву **метод гальмівного поля**.

Ідея цього методу полягає в такому. Якщо на електрод B , що міститься за циліндром зіткнень (мал. 3.1), названий колектором, подати невеликий (близько 0,5 В) негативний потенціал щодо циліндра, то електричне поле між циліндром зіткнень і колектором гальмуватиме рух електронів, які вилітають із циліндра. Подолати це гальмівне поле і досягти колектора можуть тільки ті електрони, кінетична енергія яких більша за 0,5 еВ.

Під час дослідів виявилось, що при плавному збільшенні напруги між катодом і циліндром сила струму в колі колектора, вимірювана мікроамперметром, змінюється так, як показано на графіку (мал. 3.2).

Спочатку зі зростанням прискорюючої напруги сила струму збільшується (ділянка OA). Це означає, що зіткнення електронів з атомами ртуті відбуваються без передачі енергії (пружні зіткнення) і електрони, які вилітають із циліндра, долають гальмівне електричне поле на ділянці циліндр–колектор. Проте при прискорюючій напрузі 4,9 В (точка A на графіку) сила струму в колі колектора різко зменшується.

Про що свідчить цей факт? При кінетичній енергії, яка сягнула значення 4,9 еВ, зіткнення електронів з атомами ртуті набули непружного характеру і атоми, забравши в електронів їхню кінетичну енергію, перейшли в новий стаціонарний стан. Електрони, що віддали повністю свою кінетичну енергію, дифундують із циліндра, але не можуть подолати гальмівне електричне поле і врешті-решт осідають на циліндр.

При подальшому збільшенні напруги між катодом і циліндром сила струму в колі колектора знову зростає. Це означає, що при енергіях, більших за 4,9 еВ, електрони, зазнавши непружних зіткнень з атомами і віддавши їм частину своєї енергії, зберігають ще достатню енергію для подолання гальмівного поля між циліндром і колектором. Наприклад, при напрузі між катодом і циліндром 6 В електрон, що влітає в циліндр, має енергію 6 еВ. Зіткнувшись з атомом ртуті, електрон віддасть атому 4,9 еВ і буде мати енергію $6 \text{ еВ} - 4,9 \text{ еВ} = 1,1 \text{ еВ}$, якої досить для подолання гальмівного поля. Тому при напругах між катодом і циліндром, більших за $4,9 \text{ В} + 0,5 \text{ В} = 5,4 \text{ В}$, сила струму в колі колектора знову зростає (ділянка BC).

Проте при напрузі 9,8 В знову спостерігається різке зменшення сили струму в колі колектора (ділянка CD). Це спричинене тим, що за такої напруги кожен з електронів зазнає по два зіткнення з атомами і, віддавши кожному атому по 4,9 еВ, не може подолати гальмівне поле між циліндром і колектором.

При напругах, більших за 9,8 В, сила струму в колі колектора знову почне зростати (ділянка DE). Проте при напрузі 14,7 В знову спостерігатиметься зменшення сили струму в колі колектора. Це відбувається тому, що при енергії 14,7 еВ більшість електронів зазнають послідовного зіткнення з трьома атомами і, віддавши кожному по 4,9 еВ, не можуть подолати гальмівне поле.

Результати дослідів Франка і Герца підтверджують, що атоми ртуті мають стаціонарні стани і різниця енергій між двома першими енергетичними станами дорівнює 4,9 еВ: $E_2 - E_1 = 4,9 \text{ еВ}$.

Експериментально було виявлено стаціонарні стани і в атомів інших елементів, а також виміряно різниці енергій між сусідніми станами. Так, виявилось, що для Калію $E_2 - E_1 = 1,63 \text{ еВ}$, для Натрію — $E_2 - E_1 = 2,12 \text{ еВ}$, для Гелію $E_2 - E_1 = 21 \text{ еВ}$.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Укажіть основні суперечності моделі атома Резерфорда з положеннями класичної фізики.
2. Сформулюйте постулати Бора і поясніть, для чого їх було введено.
3. Намалуйте схему і поясніть хід та результати досліду Франка і Герца.

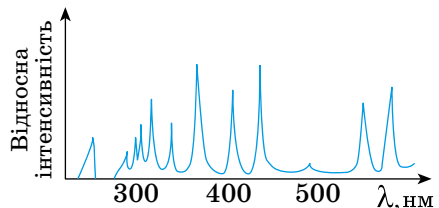
§ 40. ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА АТОМАМИ. СПЕКТРИ. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Кольори фізичних тіл, що нас оточують, визначаються поглинанням і відбиванням певних частин спектра атомами цих тіл.

Численні дослідження довели, що внаслідок нагрівання до високої температури пара будь-якої хімічної речовини випромінює світло, вузький пучок якого розкладається призмою на кілька пучків/ліній (мал. 3.3).

Сукупність цих спостережуваних ліній називають **лінійчастим спектром випускання**. Зазначимо, що лінійчастий спектр випускання будь-якого конкретного хімічного елемента не збігається зі спектром випускання інших хімічних елементів і, відповідно, є «візитною картою» елемента.

Відбувається і зворотне явище: у випадку пропускання білого світла через



Мал. 3.3

пару речовини спостерігається виникнення темних ліній на тлі суцільного спектра. Темні лінії розташовані точно в тих місцях, де спостерігалися б світлі лінії спектра випускання цього хімічного елемента. Такий спектр називають **лінійчастим спектром поглинання**.

Спектри молекулярних газів відрізняються від атомних спектрів і мають вигляд системи смуг із численних і дуже близьких одна до одної ліній. Така спектральна картина пояснюється двома причинами: коливаннями атомів усередині молекули та обертанням молекули.

Енергія коливального руху молекули також підпорядковується законам квантової фізики й має дискретний ряд значень. Таким чином, один електронний енергетичний рівень розбивається на безліч коливальних підрівнів. Окрім коливань окремих частин молекули, може відбуватися обертання молекули як цілого.

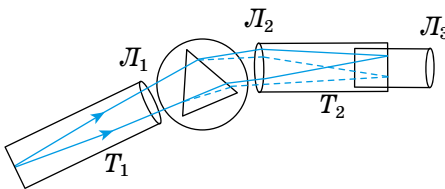
У результаті електронні та коливальні рівні енергії молекули розбиваються на множину обертальних підрівнів. Кількість можливих переходів різко збільшується, що на практиці зумовлює виникнення величезної кількості ліній спектра, які зливаються в широкі смуги.

Уже зазначалося, що вимірювання спектрального випромінювання одноелементних газів дає змогу ідентифікувати склад цих газів. Якщо порівняти інтенсивність цього вимірювання зі стандартом, то за відносним рівнем випромінювання можна визначити не тільки склад, але й концентрацію елемента. Прилади, що забезпечують такі вимірювання, називають **спектроскопами і спектрометрами**.

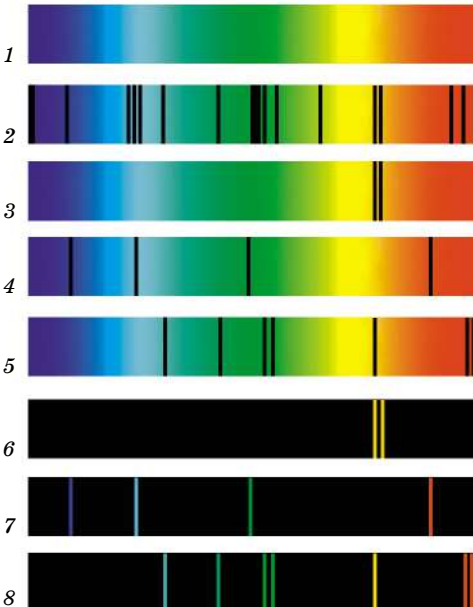
Схему призматичного спектроскопа показано на малюнку 3.4. Він складається з труби коліматора T_1 , трикутної призми і зорової труби T_2 . Досліджуване світло, пройшовши через щілину і лінзу L_1 труби коліматора, падає на призму, у якій відбувається спектральне розкладання світла. Лінза L_2 зорової труби T_2 дає зображення спектра, яке розглядається через лінзу L_3 як через лупу. У спектрографах спектр фотографується на кольорову або високочутливу чорно-білу плівку. Для цього фотоапарат встановлюється на місце ока спостерігача.

Поставимо перед щілиною спектроскопа електричну лампу розжарення і за допомогою нього вивчатимемо випромінюване лампою світло. При незначній силі струму нитка лампи має червоний колір. У цей момент спектр випромінюваного нею світла є смужкою червоного кольору. Поступово збільшуючи силу струму, який проходить через нитку лампи, зазначаємо, що в спектрі її світла з'являється спочатку оранжева, потім жовта, блакитна, синя і фіолетова частини (мал. 3.5, 1).

Під час фотографування спектра за допомогою спеціальних фотоапа-



Мал. 3.4



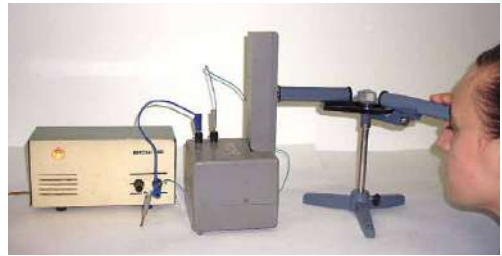
Мал. 3.5

ратів на фотоплівках було виявлено, що перед областю червоного світла і за областю фіолетового світла є невидимі області спектра, що отримали відповідні назву інфрачервоної і ультрафіолетової областей.

Вивчення цих областей спектра, які не сприймає око, показало, що ультрафіолетовій області відповідають довжини хвиль у діапазоні від 1 до 380 нм, а інфрачервоної області — довжини хвиль у діапазоні від 760 нм до 1 мм. Враховуючи, що видима частина спектра лежить у межах від 380 до 760 нм, доходимо висновку, що для світла, яке випромінюється сильно нагрітим тілом, довжини хвиль лежать в інтервалі від 1 нм до 1 мм. Істотно, що в цьому інтервалі немає незайнятих проміжків, тобто спектр цього випромінювання є суцільним.



Мал. 3.6



Мал. 3.7

Помістимо перед щілиною спектроскопа трубку, наповнену воднем при низькому тиску (мал. 3.6). Під час під'єднання трубки до джерела високої напруги в ній відбувається електричний розряд, і з трубки випромінюється червоноувате світло. Спектр цього світла складається з кількох світлих ліній на темному тлі (мал. 3.5, 7). Такий спектр отримав назву **лінійчастий спектр випромінювання**.

Поставивши між щілиною спектроскопа і лампою розжарювання трубку, заповнену воднем (мал. 3.7), на тлі суцільного спектра випускання нитки лампи розжарювання ми виявимо в червоній його частині кілька темних (чорних) ліній (мал. 3.5, 4). Такі спектри отримали назву **лінійчасті спектри поглинання**, а темні лінії — **лінії поглинання**. Спектри поглинання перший спостерігав **Густав Кірхгоф** (1824–1887).

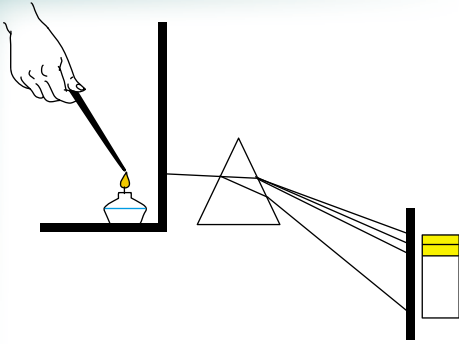
Лінійчасті спектри утворюються, якщо світло випускається або поглинається речовиною в газуватому атомарному стані. Положення темних ліній у спектрі поглинання речовини за даної температури точно збігаються з положеннями світлих ліній у спектрі випускання цієї самої речовини за тієї самої температури. Інакше кажучи, **речовина в атомарному газуватому стані за даної температури випускає і поглинає хвилі однакових частот (правило Кірхгофа)**.

Існують ще **смугасті спектри**, які складаються з окремих смуг, розділених темними проміжками. За допомогою дуже досконалого спектрального апарата можна виявити, що кожна смуга — це сукупність великої кількості щільно розміщених ліній. На відміну від лінійчастих спектрів, смугасті спектри утворюються не атомами, а молекулами, що слабо зв'язані або не зв'язані між собою.

Склад речовини може бути визначено за спектром випускання (емісійний метод) або за спектром поглинання (метод абсорбції).

Якщо в затемненому приміщенні перед щілиною спектроскопа поставити спиртівку, що горить, то побачимо суцільний спектр дуже малої яскравості. Джерелом світла, що зумовлює цей суцільний спектр, є розжарені тверді частинки в полум'ї.

Внесемо в полум'я спиртівки кристалик кухонної солі (NaCl). Зазначимо, що полум'я стане інтенсивного жовтого кольору, а в його спектрі



Мал. 3.8

з'являються дві дуже близько розміщені яскраві жовті лінії, що містяться в жовтій частині спектра (мал. 3.8). Те саме можна спостерігати, якщо замість кухонної солі внести до полум'я спиртівки кристалик глауберової солі (Na_2SO_4), йодиду натрію (NaI), сульфїду натрію (Na_2S) або карбонату натрію (Na_2CO_3). Будь-яка сіль натрію, введена в полум'я спиртівки, робить його жовтого кольору, у жовтій частині спектра з'являються дві яскраві, близько розташовані жовті лінії. Інакше кажучи, харак-

терною межею натрію є те, що його розжарена пара дає спектр, у якому завжди присутні дві яскраві лінії в жовтій частині спектра.

Якщо через пари натрію, які містяться в скляній трубці, пропустити електричний струм, то ця пара світлитиметься жовтим кольором. У спектрі цього випромінювання також будуть присутні вказані вище дві жовті лінії. У 1860 р. німецькі вчені Густав Кірхгоф і Роберт Бунзен (1811–1899), вивчаючи спектри металів, встановили, що кожен метал у пароподібному стані має свій характерний лінійчастий спектр. Введення в полум'я пальника будь-якої солі того самого металу завжди приводить до появи однакового лінійчастого спектра випускання.

162

Окремі лінії у спектрах різних елементів можуть випадково збігатися, але в цілому спектр кожного елемента є його постійною і строго індивідуальною характеристикою.

З'ясувалося, що коли вносять до полум'я суміш солей різних металів, у спектрі одночасно з'являються всі характерні для цих металів лінії. Яскравість спектральних ліній залежить від концентрації елемента в суміші речовин.

Так було відкрито новий метод визначення хімічного складу речовини — **спектральний аналіз**.

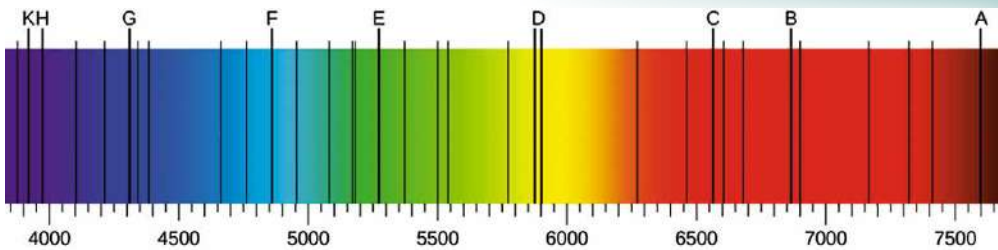
Спектральним аналізом називають метод визначення хімічного складу складних речовин, що ґрунтується на вивченні лінійчастих спектрів цих речовин.

Виявлення в спектрі досліджуваного зразка нових, незнайомих ліній означало, що у зразку присутні домішки невідомих у той час елементів. За допомогою спектрального аналізу було відкрито спочатку Рубідій і Цезій, а потім Талій, Індій, Галій. Усього методом спектрального аналізу було відкрито 24 хімічних елементи.

Йозеф
Фраунгофер

Якщо сфотографувати спектр сонячного світла, отриманий за допомогою якісного спектроскопа, то на знімку будуть спостерігатися чіткі лінії поглинання (мал. 3.9). Уперше ці лінії описав німецький фізик **Йозеф Фраунгофер** (1787–1826), тому вони отримали назву — **лінії Фраунгофера**. Поява цих ліній пов'язана з проходженням сонячного світла через атмосферу Сонця і частково з проходженням через атмосферу Землі. Таким чином, лінії Фраунгофера — це **спектр поглинання**.

Зіставляючи лінії Фраунгофера з лініями випромінювання різними елементами, можна встановити, які елементи входять до складу атмосфери Сонця. Зокрема, цим методом було вперше виявлено в атмосфері Сонця елемент Гелій. Пізніше Гелій виявили і на Землі.



Мал. 3.9

Спектральний аналіз за спектрами поглинання використовують коли вивчають хімічний склад речовин. Для проведення спектрального аналізу абсорбції досліджувану речовину спалюють у полум'ї, світло від якого прямує в спектроскоп або спектрограф. Одночасно через полум'я пропускають світло від еталонної спектральної трубки. Якщо в спектрі з'являються лінії поглинання, то це свідчить про речовину, що міститься в спектральній трубці досліджуваної речовини.

Спектральний аналіз має над хімічним аналізом такі переваги: висока чутливість, швидкість, простота визначення і невелика маса речовини, потрібної для його проведення.

Чутливість спектрального аналізу дуже висока: з його допомогою можна виявити елемент, домішка якого в речовині становить усього одну мільйонну частку відсотка. За сприятливих умов вдається виявити речовину, яка міститься в пробі масою 10^{-6} г.

Швидкість спектрального аналізу значно більша за швидкість хімічного аналізу. Тому спектральний аналіз застосовують як експрес-аналіз у металургії, у криміналістиці. Для проведення спектрального аналізу потрібно кілька десятків мікрограмів речовини. Величезне значення спектрального аналізу полягає в тому, що його можна провести, не вступаючи в безпосередній контакт з досліджуваною речовиною: у спектральному аналізі досить проаналізувати світло, яке досліджувана речовина випускає або поглинає.

Спектральний аналіз є найважливішим джерелом інформації про більшість космічних об'єктів. За допомогою цього методу можна встановити якісний і кількісний хімічний склад світила, його температуру, наявність магнітного поля, швидкість руху тощо.

163



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняється молекулярний спектр від атомного?
2. Накресліть схему спектроскопа і поясніть принцип його роботи.
3. Як можна отримати суцільний і лінійчастий спектри?
4. Який спектр називають смугастим?
5. Сформулюйте правило Кірхгофа.
6. Назвіть основні переваги спектрального аналізу над хімічним.



Розкрийте роль спектрального аналізу в астрономічних дослідженнях.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Атом випромінює фотон. Чи змінилася від цього швидкість атома?

Розв'язання

Відповідь. Змінилась на $\frac{h\nu}{mc}$, де m — маса атома; ν — частота кванта,

як наслідок закону збереження імпульсу.

2. З'ясуйте, який спектр і чому виникне в газі при рекомбінаціях позитивних йонів з вільними електронами.

Відповідь. Суцільний. Не зв'язані з атомом електрони до рекомбінації можуть мати будь-яку кінетичну енергію. Рекомбінуючи, вони випромінюють фотони найрізноманітніших енергій — суцільний спектр.

3. Спектр рентгенівського випромінювання за будь-яких напруг у короткохвильовій частині різко обривається. Поясніть цю особливість.

Розв'язання

Коли електрон всю свою кінетичну енергію витрачає на випромінювання, то $\frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda_m}$, де λ_m — короткохвильова межа спектра. У деяких електронів їхня енергія переходить у внутрішню енергію анода та інші види. Ці електрони стають джерелом рентгенівського випромінювання з довжинами хвиль $\lambda > \lambda_m$.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

3.1. Які фізичні явища свідчать про складну будову атома?

3.2. Що називають енергією іонізації атома?

3.3. Під час переходу атома Гідрогену з одного енергетичного стану в інший він випустив фотон з довжиною хвилі 490 нм. На скільки зменшилась енергія атома?

3.4. Переходячи з деякого стану збудження в інший збуджений стан, атоми Гідрогену випромінюють фотони з енергією 1,89 еВ. Яка довжина хвилі цього випромінювання? Яким кольором світиться водень?

3.5. Атом Гідрогену перебуває у стаціонарному стані з порядковим номером $n = 3$. Скільки фотонів з різними енергіями може випустити цей атом при переході в основний стан?

3.6. Унаслідок електричного розряду в розрідженому водні один з його атомів перейшов з основного стану в збуджений так, що порядковий номер стаціонарного стану змінився з $n = 1$ на $n = 4$. Надалі атом повернувся із цього стану в основний, випустивши послідовно 3 фотони. Що можна сказати про енергію, яку поглинув атом, та енергію фотонів, які він випромінював?

3.7. Чому, проводячи спектральний аналіз, досліджувану речовину вміщують у полум'я газового пальника або вводять в електричну дугу?

3.8. Який спектр випромінювання електричної лампи розжарювання? З яких променів складається це проміння? Чи є у спектрі електричної лампи розжарювання ультрафіолетова частина?

3.9. Інертний газ гелій уперше було виявлено не в земних умовах, а на Сонці, звідки й походить його назва (від грец. ἥλιος — «Сонце»). Поясніть, як могло відбутися таке відкриття.

3.10. Визначте кінетичну енергію електрона, що досяг анода рентгенівської трубки, яка працює під напругою 50 кВ.

3.11. Електрони, що досягли анода рентгенівської трубки, мають швидкість $1 \cdot 10^8$ м/с. Під якою напругою працює трубка?

3.12. Коли крізь йонізовані шари атмосфери проходять супутники чи космічні кораблі, то вони стають джерелами рентгенівського випромінювання. Як це пояснити?

Рівень Б

3.13. На яких експериментальних даних ґрунтувалися постулати Бора?

3.14. Атом Гідрогену внаслідок переходу зі стаціонарного стану з енер-

гією $E_4 = -0,85$ еВ у стаціонарний стан з енергією $E_2 = -3,38$ еВ випромінює фотон. Визначте довжину хвилі фотона.

3.15. Для йонізації атома Нітрогену потрібна енергія 14,5 еВ. Визначте довжину хвилі випромінювання, яке може спричинити йонізацію.

3.16. Газовий лазер, робочим тілом якого є суміш гелію і неону, випромінює світловий пучок потужністю 50 мВт. На якій довжині хвилі працює лазер, якщо впродовж 1 хв він випромінює $9,5 \cdot 10^{18}$ фотонів?

3.17. За допомогою спектроскопа отримали суцільний спектр. Що можна за цим спектром визначити: 1) хімічний склад речовини; 2) агрегатний стан речовини; 3) температуру речовини?

3.18. Яким способом можна встановити, солі яких металів присутні у воді в невеликих кількостях?

3.19. Які спектральні лінії з'являються під час збудження атомарного Гідрогену електронами з енергією 14 еВ?

3.20. Чому розріджені гази поглинають випромінювання лише певних частот, які утворюють дискретний спектр, а випромінювання інших частот проходить через них, не зазнаючи поглинання?

3.21. Які фізичні та хімічні властивості речовини? Як їх можна встановити за допомогою спектрального аналізу?

Є над чим замислитися

3.22. Фотон з енергією 15,5 еВ вибив електрон з незбудженого атома водню. Яку швидкість матиме електрон далеко від ядра атома?

3.23. Визначте довжину хвилі фотонів, які спричиняють йонізацію атомів Гідрогену, якщо радіус електронної орбіти — 0,2 нм.

3.24. На дифракційну ґратку падає нормально пучок світла від газорозрядної трубки, заповненої атомарним Гідрогеном. Стала ґратки $5 \cdot 10^{-4}$ см. З якої орбіти повинен перейти електрон на другу орбіту, щоб спектральну лінію у спектрі 5-го порядку можна було спостерігати під кутом 41° ?

165

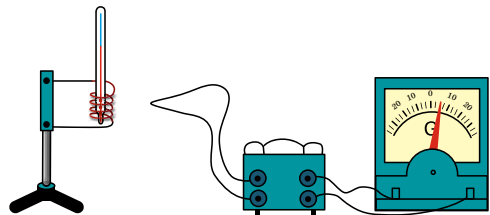
§ 41. РОЗВИТОК КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ. ГІПОТЕЗА ПЛАНКА

Явища, що відбуваються в макросвіті, вивчає класична фізика. У тих випадках, коли макроскопічні явища відбуваються з невеликими (порівняно зі швидкістю поширення світла) швидкостями, їх пояснює класична механіка Ньютона. Явища, що відбуваються зі швидкостями, які наближаються до швидкості поширення світла, вивчає теорія відносності. Квантова фізика, з якою ви починаєте ознайомлюватися, вивчає явища, що відбуваються в мікросвіті, які класична фізика пояснити не може.

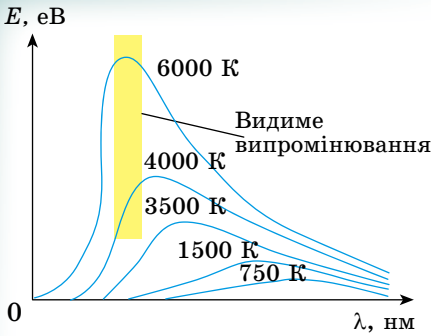
Виникнення квантової фізики пов'язане з ім'ям німецького фізика Макса Планка. Він досліджував випромінювання нагрітого тіла. Найважливіші результати своїх дослідів Планк опублікував наприкінці 1900-го р. Отже, виникнення квантової фізики датується XIX і XX ст.

Дослід. Під'єднаємо металеву спіраль до джерела регульованої напруги. Для вимірювання температури спіралі вставимо в неї термометр. Установивши низьку напругу, замкнемо коло. Спіраль трохи нагріється, але не світитиметься. Якщо недалеко від спіралі поставити термометр, приєднано до чутливого гальванометра (мал. 3.10), то прилад зафіксує наявність теплового випромінювання, що не сприймається нашим оком.

Збільшуючи напругу, що подається на спіраль, ми помітимо, що з під-



Мал. 3.10



Мал. 3.11

вищенням температури теплове випромінювання спіралі стає значнішим. За температури близько 500 °С спіраль почне випромінювати червоне («вишневе») світло. З підвищенням температури спіралі інтенсивність випромінювання буде зростати, а колір випромінюваного світла стане спочатку оранжевим, потім жовтим і, нарешті, звичайним білим.

Якщо в описаному досліді спостерігати за світлом, що випромінює спіраль, за допомогою спектроскопа, то спочатку побачимо лише червоний край спектра. Але потім послідовно почнуть з'являтися оранжева, жовта, зелена, блакитна,

синя і, нарешті, фіолетова області. Отже, з підвищенням температури підвищується інтенсивність теплового випромінювання, а в ньому спостерігаються випромінювання дедалі більших високих частот.

Тіло, нагріте до температури в кілька тисяч градусів, має суцільний спектр випромінювання, що займає область від невидимого інфрачервоного випромінювання до невидимого ультрафіолетового.

На малюнку 3.11 наведено експериментально одержані графіки розподілу енергії E в спектрі випромінювання вугільної спіралі за різних температур. На осі ординат відкладено значення енергії, що відповідають даній довжині хвилі, а на осі абсцис — довжини хвиль.

Визначений експериментально розподіл енергії випромінювання в спектрі потребував теоретичного пояснення. Зрозуміло, оскільки всі тіла складаються з атомів, то теплове, видиме та ультрафіолетове випромінювання обумовлюються потоком атомів. Але як? У класичній електродинаміці Максвелла відповідно до дослідів вважається, що заряд, який коливається, випромінює електромагнітні хвилі і втрачає енергію безперервно. Багаторазові намагання фізиків пояснити механізм випромінювання з позицій класичної фізики не мали успіху. Зазнав поразки і Планк. Аналізуючи причини своєї невдачі, він дійшов висновку, що закони випромінювання електромагнітних хвиль класичної фізики, засновані на теорії електромагнетизму Максвелла, непридатні для атомів.

Планк висловив припущення, що атоми випромінюють не безперервно, а порціями — квантами (від лат. *quantum* — «порція»), енергія яких пропорційна частоті коливань:

$$E = h\nu,$$

де E — енергія кванта; h — стала величина, що отримала згодом назву сталої Планка. Стала Планка в сучасній фізиці відіграє важливу роль; її значення визначене з високою точністю: $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Гіпотеза Планка про переривчастий характер випромінювання нагрітого тіла блискуче пояснила експериментально знайдену залежність випромінювання від довжини хвилі (частоти). Проте вона суперечить класичній фізиці. Сучасники Планка, та спочатку і сам Планк, сприйняли гіпотезу про переривчастий характер випромінювання як цікавий прийом, що дає змогу пояснити тільки закономірності теплового випромінювання. Проте значення гіпотези Планка виявилось незрівнянно більшим: воно знаменувало народження нової фізики — фізики мікросвіту.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Вивчіть графік випромінювання нагрітого тіла (мал. 3.11) і дайте відповіді на питання: а) як залежить спектральна густина енергії теплового

випромінювання $\left(\frac{E}{\lambda}\right)$ від температури; б) як залежить положення макси-

муму кривої розподілу енергії за довжинами хвиль від температури?

- У чому полягала гіпотеза Планка? Яка головна відмінність квантової теорії від класичної?
- Які явища підтверджують гіпотезу про кванти?

§ 42. ФОТОН. ЕНЕРГІЯ, МАСА, ІМПУЛЬС ФОТОНА. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

Важливість гіпотези Планка для подальшого розвитку фізики в 1900 р. не була очевидною навіть для видатних учених. Однак у 1905 р. Ейнштейн висунув гіпотезу про те, що електромагнітне випромінювання не тільки випускається порціями (квантами), а й поширюється і поглинається речовиною у вигляді окремих частинок електромагнітного поля — **фотонів**, які мають енергію $E = h\nu$.

Якщо Планк, висуваючи гіпотезу квантів, вважав, що квант потрібен лише як допоміжне поняття, то Ейнштейн побачив у кванті реально існуючу частинку електромагнітного поля — **фотон**.

Розглянемо основні властивості фотона. Фотон, як частинка електромагнітного поля, рухається зі швидкістю світла. Він існує тільки в русі. Зупинити фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Якщо фотон має енергію $E = h\nu$, то за законом пропорційності

маси і енергії він повинен мати і масу: $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$.

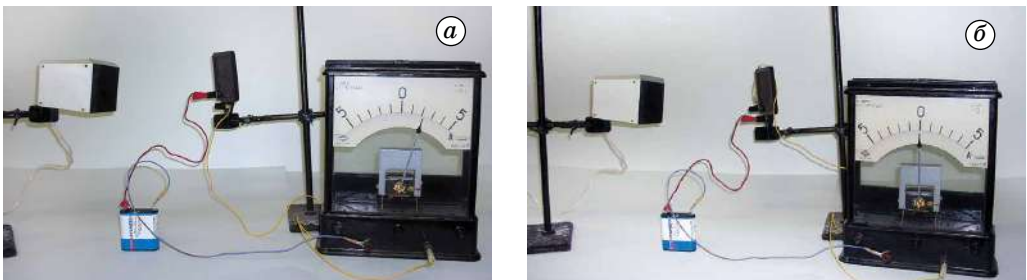
167

Оскільки фотон існує тільки в русі зі швидкістю поширення світла, то в нього немає маси спокою. У цьому полягає принципова відмінність фотона від звичайних частинок речовини. Якщо фотон рухається, то він повинен мати також імпульс: $p = mc$.

Наявність у фотона імпульсу підтверджується існуванням світлового тиску.

Ви вже знаєте, що під дією світла відбувається емісія електронів з речовини. Це явище отримало назву **фотоелектронної емісії**, або **фотоелектру**. Фотоелектр ефект відкрив у 1887 р. Генріх Герц.

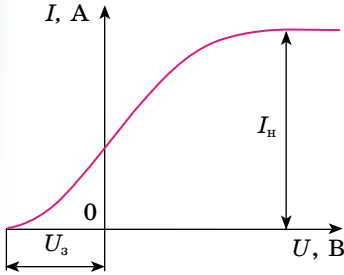
Дізнавшись про відкриття Герца, професор Московського університету **Олександр Столетов (1839–1896)** у 1888 р. почав вивчати це явище. На малюнку 3.12 зображено установку, яка демонструє, як учений досліджував явище фотоелектру. Перед ретельно очищеною цинковою пластинкою розміщували металеву сітку, через яку цинкову пластинку освітлювали світлом від електричної дуги. Якщо цинкову пластинку приєднували до негативного полюса джерела, то по колу проходив струм (мал. 3.12, а), який вимірювався гальванометром.



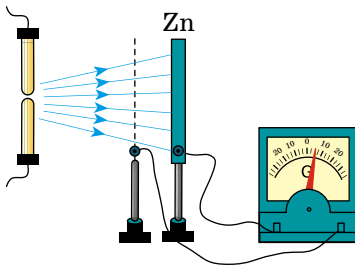
Мал. 3.12

Якщо цинкову пластинку приєднували до позитивного полюса джерела, то струму в колі не було (мал. 3.12, б). Отже, при фотоэффекті електрони покидають катод.

Струм, що виникає в колі, згодом отримав назву **фотострум**, а цинкова (або інша) пластинка, приєднана до негативного полюса джерела, — **фотокатод**. Столетов виявив, що фотон практично виникає одночасно з освітленням фотокатода.



Мал. 3.13



Мал. 3.14

досягає анода і за відсутності напруги між електродами. Для того щоб фотострум дорівнював нулю, потрібно прикласти деяку затримуючу негативну напругу — U_z (мал. 3.13). Вона повинна бути такою, щоб електрони, які мають при вильоті з катода навіть найбільшу швидкість v_{max} , не могли подолати затримуюче електричне поле і долетіти до анода. Між максимальною початковою швидкістю електронів, що вилітають під дією світла з катода, і затримуючою напругою існує таке співвідношення:

$$\frac{m_e v_{max}^2}{2} = eU_z,$$

де m_e — маса електрона. Отже, вимірявши затримуючу напругу U_z , можна визначити максимальне значення швидкості фотоелектронів:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2eU_z}{m_e}}.$$

Дослідження показали, що максимальна швидкість фотоелектронів залежить тільки від частоти світла, яким освітлюється фотокатод.

Таким чином, експериментально було встановлено такі закономірності фотоэффекту.

1. Для кожної речовини існує така гранична довжина хвилі, за якої фотоэффект ще можливий, але при опроміненні хвилями більшої довжини фотоэффект неможливий (червона межа фотоэффекту).

2. Число фотоелектронів, що вириваються з фотокатода за одиницю часу, пропорційне освітленості фотокатода.

Досліджуючи залежність фотоструму від прикладеної напруги, фізик установив, що фотострум не підкоряється закону Ома. На малюнку 3.13 зображено графік залежності фотоструму від напруги між електродами при незмінному освітленні пластинки. З графіка видно, що фотострум спочатку зростає, а потім, при порівняно невеликій напрузі, перестає збільшуватися. Максимальне значення фотоструму назвали — **фотострум насичення**. Столетов установив, що **фотострум насичення** (а отже, і число вирваних світлом фотоелектронів) прямо пропорційний освітленості цинкової пластинки (закон Столетова).

Учений виявив, що фотоэффект спостерігається тільки тоді, коли цинк опромінюється світлом, довжина хвилі якого менша за деяку граничну довжину хвилі. Ця мінімальна довжина хвилі пізніше отримала назву **червона межа фотоэффекту**.

Фотострум існує і тоді, коли в колі немає джерела (мал. 3.14). Це можна пояснити тим, що електрони покидають катод зі швидкістю, відмінною від нуля, частина з них

3. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою випромінювання і не залежить від освітленості фотокатода.

4. Фотоефект практично безінерційний.

Класична фізика не могла пояснити перерахованих вище закономірностей фотоефекту. Це пояснила квантова фізика.

Ейнштейн у 1905 р. довів, що всі закономірності фотоефекту легко пояснюються, якщо припустити, що світло поглинається речовиною такими самими порціями (квантами), якими воно випромінюється і поширюється. При поглинанні світла металом фотон передає цілком свою енергію одному електрону. Частина цієї енергії витрачається на те, щоб електрон міг покинути тіло, тобто на виконання роботи виходу A . Якщо електрон звільняється світлом не біля самої поверхні, а на деякій глибині, то частина енергії, яка дорівнює E' , може бути втрачена ним унаслідок випадкових зіткнень у речовині і піде на нагрівання речовини. Залишок енергії утворює кінетичну енергію E_k електрона, що покинув речовину. Енергія вильоту електрона буде максимальною, якщо електрон вибивається світлом з поверхні металу. Тоді $E' = 0$ і $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}$.

Це рівняння Ейнштейна для фотоефекту, яке дає змогу пояснити всі закони фотоефекту.

З нього випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а отже, і його максимальна початкова швидкість залежать від частоти світла ν і роботи виходу $A_{\text{вих}}$, але не залежать від інтенсивності світла:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m_e} (h\nu - A_{\text{вих}})}.$$

169

З рівняння Ейнштейна також випливає, що фотоефект можливий лише коли енергія фотона більша за роботу виходу. Енергії фотона повинно щонайменше вистачити на те, щоб відірвати електрон від металевої пластини: $h\nu \geq A_{\text{вих}}$.

Позначивши найменшу частоту світла ν_0 , за якої можливий фотоефект (червона межа фотоефекту), маємо $\nu_0 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$.

Червона межа фотоефекту залежить тільки від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи металу.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які властивості має фотон? Чи можна фотон зупинити?
2. Перерахуйте та поясніть основні закономірності фотоефекту.
3. Поясніть закономірності фотоефекту з позицій квантових уявлень.



Дослідіть, у яких галузях використовується явище фотоефекту.

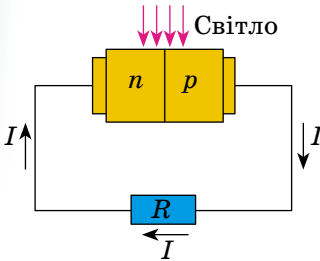
§ 43. ЗАСТОСУВАННЯ ФОТООФЕКТУ

Відкриття фотоефекту мало дуже велике значення для глибшого розуміння природи світла. Проте цінність науки не тільки в тому, що вона з'ясує складну та багатогранну будову довколишнього світу, а й у тому, що вона надає засоби, за допомогою яких можна вдосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального й культурного життя суспільства.

За допомогою фотоефекту «заговорило» кіно: можна передавати рухомі зображення. Застосування фотоелектронних приладів дало змогу створити верстати, які без участі людини виготовляють деталі за кресленнями.



Мал. 3.15



Мал. 3.16

Прилади, дія яких ґрунтується на фотоелектрі, контролюють розміри виробів краще від людини, вчасно вмикають і вимикають маяки, вуличне освітлення тощо.

Усе це стало можливим завдяки винайденню дуже досконалих пристроїв — фотоелементів, у яких світлова енергія керує енергією електричного струму або перетворюється в неї.

Вакуумний фотоелемент — це скляна колба, частину внутрішньої поверхні якої вкрито тонким шаром металу з малою роботою виходу (мал. 3.15), це катод. Через прозоре «віконце» світло проникає в колбу. У центрі колби є дратяна петля або диск — анод. Він призначений для вловлювання фотоелектронів і приєднаний до позитивного полюса батареї.

Фотоелементи здатні реагувати на видиме світло і навіть на інфрачервоне проміння. Якщо світло потрапляє на катод фотоелемента, то в колі виникає електричний струм, який вмикає або вимикає те чи інше реле. Комбінація фотоелемента і реле дає можливість кон-

струювати багато різних автоматів, що здатні «бачити». Наприклад, автомат у метро спрацьовує (висуває перегородку), коли людина перетинає світловий пучок, не опустивши монети або жетона чи не приклавши проїзної картки.

Подібні автомати можуть запобігати аварії. На заводі фотоелемент майже вмить зупиняє потужний прес, якщо рука людини потрапить у небезпечну зону.

За допомогою фотоелементів відтворюють записаний на кіноплівці звук.

Крім розглянутого фотоелемента, який називають зовнішнім фотоелементом, різноманітне застосування має внутрішній фотоелемент у напівпровідниках. Це явище використовують у фоторезисторах — приладах, опір яких залежить від освітленості. Крім того, є напівпровідникові фотоелементи, які створюють ЕРС і безпосередньо перетворюють світлову енергію в енергію електричного струму. ЕРС, яку в цьому випадку називають фотоЕРС, що виникає в ділянці p - n -переходу двох напівпровідників під час опромінення цієї ділянки світлом. Під впливом світла утворюються пари електрон-дірка. У ділянці p - n -переходу є електричне поле. Воно примушує неосновні носії напівпровідників переміщуватися через контакт. Дірки з напівпровідника n -типу переміщуються в напівпровідник p -типу, а електрони з напівпровідника p -типу — у ділянку p -типу, що створює накопичення основних носіїв у напівпровідниках n - і p -типів. Отже, потенціал напівпровідника p -типу збільшується, а n -типу зменшується. Це триває доти, доки струм неосновних носіїв через p - n -перехід зрівняється зі струмом основних носіїв через той самий перехід. У цей момент між напівпровідниками встановлюється різниця потенціалів, що дорівнює фотоЕРС.

Якщо коло замкнути зовнішнім навантаженням, то в колі проходить струм, який буде визначатися різницею струмів неосновних і основних носіїв через p - n -перехід (мал. 3.16). Сила струму залежить від інтенсивності падаючого світла й опору навантаження.

Фотоелементи з p - n -переходом створюють ЕРС близько 1–2 В. Їхня вихідна потужність сягає сотень ват при коефіцієнті корисної дії до 20%. Фотоелементи малої потужності використовують у фотоекспонетрах. Особливо широко їх застосовують при виготовленні сонячних батарей.

Сонячна батарея (панель) є фотоелектричним генератором, принцип роботи якого ґрунтується на фізичних властивостях напівпровідників.

Сьогодні існують три види сонячних батарей — тонкоплівкові, монокристалічні і полікристалічні сонячні панелі. Найпопулярнішими є монокристалічні сонячні батареї. Цей тип батарей складається з величезної кількості силіконових осередків, які перетворюють сонячні промені, що потрапляють на їхню поверхню, в електроенергію. Найоптимальнішою кількістю осередків у монокристалічних батареях вважається 36. Монокристалічні батареї досить легкі й компактні, здатні трохи згинатися. Завдяки цьому батареї не складно встановлювати на будь-яких нерівних поверхнях, щоб домогтися правильного кута нахилу.

Батареї з монокристалів (мал. 3.17) мають надійний і міцний склопластиковий корпус. Усередину такого корпусу не проникає волога, тому ці установки можна використовувати на кораблях далекого плавання. У цих батареях відсутні рухомі елементи, що робить їх більш надійними і довговічними. Монокристалічні сонячні батареї застосовують для зарядки акумуляторів, електроживлення для садових насосів, забезпечення живлення бортового обладнання кораблів, освітлення садових і присадибних ділянок, живлення сигналізації і засобів зв'язку тощо. У таких сонячних батареях максимальна потужність досягається, якщо небо буде ясным, температура повітря $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і панелі будуть спрямовані прямо на Сонце. Значно знизити потужність установки може навіть невелика хмарність (близько 70 %), а в разі сильної хмарності робота сонячної батареї майже блокувана (потужність знижується на 90 %). Щоб отримати оптимальну потужність, діапазон температур повітря має коливатися в межах $+15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для наших широт зміна сонячної енергії безпосередньо залежить від сезону. Аби не змінювати постійно напрямку панелей, рекомендується встановити їх у напрямку до екватора, відхилення має дорівнювати широті місцевості.

Тонкоплівкові сонячні батареї (мал. 3.18) — найдешевший варіант з усіх видів батарей. Їх можна встановлювати в будь-якому місці: на стіні будівлі, даху або земельній ділянці. На відміну від монокристалічних батарей, тонкоплівковим батареям не потрібні прямі сонячні промені. За потужністю вони також зручніші, тому що навіть за похмурої погоди вони втрачають потужність лише на 10–15 %. Єдиний мінус цих сонячних батарей — займана площа (практично в 2,5 рази більша, ніж в інших). Застосовуються вони в основному для більш великих систем електропостачання, рідко для побутових потреб.

Полікристалічні сонячні батареї (мал. 3.19) — також альтернативний варіант монокристалічних батарей. У них використано полікристалічний кремній, що має яскраво синій колір. Ці батареї застосовують для освітлення дворів, парків, вулиць, шосе, лікарень, кафе, шкіл, приватних будинків, засобів зв'язку, а також для енергопостачання газопроводів і нафтопроводів, зарядки акумуляторів.



Мал. 3.17



Мал. 3.18



Мал. 3.19

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Де застосовується явище фотоелектру?
2. Що таке фотоелемент? Яке його призначення?
3. Які види сонячних батарей ви знаєте? Як вони працюють?



Розробіть власний проект сучасного будинку, який забезпечується електроенергією за допомогою сонячних батарей, та презентуйте його класу.

**РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ**

Для вольфраму червона межа фотоелектру $2,75 \cdot 10^{-5}$ см. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму і швидкість вирваних фотоелектронів світлом, довжина хвилі якого $1,8 \cdot 10^5$ см.

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для червоної межі фотоелектру можна записати так:

$$h\nu_0 = A.$$

Звідси визначимо роботу виходу електрона з вольфраму: $A = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0}$.

Підставляючи значення величин, отримаємо $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Запишемо рівняння Ейнштейна для довжини хвилі $\lambda = 1,8 \cdot 10^7$ м:

$$h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } \frac{mv^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - A. \text{ Тоді } \frac{mv^2}{2} = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

Знаючи кінетичну енергію електрона, визначимо швидкість його вильоту:

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо:

$$v = 0,91 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Відповідь. $0,91 \cdot 10^6$ м/с.

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ****Рівень А**

3.25. Як і чому частота випромінювання впливає на фотоелектр?

3.26. Як і чому освітленість поверхні металу впливає на фотоелектр?

3.27. Довжина хвилі випромінювання, яка відповідає червоній межі фотоелектру для натрію, дорівнює 530 нм. Яка робота виходу електронів з натрію (результати подати в Дж і еВ)?

3.28. Робота виходу електронів з вольфраму дорівнює 4,5 еВ. Яка мінімальна частота електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоелектр під час опромінення ним поверхні вольфраму?

3.29. Яка максимальна довжина хвилі електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоелектр під час опромінення ним цинкової пластини? Робота виходу із цинку становить 4,2 еВ.

3.30. Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим ($\lambda = 0,75$ мкм) і найкоротшим ($\lambda = 0,4$ мкм) хвилям видимої частини спектра.

3.31. Який імпульс і яка довжина хвилі випромінювання, фотони якого мають масу $4 \cdot 10^{-36}$ кг?

3.32. Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію 50 кеВ. Яка довжина їхньої хвилі і яка їхня маса?

3.33. Які енергія та імпульс фотонів інфрачервоного випромінювання з частотою 30 ТГц?

Рівень Б

3.34. Поясніть, як відбувається фотосинтез і яку роль він відіграє у природі.

3.35. Визначте кінетичну енергію і швидкість фотоелектронів, що їх викидає з поверхні цинку ультрафіолетове випромінювання, яке має довжину хвилі 0,2 мкм.

3.36. Електрон вилітає із цезію, маючи кінетичну енергію 2 еВ. Яку максимальну довжину має хвиля світла, що спричиняє фотоэффект, коли робота виходу дорівнює 1,8 еВ?

3.37. Срібну пластину опромінюють ультрафіолетовим випромінюванням хвилі 200 нм. З якою максимальною швидкістю електрони залишають поверхню срібла? Робота виходу електронів дорівнює 4,3 еВ.

3.38. На фотоелемент із цезієвим фотокатодом падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 100 нм. Яку зворотну напругу слід подати на фотоелемент, щоб електричний струм крізь нього припинився?

3.39. Максимальна швидкість електронів, які вилітають з поверхні рубідію під час її освітлення ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 400 нм, дорівнює 880 км/с. Яка робота виходу електронів з рубідію?

Є над чим замислитися

3.40. На залізну кульку, віддалену від інших тіл, падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 200 нм. До якого максимального потенціалу заряджається кулька внаслідок тривалого опромінювання, якщо робота виходу електронів із заліза дорівнює 4,36 еВ?

3.41. Фотоэффект припиняється, якщо до фотоелемента прикласти зворотну напругу 2,4 В. З якою максимальною швидкістю досягатимуть електроди анода фотоелемента під час його прямого ввімкнення, якщо напруга на ньому становитиме 4,8 В?

3.42. За якої температури кінетична енергія поступального руху молекули Гідрогену дорівнює енергії фотона з довжиною хвилі 0,4 мкм?

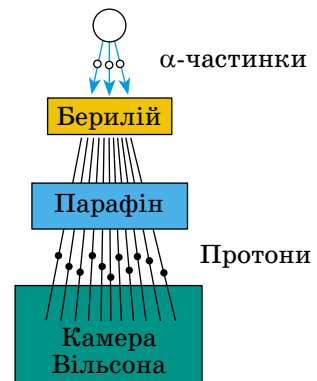
3.43. Фотони, частота яких дорівнює 500 ТГц, падають на дзеркальну поверхню. Кут падіння випромінювання становить 60°. Яка зміна імпульсу фотонів унаслідок зіткнення з поверхнею?

173

§ 44. АТОМНЕ ЯДРО. ЯДЕРНІ СИЛИ. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ АТОМНИХ ЯДЕР

У 1932 р. сталася дуже важлива для всієї ядерної фізики подія. Учень Резерфорда, англійський фізик **Джеймс Чедвік** (1891–1984), відкрив нову частинку — **нейтрон**. Під час бомбардування α -частинками берилію протони не виникали. Але було виявлено промені, які здатні проникати через свинцеву пластинку завтовшки 10–20 см. Учені припустили, що це γ -промені, які мають велику енергію.

Ірен Жоліо-Кюрі (1897–1956) та **Фредерік Жоліо-Кюрі** (1900–1958) виявили, що коли на шляху випромінювання берилію поставити парафінову пластинку, то йонізуюча здатність цього випромінювання різко зростає. Учені припустили, що випромінювання берилію викидає з парафінової пластинки протони, яких багато в парафіні — речовині, що містить водень. За допомогою камери Вільсона (схему досліду наведено на мал. 3.20) подружжя



Мал. 3.20

Жоліо-Кюрі виявило ці протони і за довжиною пробігу оцінило їхню енергію. Якщо припустити, що протони прискорювалися внаслідок зіткнень з γ -квантами, то енергія цих квантів має бути величезною — близько 55 МеВ.

Чедвік спостерігав у камері Вільсона треки ядер Нітрогену, що зазнавали зіткнень з випромінюванням берилію. За його оцінкою енергія γ -квантів, здатних надати ядрам швидкість, мала б дорівнювати 90 МеВ. Подібні спостереження в камері Вільсона треків ядер Аргону привели до висновку, що енергія зазначених гіпотетичних γ -квантів має бути 150 МеВ. Припускаючи, що ядра починають рухатися внаслідок зіткнень із частинками, які не мають маси спокою, дослідники помітили явні суперечності: одним і тим самим γ -квантам доводилося приписувати різну енергію.

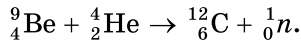


Ірен
Жоліо-Кюрі

Отже, припущення про випромінювання берилієм γ -квантів, які не мають маси спокою, не обґрунтоване. Під дією α -частинок з берилію вилітають якісь досить важкі частинки, бо лише від зіткнення з важкими частинками протони або ядра Нітрогену й Аргону могли набути такої величезної енергії, яка спостерігалася. Оскільки ці частинки мали велику проникну здатність і безпосередньо не йонізували газ, то, очевидно, вони були електрично нейтральні. Адже заряджена частинка сильно взаємодіє з речовиною і тому швидко втрачає свою енергію.

Нову частинку назвали **нейтроном**. Її існування передбачав Резерфорд більш ніж за 10 років до дослідів Чедвіка. За енергією та імпульсом ядер, що стикаються з нейтронами, визначили масу нейтрона. Виявилось, що вона трохи більша від маси протона — 1838,6 електронних мас проти 1836,1 для протона.

Через потрапляння α -частинок в ядра Берилію відбувається така реакція:



Заряд нейтрона дорівнює нулю, а відносна маса — приблизно одиниці.

Після відкриття нейтрона фізики **Дмитро Іваненко (1904–1994)** і **Вернер Гейзенберг (1901–1976)** у 1932 р. запропонували **протонно-нейтронну модель ядра**, згідно з якою ядра атомів складаються з елементарних частинки двох видів: **протонів і нейтронів**.

Кількість протонів в ядрі дорівнює кількості електронів в атомній оболонці, тому що в цілому атом нейтральний. Отже, кількість протонів у ядрі дорівнює атомному номеру елемента Z у Періодичній таблиці елементів **Д. І. Менделєєва**.

Масовим числом A називають суму числа протонів Z і числа нейтронів N у ядрі: $A = Z + N$.

Маси протона і нейтрона близькі між собою, і кожна з них приблизно дорівнює атомній одиниці маси. Маса електрона в атомі значно менша від маси ядра. Тому масове число ядра дорівнює округленій до цілого числа відносній атомній масі елемента. Масові числа можна визначити грубим вимірюванням мас ядер навіть не дуже точними приладами.

Ізотопи — це ядра з однаковим значенням Z , але з різними масовими числами A , тобто з різною кількістю нейтронів N .

Оскільки ядра досить стійкі, то протони і нейтрони мають триматися в ядрі якимись силами, причому дуже великими. *Що це за сили?* Завчасно можна сказати, що це не гравітаційні сили, які занадто слабкі. Стійкість ядра не можна пояснити також електромагнітними силами, тому що між односторонньо зарядженими протонами діє електричне відштовхування, а нейтрони не мають електричного заряду.

Отже, між ядерними частинками — протонами і нейтронами (нуклонами) — діють особливі сили — **ядерні сили**. Вони приблизно в 100 разів більші від електромагнітних та найпотужніші з усіх сил, що є в природі. Тому **взаємодія ядерних частинок** часто називають **сильною взаємодією**. Причому сильна взаємодія не зводиться лише до взаємодії нуклонів у ядрі. Це особливий вид взаємодії, властивий багатьом елементарним частинкам разом з електромагнітною взаємодією. Ядерні сили — короткодійчі. Електромагнітні сили порівняно повільно зменшуються з відстанню.

Дуже важливу роль в усій ядерній фізиці відіграє поняття — **енергія зв'язку ядра**. Під енергією зв'язку ядра розуміють ту енергію, яка потрібна для повного розщеплення ядра на окремі нуклони. Спираючись на закон збереження енергії, можна також стверджувати, що **енергія зв'язку дорівнює тій енергії, яка виділяється під час утворення ядра з окремих частинок**. Енергія зв'язку атомних ядер дуже велика. *Але як її визначити?*

Зробити відповідні розрахунки можна, лише застосувавши співвідношення Ейнштейна між масою і енергією: $E = mc^2$. Точні вимірювання мас ядер показують, що **маса спокою ядра $M_{\text{я}}$ завжди менша від суми мас спокою його протонів і нейтронів**:

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}}$$

Існує так званий дефект мас: $M = Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M_{\text{я}}$, різниця мас додатна. Зокрема, для Гелію маса ядра на 0,75 % менша від суми мас двох протонів і двох нейтронів. Отже, для одного моля Гелію $\Delta M = 0,03$ г. Зменшення маси під час утворення ядра із частинок означає, що при цьому зменшується енергія цієї системи частинок на значення енергії зв'язку $E_{\text{зв}}$:

$$E_{\text{зв}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M)c^2$$

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

Під час утворення ядра із частинок вони під дією ядерних сил на малих відстанях прямують одна до одної з величезним прискоренням.

Випромінювані при цьому γ -кванти мають енергію $E_{\text{зв}}$ і масу: $\Delta M = \frac{E_{\text{зв}}}{A^2}$.

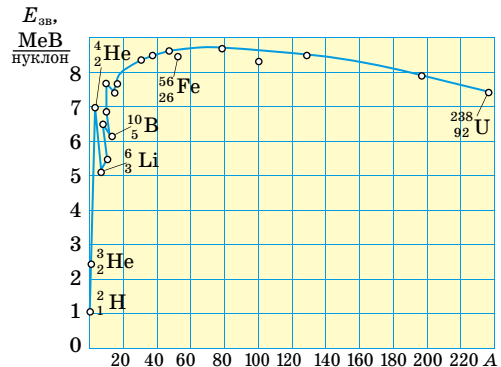
Про значення енергії зв'язку можна судити з такого прикладу: під час утворення 4 г гелію виділяється стільки само енергії, як від згоряння 1,5–2 вагонів кам'яного вугілля.

Важливу інформацію про властивості ядер дає експериментально виміряна залежність **питомої енергії зв'язку**, тобто енергії зв'язку, що припадає на один нуклон, від масового числа A .

З малюнка 3.21 добре видно, що якщо не брати до уваги найлегші ядра, то питома енергія зв'язку приблизно стала і дорівнює 8 МеВ/нуклон. Зазначимо, що енергія зв'язку електрона з ядром в атомі Гідрогену, яка

дорівнює енергії йонізації, майже в мільйон разів менша. Крива на малюнку 3.21 має слабо виявлений максимум. Максимальну питому енергію зв'язку (8,6 МеВ/нуклон) мають елементи з масовим числом від 50 до 60, тобто залізо і близькі до нього за порядковим номером елементи. Ядра цих елементів найстійкіші.

Зменшення питомої енергії зв'язку для легких елементів пояснюється поверхневими ефектами. Нуклони, які містяться на поверхні ядра, взаємодіють з меншою кількістю сусідів, ніж нуклони всередині ядра,



Мал. 3.21

оскільки ядерні сили короткодіючі. Тому енергія зв'язку нуклонів на поверхні менша, ніж у нуклонів усередині ядра. Що менше ядро, то більша частина загальної кількості нуклонів виявляється на поверхні. Через це енергія зв'язку в середньому на один нуклон менша в легких ядрах.

У важких ядер питома енергія зв'язку зменшується внаслідок зростання із збільшенням Z кулонівської енергії відштовхування протонів. Кулонівські сили намагаються розірвати ядро.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що дало поштовх для створення протонно-нейтронної моделі ядра атома? Хто з учених до цього причетний?
2. Що таке нуклон?
3. Що таке енергія зв'язку атомних ядер? Як вона визначається?
4. Розгляньте графік залежності питомої енергії зв'язку від масового числа (мал. 3.21). Укажіть елементи, які мають питому енергію зв'язку 5–8 МеВ/нуклон.

§ 45. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

Ви вже знаєте, що радіоактивність — це явище, яке свідчить про складну будову атомного ядра. Слід згадати, що рентгенівські промені вперше було одержано внаслідок зіткнення швидких електронів з антикатодом розрядної трубки. **Анрі Беккерель (1852–1908)** довго досліджував споріднене явище — після свічення речовин, які перед тим були опромінені сонячним світлом. До таких речовин, зокрема, належать солі урану, з якими він експериментував.

А чи не виникають після опромінення солей урану разом з видимим світлом і рентгенівські промені?

Беккерель загорнув фотопластинку в цупкий чорний папір, зверху поклав шматочки уранової солі і виставив це на яскраве сонячне світло. Під час проявлення пластинка почорніла на тих місцях, де лежала сіль. Отже, уран випускає промені, які, подібно до рентгенівських, пронизують непрозорі тіла і діють на фотопластинку. Учений вважав, що таке випромінювання виникає під впливом сонячного світла. Однак у лютому 1896 р. Беккерелю не вдалося зробити черговий дослід, і він поклав пластинку, на якій лежав мідний хрест, вкритий сіллю урану, у ящик стола. Проявивши пластинку через два дні, він виявив на ній почорніння у вигляді виразної тіні хреста. Це означало, що солі урану спонтанно, без впливу зовнішніх чинників, утворюють якість проміння.

Незабаром Беккерель виявив, що промені уранової солі йонізують повітря так само, як і рентгенівські, і тому розряджають електроскоп.



Марія
Скłodовська-
Кюрі

Випробовуючи різні хімічні сполуки урану, він установив дуже важливий факт: інтенсивність випромінювання визначається лише кількістю урану в препараті і зовсім не залежить від того, до яких сполук він входить. Отже, це властивість не сполук, а хімічного елемента урану, його атомів.

У 1898 р. у Франції **Марія Скłodовська-Кюрі (1867–1934)** разом з колегами виявили випромінювання торію. Особливо плідною в пошуках нових елементів виявилася праця подружжя Марії і **П'єра Кюрі (1859–1906)**. Систематичне дослідження руд, що містять уран і торій, дало їм змогу виділити новий, ще невідомий хімічний елемент Полоній, названий так на честь батьківщини Марії Скłodовської-Кюрі — Польщі.

Згодом відкрили ще один елемент, якому властиве дуже інтенсивне випромінювання. Його назвали Радієм (тобто променистим). Саме явище спонтанного випромінювання подружжя Кюрі назвало **радіоактивністю**.

Після відкриття радіоактивних елементів почалося дослідження фізичної природи їхнього проміння. Над цим питанням почав працювати й Резерфорд.

Розглянемо дослід, який допоміг виявити склад радіоактивного випромінювання. Радіоактивний препарат вміщували на дно вузького каналу в шматку свинцю. Проти каналу розміщували фотопластинку. На проміння, яке виходило з каналу, діяли сильним магнітним полем (мал. 3.22), перпендикулярним до нього. Усю установку розміщували у вакуумі.

Якщо не було магнітного поля, то на проявленій пластинці виявляли одну тільки темну пляму, точно проти каналу. У магнітному полі пучок розпадався на три пучки.

Дві складові первинного потоку відхилялись у протилежні боки. Це переконливо вказувало на те, що вони мають електричні заряди протилежних знаків. При цьому негативну складову проміння магнітне поле відхиляло значно більше, ніж позитивну. Третю складову магнітне поле не відхиляло. Позитивно заряджена складова випромінювання отримала назву «альфа-випромінювання», негативно заряджена — «бета-випромінювання», а нейтральна — «гамма-випромінювання» (α -промені, β -промені, γ -промені).

Ці три види випромінювання дуже різняться між собою за проникною здатністю, тобто за тим, наскільки інтенсивно їх поглинають різні речовини. Найменшу проникну здатність мають α -промені. Шар паперу товщиною близько 0,1 мм для них уже непрозорий. Якщо отвір у свинцевій пластинці прикрити аркушиком паперу, то на фотопластинці не буде плями, що відповідає α -променям.

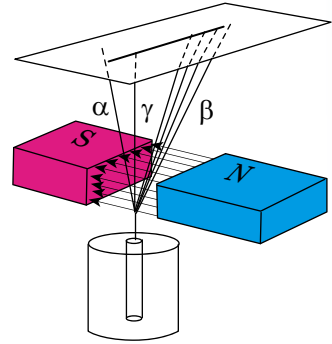
Значно менше поглинають речовини β -промені. Алюмінієва пластинка затримує їх цілком лише тоді, коли її товщина кілька міліметрів. Найбільшу проникну здатність мають γ -промені. Інтенсивність їх поглинання збільшується зі зростанням атомного номера речовини-поглинача. Але й шар свинцю завтовшки 1 см — не перешкода для цих променів. Від проходження крізь таку пластинку їхня інтенсивність зменшується лише вдвічі. Це пов'язано з тим, що фізична природа α -, β - і γ -променів різна.

Альберт Ейнштейн (1879–1955) і **Фредерік Содді** (1887–1956) встановили, що атомам деяких елементів властивий спонтанний розпад, який супроводжується випромінюванням величезної кількості енергії порівняно з енергією, яка вивільняється в процесі звичайних молекулярних видозмін.

Після того як було відкрито атомне ядро, відразу стало зрозуміло, що саме воно зазнає змін під час радіоактивних перетворень. Адже α -частинки узагалі немає в електронній оболонці, а зменшення кількості електронів оболонки на одиницю перетворює атом в йон, а не на новий хімічний елемент. Виліт електрона з ядра змінює заряд ядра (збільшує його) на одиницю.

Спонтанне перетворення одних ядер в інші, яке супроводжується випромінюванням різних частинок, отримало назву *радіоактивність*.

Перетворення ядер відбуваються за так званим правилом зміщення, яке вперше сформулював Содді:
під час α -розпаду ядро втрачає позитивний заряд $2e$, і маса його змен-



Мал. 3.22

шується приблизно на 4 о. а. м. Отже, елемент зміщується на 2 клітинки до початку Періодичної таблиці елементів Д. І. Менделєєва.

Символічно це можна записати так: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$.

У випадку β -розпаду з ядра вилітає електрон. Тому заряд ядра збільшується на одиницю, а маса залишається майже незмінною: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$.

Після β -розпаду елемент зміщується на одну клітинку ближче до кінця Періодичної таблиці елементів Д. І. Менделєєва.

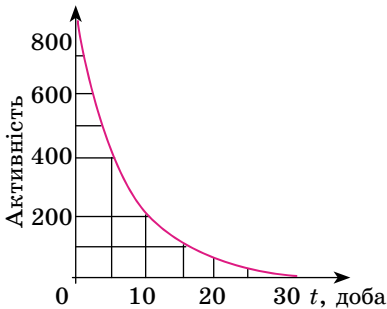
Під час γ -випромінювання не відбувається зміни заряду; маса ядра змінюється надзвичайно мало.

Правила зміщення показують, що під час радіоактивного розпаду зберігається електричний заряд і наближено зберігається відносна атомна маса ядер. Нові ядра, що утворюються під час радіоактивного розпаду, звичайно, також є радіоактивними.

Досліджуючи перетворення радіоактивних речовин, Резерфорд експериментально встановив, що їхня активність із часом зменшується. Так, активність радону зменшується в 2 рази вже через 1 хв. Активність таких елементів, як Уран, Торій і Радій, також із часом зменшується, але значно повільніше. Для кожної радіоактивної речовини є певний інтервал часу, протягом якого активність зменшується удвічі. Цей інтервал називають періодом піврозпаду.

Період піврозпаду T — це той час, за який розпадається половина всієї кількості наявних радіоактивних атомів.

178



Мал. 3.23

Адже зменшення активності препарату удвічі можна досягти простим поділом його на дві рівні частини.

Графік спаду активності, тобто кількості розпадів за секунду, залежно від часу для однієї з активних речовин наведено на малюнку 3.23, період піврозпаду цієї речовини — 5 діб.

Знайдемо тепер математичну формулу закону радіоактивного розпаду. Нехай кількість радіоактивних атомів у початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює N_0 . Тоді після закінчення періоду піврозпаду їхня кількість дорівнюватиме $N_0/2$, а ще через один такий інтервал часу їхня кількість

становитиме: $\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$. Через інтервал часу $t = nT$, тобто через n

періодів піврозпаду T , радіоактивних атомів залишиться $N = N_0 \frac{1}{2^n}$. Оскільки

якщо $n = \frac{t}{T}$, то $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$. Це і є основний закон радіоактивного розпаду.

За формулою $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ знаходять кількість атомів, які ще не розпалися, для будь-якого моменту часу.

Період піврозпаду — основна величина, що характеризує швидкість радіоактивного розпаду. Що менший період піврозпаду, то менший час життя атомів і швидше відбувається розпад. Для різних речовин значення його дуже різняться. Так, для урану ${}^{239}_{92}\text{U}$ період піврозпаду — 4,5 млрд років. Саме через це активність урану за кілька років помітно не змінюється. Для радю $T \approx 1600$ років. Тому активність радю значно більша,

ніж урану. Що менший період піврозпаду, то інтенсивніше відбувається розпад. Є радіоактивні елементи, у яких період піврозпаду становить мільйонні частки секунди.

Закон радіоактивного розпаду — це статистичний закон. Він справджується в середньому для великої кількості частинок.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке радіоактивність?
2. Які види випромінювання ви знаєте?
3. Хто сформулював правила зміщення?
4. Що таке період піврозпаду?
5. У чому полягає закон радіоактивного розпаду?

§ 46. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ. ЛАНЦЮГОВА РЕАКЦІЯ ПОДІЛУ ЯДЕР УРАНУ

Попередньо ми з'ясували, що внаслідок взаємодії частинок відбуваються реакції, які отримали назву ядерних.

Зміну атомних ядер унаслідок їхньої взаємодії з елементарними частинками і між собою називають ядерною реакцією.

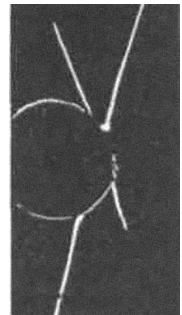
Ядерні реакції відбуваються тоді, коли частинки впритул наближаються до ядра і потрапляють у сферу дії ядерних сил. Одночасно заряджені частинки взаємно відштовхуються. Тому зближення позитивно заряджених частинок з ядрами (чи ядер між собою) можливе, якщо цим частинкам (або ядрам) надати великої кінетичної енергії. Таку енергію надають протонам, дейтронам, α -частинкам та іншим важчим ядрам за допомогою прискорювачів елементарних частинок та йонів. Для здійснення ядерних реакцій вони ефективніші, ніж α -частинки, що їх випромінюють природні радіоактивні елементи. Їм можна надати значно більшої енергії (порядку 10^5 MeV), ніж та, яку мають α -частинки (максимально 9 MeV). Можна використати також протони, які не з'являються в процесі радіоактивного розпаду. А також можна прискорити ядра, важчі, ніж ядра Гелію.

Першу штучну ядерну реакцію здійснив Резерфорд, «бомбардуючи» ядра Нітрогену α -частинками. Вона мала такий вигляд: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$.

Перше перетворення атомних ядер за допомогою протонів великої енергії, добутих на прискорювачі, було здійснено в 1932 р., коли вдалося розщепити Літій на дві α -частинки: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

Як видно на фотографії треків у камері Вільсона (мал. 3.24), ядра Гелію розлітаються в різні боки вздовж однієї прямої відповідно до закону збереження імпульсу (імпульс протона значно менший від імпульсів α -частинок, що виникають).

У розглянутій ядерній реакції кінетична енергія двох утворених ядер Гелію виявилася більшою на 7,3 MeV від кінетичної енергії протона, який вступив у реакцію. Перетворення ядер супроводжується зміною їхньої внутрішньої енергії (енергія зв'язку). У реакції питома енергія зв'язку в ядрах Гелію більша від питомої енергії зв'язку в ядрі Літію. Тому частина внутрішньої енергії ядра Літію перетворюється в кінетичну енергію α -частинок, які розлітаються. Зміна енергії зв'язку ядер означає, що сумарна енергія спокою частинок і ядер, які беруть участь у реакціях, не залишається сталою. Адже енергія спокою ядра $M_{\text{я}}c^2$ відповідно до формули $E_{\text{зв}} = Mc^2 = (Zm_{\text{п}} + Nm_{\text{н}} - M_{\text{я}})c^2$ виражається через енергію зв'язку. За законом збереження



Мал. 3.24

енергії зміна кінетичної енергії в процесі ядерної реакції дорівнює зміні енергії спокою ядер і частинок, які беруть участь у реакції.

Енергетичним виходом ядерної реакції називають різницю енергій спокою ядер і частинок до реакції і після реакції.

Отже, енергетичний вихід ядерної реакції дорівнює також зміні кінетичної енергії частинок, що беруть участь у реакції.

Відкриття нейтрона було поворотним пунктом у дослідженні ядерних реакцій. Оскільки нейтрони не мають заряду, то вони без перешкод проникають в атомні ядра і спричиняють їхнє перетворення.

Наприклад, спостерігається така реакція: ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_0^1n \rightarrow {}_{11}^{24}\text{Na} + {}_2^4\text{He}$.

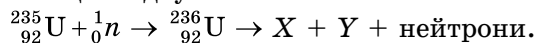
Відомий італійський фізик **Енріко Фермі (1901–1954)**, який перший почав вивчати реакції, що спричиняються нейтронами, виявив таке: ядерні перетворення зумовлюються навіть повільними нейтронами.

Причому ці повільні нейтрони здебільшого навіть ефективніші, ніж швидкі. Тому швидкі нейтрони доцільно спочатку сповільнювати. Сповільнюються нейтрони до теплових швидкостей у звичайній воді. Цей ефект пояснюється тим, що у воді є багато ядер Гідрогену — протонів, маса яких майже дорівнює масі нейтронів. А під час зіткнення куль однакової маси найінтенсивніше передається кінетична енергія. Під час центрального зіткнення нейтрона з протоном, що перебуває в стані спокою, він повністю передає протону свою кінетичну енергію.

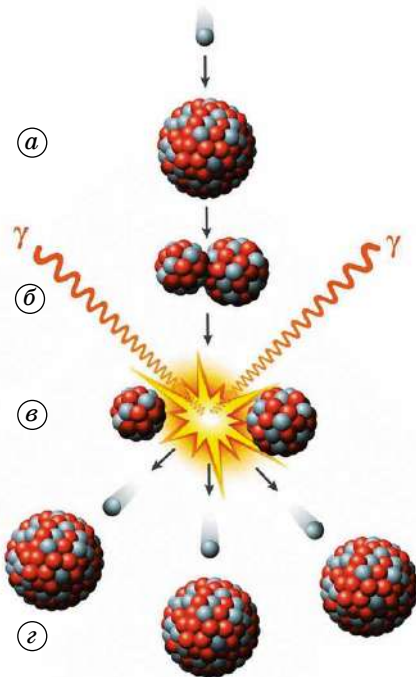
Поділ атомних ядер — це особливий вид ядерних реакцій, коли ядро важкого елемента ділиться на дві частини, одночасно випромінюючи дві-три нейтрони, γ -промені та значну кількість енергії. Це дає можливість здійснити ланцюгову ядерну реакцію.

Поділ ядер Урану відкрили в 1938 р. німецькі вчені **Отто Ган (1879–1968)** і **Фріц Штрассман (1902–1980)**. Вони встановили, що під час бомбардування Урану нейтронами виникають елементи середньої частини

Періодичної системи: Барій, Криптон та ін. Проте правильно пояснили цей факт — як поділ ядра Урану, яке захопило нейтрон, — англійський фізик **Отто Фріш (1904–1979)** і австрійський фізик **Ліза Мейтнер (1878–1968)** у 1939 р. Вони вважали, що ядро Урану, захопивши повільний нейтрон, перетворюється в ядро радіоактивного ізотопу Урану ${}_{92}^{235}\text{U}$, яке розпадається на дві приблизно рівні частини X і Y, при цьому виділяється кілька нейтронів. Реакція відбувається за схемою:



Процес поділу атомного ядра можна пояснити за допомогою краплинної моделі ядра. За цією моделлю згусток нуклонів має нагадувати краплину зарядженої рідини (мал. 3.25, а). Ядерні сили між нуклонами короткодіючі, подібно до сил, що діють між молекулами рідини. Одночасно з великими силами електростатичного відштовхування між протонами, які намагаються



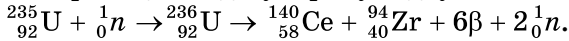
Мал. 3.25

розірвати ядро на частини, діють ще більші ядерні сили притягання. Ці сили не дають ядру розпастися.

Ядро Урану має форму кулі. Захопивши зайвий нейтрон, ядро збуджується і починає деформуватися, набуваючи витягнутої форми (мал. 3.25, б). Ядро розтягується, доки сили відштовхування між кінцями витягнутого ядра не переважатимуть сили зчеплення, які діють на перешийку (мал. 3.25, в). Розтягуючись дедалі дужче, ядро розривається на дві частини (мал. 3.25, г). Під дією кулонівських сил відштовхування ці частини, чи уламки, розлітаються зі швидкістю, що дорівнює 1/30 швидкості поширення світла.

Більш пізні дослідження показали, що внаслідок бомбардування ядер Урану нейтронами можуть утворюватися уламки 80 «сортів». Причому найвірогіднішим виявляється поділ на уламки, маси яких відносяться приблизно як 2:3.

Одна з можливих реакцій поділу Урану відбувається за схемою:



Енергетичний вихід такої реакції становить 208 МеВ. Енергія, яка виділяється при одному акті горіння Гідрогену в Оксигені, дорівнює 10 еВ.

Отже, реакція поділу ядер Урану відбувається з виділенням енергії. Ця енергія розповсюджується уламками та нейтронами у вигляді їхньої кінетичної енергії, а також випромінюванням під час супроводу цієї реакції.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке ядерна реакція?
2. Які ядерні реакції було проведено вперше?
3. Що таке енергетичний вихід ядерної реакції?
4. У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах від ядерних реакцій, спричинених зарядженими частинками?
5. Що таке ланцюгова ядерна реакція?
6. Хто відкрив і пояснив поділ ядер Урану?
7. Які елементи утворюються під час поділу ядер Урану?
8. Яка енергія виділяється під час поділу ядер Урану?

181

§ 47. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Природний Уран складається переважно з двох ізотопів: ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{92}^{238}\text{U}$. Але ізотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ становить лише 1/140 частину набагато поширенішого ізотопу ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ діляться під впливом швидких і повільних нейтронів. Ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ можуть ділитися тільки під впливом швидких нейтронів з енергією понад 1 МеВ. Таку енергію має приблизно 60 % нейтронів, що вивільняються під час поділу. Проте приблизно тільки один нейтрон з п'яти спричинює поділ ${}_{92}^{238}\text{U}$. Решта нейтронів захоплюється цим ізотопом без поділу. Тому ланцюгова реакція в чистому ізотопі ${}_{92}^{238}\text{U}$ неможлива.

Для ланцюгової реакції необов'язково, щоб кожний нейтрон спричинив поділ ядра. Потрібно тільки, щоб середня кількість вивільнених нейтронів у цій масі урану не зменшувалася із часом.

Ця умова виконується, якщо коефіцієнт розмноження нейтронів k більший від одиниці або дорівнює їй.

Коефіцієнтом розмноження нейтронів називають відношення кількості нейтронів у будь-якому «поколінні» до кількості нейтронів попереднього «покоління».

Під зміною «покоління» розуміють поділ ядер, при якому поглинаються нейтрони старого «покоління» і народжуються нові нейтрони.

Якщо $k \geq 1$, то кількість нейтронів із часом збільшується або не змінюється і відбувається ланцюгова реакція. Якщо $k < 1$, кількість нейтронів із часом зменшується і ланцюгова реакція неможлива.

Коефіцієнт розмноження визначається такими чотирма чинниками:

1. Захопленням повільних нейтронів ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ з наступним поділом їх або захопленням швидких нейтронів ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{92}^{238}\text{U}$ також з наступним поділом.

2. Захопленням нейтронів ядрами ${}_{92}^{238}\text{U}$ і ${}_{92}^{235}\text{U}$ без поділу.

3. Захопленням нейтронів продуктами поділу, сповільнювачем та конструктивними елементами установки.

4. Вилітанням нейтронів назовні з речовини, яка ділиться.

Тільки перший процес супроводжується збільшенням кількості нейтронів (переважно за рахунок поділу ${}_{92}^{235}\text{U}$). У решті процесів кількість нейтронів зменшується. У чистому ізотопі ${}_{92}^{238}\text{U}$ ланцюгова реакція неможлива, оскільки при цьому $k < 1$ (нейтронів, що захоплюються ядрами без поділу, більше, ніж нейтронів, що знову утворюються при поділі ядер).

Для стаціонарної ланцюгової реакції коефіцієнт розмноження нейтронів має дорівнювати одиниці. І ця умова має виконуватися з великою точністю. Якщо $k = 1,01$, то майже вмить станеться вибух.

Важливе значення має захоплення повільних нейтронів ядрами ізотопу Урану ${}_{92}^{238}\text{U}$ без поділу. Після захоплення утворюється радіоактивний ізотоп ${}_{92}^{239}\text{U}$ з періодом піврозпаду 23 хв. Розпад відбувається з випромінюванням електрона і виникненням трансуранового елемента — **Нептунію**: ${}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\text{Np} + {}_{-1}^0e$.

Нептуній β -радіоактивний з періодом піврозпаду близько двох днів. У процесі розпаду Нептунію утворюється інший трансурановий елемент — **Плутоній**: ${}_{93}^{239}\text{Np} \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_{-1}^0e$.

Плутоній відносно стабільний, оскільки його період піврозпаду великий — близько 24 000 років. Важливою властивістю Плутонію є те, що він ділиться під впливом повільних нейтронів, так само як ізотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Тому за допомогою Плутонію також можна здійснити ланцюгову реакцію, що супроводжується виділенням величезної кількості енергії.

Пристрій, у якому підтримується керована реакція поділу ядер, називають ядерним (атомним) реактором.

Ядра Урану, особливо ядра ізотопу ${}_{92}^{235}\text{U}$, найефективніше захоплюють повільні електрони. Причому ймовірність захоплення повільних нейтронів у сотні разів більша, ніж швидких. Тому в ядерних реакторах, що діють на природному Урані, застосовують сповільнювачі нейтронів і цим підвищують коефіцієнт розмноження нейтронів. Процеси, що відбуваються в ядерному реакторі, схематично подано на малюнку 3.26.

На малюнку 3.27, а показано розріз АЕС, 3.27, б — схему енергетичної установки з ядерним реактором, на малюнку 3.27, в — будову ядерного реактора.

Основні елементи ядерного реактора: ядерне паливо ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$ тощо, **сповільнювач нейтронів** (важка або звичайна вода, графіт тощо), **теплоносій для виведення теплоти**, що утворюється під час роботи реактора (вода, рідкий натрій тощо), і **пристрій для регулювання швидкості реакції** (стержні, які вводять у робочий простір реактора; вони містять кадмій чи бор — речовини, які добре поглинають нейтрони). Зовні реактор оточують захисною оболонкою, що затримує γ -промені і нейтрони, її роблять

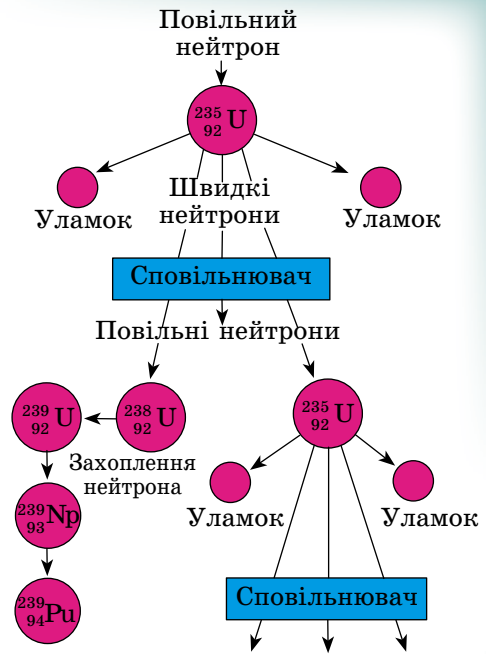
з бетону із залізним заповнювачем. Найкращий сповільнювач — **важка вода**. Звичайна ж вода сама захоплює значну кількість нейтронів і перетворюється на важку воду. Добрим сповільнювачем є також графіт, ядра якого не поглинають нейтрони.

Коефіцієнт розмноження k може дорівнювати одиниці лише за умови, що розміри реактора і відповідно маса Урану більші від деяких критичних значень.

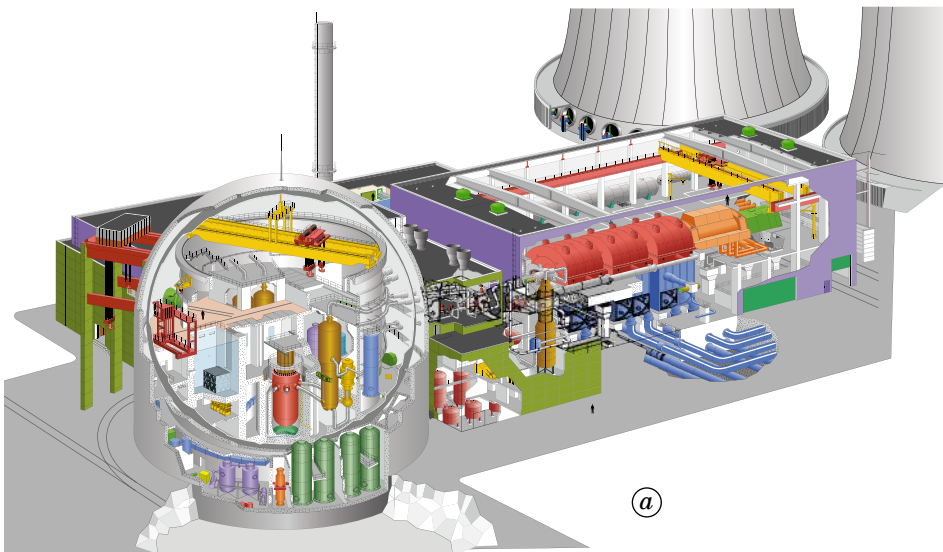
Критичною масою називають найменшу масу речовини, що ділиться, при якій може відбуватися ланцюгова ядерна реакція.

Якщо розміри реактора малі, то через поверхню його активної зони (об'єм, у якому розміщуються стержні з ураном) вилітає дуже багато нейтронів.

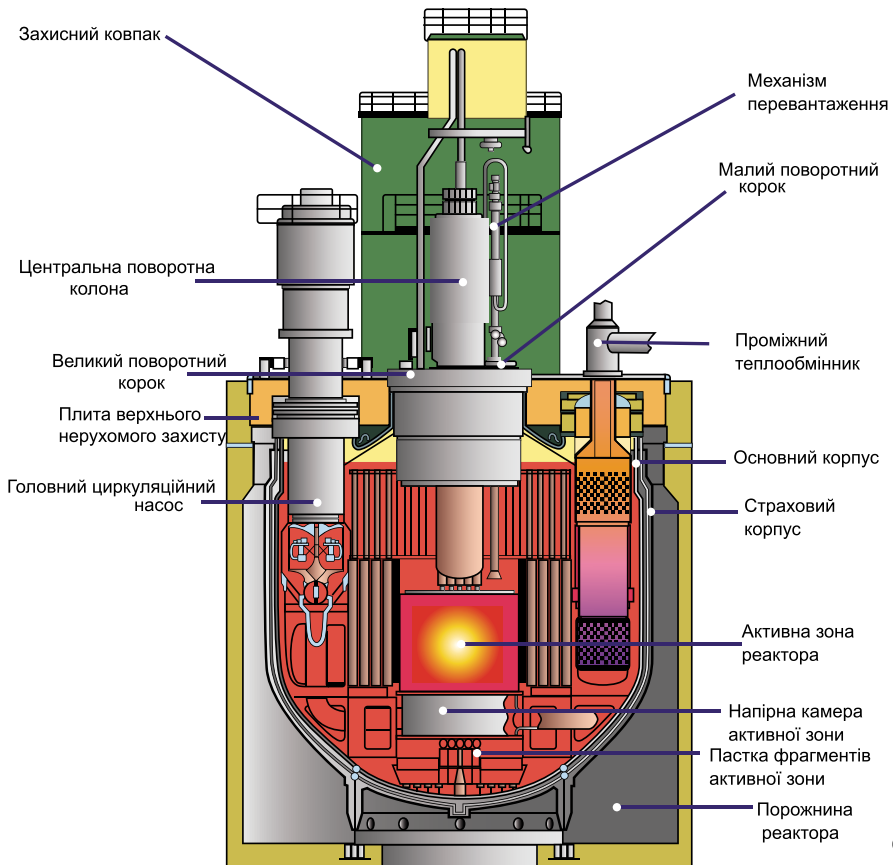
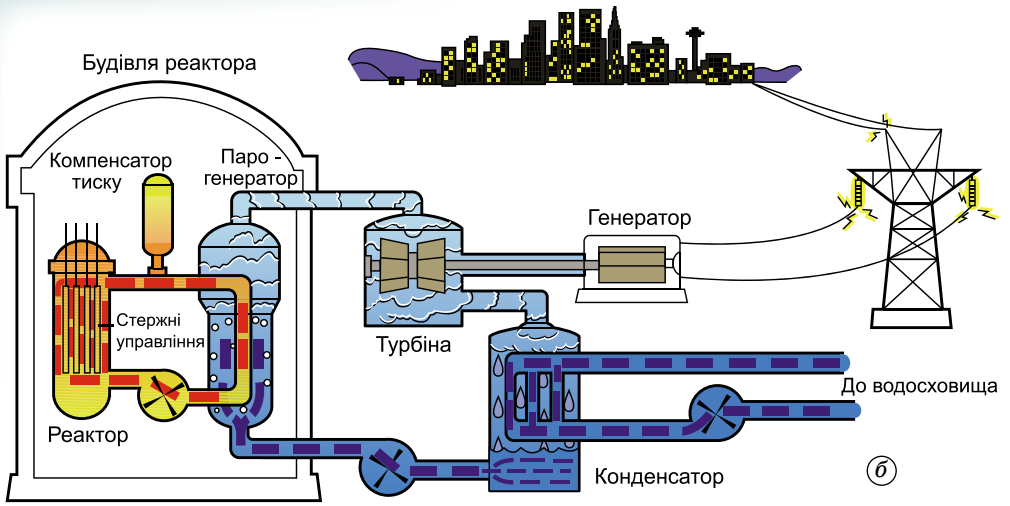
Зі збільшенням розмірів системи кількість ядер, що беруть участь у поділі, збільшується пропорційно об'єму, а кількість нейтронів, яка втрачається внаслідок вильоту, збільшується пропорційно поверхні. Тому, збільшуючи систему, можна домогтися, що коефіцієнт розмноження буде більший від одиниці ($k > 1$). Система матиме критичні розміри, якщо кількість нейтронів, втрачених унаслідок захоплення і вильоту, дорівнюватиме кількості нейтронів, що утворюються в процесі поділу. При цьому $k = 1$. Критичні розміри визначаються типом ядерного пального, сповільнювачем та конструктивними особливостями реактора.



Мал. 3.26



Мал. 3.27



Мал. 3.27

Для сферичного шматка чистого (без сповільнювача) Урану ${}_{92}^{235}\text{U}$ критична маса — близько 50 кг. Радіус такої сфери дорівнює приблизно 9 см (уран дуже важка речовина). Застосуванням сповільнювачів нейтронів і берилієвої оболонки, що відбиває нейтрони, критичну масу вдалося зменшити до 250 г.

Керують реактором за допомогою стержнів, у яких міститься кадмій чи бор. Якщо стержні вийнято з активної зони реактора, то $k > 1$, а якщо їх повністю всунуто, то $k < 1$. Вставляючи стержні в активну зону, можна в будь-який момент припинити ланцюгову реакцію.

Є реактори, які працюють без сповільнювача на швидких нейтронах. Оскільки ймовірність поділу, спричиненого швидкими нейтронами, мала, то такі реактори не можуть працювати на природному урані. Реакцію можна підтримувати лише в збагаченій суміші, яка містить не менше ніж 15 % ізотопу ${}_{92}^{235}\text{U}$. Перевагою реакторів на швидких нейтронах є те, що під час їхньої роботи утворюється значна кількість плутонію, який можна використовувати як ядерне паливо. Такі реактори називають **реакторами-розмножувачами**, оскільки вони утворюють матеріал, придатний для поділу. Будують реактори з коефіцієнтом відтворення до 1,5. Це означає, що з 1 кг ізотопу ${}_{92}^{235}\text{U}$ одержують до 1,5 кг плутонію. У звичайних реакторах коефіцієнт відтворення — 0,6–0,7.

Уперше ланцюгову ядерну реакцію поділу Урану здійснив у США в грудні 1942 р. колектив учених під керівництвом Фермі.

Перший у Європі ядерний реактор запустили 25 грудня 1946 р.

Нині існують різні типи реакторів, що відрізняються один від одного як потужністю, так і призначенням. Найперспективнішими є реактори-розмножувачі на швидких нейтронах.

На Запорізькій, Південноукраїнській, Рівненській, Хмельницькій — атомних станцій України встановлено реактори потужністю 500–1000 МВт. З 2000 р. було зупинено останній діючий енергоблок Чорнобильської АЕС.

АЕС мають ряд переваг порівняно з ТЕС, що працюють на органічному паливі. Їм не потрібно дефіцитне органічне паливо, атмосферний кисень, вони не засмічують середовище золою та іншими продуктами згоряння. Проте розміщення АЕС у густонаселених районах містить потенційну загрозу. Ядерній енергетиці властиві шкідливі або навіть небезпечні чинники впливу на навколишнє середовище. Складні проблеми виникають у зв'язку з потребою захоронення радіоактивних відходів і демонтажем атомних станцій, які відпрацювали свій термін. Досвід експлуатації АЕС в усьому світі свідчить, що за нормального режиму експлуатації біосфера надійно захищена від радіаційного впливу.

Проте вибух реактора на Чорнобильській АЕС показав, що ризик руйнування активної зони реактора внаслідок прорахунків у конструкції реакторів і помилок персоналу залишається реальністю. Сьогодні найбільшою проблемою японців є АЕС. Унаслідок сейсмічної катастрофи, що відбулася у 2011 р., підземними поштовхами було пошкоджено систему охолодження реакторів на АЕС «Фукусіма-1» і «Фукусіма-2», що створило реальну загрозу ядерного вибуху.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке коефіцієнт розмноження?
2. Що таке критична маса?
3. Що являє собою ядерний реактор?
4. Які види палива використовуються в ядерному реакторі?
5. Назвіть, які АЕС побудовано в Україні і де їх розміщено.



Дізнайтеся з додаткових джерел, Інтернету про наслідки аварій на атомних станціях.

§ 48. ДОЗИМЕТРИЯ. ДОЗИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ЗАХИСТ ВІД ЙОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Дозиметрія — розділ прикладної ядерної фізики, що розглядає йонізуюче випромінювання, фізичні величини, що характеризують поле випромінювання або взаємодію випромінювання з речовиною, а також принципи та методи визначення цих величин.

Дозиметрія має справу з такими фізичними величинами йонізуючого випромінювання, які визначають його хімічну, фізичну та біологічну дію. Найважливіша властивість дозиметричних величин — встановлений зв'язок між фізичною величиною, що вимірюється, й очікуваним радіаційним ефектом.

При формуванні дози опромінення в біологічному середовищі розрізняються безпосередньо йонізуючі частинки і побічно йонізуючі частинки. Безпосередньо йонізуючі частинки — заряджені частинки: α -частинки (ядра Гелію), β -частинки (електрони, позитрони) тощо; побічно йонізуючі частинки — незаряджені частинки: нейтрони, γ -кванти.

При опроміненні біологічних індивідуумів розрізняють гостре (що виявляється ранніми ефектами опромінення) і пролонговане (тривале), однократне і багатократне (фракціоноване) опромінення. Гостре і пролонговане опромінення можуть бути однократними або багатократними. Можливе хронічне опромінення, що здійснюється тривалий час при дуже малих потужностях дози.

186

Дозу, що формується випромінюванням в речовині, можна оцінити, вимірюючи, наприклад, спричинене ним підвищення температури. Проте навіть при дозах, небезпечних для життя людини, енергії, що виділяється, виявляється недостатньо для нагріву опромінюваного організму на тисячні частки градуса. Тому при вивченні дії випромінювання на біологічні об'єкти дози оцінюють із застосуванням чутливіших методів дозиметрії.

Основною фізичною дозиметричною величиною, що використовується для оцінки міри дії випромінювання на середовище, є **поглинута доза випромінювання**.

Поглинута доза випромінювання (D) — величина, що визначається енергією випромінювання, яка поглинається одиницею маси опроміненої речовини.

За одиницю дози в СІ прийнято **один грей (1 Гр):** $1 \text{ Дж}/1 \text{ кг} = 1 \text{ Гр}$.

Грей — це така доза йонізуючого випромінювання, при якій ділянці речовини масою 1 кг передається енергія 1 Дж. Позасистемною одиницею є 1 рад: $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$.

Поглинута доза характеризує не саме випромінювання, а міру його дії на середовище. Той самий потік випромінювання в різних середовищах і навіть в різних ділянках одного середовища може сформувати різне значення поглинутої дози. Тому, коли говорять про поглинуту дозу, потрібно вказувати, у якому середовищі вона сформована: у повітрі, воді або м'якій біологічній тканині.

Для характеристики розподілу дози опромінення в часі використовують величину потужності поглинутої дози, або інтенсивності опромінення. Під цим розуміють кількість енергії випромінювання, що поглинається в одиницю часу одиницею маси опромінюваної речовини (Гр/година; Гр/рік).

Індуковані біологічні ефекти не залежать від таких чинників, як потужність дози, її розподіл, умови і ритм опромінення. Вихід ефектів визначається лише сумарною накопиченою дозою (незалежно від часу опромінення), тобто наслідки опромінення будуть однаковими при одно-

кратному опроміненні даною дозою або при її здобутті протягом кількох днів, місяців і навіть року. На міру вираженості ефекту впливатиме лише просторовий розподіл актів йонізації і збудження, що створюються в треках, тобто лінійного передавання енергії (ЛПЕ) йонізуючого випромінювання. Тому для таких умов уведено спеціальну величину дози, що враховує обидва цих чинники, — **еквівалентна доза**. Цією величиною можна однозначно пов'язати вихід радіаційних наслідків опромінення з дозою опромінення.

Еквівалентна доза (H) визначається як добуток поглинутої дози (D) даного виду випромінювання на середнє значення зважуючого фактору (коефіцієнта якості) йонізуючого випромінювання (W_R), у даному елементі — об'єму біологічної тканини.

Значення W_R для різних видів випромінювань представлено в таблиці 3.1. Ця доза є мірою вираженості стохастичних ефектів опромінення. Її застосовують для оцінки радіаційної небезпеки хронічного опромінення випромінюванням довільного складу (і гострого опромінення дозою менше ніж 0,25 зіверт) і визначають за формулою: $H = DW_R$.

За одиницю еквівалентної дози в СІ прийнято 1 зіверт (1 Зв). 1 зіверт дорівнює такій еквівалентній дозі, при якій значення добутку поглинутої в біологічній тканині дози йонізуючого випромінювання і середнього значення зважуючого фактору для цього випромінювання дорівнює 1 Дж/кг. Позасистемною одиницею є 1 бер (біологічний еквівалент рентгена): 1 бер = 0,01 Зв.

З означення випливає, що для випромінювання з $W_R = 1$ еквівалентна доза 1 Зв реалізується при поглинутій дозі 1 Гр, тобто для цього випадку 1 Зв = 1 Гр. Якщо W_R відрізняється від 1, то еквівалентну дозу 1 Зв буде сформовано в біологічній тканині при значенні поглинутої дози в ній рів-

ною $\left(\frac{1}{W_R}\right)$ Гр. Допускається підсумовування еквівалентних доз для оцінки загального рівня опромінення за тривалий інтервал часу, якщо кожна разова доза, що мала місце при фракціонованому гострому опроміненні за цей час, не перевищувала 0,25 Зв.

Таблиця 3.1

Значення радіаційних зважуючих факторів (W_R)

Вид випромінювання і діапазон енергії	W_R
Фотони, усі енергії (включаючи гамма- і рентгенівське випромінювання)	1
Електрони (позитрони) і мюони, усі енергії	1
Протони з енергією > 2 МеВ	5
Нейтрони з енергією < 10 кеВ	5
Нейтрони з енергією від 10 кеВ до 100 кеВ	10
Нейтрони з енергією від 100 кеВ до 2 МеВ	20
Нейтрони з енергією від 2 МеВ до 20 МеВ	10
Нейтрони з енергією > 20 МеВ	5
α -частинки, уламки ділення, важкі ядра віддачі	20

Для змішаного випромінювання еквівалентна доза визначається як сума добутків поглинутих доз окремих видів випромінювань на відповідні значення зважуючих факторів цих випромінювань.

При заданій еквівалентній дозі опромінення вірогідність наслідків залежить від опромінюваної ним тканини або органу. Тому було введено ще один коефіцієнт, що враховує специфіку різних тканин з точки зору вірогідності індукції в них наслідків опромінення, — **тканинний зважуючий фактор (W_T)**. Прийняті на сьогодні значення W_T подано в таблиці 3.2 і використовуються для розрахунку ефективної дози.

Таблиця 3.2

Значення тканинних зважуючих факторів (W_T)

Тканина або орган	W_T
Гонади (статеві залози)	0,20
Червоний кістковий мозок	0,12
Товста кишка	0,12
Легені	0,12
Шлунок	0,12
Сечовий міхур	0,05
Молочна залоза	0,05
Печінка	0,05
Стравохід	0,05
Щитоподібна залоза	0,05
Шкіра	0,01
Кісткова поверхня	0,01
Інші тканини і органи (наднирки, нирки, головний мозок, дихальні шляхи позагрудної області, м'язи, матка, селезінка, тонка кишка, підшлункова і вилочкова залози)	0,05
Усе тіло	1,00

На відміну від стохастичних ефектів, нестохастичні (детерміновані) виявляються лише при отриманні певних доз (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Значення доз, нижче від яких виключено виникнення нестохастичних (детермінованих) ефектів

Орган, тканина	Нестохастичний (детермінований) ефект	Доза, Гр
Усе тіло	Блювота	0,5
Кістковий мозок	Смерть	1,0
Шкіра	Опік, тимчасова епіляція	3,0
Легені	Пневмонія	5,0
Щитоподібна залоза	Порушення, деструкція залози	10

Абсолютні значення факторів підбрано так, щоб їхнє сумарне значення дорівнювало одиниці. Це дає змогу трактувати тканинні зважуючі фактори як набір коефіцієнтів, що визначають відносні вклади відповідних органів в сумарний вихід стохастичних наслідків, що виникають при рівномірному опроміненні всього організму. Найбільш радіочутливим органом по критерію виходу цих наслідків є статеві залози, повністю відповідальні за генетичні ефекти і частину соматичних стохастичних наслідків опромінення.

Фізичний зміст поняття ефективної дози такий: значення **ефективної дози (E)** відповідає такому рівню рівномірного опромінення всього організму, при якому сумарний вихід стохастичних наслідків опромінення буде таким самим, як і при локальному опроміненні органу (T) еквівалентною дозою величиною (H): $E = HW_T$.

За одиницю ефективної дози в СІ також було прийнято 1 зіверт (1 Зв). При рівномірному опроміненні — ефективна доза дорівнює еквівалентній дозі. При нерівномірному опроміненні — ефективна доза дорівнює добутку еквівалентної дози і тканинно зважуючого фактору, або дорівнює такій еквівалентній дозі (при рівномірному опроміненні), яка створює такий самий ризик небажаних наслідків.

Виміряти ефективну дозу опромінення організму неможливо. Її розраховують як суму добутків еквівалентних доз (H) в окремих органах і

тканинах на відповідні значення зважуючих факторів (W_T), указаних в таблиці 2.

Ефективна доза є мірою виходу стохастичних наслідків біологічної дії малих доз опромінення цього індивіда, тобто вона є міра індивідуальної небезпеки, обумовленої дією на організм малих доз йонізуючих випромінювань.

У дозиметрії для фотонного випромінювання введено **експозиційну дозу**. Вона дорівнює абсолютному значенню повного заряду йонів одного знака, утворених в одиниці маси повітря при повному гальмуванні електронів і позитронів, звільнених фотонами (рентгенівським випромінюванням). Тобто це повітряно еквівалентна одиниця дози, яка не призначена для дозиметрії в речовині.

Одиницею експозиційної дози в СІ є 1 кулон/кг (1 Кл/кг), позасистемною одиницею є 1 рентген (1 Р). $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ (точно).

Експозиційну дозу можна використовувати для наближеної оцінки поглинутої та експозиційної доз у речовині.

Сьогодні існують такі види захисту від йонізаційного випромінювання. **Захист часом.** Що менше час контакту із джерелом йонізуючого випромінювання, то менша отримана доза опромінення.

Захист відстанню. Що далі від джерела йонізуючого випромінювання, то менша отримана доза. Залежність зворотно квадратична, тому що від джерела промені йдуть радіально і розподіляються по сфері, площа якої $\propto R^2$. Отже, густина потоку буде зменшуватися пропорційно квадрату відстані. Використовують прилади дистанційного управління.

Захист екранами. Їх виготовляють із щільних високоатомних матеріалів (цегла, бетон, баритобетон). Якщо потрібен компактний захист, використовуються свинець або високоатомний уран (у терапевтичних апаратах). Інколи використовуються більш прості матеріали. Наприклад, окуляри для захисту від β -променів виготовляють з органічного скла замість просвинцьованого скла, тому що β -частинки будуть гальмуватися. Тобто для різних видів випромінювання використовуються різні екрани. Альфа-промені може затримати тонкий бар'єр, наприклад аркуш паперу; високоенергетичні β -промені не можуть пройти крізь долоню людини, також їх може затримати пластинка алюмінію товщиною кілька мм; γ -промені здатні проникати глибоко в речовину або проходити крізь товсті бар'єри. Нейтрони краще поглинаються низькоатомними екранами — водою, парафіном.

Захист кількістю. Що з меншою потужністю джерела працює персонал, то меншою буде доза опромінення. Лікарі обов'язково захищають хворого від опромінення, яке йому не потрібне (що менше використовується радіоактивного препарату для діагностики, то краще і для персоналу, і для оточуючих). У рентген-апараті використовується електронно-оптичний підсилювач. Щоб зображення було достатньо яскравим при меншому потоці променів, а доза на хворого і лікаря була меншою, на рентген-трубку підводять струм не 3–4 мА, а 0,3–0,4 мА, і цього достатньо для отримання якісного зображення. Особливо це важливо під час профілактичних медоглядів.

Засоби захисту бувають: колективні (стіни, вентиляція, ширми), індивідуальні (окуляри, щиток для захисту обличчя, пальчатки, фартух з просвинцьованої гуми, пластикові бахіли, маска, скафандр (мал. 3.28)).



Мал. 3.28



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке дозиметрія?
2. Сформулюйте означення поглинутої дози випромінювання, еквівалентної дози. Які їхні одиниці?
3. Як діє йонізаційне випромінювання на органи людини?
4. Які є види захисту від йонізаційного випромінювання?



Дослідіть, як діє йонізаційне випромінювання на живі організми.

§ 49. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ, ЇХНЯ КЛАСИФІКАЦІЯ, РЕЄСТРАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА

Вивчаючи фізику, ми не раз говорили про існування в природі частинок, які називають **елементарними**. Ви вже ознайомилися з електроном, фотоном, протоном і нейтроном. *Але що ж таке елементарна частинка?*

У самому слові «елементарна» закладено подвійний зміст. З одного боку, елементарний — це найпростіший, з другого боку, під елементарним розуміють щось фундаментальне, що лежить в основі речей. Саме в цьому розумінні і називають **субатомні частинки** (частинки, з яких складаються атоми) елементарними.

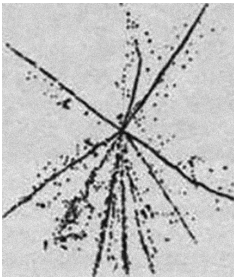
Жодна із частинок не існує вічно. Більшість елементарних частинок не може проіснувати більше від двох мільйонних частинок секунди, навіть тоді, коли немає жодного зовнішнього впливу. Наприклад, вільний нейтрон (нейтрон поза атомним ядром) існує в середньому 15 хв.

190

Тільки такі частинки, як фотон, електрон, протон і нейтрино, могли б залишитися незмінними, якби кожна з них була одна на світі.

Але разом з електронами і протонами існують **позитрони** і **антипротони**, від зіткнення з якими частинки взаємно знищуються і утворюються нові.

Фотон, випромінений настільною лампою, існує не довше від 10^{-8} с. Це той час, який йому потрібен, щоб долетіти до сторінки книжки і поглинутися папером.



Мал. 3.29

Лише **нейтрино** майже вічне, тому що воно надзвичайно слабо взаємодіє з іншими частинками. Але й нейтрино гинуть від зіткнення з іншими частинками, хоч такі зіткнення трапляються рідко. Усі елементарні частинки перетворюються одна в одну, і ці взаємні перетворення — основний факт їхнього існування.

На малюнку 3.29 ви бачите результат зіткнення ядра Карбону, що мало енергію 60 млрд еВ, з ядром Аргентуму фотоемульсії. Ядро розпадається на уламки, які розлітаються в усі боки. Одночасно народжується багато нових елементарних частинок — **піонів**.

За сучасними уявленнями, елементарні частинки — це первинні частинки, які далі не розкладаються, з них складається вся матерія. Проте неподільність елементарних частинок не означає, що вони не мають внутрішньої структури.

Існування двійника **електрона-позитрона** теоретично передбачив англійський фізик **Поль Дірак** (1902–1984) у 1931 р.

Коли зустрічаються позитрон і електрон, обидві частинки зникають — анігілюють, народжуючи фотони великої енергії. Може бути і зворотний процес — утворення **електронно-позитронної пари**, наприклад, коли стикається фотон досить великої енергії (його маса має бути більшою від суми мас спокою народжуваних частинок) з ядром.

Через два роки позитрон виявили за допомогою камери Вільсона, вміщеної в магнітне поле. Напрямок викривлення треку частинки вказував на знак її заряду, а за радіусом кривизни й енергією частинки визначили відношення її заряду до маси. Воно за значенням таке саме, як і для електрона. На малюнку 3.30 ви бачите першу фотографію, яка довела існування позитрона. Частинка рухалася вгору і, пройшовши через свинцеву пластинку, втратила частину своєї енергії. Тому кривизна траєкторії збільшилася.

Процес утворення пари електрон-позитрон γ -квантом у свинцевій пластинці видно на фотографії (мал. 3.31). У камері Вільсона, вміщеній у магнітне поле, пара залишає характерний слід у вигляді дворогої вилки.

Те, що зникнення одних частинок і поява інших під час реакції між елементарними частинками — це перетворення, а не просто виникнення нової комбінації складових частин старих частинок, особливо виявляється саме під час анігіляції пари **електрон-позитрон**. Обидві ці частинки мають певну масу у стані спокою — електричні заряди.

Порівняно недавно виявили **антипротон** і **антинейтрон**. Електричний заряд антипротона негативний.

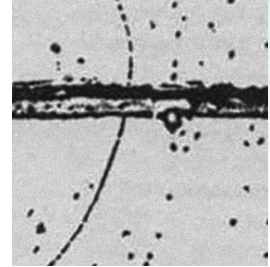
Атоми, ядра яких складаються з **антинуклонів**, а оболонка — з **позитронів**, утворюють **антиречовину**. У 1969 р. уперше було одержано **антигелій**.

Під час β -розпаду з ядра вилітає електрон. Але електрона в ядрі немає. *Звідки ж він береться?* Після того як електрон вилітає з ядра, заряд ядра, а отже, і кількість протонів збільшується на одиницю. Масове число ядра не змінюється. Це означає, що кількість нейтронів зменшується на одиницю. Отже, у β -радіоактивних ядрах нейтрон здатний розпадатися на протон і електрон. Протон залишається в ядрі, а електрон вилітає назовні. Лише в стабільних ядрах нейтрони стійкі.

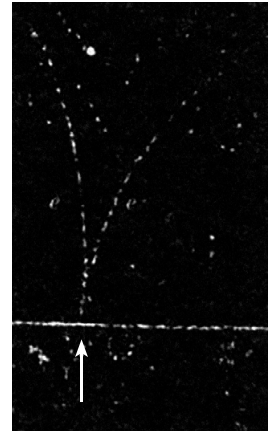
Швейцарський фізик **Вольфганг Паулі** (1890–1958) припустив, що разом з протоном і електроном під час розпаду нейтрона народжується якась частинка-«невидимка», що й виносить із собою енергію, якої не вистачає. Цю частинку прилади не реєструють, оскільки вона не має електричного заряду і маси спокою. Отже, вона не може йонізувати атоми, розщеплювати ядра, тобто не може спричинювати ефекти, за якими можна судити про виникнення частинки.

Цю частинку **Енріко Фермі** (1901–1954) назвав **нейтрино**. Виявилось, що маса спокою нейтрино, як і передбачав Паулі, дорівнює нулю. Це означає, що нейтрино в стані спокою немає. Ледь з'явившись на світ, вони одразу рухаються зі швидкістю 300 000 км/с. Розраховуючи взаємодію нейтрино з речовиною в шарі певної товщини, одержали досить невтішний результат щодо можливості виявити цю частинку експериментально. Земна куля для нейтрино прозоріша, ніж найкраще скло для світла.

Роль нейтрино не зводиться лише до пояснення β -розпаду ядер. Багато елементарних частинок у вільному стані спонтанно розпадається, випромінюючи нейтрино. Передусім так поводить себе нейтрон. Тільки в ядрах нейтрон унаслідок взаємодії з іншими нуклонами набуває стабільності. Вільний нейтрон живе в середньому 15 хв. Це довели експериментально



Мал. 3.30



Мал. 3.31

лише після того, як було побудовано ядерні реактори, що дають потужні пучки нейтронів.

Як і інші частинки, нейтрино ν має античастинку, яку називають **антинейтрино** $\bar{\nu}$. Під час розпаду нейтрона на протон і електрон випромінюється саме антинейтрино: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$.

Енергія нейтрона завжди більша від суми енергій протона й електрона. Надлишкову енергію виносить із собою антинейтрино.

Розпад частинки зовсім не ознака того, що вона не елементарна. Нейтрон, незважаючи на свою нестабільність, вважається елементарною частинкою, а **дейтрон** складається з нейтрона і протона, хоч він і стабільний.

У свій час було відкрито групу «дивних» частинок: K -мезонів і гіперонів з масами, більшими від маси нуклонів. У 70-ті роки ХХ ст. до них приєдналася велика група «зачарованих» частинок, які мають ще більші маси. Крім того, було відкрито частинки з коротким життям — близько 10^{-22} – 10^{-23} с. Ці частинки назвали **резонансами**, їх було понад 200.

Якщо до таблиці елементарних частинок не вносити резонанси і «зачаровані» частинки, то матимемо 39 частинок. Усі частинки поділяють на групи:

Фотон.

Лептони. Це 12 частинок (з античастинками). Є 3 види нейтрино: **електронне нейтрино** народжується разом з електронами, **мюонне нейтрино** — з μ -мезонами і **τ -мезонне нейтрино** — з τ -мезонами. Далі йдуть **електрон**, μ -мезон і τ -мезон, відкритий у 1975 р.

Мезони. Ця група має 8 частинок. Найлегші з них π -мезони: **позитивні**, **негативні** й **нейтральні**. Їхні маси — 264 (π^0) і 273 (π^+ , π^-) електронних мас. **Піони** — це кванти ядерного поля, подібно до того, як фотони є квантами електромагнітного поля. Ще є 4 K -мезони і 1 η^0 -мезон.

Баріони. До цієї групи входять 18 частинок із 39. Найлегші баріони — це протони і нейтрони. За ними йдуть так звані **гіперони**. Таблицю замикає Ω -частинка (омега мінус), відкрита в 1964 р., її маса в 3273 рази більша від маси електрона. Існування великої кількості частинок наводить на думку, що не всі вони однаково елементарні.

Ще в 1963 р. **Маррі Гелл-Ман** (1929) і **Джордж Цвейг** (1937) запропонували модель, за якою всі частинки, що беруть участь у сильних (ядерних) взаємодіях, народжені з фундаментальніших (або первинних) частинок — **кварків**.

Кваркам приписали дробові електричні заряди, їх позначають літерами: u , d , s . Перший — u -кварк — має заряд $2/3e$, а d - і s -кварк мають однакові заряди по $-1/3e$ (де e — модуль заряду електрона). Протон складається з двох u -кварків і одного d -кварка; піони складаються з комбінації **кварк-антикварк** і т. д. Дивні частинки (**каони** і **гіперони**) містять важчий s -кварк, його називають «дивним».

Передбачалося існування четвертого c -кварка, його назвали «зачарованим». Потім експериментально виявили частинки, до яких входить цей кварк. Маса c -кварка більша за масу s -кварка.

За сучасними уявленнями, усі лептони, як і кварки, не мають внутрішньої структури. Тому їх можна вважати справді елементарними частинками. Без античастинок відкрито 6 лептонів. Відкрито 5 кварків. П'ятий — це так званий b -кварк, маса якого більша від маси c -кварка. Припускають, що є ще й шостий кварк, масивніший за b -кварк. Теоретичний аналіз приводить до висновку про те, що має бути кварк-лептонна симетрія — речовина, побудована із шести різних лептонів і шести різних кварків. Разом з їхніми античастинками цих справжніх елементарних частинок налічується 24.

До них треба ще додати квант електромагнітного поля — фотон — і кванти поля, що зумовлює міжкваркові взаємодії. Частинки міжквар-

кового поля називають **глюонами**. Експериментально глюонів поки що не виявлено. Є ще кванти поля слабких взаємодій — **векторні бозони**. Їх вперше виявлено 1983 р. на Женевському прискорювачі.

До застосування потужних прискорювачів заряджених частинок єдиним джерелом частинок з енергією, достатньою для утворення мезонів і гіперонів, було космічне випромінювання.

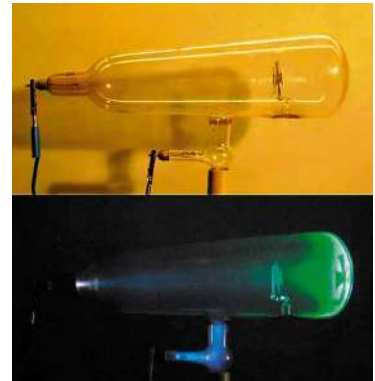
Космічне випромінювання — потік атомних ядер (в основному протонів), що потрапляє на Землю зі світового простору й утворює в земній атмосфері вторинне випромінювання, у якому виявлено багато елементарних частинок.

Відкриття космічного випромінювання пов'язане з проведенням на початку ХХ ст. дослідів, які вказували на існування слабкої йонізації повітря, що спричиняла розряд електроскопів, екранованих товстим шаром речовини. Дослідження причин цього ефекту привели до відкриття випромінювання неземного походження, яке пізніше назвали космічним. Середня енергія космічних частинок становила близько 10 GeV, а енергія окремих частинок сягала 10^{10} GeV. Потік первинного космічного випромінювання на межі атмосфери в період мінімуму сонячної активності становить $7 \cdot 10^2 \dots 10^4$ частинок на $1 \text{ м}^2/\text{с}$ і збільшується в кілька разів з наближенням до максимуму активності. Потік заряджених частинок на рівні моря дорівнює в середньому $1,7 \cdot 10^2$ частинок на $1 \text{ м}^2/\text{с}$ і мало змінюється із сонячною активністю.

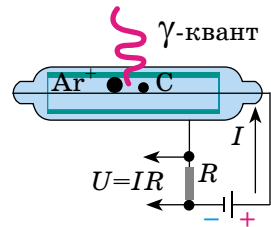
Учені вважають, що головним джерелом космічного випромінювання є так звані пульсари, яких у нашій Галактиці нараховується близько 10 млн. Характерну перевагу важких елементів у складі первинного космічного випромінювання, очевидно, можна пояснити переважним прискоренням важких ядер ($Z > 20$) у джерелах космічного випромінювання. Поява легких елементів у складі космічного випромінювання спричинена розщепленням важких ядер при взаємодії з ядрами міжзоряного газу.

Для реєстрації елементарних частинок використовують прилади, які призначено для знаходження та ідентифікації заряджених частинок. Дія всіх приладів ґрунтується на загальному принципі: заряджені частинки, потрапляючи в прилад, пролітають через речовину, при цьому можуть спричиняти збудження атомів, їх йонізацію.

Перший детектор елементарних частинок — **спінтарископ Крукса** (мал. 3.32), що ґрунтується на сцинтиляційному методі, з'явився в 1903 р. Він давав змогу зареєструвати наявність зарядженої частинки. Йому на зміну в 1908 р. прийшов **газорозрядний лічильник** (мал. 3.33). Німецький фізик **Ханс Гейгер** (1882–1945) використовував для рахунку заряджених частинок газовий розряд (виникнення іскри розряду в газі при проходженні частинки). Цей лічильник реєстрував α -випромінювання радіоактивних елементів. Пізніше, у 1913 р., Гейгер разом з іншим ученим **Ервіном Мюллером** (1911–1977) удосконалив свій прилад, який тепер працював у сфері



Мал. 3.32



Мал. 3.33



Ханс Гейгер

самостійного розряду. Газорозрядні лічильники дають змогу лише реєструвати факт проходження через них частинок і визначити деякі їхні характеристики.

Важливу роль у ядерних дослідженнях відіграють прилади, які дають змогу зафіксувати трек (слід) зарядженої частинки.

У 1912 р. шотландський учений **Чарльз Вільсон** (1869–1959) створив прилад для реєстрації частинок — **туманну камеру** (мал. 3.34). Її дія ґрунтується на конденсації перенасиченої пари на йонах з утворенням крапель води. Слід частинки видимий, і його можна сфотографувати.

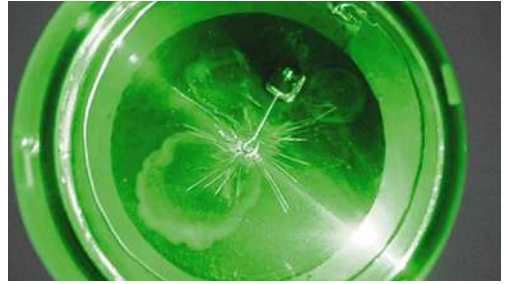
Інший трековий прилад з'явився у 1952 р. Американський учений **Дональд Глазер** (1926–2013) створив **бульбашкову камеру**, у якій частинки рухаються в перегрітій рідині, і при цьому утворюються бульбашки пари (мал. 3.35).

Для реєстрації частинок використовують ще один метод — **метод товстошарових емульсій**, у якому фотографуються заряджені частинки.

Усі сучасні реєстрації ядерних частинок ділять на 2 групи: 1. Лічильні методи, ґрунтуються на використанні приладів, які рахують число частинок того чи іншого типу. 2. Трекові методи, які дають змогу відтворювати слід частинки.



Мал. 3.34



Мал. 3.35



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Електрон — найлегша із заряджених частинок. За яким із законів, які ви знаєте, не можна перетворити електрон у фотон?
2. Під час анігіляції електрона і позитрона, які рухаються повільно, утворилося 2 γ -кванти. Під яким кутом один відносно одного вони розлітаються?
3. Яка частота γ -квантів, що виникають за умов, зазначених у попередньому запитанні?
4. Чому вільний нейтрон розпадається на протон, електрон та антинейтрино, а вільний протон не може розпастися на нейтрон, позитрон і нейтрино?
5. Що таке кварк?
6. Що таке космічне випромінювання?
7. Які методи реєстрації елементарних частинок ви знаєте?
8. Чи можна в камері Вільсона спостерігати трек зарядженої частинки із часом життя 10^{-23} с?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Чому нейтрони є кращими снарядами для руйнування ядра атома, ніж протони, електрони, α -частинки?

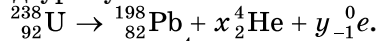
Відповідь. Нейтрон завдяки своїй нейтральності з будь-якою енергією (від часток до кількох мільйонів електрон-вольт) вільно проникає в будь-яке ядро,

включаючи і важкі. Але в кожному конкретному випадку частинки-снаряди повинні мати відповідну енергію.

2. Скільки відбувається α - і β -розпадів під час радіоактивного розпаду ${}^{238}_{92}\text{U}$, якщо він перетворюється в ${}^{198}_{82}\text{Pb}$?

Розв'язання

Радіоактивний розпад урану можна записати так:



Нагадаємо, що α -частинка — це ${}^4_2\text{He}$, а β -частинка — це ${}^0_{-1}e$.

Застосовуючи закон збереження зарядових чисел, можна записати:

$$92 = 82 + 2x - 1y.$$

Застосувавши закон збереження масових чисел, отримаємо

$$238 = 198 + 4x.$$

Розв'язуючи отримані рівняння як систему, маємо $x = 10$ і $y = 10$, тобто відбувається 10 α -розпадів і 10 β -розпадів.

3. При зіткненні α -частинки з ядром бора ${}^{10}_5\text{B}$ відбулась ядерна реакція, унаслідок якої утворилося 2 нових ядра. Одне із цих ядер було ядро атома Гідрогену ${}^1_1\text{H}$. Визначте порядковий номер і масове число другого ядра, дайте символічний запис ядерної реакції і визначте її енергетичний ефект.

Розв'язання

Позначимо невідоме ядро символом ${}^A_Z\text{X}$. Знаючи, що α -частинка — це ядро Гелію ${}^4_2\text{He}$, запис реакції матиме вигляд ${}^4_2\text{He} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^A_Z\text{X}$.

Застосовувавши закон збереження числа нуклонів, отримаємо рівняння $4 + 10 = 1 + A$, звідки $A = 13$.

Застосуємо закон збереження заряду $2 + 5 = 1 + Z$, звідки $Z = 6$.

Отже, невідоме ядро є ядром атома ізотопу Карбону ${}^{13}_6\text{C}$.

Тепер рівняння можна записати в кінцевому вигляді ${}^4_2\text{He} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{13}_6\text{C}$.

Енергетичний ефект ядерної реакції визначається за формулою:

$$Q = 931[(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})].$$

Використовуючи табличні значення маси атомів, отримаємо:

$$Q = 931[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)] \text{ MeV} = 4,06 \text{ MeV}.$$

Відповідь. $Q = 4,06 \text{ MeV}$.

4. Визначте добові витрати Урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ на атомній електростанції потужністю 7 МВт, якщо ККД електростанції 20 %. При кожному розпаді виділяється енергія 200 МеВ.

Розв'язання

Якщо при кожному розпаді виділяється енергія E_0 , то при розпаді за добу, припустимо N атомів (ядер), виділиться енергія $E = NE_0$. Нехай

N атомів відповідає масі урану m кг, тоді $N = \frac{mN_A}{\mu} E_0$, де N_A — число

Авогадро; μ — молярна маса урану.

Енергія, яка виділяється за добу, розраховується за формулою:

$$E_1 = NE_0 = \frac{mN_A}{\mu} E_0, \text{ а повна енергія: } E = \eta E_1 = Pt, \text{ де } P \text{ — потужність}$$

електростанції, $t = 1$ доба = 86 400 с.

$$\text{Тоді } Pt = \eta \frac{mN_A}{\mu} E_0, \text{ звідки } m = \frac{Pt\mu}{\eta N_A E_0}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо $m = 36,8 \cdot 10^{-3}$ кг.

Відповідь. $m = 36,8 \cdot 10^{-3}$ кг.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

Рівень А

3.44. Який склад натрію $^{23}_{13}\text{Na}$, Аргентуму $^{107}_{47}\text{Ag}$, Йоду $^{126}_{53}\text{I}$, Францію $^{223}_{87}\text{Fr}$, Урану $^{238}_{92}\text{U}$, Менделевію $^{256}_{101}\text{Md}$?

3.45. Який склад ядра $^{226}_{88}\text{Ra}$? Напишіть рівняння α -розпаду цього ядра.

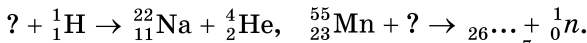
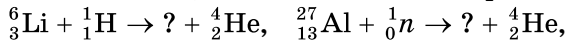
3.46. Який склад ядра $^{22}_{11}\text{Na}$? Напишіть рівняння β -розпаду цього ядра.

3.47. Для ядра ^7_3Li визначте: 1) дефект маси; 2) енергію зв'язку.

3.48. Період піврозпаду $^{137}_{55}\text{Cs}$ дорівнює 30 років. За який інтервал часу на забрудненій території після Чорнобильської катастрофи кількість ядер $^{137}_{55}\text{Cs}$ зменшиться в 4 рази?

3.49. Період піврозпаду радіоактивних ядер $^{90}_{38}\text{Sr}$ становить 27,7 року. Через який інтервал часу після початку спостереження за радіоактивним зразком у ньому залишиться 25 % ядер $^{90}_{38}\text{Sr}$?

3.50. Напишіть позначення, яких не вистачає в рівняннях реакції:



3.51. Визначте енергетичний ефект ядерної реакції: $^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0n$. Поглинається чи виділяється енергія в реакції?

3.52. Яку мінімальну енергію повинна мати α -частинка, щоб відбулась ядерна реакція: $^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{10}_5\text{B} + ^1_0n$?

3.53. Яка енергія виділяється під час ядерної реакції: $^7_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^8_4\text{Be} + ^1_0n$?

3.54. Хімічних елементів, що мають заряд ядер Z , який дорівнює 0, 43, 61, 85 і понад 92 протонні одиниці, немає в природі, але їх одержано штучно. Які це елементи?

3.55. Радіоактивний ізотоп Технецію $^{95}_{43}\text{Tc}$, якого не виявлено у природі, було одержано штучно в результаті реакції: $^{94}_{42}\text{Mo} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{95}_{43}\text{Tc} + ?$. Поясніть реакцію. Яка частинка викидається?

Рівень Б

3.56. Чи змінюється масове число, маса та порядковий номер елемента при випусканні ядром γ -кванта?

3.57. Який склад ядра $^{238}_{94}\text{Pu}$? Обчисліть для цього ядра: 1) дефект маси; 2) енергію зв'язку на нуклон.

3.58. Радіоактивний ізотоп $^{232}_{90}\text{Th}$ перетворився на ізотоп $^{212}_{83}\text{Bi}$. Скільки відбулося α - і β -розпадів під час цього перетворення?

3.59. У який ізотоп перетвориться ізотоп $^{238}_{92}\text{U}$ унаслідок α -розпаду і двох β -розпадів?

3.60. Атомна маса хлору 35,5. Хлор має два ізотопи $^{35}_{17}\text{Cl}$ та $^{37}_{17}\text{Cl}$. Визначте їхній склад.

3.61. Скільки відсотків ядер розпадається в радіоактивному зразку $^{131}_{53}\text{I}$ через 18 діб, якщо період піврозпаду $^{131}_{53}\text{I}$ становить 6 діб?

3.62. За 8 год початкова кількість радіоактивного ізотопу зменшилась утричі. У скільки разів вона зменшиться за добу?

3.63. Період піврозпаду $^{60}_{27}\text{Co}$ дорівнює 5,26 року. Яка кількість ядер $^{60}_{27}\text{Co}$ розпадається впродовж 7,89 року в зразку масою 30 мг?

3.64. Період піврозпаду Ітрію-90 дорівнює 64 год. На скільки відсотків зменшиться інтенсивність радіоактивного випромінювання препарату Ітрію-90 за 24 год?

3.65. Яку бомбардуючу частинку застосовували в кожній з таких реакцій: $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$, $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{15}_8\text{O} + \gamma$, $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{11}_5\text{B} + ^4_2\text{He}$?

3.66. Чому нейтрони легше проникають в ядра атомів, ніж інші частинки?

3.67. Яка енергія виділяється під час термоядерної реакції синтезу дейтрона ${}^2_1\text{H}$ і тритона ${}^3_1\text{H}$, якщо один із продуктів реакції нейтрон?

3.68. Запишіть рівняння ядерної реакції бомбардування ядер ${}^{14}_7\text{N}$ α -частинками, унаслідок якої отримуються протони. Обчисліть енергетичний ефект реакції. Виділяється чи поглинається енергія в цій реакції?

3.69. Який енергетичний ефект реакції ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$? Поглинається чи виділяється енергія в реакції?

3.70. Визначте найменшу енергію γ -кванта, потрібну для проведення реакції: ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0n$.

3.71. Поясніть лабораторну реакцію добування золота із ртуті: ${}^{198}_{80}\text{Hg} + {}^1_0n \rightarrow {}^{199}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{198}_{79}\text{Au} + {}^1_1\text{H}$. Чому цю реакцію не можна застосовувати в промислових масштабах?

Є над чим замислитися

3.72. Яке ядро має однакове число протонів і нейтронів, а радіус його в півтора раза менший від радіуса ядра ${}^{35}_{13}\text{Al}$? Вважайте густину ядерної речовини сталою. Визначте енергію зв'язку цього ядра.

3.73. Визначте енергію зв'язку α -частин у ядрі Кальцію-40, використовуючи значення мас Кальцію-40, Аргону-36, Гелію-4.

3.74. Період піврозпаду Калію-42 дорівнює 12 год. Під час розпаду кожного ядра виділяється енергія 5 МеВ. Яка енергія виділяється в цьому самому зразку за другу добу?

3.75. Період піврозпаду радіоактивного нукліда дорівнює 1 год. Визначте середню тривалість життя цього нукліда. 197

3.76. Унаслідок захоплення нерухомим ядром надважкого Гідрогену ${}^3_1\text{H}$ ядра звичайного Гідрогену ${}^1_1\text{H}$ з мінімальною кінетичною енергією 2 МеВ виникає збуджене ядро ${}^4_2\text{He}$. Визначте енергію збудження цього ядра.



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Смугасті спектри молекул складаються з окремих ліній, що в межах однієї смуги близько розміщені одна біля одної. Який висновок із цього факту можна зробити про число можливих енергетичних рівнів молекул? Чи дуже різняться модулі енергій окремих рівнів?

2. Якби світло взаємодіяло з речовиною як хвиля, то не існувало б червоної межі фотоефекту. Доведіть це.

3. Фотон поглинається речовиною. Що стається з масою фотона?

4. Доведіть, що вільний електрон не може поглинути фотон.

5. Чому атоми ізотопів хімічно цілком тотожні один одному?

6. Чому систематизацію хімічних елементів проводять не за масою, а за зарядом ядер?

7. У першому наближенні енергію зв'язку ядра можна вважати пропорційною числу нуклонів у ньому. Чому це так?

8. Альфа-частинку поглинула речовина. Що відбулося з α -частинкою?

9. Чому виникає γ -квант у ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду?

10. З'ясуйте, чому ядра атомів при опроміненні їх нейтронами стають радіоактивними?

11. Чому в ядерних реакторах повільні (теплові) нейтрони більш ефективно захоплюються ядрами Урану, ніж швидкі?

12. Поясніть, чому для здійснення термоядерної реакції найзручніше використати ядра Гідрогену, особливо його важкі ізотопи: дейтерій і тритій.

13. Що відбудеться, коли електрон зіткнеться з протоном?

14. Існують радіоактивні ядра атомів. А чи існують радіоактивні елементарні частинки? Наведіть приклади.

Що я знаю і вмію робити

● Я знаю, що таке спектральний аналіз

1. Пояснюючи практичне використання спектрального аналізу, учень сказав: «Щоб визначити склад сплаву, дротину з нього дуже нагрівають струмом і ставлять біля скілини спектроскопа. За результатами аналізу смужки спектра роблять висновки про склад сплаву». У чому помилився учень?

2. На матовому склі спектроскопа наведено спектр гарячого газу у вигляді окремих яскравих тонких ліній. Що змінюватиметься при значному підвищенні густини газу?

● Я знаю, як застосовувати рівняння фотоефекту

3. Електрон вилітає із цезію з кінетичною енергією $3,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, а робота виходу із цезію $2,88 \cdot 10^{-19}$ Дж. Яка довжина світлової хвилі, що спричиняє фотоефект?

4. Робота виходу електронів із цинку $5,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Чи відбуватиметься фотоефект, якщо на цинк падатимуть світлові промені довжиною хвилі $4,5 \cdot 10^{-7}$ м?

5. Червона межа для фотоефекту калію $\lambda_{\text{ч}} = 577$ нм, кінетична енергія виваних фотоелектронів $4,2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Яка частота світлової хвилі, що спричиняє фотоефект?

6. Робота виходу фотоелектронів зі срібла становить $7,85 \cdot 10^{-19}$ Дж. Визначте довжину і частоту хвилі червоної межі фотоефекту для срібла.

● Я вмію розв'язувати задачі і пояснювати їхні розв'язки

7. Світло частотою 10^{15} Гц падає перпендикулярно до плоского дзеркала. Визначте зміну імпульсу фотона при відбиванні.

8. Фотоелектрони, що вириваються з металу червоним світлом частотою $3,9 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються напругою 5 В, а фіолетовим світлом частотою $7,6 \cdot 10^{15}$ Гц — напругою 20 В. Визначте сталу Планка за цими даними.

● Я вмію виконувати досліди

9. Змінюючи температуру нитки електричної лампи, спостерігайте за спектром випромінюваного нею світла.

Необхідне устаткування: спектроскоп, низьковольтна лампочка з ковпачком, джерело струму з ЕРС 4 В, реостат, ключ, з'єднувальні провідники.

● Я знаю, як працюють фотоелементи

10. Катод фотоелемента освітлюється монохроматичним випромінюванням. При зворотній напрузі на фотоелементі 1,25 В струм через нього припиняється. Після зміни довжини хвилі випромінювання на 50 % для припинення фотоструму на фотоелемент довелося подати зворотну напругу 4 В. Яка довжина хвилі випромінювання, яким опромінювався катод? Яка червона межа фотоефекту для речовини катода фотоелемента?

● Я знаю, що таке радіоактивні перетворення

11. Унаслідок радіоактивного розпаду ядро ${}_{92}^{238}\text{U}$ перетворилося на ядро ${}_{84}^{210}\text{P}$. Скільки α - і β -розпадів відбулося?

12. Нейтрон розпадається за схемою $n \rightarrow p + e^{-} + \nu$. Одночасно він відновлюється за схемою $p + \nu \rightarrow e^{+} + n$. Якщо ці реакції відбуватимуться послідовно, то отримаємо вихідний нейтрон і, крім того, електрон та позитрон. Чи не суперечить це законам збереження?

● Я вмію пояснювати, як проходять ядерні реакції

13. Яку бомбардуючу частинку застосовували в кожній з таких реакцій:
 $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$, $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{15}_8\text{O} + \gamma$, $^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow ^{11}_8\text{B} + ^4_2\text{He}$?

14. Яка мінімальна енергія потрібна для розщеплення ядра Оксигену $^{17}_8\text{O}$, якщо маса протона — 1,00728 а. о. м, нейтрона — 1,00867 а. о. м, електрона — $5,48 \cdot 10^{-4}$ а. о. м, маса Оксигену — 19,99913 а. о. м?

● Я вмію визначати енергетичний вихід ядерних реакцій

15. Визначте енергетичний ефект ядерної реакції: $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$.

16. Визначте енергетичний вихід ядерної реакції: $^6_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$.

17. Визначте енергетичний вихід ядерної реакції $^7_3\text{Li} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^8_4\text{Be} + ^1_0n$. Виділяється чи поглинається енергія? Маси ізотопів: Літійу — 7,01601 а. о. м; Дейтерію — 2,01410 а. о. м, Берилію — 8,00531 а. о. м.

● Я вмію застосовувати закон радіоактивного розпаду

18. За 8 год початкова кількість радіоактивного ізотопу зменшилась утричі. У скільки разів вона зменшиться за добу?

19. У двох зразках у початковий момент містилась однакова кількість радіоактивних атомів. Період піврозпаду атомів першого зразка дорівнює 10 хв, а другого — 40 хв. Визначте відношення кількості радіоактивних атомів у зразках через 2 год.

20. Радіоактивний препарат має 10^3 ядер. Яка частка їх залишиться через час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?

● Я знаю, як застосувати фізичні закони

21. Оцініть густину ядерної речовини.

22. Який закон електродинаміки постулює той факт, що при перетворенні нейтрона на протон виникає саме електрон, що вилітає з ядра як β -частинка?



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант 1

1. Перший постулат Бора визначає існування...

А електронів в атомі Б ядра В нейтронів у ядрі
 Г протонів у ядрі Д стаціонарних станів атома

2. Другий постулат Бора визначається співвідношенням...

А $h\nu = \frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_m}$ Б $\frac{1}{h\nu} = \frac{1}{E_n} - \frac{1}{E_m}$ В $\frac{1}{h\nu} = E_n - E_m$ Г $h\lambda = E_n - E_m$

Д $h\nu = E_n - E_m$

3. При центральному зіткненні α -частинки з ядром найменша відстань, на яку підлітає частинка, дорівнює...

А $r = \frac{Ze^2}{\pi\epsilon_0 m_\alpha v_\alpha^2}$ Б $r = \frac{\pi\epsilon_0 m_\alpha v_\alpha^2}{Ze^2}$ В $r = \frac{\pi\epsilon_0 Ze^2}{m_\alpha v_\alpha^2}$ Г $r = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{\pi\epsilon_0 Ze^2}$ Д $r = 0$

4. Довжина хвилі, що супроводжує рух частинки, визначається співвідношенням...

А $\lambda = \frac{mv}{h}$ Б $\lambda = \frac{mv}{hc}$ В $\lambda = \frac{h}{mv}$ Г $\lambda = \frac{hc}{mv}$ Д $\lambda = \frac{h}{v}$

5. Згідно з рівнянням Ейнштейна для фотоэффекту, енергія кванта, що спричиняє фотоэффект, має бути...

- А більшою за роботу виходу
- Б дорівнювати роботі виходу
- В більшою за роботу виходу або дорівнювати їй
- Г більшою за кінетичну енергію
- Д дорівнювати кінетичній енергії електрона, що вилітає

6. Якщо довжина хвилі падаючого світла дорівнює червоній межі, то швидкість фотоелектронів...

- А $v = 10^6$ м/с
- Б $v = 3 \cdot 10^8$ м/с
- В $v = 1,5 \cdot 10^8$ м/с
- Г $v = 1000$ м/с
- Д = 0

7. Визначте енергію фотона, якщо $\nu = 4 \cdot 10^{14}$ Гц.

- А $26,56 \cdot 10^{-19}$ Дж
- Б $2,656 \cdot 10^{-19}$ Дж
- В $265,6 \cdot 10^{-20}$ Дж
- Г $2,656 \cdot 10^{-20}$ Дж
- Д $2,656 \cdot 10^{-18}$ Дж

8. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин та фізичними величинами.

- | | |
|------------------|---------------------|
| А маса фотона | 1 метр |
| Б частота | 2 джоуль |
| В довжина хвилі | 3 кілограм |
| Г імпульс фотона | 4 герц |
| Д енергія фотона | 5 ньютон на секунду |

9. Період піврозпаду радіоактивних ядер — це час, за який...

- А розпадаються всі ядра
- Б розпадається половина ядер
- В розпадається третина ядер
- Г розпадається четверта частина всіх ядер
- Д кількість ядер зменшується в e разів

10. Нейтрино виділяється при перетворенні...

- А протона в α -розпаді
- Б протона в нейтрон і протон
- В нейтрона в протон і електрон
- Г протона в ядро Гідрогену
- Д протона в протон

11. Кількість електронів в атомі ${}_{91}^{231}\text{Pa}$ становить...

- А 231
- Б 140
- В 322
- Г 91
- Д відсутні

12. Укажіть схему радіоактивного α -розпаду.

- А ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$
- Б ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A+4}_{Z-2}Y$
- В ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$
- Г ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A+4}_{Z+2}Y$
- Д ${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A+4}_{Z+2}Y$

Варіант 2

1. Перехід атома з нижчого енергетичного стану на вищий супроводжується...

- А поглинанням кванта енергії
- Б випромінюванням кванта енергії
- В без затрат енергії
- Г випромінюванням двох квантів енергії
- Д випромінюванням трьох квантів енергії

2. Частота випромінювання світла визначається співвідношенням...

А $\nu = \frac{h}{E_n - E_m}$ Б $\lambda = \frac{hc}{E_n - E_m}$ В $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$ Г $\lambda = \frac{E_n - E_m}{h}$ Д $\nu = \frac{hc}{E_n - E_m}$

3. Співвідношення між імпульсом частинки та довжиною хвилі записується так...

А $p = h\lambda$ Б $p = \frac{h}{\lambda}$ В $p = \frac{\lambda}{h}$ Г $p = \frac{hc}{\lambda}$ Д $p = \frac{\lambda}{hc}$

4. Робота виходу електрона дорівнює найменшій енергії, яку потрібно...

А надати електрону провідності, щоб він міг вийти у вакуумі

Б надати, щоб електрон став електроном провідності

В надати, щоб швидкість електрона збільшилася в 2,74 рази

Г забрати, щоб електрон перейшов із зони провідності в зону валентності

Д надати, щоб електрон перейшов із зони валентності в зону провідності

5. Рівняння Ейнштейна для фотоефекту записується так...

А $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}$ Б $h\nu = \frac{mv^2}{2}$ В $h\nu = eU_3$ Г $h\nu = A_{\text{вих}}$ Д $h\frac{A}{\lambda} = A_{\text{вих}}$

6. Енергія фотона визначається...

А $\frac{h\nu}{c}$ Б $\frac{hc}{\lambda}$ В $\frac{h\lambda}{c}$ Г $\frac{hc}{\nu}$ Д mc

7. Визначте енергію фотона, якщо $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м.

А $13,28 \cdot 10^{-20}$ Дж Б $6,64 \cdot 10^{-19}$ Дж В $6,64 \cdot 10^{-20}$ Дж Г $13,28 \cdot 10^{-19}$ Дж

Д $19,92 \cdot 10^{-20}$ Дж

8. Установіть відповідність між явищами та теоріями світла, що їх описують.

А інтерференція	1 хвильова теорія світла
Б фотоефект	2 корпускулярна теорія світла
В дисперсія	3 класична механіка
Г дифракція	4 релятивістська механіка
Д поляризація	5 спеціальна теорія відносності

9. Дефект маси дорівнює...

А $\Delta m = Zm_{\text{п}} + (A - Z)m_{\text{н}} - M_{\text{я}}$ Б $\Delta m = M_{\text{я}} - Zm_{\text{п}}$
 В $\Delta m = M_{\text{я}} - (A - Z)m_{\text{п}}$ Г $\Delta m = Zm_{\text{п}} + (A - Z)m_{\text{н}}$
 Д $\Delta m = M_{\text{я}}$

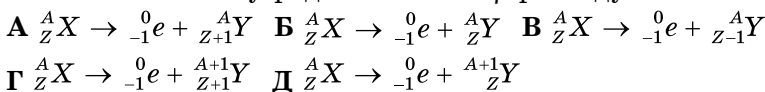
10. Позитрон — це...

А античастинка електрона Б античастинка протона В електрон
 Г протон Д античастинка нейтрона

11. Укажіть кількість нейтронів у ядрі ${}^{96}_{40}\text{Zr}$.

А 40 Б 96 В 136 Г відсутні Д 56

12. Укажіть схему радіоактивного β -розпаду.



АСТРОНОМІЯ

Розділ 1

ОСНОВИ ПРАКТИЧНОЇ АСТРОНОМІЇ

Ви вивчатимите практичну астрономію — розділ, який присвячено способам визначення з астрономічних спостережень часу, небесних координат і азимутів; методам визначення координат небесних світил. Ці знання застосовують у геодезії (геодезична астрономія), судноводінні (мореплавна астрономія) і літаководінні (авіаційна астрономія). Способи практичної астрономії розробляються методами сферичної астрономії і базуються на розв'язуванні паралактичного трикутника (полюс світу — зеніт місяця спостереження — спостережуване світило) після вимірювання деяких його елементів. Низка задач практичної астрономії розв'язується шляхом спостережень штучних небесних тіл.

202

§ 1. НЕБЕСНІ СВІТИЛА ТА НЕБЕСНА СФЕРА. СУЗІР'Я

Небо над нами на відкритому місці простирається у вигляді купола. На ньому в безхмарну ніч сяють тисячі зір, і, здається, неможливо розібратися в цій величній зоряній картині. У давнину спостерігачі бачили на зоряному небі окремі поєднання яскравих зір і подумки уявляли їх у вигляді різних фігур. Щоб було легше орієнтуватися на зоряному небі, групам зір, або сузір'ям, люди давали назви тварин, птахів, різних предметів. У деяких фігурах давньогрецькі астрономи «бачили» міфічних героїв. У праці «Альмагест» давньогрецький астроном **Клавдій Птолемей** (бл. 87–165) згадує 48 сузір'їв. Це Велика Ведмедиця і Мала Ведмедиця, Дракон, Лебідь, Орел, Телець, Терези та ін.

Найпомітніші сузір'я в багатьох народів мали свої назви. Так, стародавні слов'яни Велику Ведмедицю уявляли у вигляді Лося або Оленя. Часто ківш Великої Ведмедиці представляли візком, звідси й назви цього сузір'я: Віз, Колісниця. Між Великою Ведмедицею й Малою Ведмедицею є сузір'я Дракона. За легендою, Дракон (Змій) викрадає юну красуню, а красуня ця — відома Полярна зоря.

Ще в III ст. до н. е. давньогрецькі астрономи звели назви сузір'їв у єдину систему, пов'язану з грецькою міфологією. Ці назви згодом запозичила європейська наука. Тому всі сузір'я, що містять яскраві зорі й видимі в середніх широтах Північної півкулі Землі, отримали імена героїв давньогрецьких міфів і легенд (наприклад, сузір'я Цефея, Андромеди, Пегаса, Персея). Їхні зображення можна знайти на давніх зоряних картах: Велика Ведмедиця й Мала Ведмедиця, небесний мисливець Оріон, голова зоряного бика — Тельця тощо. А сузір'я Кассіопеї названо на честь міфічної цариці (мал. 1.1).

На сучасних астрономічних картах немає малюнків міфічних образів сузір'їв, але збережено їхні давні назви.

У XVI–XVIII ст. європейські астрономи назвали менш яскраві сузір'я. Усі сузір'я Південної півкулі (невидимі в Європі) отримали назви в епоху Великих географічних відкриттів, коли європейці почали освоювати Новий Світ (Америку).

Однак у різних країнах використовувалися різні карти сузір'їв. Виникла необхідність уніфікувати поділ зоряного неба. Остаточне число та межі сузір'їв було визначено на I з'їзді Міжнародного астрономічного союзу в 1922 р. Уся сферична поверхня зоряного неба була умовно поділена на 88 сузір'їв.

У наш час під сузір'ям розуміють ділянку зоряного неба з характерним спостережуваним угрупованням зір. Для полегшення запам'ятовування та пошуку сузір'їв у підручниках з астрономії і астрономічних атласах яскраві зорі, що утворюють сузір'я, сполучено умовними лініями. Сузір'я, зорі яких утворюють виділену на зоряному фоні конфігурацію, або ті, які містять яскраві зорі, належать до головних сузір'їв (мал. 1.2).

Над горизонтом на яасному зоряному небі неозброєним оком можна побачити близько 3000 зір. Вони відрізняються своїм блиском: одні помітні відразу, інші ледь помітні. Тому ще в II ст. до н. е. Гішпарх (190–126 до н. е.),



Мал. 1.1



Мал. 1.2

один з основоположників астрономії, увів умовну шкалу зоряних величин. Найяскравіші зорі вважалися зорями 1-ї величини, слабші приблизно в 2,5 раза — зорями 2-ї зоряної величини, а найслабкіші, видимі тільки в безмісячну ніч, — зорями 6-ї величини.

Багатьом яскравим зорям давньогрецькі й арабські астрономи дали назви: Вега, Сіріус, Капела, Альтаір, Ригель, Альдебаран тощо. Згодом яскраві зорі в сузір'ях стали позначати буквами грецького алфавіту в міру зменшення їхнього блиску.

З 1603 р. почала діяти система позначень зір, яку запропонував німецький астроном **Йоганн Байєр** (1572–1625). У цій системі назва зорі складалася з двох частин: назви сузір'я, якому належить зоря, і літери грецького алфавіту. Перша літера грецького алфавіту α відповідає найяскравішій зорі в сузір'ї, β — другій за блиском зорі і т. д. Наприклад, Регул — α Лева — це найяскравіша зоря в сузір'ї Лева, Денебола — β Лева — друга за блиском зоря в цьому сузір'ї.

З розвитком науки та винаходом телескопів кількість досліджуваних зір збільшувалася. Для їхнього позначення вже не вистачало літер грецького алфавіту. І тоді зорі почали позначати латинськими літерами. Коли закінчилися й вони, зорі стали позначати цифрами (наприклад, 61 Лебідь).

Спостерігаючи зоряне небо впродовж однієї-двох годин, переконалися, що воно обертається як єдине ціле. Так, з одного боку зорі піднімаються, а з іншого — опускаються. Для жителів Північної півкулі зорі піднімаються зі східної частини горизонту й зміщуються праворуч. Далі вони досягають найвищого положення в південній частині неба, а потім опускаються в західній частині горизонту. Упродовж доби зоряне небо з усіма світилами, що перебувають на ньому, робить один оберт. Отже, видиме добове обертання зоряного неба відбувається зі сходу на захід, якщо стояти обличчям до півдня, тобто за годинниковою стрілкою. У північній частині неба можна відшукати Полярну зорю. Здається, що все небо обертається навколо неї.

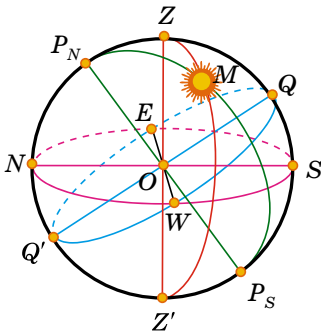
Насправді навколо своєї осі обертається Земля із заходу на схід, а весь небосхил обертається у зворотному напрямку — зі сходу на захід. Полярна зоря для нашої місцевості залишається майже нерухомою на одній і тій самій висоті над горизонтом. Очевидно, що добовий рух зір (світил) — спостережуване явище обертання небесного схилу — відображає дійсне обертання земної кулі навколо осі.

Нам здається, що всі зорі розміщені на деякій кульовій поверхні небосхилу й однаково віддалені від спостерігача. Насправді вони перебувають на різних відстанях від нас. Вони величезні, тому око не може помітити цю відмінність. Тому уявлювану кульову поверхню стали називати небесною сферою.

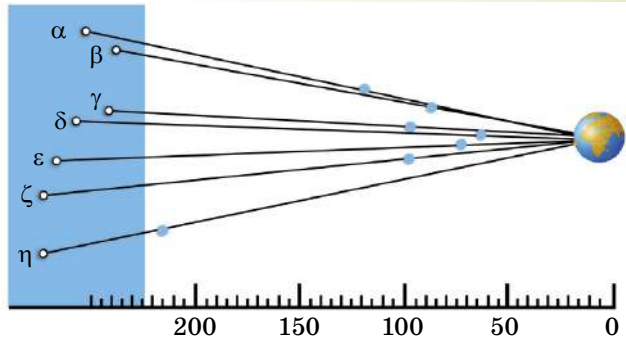
Небесна сфера — це уявна сфера довільного радіуса, центр якої, залежно від розв'язуваного завдання, сполучається з тією або іншою точкою простору.

На малюнку 1.3 зображено небесну сферу: O — центр небесної сфери (місце знаходження спостерігача); P_N — Північний полюс світу; P_S — Південний полюс світу; $P_N P_S$ — вісь світу (полярна вісь); Z — zenit; Z' — надир; E — схід; W — захід; N — північ; S — південь; Q — верхня точка небесного екватора; Q' — нижня точка небесного екватора; ZZ' — вертикальна лінія; $P_N M P_S$ — коло схилення; NS — полуденна лінія; M — світило на небесній сфері.

Центр небесної сфери може бути обрано в місці спостереження (око спостерігача), у центрі Землі або Сонця тощо. Поняттям небесної сфери користуються для кутових вимірювань, для вивчення взаємного розміщення й руху космічних об'єктів на небі.



Мал. 1.3



Мал. 1.4

На поверхню небесної сфери проєктуються видимі положення всіх світил, а для зручності вимірювань будують на ній ряд точок і ліній. Наприклад, деякі із зір «ковша» Великої Ведмедиці перебувають далеко одна від одної, але для земного спостерігача вони проєктуються на ту саму ділянку небесної сфери (мал. 1.4).

Прямовисна лінія (або вертикальна лінія) — пряма, що проходить через центр небесної сфери і збігається з напрямком дії сили тяжіння в місці спостереження.

Прямовисна лінія перетинає небесну сферу в точках: **зеніті** (верхня точка перетину прямовисної лінії з небесною сферою) і **надирі** (точка небесної сфери, яка протилежна зеніту).

205

Площину, що проходить через центр небесної сфери перпендикулярно до прямовисної лінії, називають площиною дійсного, або математичного, горизонту.

Математичний горизонт ділить поверхню небесної сфери на дві половини: видиму для спостерігача, з вершиною в зеніті, і невидиму, з вершиною в надирі. Математичний горизонт не збігається з видимим горизонтом унаслідок нерівності поверхні Землі і у зв'язку з різною висотою точок спостереження, а також викривленням променів світла в атмосфері.

Вертикальне коло, або вертикал світила, — це велике коло небесної сфери, що проходить через зеніт, світило та надир.

Вісь світу — пряма, що проходить через центр небесної сфери паралельно осі обертання Землі, що перетинає небесну сферу у двох діаметрально протилежних точках. Точку перетину осі світу з небесною сферою, поблизу якої перебуває Полярна зоря, називають **Північним полюсом світу**, протилежну точку — **Південним полюсом світу**. Полярна зоря розміщена від Північного полюса світу на кутовій відстані близько 1° (точніше $44'$).

Велике коло, що проходить через центр небесної сфери і перпендикулярно до осі світу, називають **небесним екватором**. Воно ділить небесну сферу на дві частини: Північну півкулю з вершиною в Північному полюсі світу та Південну з вершиною в Південному полюсі світу.

Коло схилення світила — велике коло небесної сфери, що проходить через полюси світу і світило. **Добова паралель** — мале коло небесної сфери, площина якого перпендикулярна до осі світу.

Велике коло небесної сфери, що проходить через точки зеніту, надирі й полюси світу, називають **небесним меридіаном**. Він перетинається зі справжнім горизонтом у двох діаметрально протилежних точках. Точку перетину справжнього горизонту й небесного меридіана, найближчу до Північного полюса світу, називають **точкою півночі**. Точку перетину

справжнього горизонту й небесного меридіана, найближчу до Південного полюса світу, називають **точкою півдня**.

Лінію, що сполучає точки півночі й півдня, називають **полуденною лінією**. Вона лежить на площині справжнього горизонту. За напрямком полуденної лінії падають тіні від предметів опівдні.

З небесним екватором справжній горизонт також перетинається у двох діаметрально протилежних точках — **точці сходу** і **точці заходу**. Для спостерігача, що перебуває в центрі небесної сфери обличчям до точки півночі, точка сходу буде розміщена праворуч, а точка заходу — ліворуч. Пам'ятаючи це, легко орієнтуватися на місцевості.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під сузір'ям?
2. На яку кількість сузір'їв розділено небесну сферу?
3. Як сузір'я одержали свої назви?
4. Що розуміють під небесною сферою?
5. Дайте означення основних точок, ліній і площин небесної сфери.



Підготуйте мультимедійну презентацію на тему «Міфи і легенди зоряного неба» та презентуйте її класу.

§ 2. НЕБЕСНІ КООРДИНАТИ. СИСТЕМИ КООРДИНАТ

206 Положення світил визначається відносно точок і кіл небесної сфери. Для цього введено небесні координати, подібно до географічних координат на поверхні Землі.

Небесні координати — центральні кути або дуги великих кіл небесної сфери, за допомогою яких визначають положення світил відносно основних кіл і точок небесної сфери (мал. 1.5, 1.6).

Під час астрономічних спостережень зручно визначати положення світил відносно горизонту. **Горизонтальна система** координат використовує за основу коло дійсного горизонту. У цій системі координатами є **висота h** і **азимут A** .

Висота світила h — кутова відстань світила M від справжнього горизонту, виміряна вздовж вертикального кола (мал. 1.5).

Висота визначається в градусах, хвилинах і секундах. Вона вимірюється в межах від 0 до $+90^\circ$ до зеніту, якщо світило перебуває у видимій частині небесної сфери, і від 0 до -90° до надира, якщо світило перебуває під горизонтом. Для вимірювання азимутів за початок відліку беруть точку півдня.

Азимут світила A — кутова відстань, виміряна вздовж справжнього горизонту, від точки півдня до точки перетину горизонту з вертикальним колом, що проходить через світило M (мал. 1.5).

Азимут відраховується на захід від точки півдня в межах від 0 до 360° .

Горизонтальна система координат використовується під час топографічної зйомки та навігації. Унаслідок добового обертання небесної сфери висота й азимут світила із часом змінюються. Отже, горизонтальні координати мають певне значення тільки для відомого моменту часу. Кутову відстань від зеніту до світила, вимірювану вздовж вертикального кола, називають **зенітною відстанню z** . Вона відраховується в межах від 0 до $+180^\circ$ до надира. Висота й зенітна відстань пов'язані співвідношенням: $z + h = 90^\circ$.

Для побудови зоряних карт і складання зоряних каталогів за основне коло небесної сфери зручно прийняти коло небесного екватора. На малюнку 1.6 показано **екваторіальну систему** небесних координат: δ — схилення

світила M ; α — пряме піднесення; t — годинний кут.

Небесні координати, у системі яких головним колом є небесний екватор, називають екваторіальною системою координат.

У цій системі координатами є схилення δ і пряме піднесення α .

Схилення світила δ — кутова відстань світила M від небесного екватора, виміряна вздовж кола схилення.

Схилення обчислюється в межах від 0 до $+90^\circ$ до Північного полюса світу й від 0 до -90° до Південного полюса світу. За початкову точку відліку на небесному екваторі приймають точку весняного рівнодення Υ , де Сонце буває близько 21 березня.

Точку, у якій центр Сонця перетинає екватор, рухаючись з Південної півкулі до Північної, називають точкою весняного рівнодення Υ , протилежну — точкою осіннього рівнодення Ω .

Унаслідок того, що тропічний рік (інтервал часу між двома послідовними проходженнями Сонця через ту саму точку рівнодення) не збігається з тривалістю календарного року, моменти рівнодення рік у рік зсуваються відносно початку календарної доби. Моменти рівнодення настають у простий рік на 5 год 48 хв 46 с пізніше, ніж у попередній, а у високосний — на 18 год 11 хв 14 с раніше. Тому моменти рівнодення можуть припадати на дві сусідні календарні дати. У наш час Сонце проходить точку весняного рівнодення 20 або 21 березня за Гринвічем (цей момент вважають початком астрономічної весни в Північній півкулі), а точку осіннього рівнодення — 22 або 23 вересня (початком астрономічної осені в Північній півкулі).

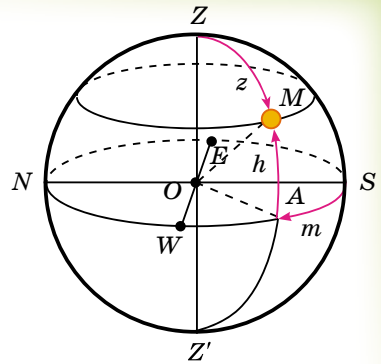
Прямим піднесенням світила α називають дугу небесного екватора від точки весняного рівнодення до кола схилення світила, або кут між напрямком на точку весняного рівнодення та площиною кола схилення світила.

Пряме піднесення відраховується у бік, протилежний добовому обертанню небесної сфери, у межах від 0 до 360° у градусній мірі або від 0 до 24^h у годинній мірі.

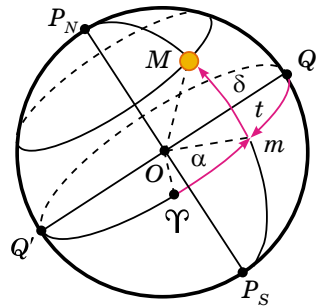
Для деяких астрономічних завдань (пов'язаних з вимірюванням часу) замість прямого піднесення α вводять годинний кут t (мал. 1.6).

Годинні кути відраховують в бік добового обертання небесної сфери, тобто на захід від верхньої точки небесного екватора, у межах від 0 до 360° (в градусній мірі) або від 0 до 24^h (у годинній мірі). Іноді годинні кути відраховують в межах від 0 до $+180^\circ$ (від 0 до $+12^h$) на захід і від 0 до -180° (від 0 до 12^h) на схід.

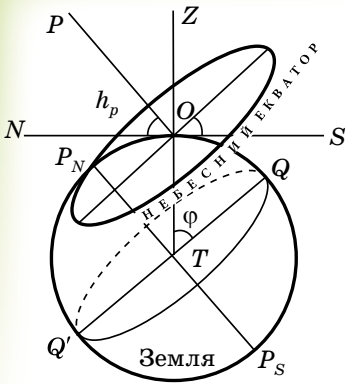
Отже, годинний кут — це кутова відстань, виміряна вздовж небесного екватора, від верхньої точки небесного екватора до кола схилення світила.



Мал. 1.5



Мал. 1.6



Мал. 1.7

Координати зір (α , δ) в екваторіальній системі координат не пов'язані з добовим рухом небесної сфери й змінюються дуже повільно. Тому вони застосовуються для складання зоряних карт і каталогів. Зоряні карти — це проєкції небесної сфери на площину з нанесеними на неї об'єктами в певній системі координат. Набір зоряних карт суміжних ділянок неба, що вкривають усе небо або деяку його частину, називають **зоряним атласом**. У спеціальних списках зір, названих зоряними каталогами, вказуються координати їхнього місця на небесній сфері, зоряна величина й інші параметри. Наприклад, каталог *Hubble Guide Star Catalog (GSC)* містить близько 19 млн об'єктів.

Ми вже знаємо, що Полярна зоря, яка перебуває поблизу Північного полюса світу, залишається майже на одній висоті над гори-

зонтом на даній широті під час добового обертання зоряного неба. Під час переміщення спостерігача з півночі на південь, де географічна широта менша, Полярна зоря опускається до горизонту, тобто існує залежність між висотою полюса світу й географічною широтою місця спостереження. На малюнку 1.7 земну кулю й небесну сферу зображено в перетині площиною небесного меридіана місця спостереження. Спостерігач із точки O бачить полюс світу на висоті $\angle PON = h_p$. Напрямок осі світу OP паралельний земній осі. Кут при центрі Землі $\angle OTQ$ відповідає географічній широті місця спостереження φ .

Радіус Землі в точці спостереження перпендикулярний до площини дійсного горизонту, а вісь світу перпендикулярна до площини географічного екватора. Тому $\angle PON$ і $\angle OTQ$ рівні між собою як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Отже, кутова висота полюса світу над горизонтом дорівнює географічній широті місця спостереження: $h_p = \varphi$.

З іншого боку, видно, що $\angle QOZ$ визначає собою величину схилення зеніту δ_z . Тому можна записати, що $\varphi = \delta_z$, або $\varphi = h_p = \delta_z$. Ця рівність характеризує залежність між географічною широтою місця спостереження та відповідними горизонтальними й екваторіальними координатами світила.

З переміщенням спостерігача до Північного полюса Землі Північний полюс світу піднімається над горизонтом. На полюсі Землі полюс світу буде перебувати в зеніті. Зорі тут рухаються по колах, паралельних горизонту, що збігається з небесним екватором.

На середніх географічних широтах вісь світу й небесний екватор нахилені до горизонту, добові траєкторії зір також нахилені до горизонту. Тому спостерігаються зорі, які сходять і заходять. Під сходом мається на увазі явище перетинання світилом східної частини горизонту, а під заходом — західної.

У середніх широтах, наприклад на території України, спостерігаються зорі північних навколополярних сузір'їв, які ніколи не опускаються під горизонт. Їх називають **зорями, що не заходять**. Зорі, розташовані біля Південного полюса світу, в Україні ніколи не сходять, їх так і називають **зорі, що не сходять**.

Одне з найважливіших завдань практичної астрономії — визначення моментів часу та азимутів точок сходу та заходу небесних світил. Моменти часу сходу та заходу світила, а також положення точок сходу та заходу на математичному горизонті залежать від схилення δ світила та географічної широти φ місця спостереження.

Видимий річний шлях Сонця серед зір називають *екліптикою*.

У площині екліптики лежить шлях Землі навколо Сонця, тобто її орбіта. Вона нахилена до небесного екватора під кутом $23^{\circ}26,5'$ і перетинає його в точках **весняного** (Υ , близько 21 березня) й **осіннього** (Ω , близько 23 вересня) рівнодення (мал. 1.8).

Точкою весняного рівнодення називають точку, у якій Сонце в результаті свого річного руху переходить з Південної півкулі небесної сфери в Північну. У точці осіннього рівнодення Сонце переходить з Північної півкулі небесної сфери у Південну.



Мал. 1.8

На середніх географічних широтах є світила, що сходять і заходять за горизонт; є такі, що ніколи не заходять за горизонт, і є такі, які ніколи не сходять над горизонтом (невидимі в цій місцевості). На екваторі всі світила сходять і заходять за горизонт. На полюсах Землі є світила, завжди видимі над горизонтом, і є світила, що ніколи не видимі.

209

Час s , що минув від верхньої кульмінації точки весняного рівнодення, називають *зоряним часом*.

Інтервал часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями точки весняного рівнодення називають *зоряною добою*.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Схарактеризуйте горизонтальну та екваторіальну системи координат.
2. Чому в астрономії використовують різні системи координат?
3. У чому полягає принципова відмінність між різними системами небесних координат?
4. Як визначити висоту полюса світу над горизонтом?
5. За якої умови світило буде видимим на даній широті?
6. Де на земній кулі всі зорі протягом року рухаються паралельно математичному горизонту?



РОБОТА У ГРУПАХ

- Об'єднайтеся у групи та поспостерігайте й з'ясуйте, які сузір'я не заходять за горизонт у вашій місцевості взимку і влітку.
- Підготуйте повідомлення про жінок-науковиць (минулих часів і сучасниць) в галузі астрономії.

§ 3. ВИДИМІ РУХИ СОНЦЯ ТА ПЛАНЕТ. КОНФІГУРАЦІЇ ТА УМОВИ ВИДИМОСТІ ПЛАНЕТ

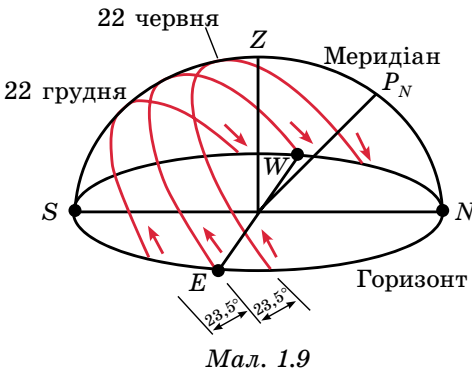
За постійно змінними координатами Сонця δ і α на небесній сфері можна назвати велике коло, що представляє видиму траєкторію центра сонячного диска протягом року. Це коло давні греки назвали **екліптикою**.

Оскільки річний рух Сонця відображає реальний рух Землі по орбіті, екліптика є слідом від перетину небесної сфери площиною, паралельною площині земної орбіти. Цю площину називають **площиною екліптики**. Крім двох точок рівнодення, на екліптиці виділяють дві проміжні між ними й протилежні одна одній точки, у яких схилення Сонця буває найбільшим за абсолютною величиною. У **точці літнього сонцестояння** Сонце має максимальне схилення $\delta = +23^\circ 26'$. У **точці зимового сонцестояння** Сонце має максимальне схилення $\delta = -23^\circ 26'$.

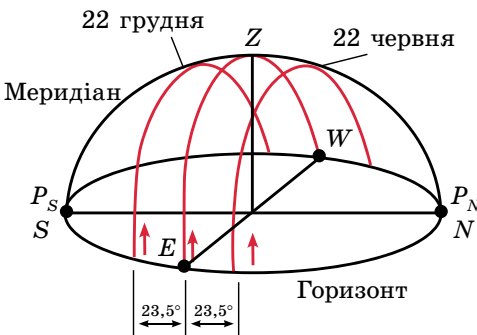
Усю екліптику (360°) Сонце проходить за один рік, однак цей рух уявний, тому що відбувається внаслідок обертання Землі навколо Сонця. Нагадаємо, що видимий рух світил (у тому числі й Сонця), що відбувається через власне обертання Землі навколо осі, називають **добовим рухом**.

Розглянемо добовий рух Сонця на різних широтах. У середніх широтах Сонце сходить завжди у східній частині неба, поступово піднімається над горизонтом. Опівдні досягає найвищого положення на небі, потім починає опускатися до горизонту і заходить у західній частині неба. У Північній півкулі цей рух відбувається зліва направо, а в Південній — справа наліво. Спостерігач у Північній півкулі Землі при цьому буде бачити Сонце на півдні, а в Південній півкулі — на півночі. Денний шлях Сонця на небі симетричний напрямку північ–південь.

За Полярним колом на Землі, де $|\phi| > 66,5^\circ$, добовий шлях Сонця практично паралельний горизонту. Сонце протягом півроку не заходить, описуючи кола над горизонтом. Це полярний день. Потім на півроку Сонце заходить, і настає полярна ніч. На екваторі Сонце, як й інші світила, сходить і заходить перпендикулярно до площини справжнього горизонту і видиме протягом половини доби.



Мал. 1.9



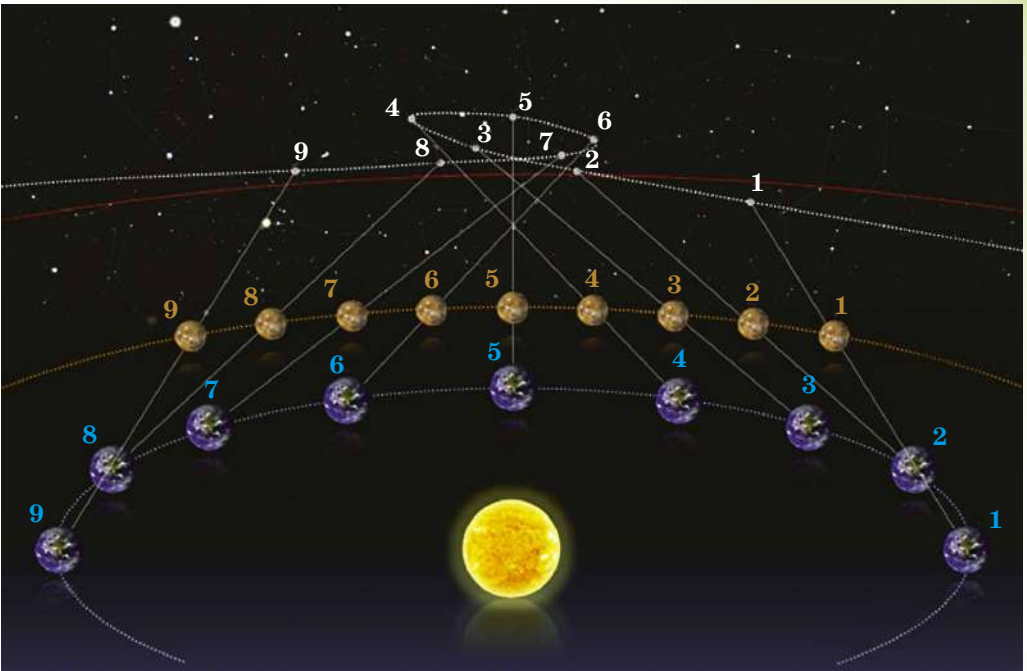
Мал. 1.10

Зміну добового шляху Сонця над горизонтом у різні пори року для середніх географічних широт Північної півкулі показано на малюнку 1.9.

Визначаючи протягом року висоту Сонця опівдні, можна помітити, що двічі на рік воно буває на небесному екваторі. Це відбувається в дні весняного й осіннього рівнодень. Площина горизонту ділить небесний екватор навпіл. Тому в дні рівнодень шляхи Сонця над горизонтом і під горизонтом однакові, відповідно тривалість дня і ночі однакова. Найкоротший день припадає на 22 грудня, а найдовший — на 22 червня.

Для спостерігачів, що перебувають на земному екваторі, добові шляхи Сонця над горизонтом протягом року показано на малюнку 1.10.

У давнину було відомо п'ять схожих на зорі, але більш яскравих світил, які хоча й беруть участь разом із зорями в добовому обертанні небосхилу, але мають також самостійний видимий рух. Давні греки назвали ці світила **планетами** (від грец. *πλανήτης* — «блукаюча»).



Мал. 1.11

211

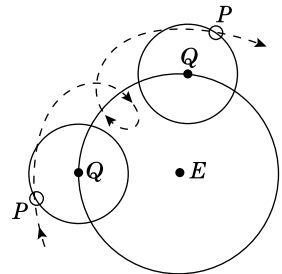
Неозброєним оком можна побачити блукаючі світила (планети): Меркурій, Венеру, Марс, Юпітер та Сатурн.

Планети завжди розміщуються на небі недалеко від екліптики, але, на відміну від Сонця й Місяця, через певні тимчасові інтервали змінюють напрямок свого руху. Вони переміщуються між зорями в основному із заходу на схід (як Сонце й Місяць) — прямий рух. Однак кожна планета в певний час сповільнює свій рух, зупиняється й починає рухатися зі сходу на захід — зворотний рух. Потім світило знову зупиняється й відновлює прямий рух. Тому видима траєкторія кожної планети на небосхилі — складна лінія з зигзагами й петлями. Ця траєкторія ще й змінюється від циклу до циклу, протягом якого планета повертається приблизно на те саме місце серед зір (мал. 1.11).

Рух планет тривалий час залишався явищем незрозумілим і загадковим, яке згодом знайшло своє правильне й просте пояснення в теорії Коперника. Проте в II ст. н. е. Клавдій Птолемей розробив геоцентричну систему світу, що дала змогу обчислювати положення планет відносно зір на багато років уперед та передбачати настання сонячних і місячних затемнень.

Використовуючи власні спостереження та свої попередники, Птолемей побудував теорію руху Сонця, Місяця, планет. Учений припустив, що всі світила рухаються навколо нерухомої Землі, яка є центром світобудови й має кулясту форму.

Для пояснення складного петлеподібного руху планет Птолемей увів комбінацію двох рівномірних кругових рухів: рух самої планети по малому колу (епіцикл) і рух центра цього кола навколо Землі (деферент). При комбінації двох кругових рухів виходила епіциклоїда, якою рухалася планета P (мал. 1.12).



Мал. 1.12

Завдяки довготривалим спостереженням рухів планет теорія Птолемея дедалі більше ускладнювалася (уведення додаткових кіл з різними радіусами, нахилами, швидкостями тощо), що незабаром зробило її занадто громіздкою і неправдоподібною.

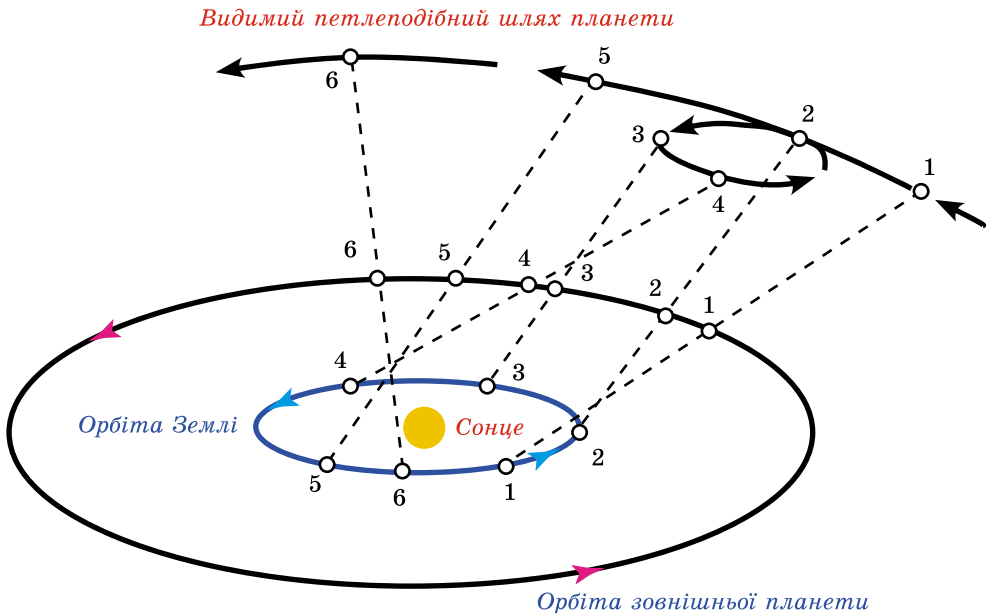
У XVI ст. польський учений **Міколай Коперник (1473–1543)**, відкинувши догматичне поняття про нерухомість Землі, зарахував її до числа звичайних планет. Учений показав, що Земля, посідаючи третє місце від Сонця так само, як й інші планети, рухається в просторі навколо Сонця та одночасно обертається навколо своєї осі. Геліоцентрична система Коперника дуже просто пояснювала петлеподібний рух планет. На малюнках 1.11 і 1.13 показано рух Марса на небесній сфері, який спостерігають із Землі. Однаковими цифрами позначено положення Марса, Землі й точок траєкторії Марса на небосхилі в однакові моменти часу.

Геоцентрична система Птолемея не давала змоги виміряти відстань до планет. Геліоцентрична система Коперника вперше дала змогу розрахувати пропорції Сонячної системи, користуючись радіусом земної орбіти як астрономічною одиницею довжини.

Великий італійський учений Галілео Галілей підтвердив теорію Коперника своїми відкриттями, які зробив за допомогою телескопа. Він виявив, що на Місяці існують гори й кратери, Венера має фази, у Юпітера є 4 супутники і що Чумацький Шлях — не просте сяйво на небі: воно складається з окремих слабких зір, недоступних для неозброєного ока.

Йоганн Кеплер розвинув теорію Коперника, відкривши закони руху планет, і довів на основі фактів, що планети рухаються по еліпсах і нерівномірно. Ісаак Ньютон відкрив у 1687 р. закон всесвітнього тяжіння, що дав змогу виразити теорію руху планет у вигляді формул і відмовитися назавжди від громіздких геометричних побудов.

Що ж розуміють під конфігураціями планет? Це взаємні розміщення планет, Землі та Сонця. Конфігурації різні для нижніх планет (орбіти яких перебувають ближче до Сонця, ніж орбіта Землі) і верхніх планет (орбіти яких розміщені за орбітою Землі).

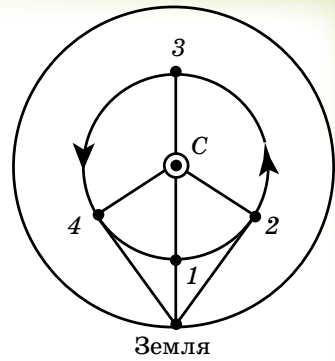


Мал. 1.13

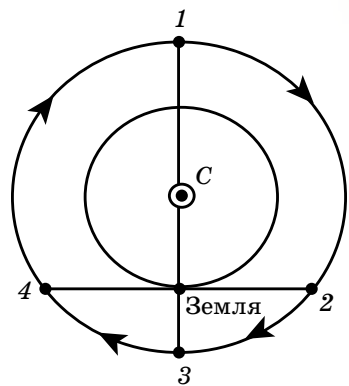
Для нижніх планет виділяють сполучення та елонгації. На малюнку 1.14 зображено схему конфігурацій нижніх планет: 1 — нижнє сполучення; 2 — найбільша західна елонгація; 3 — верхнє сполучення; 4 — найбільша східна елонгація. У нижньому сполученні планета найближче до Землі, а у верхньому — найдалі від неї. При елонгаціях кут між напрямками із Землі на Сонце й на нижню планету залишається гострим. Через еліптичність планетних орбіт найбільші елонгації не мають сталого значення. У Венери вони — у межах від 45° до 48° , а в Меркурія — від 18° до 28° . Обидві планети не відходять далеко від Сонця і тому вночі невидимі. Тривалість їхньої ранкової або вечірньої видимості не перевищує 4 год для Венери й 1,5 год для Меркурія. Меркурій іноді зовсім невидимий, тому що сходить і заходить у світлий час доби.

Розрізняють східну й західну елонгації. У східній елонгації планета спостерігається увечері після заходу Сонця, а в західній — уранці перед сходом Сонця. Для верхніх планет характерні інші конфігурації (мал. 1.15): 1 — сполучення; 2 — західна квадратура; 3 — протистояння; 4 — східна квадратура.

Якщо Земля перебуває між планетою й Сонцем, то таку конфігурацію називають **протистоянням**. Ця конфігурація найсприятливіша для спостережень планети, тому що в цей час планета перебуває найближче до Землі та повернена до неї своєю освітленою півкулею, а перебуваючи на небі в протилежному до Сонця місці, перебуває у верхній кульмінації близько опівночі. У верхніх планет нижнього сполучення не буває, тому не має смислу єдине сполучення називати верхнім. Якщо кут між напрямками із Землі на верхню планету і на Сонце становить 90° , то кажуть, що планета перебуває у квадратурі. Розрізняють західну й східну квадратури. У конфігурації західної квадратури планета сходить близько опівночі, а в східній — заходить близько опівночі. Моменти конфігурацій планет й умови їхньої видимості щорічно публікуються в астрономічних довідниках і календарях.



Мал. 1.14



Мал. 1.15

Інтервал часу, протягом якого планета робить повний оберт навколо Сонця по орбіті відносно зір, називають зоряним, або сидеричним, періодом обертання планети.

Одноїменні конфігурації планет наступають у різних точках їхніх орбіт.

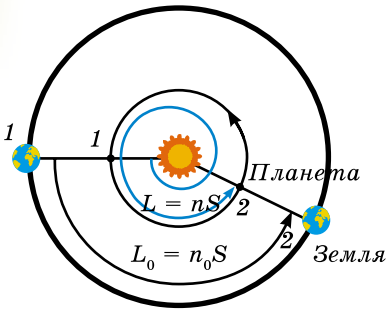
Інтервал часу між двома послідовними однойменними конфігураціями планет називають синодичним періодом обертання планети.

Він відрізняється від зоряного періоду. Синодичний період (від грец. *σύνωδος* — «зближення») — це період між двома послідовними сполученнями (протистояннями).

Теорія Коперника дає змогу встановити взаємозв'язок синодичного й сидеричного періодів обертання планет.

Припустимо, що T — сидеричний (зоряний) період обертання планети, а T_0 — сидеричний період обертання Землі (зоряний рік); S — синодичний період обертання планети. Середнє значення дуги, що проходить планета за одну добу, називають середнім рухом n , і дорівнює $n = 360^\circ:T$, а середній рух Землі — $n_0 = 360^\circ:T_0$. У нижніх планет $T < T_0$ і $n > n_0$.

Одноіменні сполучення таких планет (наприклад, нижні сполучення на мал. 1.16) настають через синодичний період обертання S , за який Земля проходить дугу $L_0 = n_0S = \frac{360^\circ}{T_0}S$, а планета, забігаючи вперед, робить один оберт навколо Сонця й доганяє Землю, проходячи кутовий шлях $L = 360^\circ + L_0$, дорівнює: $L = nS = \frac{360^\circ}{T}S$.



Мал. 1.16

Віднімаючи перше рівняння від другого, одержимо рівняння синодичного руху для нижніх планет: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$. Для верхніх планет рівняння синодичного руху матиме вигляд: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$, тому що $T > T_0$ і $n < n_0$.

Останні рівняння дають середні значення синодичних періодів обертання планет. За допомогою цих рівнянь за спостережуваним синодичним періодом обертання планети легко підрахувати сидеричний період її обертання навколо Сонця.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Як рухається Сонце протягом року?
2. Які особливості добового руху Сонця на різних широтах?
3. Який основний недолік системи світу Птолемея?
4. У чому полягає революційність поглядів Коперника?
5. Як Галілей підтвердив теорію Коперника?
6. Що означає зворотний рух планет?
7. Що розуміють під конфігураціями планет? У якій з конфігурацій можуть бути верхні й нижні планети?



Зробіть історичний екскурс впровадження теорії Міколая Коперника.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

Головна наукова праця Коперника «Про обертання небесних сфер», на написання шести книжок якої було витрачено понад 20 років тяжкої праці, була опублікована в 1543 р. У ній з новим поглядом на будову Сонячної системи нерозривно пов'язане питання про положення Землі, а з нею й людини у Всесвіті. Простота та реальність системи будови світу, яку виклав Коперник, швидко знайшла собі прихильників. Його теорія змусила звільнити науку від застарілих і схоластичних традицій, що гальмували її розвиток. Однак сам астроном залишався в полоні деяких переконань. Наприклад, астроном так і не зміг відмовитися від того, що планети рухаються рівномірно по колових орбітах. Тому його модель Всесвіту також містила безліч сфер — епіциклів і деферентів.

§ 4. ЗАКОНИ КЕПЛЕРА ТА ЇХНІЙ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ЗАКОНАМИ НЬЮТОНА

До кінця XVI ст. ученим не вдавалося точно розрахувати відносне положення планет на кілька років уперед за допомогою існуючих у той час теорій. Тоді вчені припустили, що планети рівномірно рухаються по строго колових орбітах навколо Сонця. Кінематичні закони руху планет відкрив лише на початку XVII ст. австрійський астроном і математик **Йоганн Кеплер** (1571–1630).

Він уперше встановив, що **планети обертаються по еліпсах, в одному з фокусів яких є Сонце**. Ця закономірність одержала назву **першого закону Кеплера**.

Відрізок AB (мал. 1.17) називають **великою віссю**, а відрізок CD — **малою віссю** еліпса. Відрізки $AO = OB = a$, $CO = OD = b$ називають відповідно **великою** і **малою півосьми** еліпса. Відношення $e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a}$ назива-

ють **ексцентриситетом** еліпса. Що більший ексцентриситет еліпса, то більше зміщені фокуси відносно центра і більшою буде різниця між великою та малою півосьми. Тобто ексцентриситет слугує мірою «сплюснутості» еліпса.

Для еліпса $0 < e < 1$. Якщо $e = 0$, можна розглядати коло як окремий вид еліпса ($b = a$). Припустимо, якщо Сонце перебуває у фокусі F_1 , то найближчу до Сонця точку A орбіти планети називають **перигелієм**, а найвіддаленішу B — **афелієм**. Позначимо $AF_1 = q$ (q — перигелійна відстань), а $BF_1 = Q$ (Q — афелійна відстань).

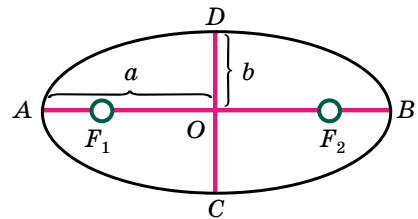
З малюнка 1.17 випливає, що $q + OF_1 = a$, $OF_1 = ae$, то $q = a - ae = a(1 - e)$.

У земної орбіти ексцентриситет дорівнює 0,017. Земля перебуває у перигелії на початку січня, і перигелійна відстань дорівнює 147 млн км, а в афелії — на початку липня, й афелійна відстань дорівнює 152 млн км.

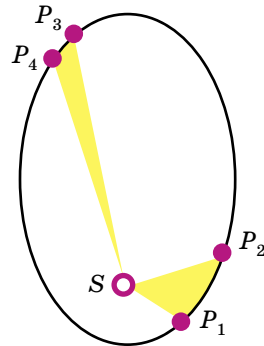
Вивчаючи рух Марса в просторі, Кеплер помітив, що планета рухається по орбіті нерівномірно — узимку швидше, ніж улітку. Він став шукати закономірність, за якою відбувається зміна швидкості Марса, і висунув гіпотезу, що швидкість має бути обернено пропорційна відстані від Марса до Сонця. Для перигелію й афелію припущення підтвердилось. Тоді Кеплер умовно розбив орбіту Марса на 360 частин і став перевіряти свою гіпотезу для різних її ділянок. Спостереження та розрахунки показали, що за однакові інтервали часу Марс проходить рівні площі секторів орбіти.

Сучасне формулювання цієї залежності поширене на всі планети, і називають його **другим законом Кеплера**. Полягає він в такому: **радіус-вектор планети** (лінія, що сполучає центр Сонця із центром планети) **за однакові інтервали часу описує рівні площі**.

Другий закон Кеплера, або закон площ, проілюстровано на малюнку 1.18. Під час руху планети (P) навколо Сонця (S)



Мал. 1.17



Мал. 1.18

її радіус-вектор за рівні інтервали часу описує однакові за площею фігури — P_1SP_2 і P_3SP_4 . Отже, швидкість руху планети по орбіті змінюється, приймаючи максимальне значення в перигелії та мінімальне в афелії. Найбільшу швидкість Земля має взимку: $v_{max} = 30,38$ км/с. Найменшу — влітку: $v_{min} = 29,36$ км/с. У липні Земля рухається повільніше, тому тривалість літа в Північній півкулі більша, ніж у Південній. Цим пояснюється, що середньорічна температура в Північній півкулі Землі вища, ніж у Південній. Коли б Земля оберталася навколо Сонця зі сталою швидкістю, то кількість днів у цих півріччях була б однаковою.

Порівнюючи розміри орбіт і періоди обертання планет навколо Сонця, Кеплер виявив, що квадрати періодів обертання планет пропорційні кубам їхніх середніх відстаней від Сонця (або відношення $r^3 : T^2$ однакове для всіх планет).

Третій закон Кеплера формулюється так: **квадрати сидеричних періодів обертання двох планет відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт:**

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Відкриття Коперника і його послідовників показали, що Земля — це планета, що рухається навколо Сонця, як і інші планети. Тому з'явилося припущення, що сила тяжіння властива не тільки Землі, але й іншим небесним тілам. На матеріальні тіла, що перебувають біля інших планет, Місяця або Сонця, діє сила тяжіння, що спрямована до їхнього центра так само, як і на Землі. Отже, завдяки поширенню властивостей тяжіння на інші небесні тіла було поставлено питання про взаємодію тіл.

На основі дослідних даних Ньютон сформулював три основних закони руху тіл (закон інерції, закон динаміки матеріальної точки, закон дії і протидії). На основі третього закону Кеплера та закону динаміки Ньютон вивів закон всесвітнього тяжіння:

два тіла притягаються одне до одного із силою, пропорційною добутку мас цих тіл і обернено пропорційною квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де m_1 і m_2 — маси двох тіл, що притягаються одне до одного; r — відстань між ними; $G = 6,673 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² — гравітаційна стала.

На основі закону всесвітнього тяжіння та законів механіки Ньютон математично довів, що під дією сили тяжіння (гравітаційної сили) тіло масою m буде рухатися щодо тіла масою M по одній з кривих: еліпсу, колу, параболі або гіперболі.

Таким чином, Ньютон уточнив й узагальнив перший закон Кеплера: **під дією тяжіння одне небесне тіло рухається в полі тяжіння іншого небесного тіла по одному з конічних перерізів — еліпсу, колу, параболі або гіперболі.**



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Сформулюйте закони Кеплера.
2. По яких орбітах можуть рухатися небесні тіла під дією сили тяжіння?
3. Як змінюється значення швидкості при русі планети по орбіті від перигелію до афелію?
4. Як залежить період обертання супутників від мас планет?



Дослідіть, яку роль відіграли закони Кеплера у становленні космонавтики.

§ 5. ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНЕЙ ДО НЕБЕСНИХ ТІЛ

В астрономії немає єдиного універсального способу визначення відстаней. У міру переходу від близьких небесних тіл до більш далеких одні методи визначення відстаней змінюють інші. Точність оцінки відстаней обмежується або точністю самого грубого з методів, або точністю вимірювання астрономічної одиниці довжини (а. о.), значення якої за радіолокаційними вимірюваннями відоме із середньоквадратичною похибкою 0,9 км і дорівнює $149\,597\,867,9 \pm 0,9$ км. З урахуванням різних змін а. о. Міжнародний астрономічний союз у 1976 році ухвалив значення 1 а. о. = $149\,597\,870 \pm 2$ км.

Визначення відстаней до тіл Сонячної системи. Середню відстань від усіх планет до Сонця в астрономічних одиницях можна обчислити, використовуючи третій закон Кеплера. Визначивши середню відстань від Землі до Сонця (тобто значення 1 а. о.) у кілометрах, можна знайти в цих одиницях відстані до всіх планет Сонячної системи.

Із 40-х років минулого століття радіотехніка дала змогу визначати відстані до небесних тіл за допомогою радіолокації, про яку ви знаєте з курсу фізики. Класичним способом визначення відстаней був і залишається кутимірний геометричний спосіб. Ним визначають відстані й до далеких зір, до яких метод радіолокації застосувати не можна. Геометричний спосіб ґрунтується на явищі паралактичного зміщення.

Удаване зміщення світила, обумовлене переміщенням спостерігача, називають **паралактичним зміщенням**, або **паралаксом світила**. Визначення відстаней до тіл Сонячної системи ґрунтується на вимірюванні їхніх горизонтальних паралаксів.

217

Кут p , під яким зі світила видно радіус Землі, перпендикулярний до променя зору, називають горизонтальним паралаксом (мал. 1.19). Що більша відстань до світила, то менший кут p .

Знаючи горизонтальний паралакс світила, можна визначити його відстань $D = SO$ від центра Землі. Від-

стань до світила $D = \frac{R_3}{\sin p}$, де R_3 —

радіус Землі. Приймавши R_3 за одиницю, можна виразити відстань до світила в земних радіусах.

Наприклад, паралакс Сонця $p_{\odot} = 8,794''$. Паралаксу Сонця відповідає середня відстань від Землі до Сонця, приблизно 149,6 млн км. Цю відстань приймають за одну астрономічну одиницю (1 а. о.). В астрономічних одиницях зручно вимірювати відстані між тілами Сонячної системи.

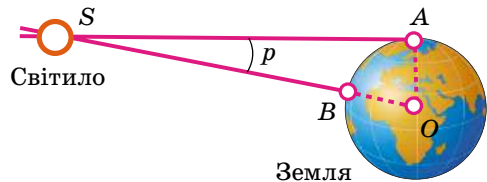
При малих кутах $\sin p \approx p$, якщо кут p виражений у радіанах.

Якщо p виражений у секундах дуги, то вводиться множник $\sin 1'' = \frac{1}{206265}$, де 206 265 — число секунд в одному радіані. Тоді

$\sin p'' = p'' \sin 1'' = \frac{p''}{206265}$ і $D = \frac{206265''}{p''} R_3$. Це рівняння значно спрощує

обчислення відстані D до світила за відомим паралаксом p .

Для визначення відстаней до тіл Сонячної системи використовують радіолокаційні вимірювання. Вимірявши час t , потрібний для того, щоб радіоло-



Мал. 1.19

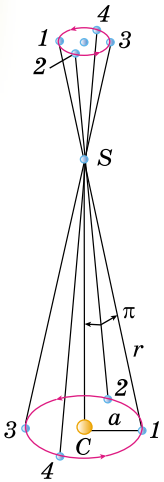
каційний імпульс досяг небесного тіла, відбився і повернувся на Землю, визначають відстань D до цього тіла за формулою $D = c \frac{t}{2}$, де c — швидкість світла, наближено дорівнює $3 \cdot 10^8$ м/с (точніше $c = 299\,792\,458$ м/с).

За допомогою радіолокації одержано найбільш точні значення відстаней до тіл Сонячної системи, уточнено відстані між материками Землі, більш точно визначено астрономічну одиницю (1 а. о. = 149 597 870 км).

Методи лазерної локації (наприклад, спеціальні кутові відбивачі, доставлені на Місяць) дали змогу виміряти відстань від Землі до Місяця з точністю до кількох сантиметрів.

Визначення відстаней до зір. Учені давно припускали, що зорі мають таку саму фізичну природу, як і Сонце. Через величезні відстані диски зір не видно навіть у сильні телескопи. Щоб порівнювати зорі між собою та із Сонцем, потрібно знайти методи визначення відстаней до них.

Основним методом є **метод паралактичного зсуву зір**, тому що радіус Землі занадто малий порівняно з відстанню до зір. Ще Коперник розумів, що, відповідно до його геліоцентричної системи, близькі зорі на фоні далеких зір повинні описувати еліпси в результаті річного руху Землі навколо Сонця. Припущене переміщення близької зорі на фоні дуже далеких зір відбувається по еліпсу з періодом 1 рік і відображає рух спостерігача разом із Землею навколо Сонця (мал. 1.20). Паралактичний зсув зорі протягом року: C — Сонце; S — зоря; a — піввісь земної орбіти; π — річний паралакс. Положення Землі на орбіті та видиме із Землі положення зорі на небі на цьому малюнку позначено однаковими цифрами.



Мал. 1.20

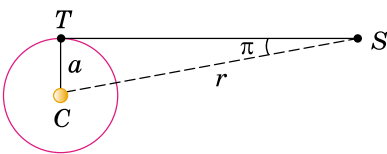
Малий еліпс, описаний зорею, називають **паралактичним еліпсом**. У кутовій мірі більша піввісь цього еліпса дорівнює значенню кута, під яким із зорі видно більшу піввісь земної орбіти, перпендикулярну до напрямку на зорю. Цей кут називають **річним паралаксом** (π). Паралактичне зміщення зір є незаперечним доказом обертання Землі навколо Сонця.

Відстані до зір визначаються за їхнім річним паралактичним зміщенням, що обумовлене переміщенням спостерігача (разом із Землею) по земній орбіті.

З малюнка 1.21 видно, що якщо $CT = a$ є середнім радіусом земної орбіти, $SC = r$ — відстань до зорі S від Сонця C , а кут π — річний паралакс зорі, то $r = \frac{a}{\sin \pi}$.

Якщо річні паралакси зір оцінюються десятковими частками секунди, а 1 радіан дорівнює 206 265'', то відстань до зорі можна визначити із спів-

$$\text{відношення } r = \frac{206265''}{\pi''} \text{ а. о.}$$



Мал. 1.21

Під час вимірювання відстаней до зір астрономічна одиниця занадто мала. Тому для зручності визначення відстаней до зір в астрономії застосовується спеціальна одиниця довжини — **парсек** (пк), назва якої походить від слів «паралакс» і «секунда».

Парсек — це відстань, з якої середній радіус земної орбіти (що дорівнює 1 а. о.) перпендикулярний до променя зору, видно під кутом $1''$ (одна кутова секунда).

Відповідно до останньої формули $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. о.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$.

Отже, відстань до зір у парсеках буде визначатися виразом: $r = \frac{1}{\pi''} \text{ пк}$.

В астрономічних одиницях зазвичай виражаються відстані до тіл Сонячної системи. Відстані до небесних тіл, що розміщені за межами Сонячної системи, зазвичай виражаються в парсеках, кілопарсеках ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ пк}$) і мегапарсеках ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$), а також у світлових роках ($1 \text{ св. р.} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. о.} = 0,3067 \text{ пк}$, $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. р.}$).

Світловий рік — відстань, яку проходить електромагнітне випромінювання (світло) у вакуумі за 1 рік.

Нижня межа вимірювання паралаксів не перевищує $0,005''$, що дає змогу визначати відстані не більші за 200 пк. Відстань до більш далеких об'єктів визначаються менш точно та іншими методами.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Перелічіть способи визначення відстаней до тіл Сонячної системи, які ви знаєте.
2. Що розуміють під горизонтальним паралаксом? Як визначити відстань до світила, знаючи його горизонтальний паралакс?
3. Що таке астрономічна одиниця, парсек, світловий рік?
4. У чому полягає радіолокаційний метод визначення відстаней до небесних тіл?

219



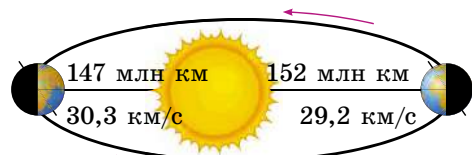
Дослідіть в історичному плані, які методи використовувалися для визначення відстаней до небесних тіл.

§ 6. АСТРОНОМІЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ. КАЛЕНДАР

Усе наше життя пов'язане з періодичною зміною дня і ночі, а також пір року. На цих повторюваних астрономічних явищах базуються основні одиниці часу — доба, місяць, рік. Основна величина для вимірювання часу пов'язана з періодом повного обертання земної кулі навколо своєї осі.

Момент верхньої кульмінації центра Сонця називають **дійсним полуднем**, момент нижньої кульмінації — **дійсним північчю**. Інтервал часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра Сонця називають **дійсною сонячною добою**. Час, що пройшов від моменту нижньої кульмінації центра сонячного диска до будь-якого іншого його положення на тому самому географічному меридіані, називають **дійсним сонячним часом** (T_{\odot}).

Зауважимо, що дійсна сонячна доба періодично змінює свою тривалість. У цього є дві причини: 1) нахил площини екліптики до площини небесного екватора, 2) еліптична форма орбіти Землі. Коли Земля перебуває на ділянці еліпса, розміщеній ближче до Сонця (на мал. 1.22 — це положення показано ліворуч), то вона рухається швидше. Через півроку Земля, перебуваючи в протилежній частині еліпса, буде



Мал. 1.22

переміщуватися по орбіті повільніше. Нерівномірний рух Землі по своїй орбіті спричиняє нерівномірне видиме переміщення Сонця на небесній сфері. Тобто в різні пори року Сонце переміщується з різною швидкістю. Тому тривалість дійсної сонячної доби постійно змінюється.

Унаслідок нерівномірності дійсної сонячної доби користуватися нею як одиницею часу незручно. У повсякденному житті використовують не дійсну, а середню сонячну добу, тривалість якої прийнято сталою.

Що таке середня сонячна доба? Уявимо точку, що протягом року робить один повний оберт навколо Землі за такий час, як і Сонце, але при цьому переміщується рівномірно по небесному екватору, а не по екліптиці. Назвемо таку уявну точку **середнім екваторіальним сонцем**. Верхню кульмінацію середнього екваторіального Сонця називають **середнім полуднем**, а інтервал часу між двома послідовними середніми полуднями — **середньою сонячною добою**. Тривалість її завжди однакова. Середню сонячну добу ділять на 24 години.

Кожна година середнього сонячного часу ділиться на 60 хвилин, а кожна хвилина — на 60 секунд середнього сонячного часу. За початок середньої сонячної доби приймають **середню північ**, тобто момент нижньої кульмінації уявної точки небесної сфери, яку називають **середнім сонцем**.

Інтервал часу від моменту нижньої кульмінації середнього екваторіального сонця до будь-якого іншого його положення на тому самому географічному меридіані називають середнім сонячним часом (T_c).

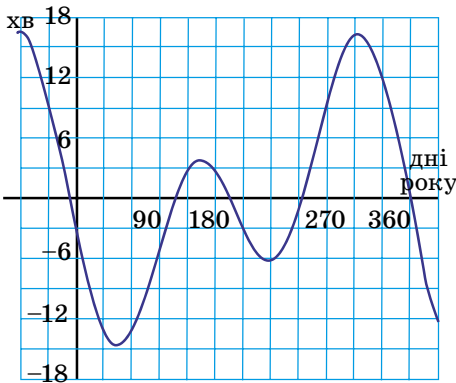
220

Різницю між середнім сонячним часом і дійсним сонячним часом у той самий момент називають **рівнянням часу**. Позначають його грецькою літерою η , і його можна записати так: $\eta = T_c - T_{\odot}$.

Значення рівняння часу η зазвичай дається в астрономічних календарях. Наближене значення можна визначити за графіком (мал. 1.23), з якого також видно, що 4 рази в рік рівняння часу η дорівнює нулю. Це відбувається приблизно 14 квітня, 14 червня, 2 вересня та 24 грудня. Та 4 рази на рік графік рівняння часу η досягає екстремумів: двох додатних — 15 травня і 3 листопада, і двох від'ємних — 15 лютого і 1 серпня.

Розрізняють також **зоряну добу** (близько 23 год 56 хв 4 с). Зоряна доба дорівнює інтервалу часу між двома послідовними одноіменними кульмінаціями точки весняного рівнодення. Момент верхньої кульмінації цієї точки, прийнятий за початок зоряної доби, вважається 0 годин зоряного часу.

Час від моменту верхньої кульмінації точки весняного рівнодення до будь-якого іншого її положення на тому самому географічному меридіані називають **зоряним часом**.



Мал. 1.23

Вимірювання часу сонячною добою пов'язане з географічним меридіаном. Час, виміряний на цьому меридіані, називають **місцевим часом даного меридіана**, і він однаковий для всіх пунктів, що перебувають на ньому. Кульмінація будь-якої точки небесної сфери відбувається у різний час на різних меридіанах земної кулі. Причому, що східніше земний меридіан, то раніше в пунктах, що лежать на ньому, відбувається кульмінація або починається доба. Якщо Земля щогодини повертається на 15° , то

різниця часу двох пунктів в одну годину відповідає і різниці довгот 15° (у годинній мірі 1 година). Звідси можна зробити висновок: різниця місцевого часу двох пунктів на Землі дорівнює різниці значень довготи, виражених у годинній мірі. Для пунктів земної поверхні, розташованих на географічних довготах λ_1 й λ_2 , одержимо:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2.$$

За початковий (нульовий) меридіан для відліку географічної довготи прийнято меридіан, що проходить через Гринвіцьку обсерваторію поблизу Лондона. Місцевий середній сонячний час Гринвіцького меридіана називають **всесвітнім часом**. Усі сигнали точного часу відповідають хвилинам і секундам всесвітнього часу. В астрономічних календарях і щорічниках моменти більшості явищ указують за всесвітнім часом. Моменти цих явищ за місцевим часом якого-небудь пункту легко визначити, знаючи довготу цього пункту від Гринвіча.

Якщо в цей момент на Гринвіцькому меридіані всесвітній час буде T_0 , то в місцевості з географічною довготою λ буде T_λ . Отже, попереднє рівняння при $\lambda_0 = 0$ матиме вигляд: $\lambda = T_\lambda - T_0$. Воно дає змогу визначати географічну довготу за всесвітнім часом (T_0) і місцевим часом (T_λ), що потрібно для астрономічних спостережень.

З іншого боку, знаючи довготу місця спостереження (λ) і всесвітній час (T_0), можна визначити місцевий час (T_λ): $T_\lambda = T_0 + \lambda$.

Знаючи всесвітній час (T_0) і номер пояса даного місця (n), можна визначити поясний час: $T_n = T_0 + n$.

Виразивши T_0 з рівнянь $\lambda = T_\lambda - T_0$ і $T_n = T_0 + n$, одержимо співвідношення, що дає змогу визначити географічну довготу за поясним часом (T_n) і часом для місцевості з географічною довготою λ (T_λ): $T_n - T_\lambda = n - \lambda$.

Система поясного визначення часу усуває незручності, пов'язані з використанням і місцевого, і всесвітнього часу. Годинники, встановлені за поясним часом, показують ту саму кількість секунд і хвилин у всіх годинних поясах і різняться тільки на ціле число годин.

Для економії й раціонального розподілу електроенергії протягом доби в літній період у деяких країнах (зокрема, і в нашій) навесні вводять літній час — стрілки годинника переводять на годину вперед. Восени годинники знову повертають на поясний час.

Для обліку часу використовують календар.

Календар — це система обліку тривалих інтервалів часу, в основі якої лежать періодичні астрономічні явища: зміна дня і ночі, зміна місячних фаз, зміна пір року.

Будь-яка календарна система спирається на три основні одиниці часу: середню сонячну добу, синодичний (або місячний) місяць і тропічний (або сонячний) рік.

Синодичний місяць — це інтервал часу між двома послідовними однаковими фазами Місяця.

Тропічний рік — інтервал часу між двома послідовними проходженнями центра Сонця через точку весняного рівнодення.

Через повільний рух точки весняного рівнодення назустріч Сонцю, відносно зір Сонце виявляється в тій самій точці неба через інтервал часу на 20 хв 24 с більший, ніж тропічний рік. Його називають **зоряним роком**, і він має 365,2564 середньої сонячної доби.

Синодичний місяць і тропічний рік не мають цілого числа середньої сонячної доби. Так, середня тривалість синодичного місяця дорівнює

29,530589 доби, а тривалість тропічного року — у середньому 365,242190 доби. Як бачимо, всі три міри часу непорівнянні. Неможливо підібрати таке ціле число тропічних років, у яке вміщувалося б ціле число синодичних місяців і ціле число середніх сонячних діб. Прагнення узгодити між собою доби, місяць і рік привело до того, що в різні епохи в різних народів було створено багато різних календарів, які можна умовно розділити на 3 типи: **місячні**, **місячно-сонячні** й **сонячні**. Саме цим пояснюється складність побудови календаря й поява протягом кількох тисячоліть численних календарних систем, що направлені перебороти ці складності.

У місячному календарі рік ділиться на 12 місяців, що містять змінно 30 або 29 діб. Усього в місячному календарі 354 або 355 середніх сонячних діб, тобто він коротший сонячного року приблизно на 10 діб. Цей календар отримав широке застосування в мусульманських країнах.

Через те, що місячний рік має менше днів, ніж тропічний, у мусульман взагалі немає фіксованого початку року на певний сезон часу, він постійно зміщується по сезонах і випадає то на весну, то на літо, то на осінь, то на зиму.

Місячно-сонячні календарі найбільш складні. У них сума деякої кількості місячних місяців приблизно відповідає тривалості тропічного року. В основі цих календарів лежить співвідношення: 19 сонячних років дорівнюють 235 місячним місяцям (з похибкою близько 2 год). Рік ділиться на 12 місяців, кожен з яких починається з молодика. У наш час така система збереглася в єврейському календарі. Він містить 12 або 13 місяців у році. Тривалість деяких місяців щороку змінюється, початок року завжди припадає на осінь, але не збігається з жодною датою григоріанського календаря, яким ми користуємося.

Римляни спочатку обчислювали час місячними роками. Новий рік починався 1 березня. І до цього часу деякі місяці сучасного календаря називають відповідно до цієї традиції: вересень — «сьомий», грудень — «десятий» тощо. Згодом перший день року римляни перенесли на 1 січня, тому що з 153 р. до н. е. у цей день ставали на посаду консули.

Одним з перших сонячних календарів вважається єгипетський, створений в 4 тис. до н. е. За цим календарем рік складався з 12 місяців по 30 днів у кожному, а наприкінці року додавалося ще 5 святкових днів. Сучасний календар бере початок від сонячного римського календаря, що з'явився в результаті реформи Юлія Цезаря (звідси пішла і його назва — **юліанський календар**), уведеного 1 січня 45 р. до н. е. Середня тривалість року, відповідно до цього календаря, дорівнює 365,25 доби, що відповідає відомій на той час довжині тропічного року.

Для зручності три роки поспіль вважали по 365 днів, а на четвертий (високосний) додавали зайву добу — 366 днів. Рік складався з 12 місяців: непарні місяці — 31 день, парні — 30 днів; тільки лютий простого, не високосного, року містив 28 днів.

Унаслідок того, що тривалість юліанського року довша від тропічного на 11 хв 15 с, за 128 років накопичувалася помилка в цілу добу, а за 400 років — близько трьох діб. Із плином часу календар заплизував дедалі більше. Тому в кінці XVI ст. весняне рівнодення наставало не 21, а 11 березня.

Помилку виправили в 1582 р., коли глава католицької церкви папа Григорій XIII створив спеціальну комісію з реформи календаря, що пересунула рахунок днів на 10 днів уперед і повернула весняне рівнодення на 21 березня. Цей календар отримав назву **григоріанського календаря** або календаря нового стилю. Високосний рік у григоріанському календарі — кожен четвертий, за винятком років із цілим числом сторіч (наприклад, 1700, 1800). Такий рік вважається високосним тільки тоді, коли число сотень ділиться на 4 без залишку.

В Україні цей календар було введено із 31 січня 1918 р. Наступний день уже був 14 лютого, тому що на той час календарна різниця між новим і старим стилем сягала 13 днів.

Це розходження в 13 днів буде зберігатися до 15 лютого 2100 р. за старим стилем, або до 28 лютого 2100 р. за новим стилем. Після цієї дати воно збільшиться на одну добу і становитиме 14 днів.

Юліанський календарний рік довший від сонячного року майже на $11\frac{1}{4}$ хв, а григоріанський — на 27 с. Зайва доба набігає за 3226 років, а для практичних цілей більшої точності і не потрібно.

Зауважимо, що й григоріанський календар не позбавлений недоліків: неоднакова тривалість місяців, нерівні квартали, непогодженість чисел місяців з днями тижня. Тому з'явилися проекти нових (всесвітніх) календарів, у яких рік більш рівномірно розділяється на півріччя, квартали тощо. Однак політичні й економічні відносини, що існують між країнами світу, не дають змоги провести єдину реформу та ввести всесвітній календар.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняється дійсна сонячна доба від середньої сонячної доби?
2. Що називають зоряною добою?
3. Що розуміють під рівнянням часу? Запишіть і поясніть рівняння часу.
4. Як пов'язані між собою географічна довгота місця спостереження з місцевим часом? Що розуміють під всесвітнім часом?
5. Як можна визначити поясний час?
6. Як визначають географічну довготу за поясним часом?
7. Чому не можна створити абсолютно точний календар?

223



Опишіть усі види календарів, які використовувалися на території України.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Існує межа, що відкриває нову дату й день тижня. Міжнародна лінія зміни дат проходить через Берингову протоку між островами Тихого океану від Північного полюса до Південного полюса (меридіан 180°).
- Найбільш надійним і зручним часом вважається атомний час, що був уведений Міжнародним Комітетом міри і ваги в 1964 р. За еталон прийнято атомні (квантові) годинники. За такими годинниками секунда — це інтервал часу, за який проходить 9 192 631 770 коливань електромагнітної хвилі, що випромінює атом Цезію. З 1 січня 1972 р. усі країни ведуть лічбу часу за атомними годинниками.
- Атомний час дуже зручний для дослідження самої Землі, тому що за ним можна вивчати нерівномірності в обертанні нашої планети. Помилка ходу атомного годинника невелика — приблизно 1 с за 50 тис. років.
- Для лічби часу використовуються ери, тобто тривалі інтервали рахунку років. Ерою називають вихідний пункт кожного літочислення. У різних народів ери були різні й пов'язувалися з якими-небудь знаменними подіями або з роками правління царів та імператорів.
- У Римі використовувалася ера від заснування Рима (753 р. до н. е.) і рахунок років від призначення консулів. У середньовічній Європі була ера Діоклетіана, що почалася від приходу на престол імператора Діоклетіана (29 серпня 284 р. н. е.). Вона застосовувалася до XV ст. У Давній Греції застосовувалася ера Олімпіад (початок 776 р. до н. е.), які проводилися раз у 4 роки. Іудеї відраховують початок ери від створення світу — від 3761 р. до н. е. Християни вважають, що створення світу відбулося в 5508 р. до н. е. Еру від Різдва Христового розраховував папський архіваріус Діонісій Малій у 525 р. Він прирівняв 248 р. ери Діоклетіана до 532 р. від народження Христа. Християнська, або нова, ера (наша ера) частково почала застосовуватися з X ст., а повсюдно в католицьких країнах — лише з XV ст. За указом Петра I в Російській імперії в 1700 р. було введено нову еру, відповідно

до якої після 31 грудня 7208 р. від створення світу настало 1 січня 1700 р. Мусульмани всього світу використовують свою еру — хіджру й рахують роки від дати переселення пророка Мухаммеда з Мекки в Медіну, що відбулося у вересні 622 р. н. е.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Навіщо та коли було введено точки та лінії небесної сфери?

Відповідь. Точки та лінії небесної сфери ввели давньогрецькі вчені — Фалес Мілетський (VII–VI ст. до н. е.), Евклід (III ст. до н. е.) та ін. Вони були потрібні для побудови систем сферичних астрономічних координат і для кутомірних вимірювань.

2. Увечері учень спостерігав верхню кульмінацію деякої зорі на висоті $66^\circ 30'$ в бік півночі від зеніту, а висота цієї зорі, яку він виміряв у нижній кульмінації, дорівнювала $35^\circ 42'$. Знайдіть географічну широту місця спостереження та схилення зорі.

Розв'язання

Висота зорі над горизонтом для верхньої кульмінації, яка відбувається на північ від зеніту $h_{\text{в}} = 90^\circ + \varphi - \delta$, де φ — географічна широта місця спостереження, δ — схилення зорі.

Для нижньої кульмінації: $h_{\text{н}} = \delta + \varphi - 90^\circ$.

Додавши і віднявши ці рівняння, знаходимо:

$$h_{\text{в}} + h_{\text{н}} = 2\varphi, \quad h_{\text{в}} - h_{\text{н}} = 180^\circ - 2\delta.$$

Звідси знаходимо широту місця спостереження:

$$\varphi = \frac{h_{\text{в}} + h_{\text{н}}}{2} = \frac{66^\circ 30' + 35^\circ 42'}{2} = 51^\circ 06'$$

$$\text{та схилення зорі: } \delta = \frac{180^\circ - (h_{\text{в}} - h_{\text{н}})}{2} = \frac{180^\circ - (66^\circ 30' - 35^\circ 42')}{2} = 74^\circ 36'.$$

3. Для визначення положення тіла в просторі потрібні три координати. В астрономічних каталогах найчастіше дають тільки дві координати: пряме сходження і схилення. Чому?

Відповідь. Третьою координатою в сферичній системі координат є модуль радіуса-вектора — відстань до об'єкта r . Ця координата визначається з більш складних спостережень, ніж α і δ . У каталогах її еквівалентом є річний паралакс, звідси $r = 1/\pi$ (пк). Для завдань сферичної астрономії достатньо знати лише дві координати α і δ або альтернативні пари координат: екліптичні — λ , β або галактичні — l , b .

4. Можна сказати, що Сонце з року в рік проходить однаковий шлях по небесній сфері. Чому ж його схилення на ту саму дату в різні роки, що наводять в астрономічних календарях, відрізняються одне від одного?

Відповідь. В основному, тому що фактичні, природні роки не складаються із цілого числа діб.

5. Обчисліть період обертання Нептуна навколо Сонця, знаючи, що його середня відстань від Сонця дорівнює 30 а. о.

Розв'язання

Скористаємося третім законом Кеплера: $\frac{T_{\text{Н}}^2}{T_{\text{З}}^2} = \frac{a_{\text{Н}}^3}{a_{\text{З}}^3}$, де $T_{\text{Н}}$ — зоряний період Нептуна; a — середня відстань від Сонця (більша піввісь орбіти); $T_{\text{З}}$ — зоряний період Землі; $a_{\text{З}}$ — більша піввісь земної орбіти (1 а. о.).

Тоді

$$T_{\text{Н}} = \sqrt{\frac{T_{\text{З}}^2 a_{\text{Н}}^3}{a_{\text{З}}^3}} = T_{\text{З}} \sqrt{\frac{a_{\text{Н}}^3}{a_{\text{З}}^3}}; \quad T_{\text{Н}} = 1 \sqrt{\frac{30^3}{1^3}} = 164 \text{ роки.}$$

6. У пункті, що міститься на 41° сх. довготи, поясний час становить 6 год 40 хв. Знайдіть місцевий час у пункті на 86° сх. довготи в цей момент.

Розв'язання

Різниця місцевих часів дорівнює різниці довгот: $T_{1м} - T_{2м} = \lambda_1 - \lambda_2$. Різниця місцевого і поясного часу становить: $T_{1м} - T_{1п} = \lambda_1 - n_1$, де n_1 – номер пояса. Із цих двох рівнянь $T_{2м} = T_{1п} + \lambda_2 - n_1$. Враховуючи, що $\lambda_1 = 41^\circ$ належить до третього поясу [$37,5^\circ - 52,5^\circ$] і що 1 год = 15° , одержимо, що $\lambda_2 = 86^\circ = 5$ год 44 хв і $T_{2м} = 6$ год 40 хв + 5 год 44 хв – 3 год = 9 год 24 хв.

7. У який день тижня було введено григоріанський календар?

Відповідь. Григоріанський календар введено після 4 жовтня 1582 року: за 4 жовтня настало 15 жовтня (а не 5 жовтня). Отже, григоріанський календар введено в п'ятницю (5/15 жовтня 1582 року).

8. Як виходить, що юліанський календар при більшій тривалості року, ніж його фактична тривалість, все-таки відстає від природи? Це нагадує відставання одного мандрівника від іншого при більшій довжині кроку в того, хто відстає. Розберіться в цій неузгодженості.

Відповідь. Що більша будь-яка міра, то менше число разів вона вміщується у вимірюваній величині. Так, користуючись юліанським роком, ми одержуємо менше років і частин року, ніж використовуємо тропічний рік. Якби ми використали для календаря рік менший, ніж тропічний, то вийшло б, навпаки, забігання наперед.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

225

1.1. Опишіть, які добові кола описували б зорі, якби астрономічні спостереження проводилися: а) на Північному полюсі; б) на екваторі.

1.2. Виразіть 10 год 25 хв 16 с у градусній мірі.

1.3. Визначте за зоряною картою екваторіальні координати Веги.

1.4. Чи не спотворюються до невпізнанності фігури сузір'їв, що перебувають поблизу від горизонту?

1.5. Чи буде змінюватися вигляд відомих нам сузір'їв для міжпланетних мандрівників?

1.6. Штучний супутник перетинає горизонтальну нитку кутомірного інструмента на відстані d° праворуч від центра поля зору, координати якого $A = 0^\circ$, $z = 0^\circ$. Визначте горизонтальні координати штучного супутника в цей момент часу. Як зміняться координати об'єкта, якщо азимут інструмента змінити на 180° ?

1.7. На якій широті Землі можна побачити:

а) усі зорі небесної півсфери в будь-який момент ночі; б) зорі тільки однієї півсфери (північної або південної); в) усі зорі небесної сфери?

1.8. Чи можуть бути однаковими азимути зорі у верхній і нижній кульмінаціях? Чому в цьому випадку азимут дорівнює?

1.9. У яких двох випадках висота зорі над горизонтом протягом доби не змінюється?

1.10. У якій частині неба азимути світил змінюються найшвидше і в якій найповільніше?

1.11. За яких умов азимут зорі не змінюється від її сходу до верхньої кульмінації і від верхньої кульмінації до заходу?

1.12. Зоря перебуває над горизонтом половину доби. Яке її схилення?

1.13. Чи може світило за добу пройти через точки сходу, зеніту, заходу і надира?

1.14. У Давньому Єгипті перша поява Сіріуса у променях ранкової зорі після періоду невидимості (геліактичний схід) збігалася з підняттям води у річці Ніл. Чи збігаються ці два явища так само й у наш час?

1.15. Спостерігач перебуває на Північному полюсі Землі ($\varphi = +90^\circ$). Положення точки весняного рівнодення Υ відомо. У світила пряме схилення $\alpha = 120^\circ$, а схилення $\delta = +60^\circ$. Визначте висоту й азимут світила.

1.16. У місці, широта якого $+20^\circ$ (сх. ш.), у світила спостерігався годинний кут $\alpha = 310^\circ$, а схилення $\delta = -5^\circ$. Знайдіть висоту й азимут світила.

1.17. У місці, широта якого дорівнює -45° (пд. ш.), спостерігалася зоря на висоті 45° і в азимуті 100° сходу. Визначте годинний кут і схилення цієї зорі.

1.18. У місці, широта якого південна й дорівнює $\varphi = -30^\circ$, у світила був годинний кут $t = 5^h 30^m$, а схилення $\delta = -60^\circ$. Визначте висоту й азимут цього світила.

1.19. У місці ($\varphi = +60^\circ$), знаючи положення на небі точки весняного рівнодення Υ , визначте висоту й азимут світила, у якого пряме схилення $\alpha = 300^\circ$, а схилення $\delta = +70^\circ$.

1.20. Чи зберігає екліптика, подібно до небесного екватора, постійне положення на небесній сфері під час її добового обертання, чи ні? Чому?

1.21. У яку пору року Сонце швидше рухається по екліптиці? Чому?

1.22. Чи всі сузір'я зодіаку можна спостерігати на земних полюсах?

1.23. Коли сузір'я зодіаку більш помітні на небі наших середніх північних широт — улітку чи взимку? Чому?

1.24. У яких широтних межах сузір'я зодіаку можуть перебувати в зеніті?

1.25. «Настала зима. Сонце, покинувши сузір'я Стрільця, наближалось вже до сузір'я Козерога». Про які місяці року тут йдеться?

1.26. Іноді знаки зодіаку зображають замість цифр на циферблатах годинників. Яким знаком зодіаку зображають число 12 і чому?

1.27. Яке із сузір'їв зодіаку Сонце проходить за найкоротший та найдовший час?

1.28. Якщо уявити себе на північному полюсі Сонця, то в який бік будуть обертатися навколо нього планети — за напрямком руху годинникової стрілки чи проти?

1.29. У внутрішніх планет — Меркурія й Венери — спостерігаються фази. Чи спостерігаються вони в зовнішніх планет?

1.30. Марс у 1959 р. пройшов через сузір'я Скорпіона, Діви, Лева, Рака, Близнюків, Тельця, Овна. У якому напрямку він рухався — від Скорпіона до Овна або від Овна до Скорпіона?

1.31. У якої із зовнішніх планет петля, яку вона описує, найменша за розмірами?

1.32. Деякі астрономи припускають, що за Плутоном є ще одна планета, що перебуває від Сонця на відстані приблизно 77 а. о. Обчисліть силу, з якою Сонце на такій відстані притягає 1 т маси на її орбіті. Маса Сонця дорівнює $1,983 \cdot 10^{30}$ кг.

1.33. Вважається, що на всій довжині меридіана, від полюса і до полюса, однаковий час, тому під час руху по меридіану немає потреби в переведенні стрілки годинника. Дайте відповідь, чи так це насправді?

1.34. «Коли в Англії вже вівторок і перша година ночі, то в Нью-Йорку ще понеділок і 8 година вечора». Перевірте за картою годинних поясів, чи правильно це.

1.35. Вважають, що коли в Європі день, то в Північній Америці ніч, і навпаки. З висловлювання одного індуса: «Люди-вчені говорять, що, коли в Америці день, тут (у Калькутті) ніч, а коли в Америці ніч, тут, на сході, займається зоря». Візьміть, наприклад, для розрахунків міста Київ, Нью-Йорк і Калькутту й з'ясуйте, хто говорить правильно — європейці чи індуси.

1.36. З 1950 р. введено так званий ефемеридний час. Що він собою являє?

1.37. Як відомо, є 5 різних часів: зоряний, істинний сонячний, середній сонячний, поясний і декретний (літній у деяких країнах за кордоном). Скільки треба скласти формул для переходу від одного із цих часів до будь-якого іншого?

1.38. Іноді говорять про всесвітній час. До якого роду часу він належить?

1.39. Чи існує відмінність в днях тижня в старому і новому стилях?

1.40. Датою відкриття Америки вважається 12 жовтня 1492 року. Яка це дата за новим стилем?

1.41. Якщо деякий звичайний (високосний) рік розпочався з понеділка, то яким днем тижня він закінчився?

1.42. 1 січня деякого року було у вівторок. А який день тижня був 1 січня попереднього року? Наступного року? (Усі три роки звичайні.)

1.43. Які місяці в звичайному (високосному) році починаються з однакових днів тижня?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Що розуміють під сузір'ям?
2. На яку кількість сузір'їв розділено небесну сферу?
3. Яким чином сузір'я одержали свої назви? Наведіть приклади назв сузір'їв.
4. Яка відмінність між геоцентричною та геліоцентричною системами світу?
5. Чому в астрономії використовують різні системи координат? У чому полягає принципова відмінність між різними системами небесних координат?
6. Як називають точки перетину небесної сфери з віссю обертання Землі, що продовжена в космос?

227

Що я знаю і вмію робити

- **Я вмію розв'язувати задачі**
 1. Скільки (приблизно) сузір'їв на небесній сфері над горизонтом удень?
 2. Які астрономічні інструменти можна знайти на карті зоряного неба у вигляді сузір'їв? Назви яких ще приладів і механізмів можна побачити на цій карті?
 3. У деякому пункті спостереження найменша висота зорі становить 0° , а найбільша — 50° . На якій широті розміщено цей пункт, яким є схилення зорі?
- **Я вмію проводити астрономічні спостереження**
 4. Виконайте спостереження заходу або сходу Сонця у день рівнодення — 23 вересня або 21 березня. Сонце в ці дні сходить у точці сходу та заходить у точці заходу. Намалуйте положення цих точок відносно вашого будинку.
- **Я знаю, як потрібно користуватися астрономічним календарем**
 5. Визначте за допомогою астрономічного календаря, яка планета Сонячної системи є найближчою до Землі в день вашого народження. У якому сузір'ї її можна побачити сьогодні вночі?
 6. За допомогою астрономічного календаря відшукайте на небі Юпітер та Сатурн і визначте, у якому сузір'ї спостерігаються ці планети.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Яке тіло міститься в центрі геоцентричної системи світу?
А Сонце Б Юпітер В Сатурн Г Земля Д Венера
2. Яку планету відкрив Міколай Коперник?
А Марс Б Сатурн В Уран Г Землю Д Юпітер
3. Як перекладається з грецької слово «планета»?
А волохата зоря Б хвостата зоря В блукаюча зоря Г туманність
Д холодне тіло
4. Північний полюс світу міститься...
А в Арктиці Б в Антарктиці В у сузір'ї Оріон
Г у сузір'ї Велика Ведмедиця Д поблизу Полярної зорі
5. Момент, коли світило міститься найвище над горизонтом, називають...
А прямим сходженням Б верхньою кульмінацією
В нижньою кульмінацією Г верхньою культивациєю
Д нижньою культивациєю
6. Тропіки — це така географічна широта, де...
А ростуть пальми
Б Сонце ніколи не заходить
В під час сонцестояння Сонце кульмінує в zenіті
Г під час рівнодення Сонце кульмінує в zenіті
Д ніколи не випадає дощ
7. Полярне коло — це така географічна широта, де...
А весь рік не тане сніг
Б живуть білі ведмеді
В півроку триває ніч, а півроку — день
Г під час рівнодення Сонце кульмінує в zenіті
Д у день зимового сонцестояння Сонце не сходить
8. Який кут між площинами екватора та екліптики?
А 0° Б 23,5° В 45° Г 66,5° Д 90°
9. Як називають розташування планет в космічному просторі відносно Землі та Сонця?
А конфігурація Б протистояння В космогонія Г піднесення
Д переміщення
10. У протистоянні можуть спостерігатися такі планети...
А Сатурн Б Венера В Меркурій Г Юпітер
11. У сполученні із Сонцем можуть перебувати такі планети...
А Сатурн Б Венера В Меркурій Г Юпітер
12. Як називають точку орбіти, де планета перебуває найближче до Сонця?
А перигелій Б перигей В апогей Г афелій Д апекс



Розділ 2

ФІЗИКА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Всесвіт — неймовірно величезне місце, таке неймовірне, що навіть людська уява не може охопити всю глибину його неосяжності. Що ж стосується нашої Сонячної системи, то за мірками Всесвіту вона лише його крихітна частинка. Тоді як для нас, мешканців маленької планети під назвою Земля, Сонячна система — дуже велике місце, і, незважаючи на всі великі досягнення астрономії останніх років, багато ще залишається незвіданим, ми лише починаємо наближатися до кордонів рідної Сонячної системи.

229

§ 7. ЗЕМЛЯ І МІСЯЦЬ

Земля — третя від Сонця планета Сонячної системи. З космосу наша планета має вигляд гарної блакитної кулі. Крізь хмарний покрив можна розглянути материки й океани.

Земля обертається навколо Сонця еліптичною орбітою (дуже близькою до колової) із середньою швидкістю 29 785 м/с на середній відстані 149,6 млн км з періодом, що приблизно дорівнює 365,24 доби (зоряний рік).

Форма Землі — геоїд. Середній радіус Землі становить 6371,032 км, екваторіальний — 6378,16 км, полярний — 6356,777 км. Площа поверхні земної кулі 510 млн км², об'єм — $1,083 \cdot 10^{12}$ км³, середня густина — 5518 кг/м³. Маса Землі дорівнює $5976 \cdot 10^{21}$ кг. Температура на поверхні від -90 °С в Антарктиді до $+70$ °С у пустелі. Земля має повітряну атмосферу. Понад 70 % поверхні вкрито водою.

Нахил земної осі до площини екліптики — $66^{\circ}33'22''$. Період обертання планети навколо своєї осі 23 год 56 хв 4,1 с. Обертання навколо своєї осі спричиняє зміну дня і ночі, а нахил осі до екліптики разом з обертанням навколо Сонця — зміну пір року.

Гравітаційне поле Землі зумовлює її близьку до сферичної форму та існування атмосфери. Газову оболонку, що огортає Землю, називають **атмосферою**. Атмосфера Землі, загальна маса якої $5,15 \cdot 10^{15}$ т, складається з повітря — суміші в основному азоту (78,08 %) і кисню (20,95 %), аргону (0,93 %), вуглекислого газу (0,03 %), інше — це водяна пара, а також інертні та інші гази. Атмосфера Землі захищає все живе від згубного впливу космічного випромінювання.

Атмосфера Землі включає (мал. 2.1): *тропосферу* (до 15 км), *стратосферу* (15–100 км), *іоносферу* (100–500 км). Між тропосферою і стратосферою розміщується перехідний шар — *тропопауза*. У глибинах стратосфери під впливом сонячного світла створюється *озоновий екран*, який



Мал. 2.1

захищає живі організми від космічного випромінювання. Вище розміщені *мезо-*, *термо-* й *екзосфера*.

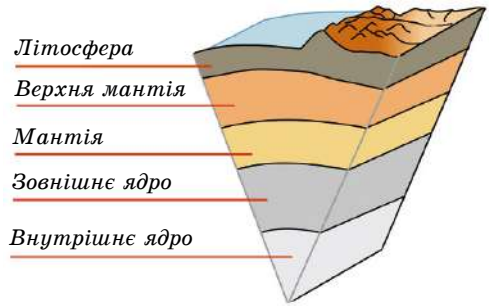
Атмосфера як елемент глобальної екосистеми виконує такі функції: є бар'єром для згубного впливу космічних випромінювань на живі організми та ударів метеоритів; регулює сезонні та добові коливання температури; регулює теплообмін Землі з космічним простором, впливає на її радіаційний та водний баланс; є джерелом газів, які беруть участь у процесах фотосинтезу та забезпечують дихальні процеси живих організмів; зумовлює низку складних екзогенних процесів — вивітрювання гірських порід, діяльність природних вод, мерзлоти, льодовиків тощо.

Земля має магнітне та тісно пов'язане з ним електричне поле. Магнітне поле Землі генерується в рідкому металевому шарі ядра.

Деталі поверхні Землі й умови життя ви знаєте, тому зупинимося детальніше на будові надр (мал. 2.2). Моделі внутрішньої будови Землі й інших планет земної групи приблизно схожі.

За записами коливань земної поверхні під час землетрусів **сейсмограмами** було встановлено, що внутрішня будова планети по вертикалі має шари. За хімічним складом та фізичними характеристиками виділяють три основні сферичні оболонки: **тверда кора**, **мантія** (оболонка) і **ядро**. Найтонший зовнішній шар — тверда кора. Глибина її в середньому 35 км (океанічна кора — 10 км, континентальна кора — 70 км). За хімічним складом земна кора складається з кисню (46,6 %), кремнію (27,7 %), алюмінію (8,1 %), заліза (5 %), кальцію (3,6 %) та інших хімічних елементів. Загальна маса земної кори становить усього 0,8 % від загальної маси Землі. Кора відокремлюється від мантії чіткою межею.

Ядро — найгустіша частина земних надр. Від поверхні Землі до центра збільшується тиск, густина й температура. Тиск у центрі планети $3,6 \cdot 10^{11}$ Па, густина приблизно $12,5 \cdot 10^3$ кг/м³, температура — від 5000 до 6000 °С. Радіус ядра становить 55 % від радіуса Землі, а маса — приблизно 30 % від маси планети. Земне ядро ділиться на зовнішнє і тверде внутрішнє радіусом 1270 км. Перехідна зона між зовнішньою й внутрішньою частинами ядра дуже тонка — приблизно 5 км. Під час дослідження геологи з'ясували, що тверде металеве ядро всередині Землі утворилося 1–1,5 млрд років тому. Також учені змогли визначити швидкість росту земного ядра: за рік його радіус збільшується приблизно на міліметр.



Мал. 2.2

Місяць — єдиний природний супутник Землі. Це тіло кулястої форми діаметром 3475 км. Маса Місяця всього в 81 раз менша за масу Землі. Середня густина Місяця становить 0,6 від густини Землі, а прискорення вільного падіння в 6 разів менше від земного. Тобто на місячній поверхні предмети у 6 разів легші, ніж на Землі. Сонячна доба на Місяці триває синодичний місяць (29,5 земної доби). На Місяці немає води в рідкому стані й практично немає атмосфери. За місячний день, що триває приблизно 15 земних діб, поверхня нагрівається до +130 °С, а вночі охолоджуються до -170 °С. За високих температур швидкість молекул газу перевищує другу космічну швидкість для поверхні Місяця (2,38 км/с), тому газу, що виділяються з надр супутника Землі або утворюються під час падіння метеорних тіл, швидко залишають Місяць. Без газової атмосфери Місяць піддається впливу всіх видів електромагнітного випромінювання Сонця, а також ударам метеорних тіл різного розміру.

Неозброєним оком на місячній поверхні помітні світлі й темні ділянки. Темні і відносно рівні частини поверхні назвали морями, на них припадає 16,9 % усієї поверхні Місяця. Більш світлі гористі ділянки, так би мовити, материки, займають решту поверхні та характеризуються наявністю гірських хребтів, кільцевих гір, кратерів (мал. 2.3).

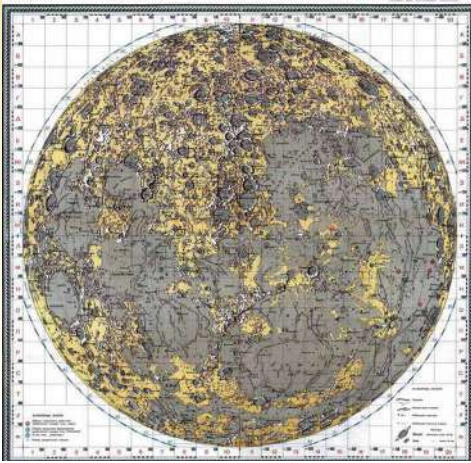
Першу детальну місячну карту склав у 1647 р. польський астроном **Ян Гевелій** (1611–1687). Відтоді до наших днів збереглися назви морів — Море Спокою, Море Криз тощо. Назви гірських хребтів, що тягнуться уздовж окраїн морів, співзвучні земним — Апенніни, Кавказ, Карпати тощо. Апенніни мають максимальну висоту близько 6 км, а Карпати — лише 2 км.

Космічні дослідження істотно поглибили наші знання про Місяць. У 1959 р. апарат «Луна-3» уперше сфотографував протилежний, невидимий бік Місяця. У 1965 р. з'явилася перша повна карта Місяця (мал. 2.4).

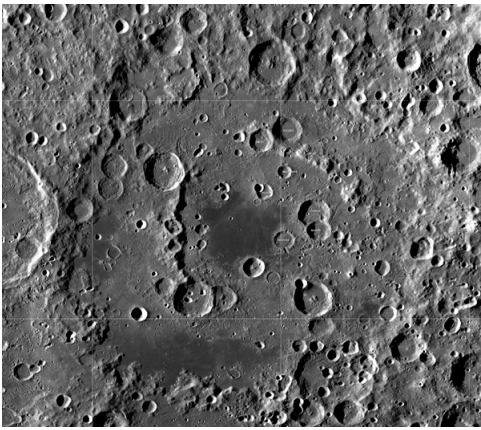
Найчисленнішими утвореннями на місячній поверхні є кратери (мал. 2.5). Їхні розміри — від мікроскопічних до 100 км у діаметрі. Великі й середні кратери названо на честь видатних учених: Птолемей, Архімед, Платон, Коперник, Тихо, Шмідт та ін.



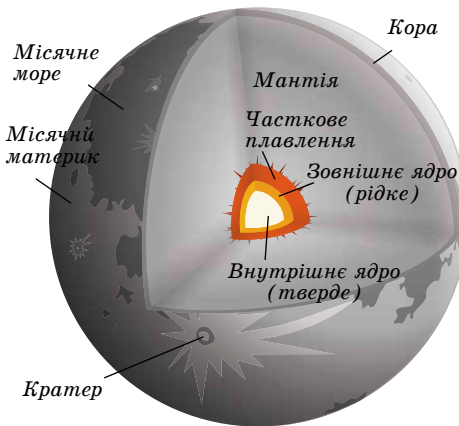
Мал. 2.3



Мал. 2.4



Мал. 2.5



Мал. 2.6

Поверхневий шар природного супутника Землі складається з дрібних шматків реголіту завтовшки приблизно 10 м. До складу місячного реголіту входять також скляні сферичні мікрочастинки. Реголіт має малу густину (верхній шар 1200 кг/м^3) і дуже низьку теплопровідність (у 20 разів меншу за повітря), тому вже на глибині приблизно 1 м коливання температури практично не відчутні.

За хімічним складом місячні породи дуже близькі до базальтових порід Землі. Породи місячних морів відрізняються високим вмістом оксидів заліза і титану, материкові — високим вмістом оксидів алюмінію. Останнім часом космічні станції виявили запаси водяного льоду в полярних областях Місяця — у тіні кратерів на Південному і Північному полюсах Місяця. Оскільки кут нахилу місячного екватора до екліптики лише $1,5^\circ$, то дно навіть неглибоких кратерів у полярних областях ніколи не освітлюється сонячними променями. За сталої температури -200°C дно полярних кратерів покриває суміш реголіту з льодом.

Внутрішню будову Місяця (мал. 2.6) вивчили за записами струсів від ударів метеоритів, які фіксували доставлені на Місяць сейсмографи. Під шаром реголіту розміщується кора, завтовшки на видимому (повернутому до Землі) боці становить 60 км, а на зворотному — 100 км. Під корою розміщується мантія, товщина якої приблизно 1000 км. Зона глибше від 1600 км нагадує земну мантію, має товщину 430 км і температуру 1800 К.

Останні дослідження підтвердили, що в центрі Місяця існує металеве ядро радіусом приблизно 300 км, маса якого становить 3 % від загальної маси Місяця.

Для Землі Місяць відіграє важливу роль. Найважливіший вплив Місяця на Землю полягає в тому, що він ось уже понад 4 млрд років стабілізує клімат. Без Місяця земна вісь коливалася б набагато сильніше. Екватор Землі розміщений під

кутом $23,5^\circ$ до орбіти, по якій планета рухається навколо Сонця, тому існують різні пори року. Якби не було Місяця, кут нахилу Землі змінився би на 85° . Це означало б, що вісь обертання Землі була б на рівні своєї орбіти. Уран з кутом нахилу 97° обертається навколо Сонця так, що протягом одного півріччя до Сонця обернена його північна півкуля, а протягом другого — південна. Якби так відбувалося на Землі, то клімат був би іншим. Імовірно, температура на Землі сягала б екстремальних позначок. А вітри були б набагато сильнішими.

Дослідники з'ясували, що зараз Земля відштовхує від себе Місяць швидше, ніж будь-коли за останні 50 млн років. Супутник віддаляється від Землі через припливи і відливи, а це впливає і на саму планету.

Гравітація Місяця створює добовий цикл припливів і відпливів. Цей процес уповільнює обертання планети навколо своєї осі та змушує Місяць віддалятися від Землі приблизно на 3,8 см в рік. Якщо припустити, що темпи віддалення Місяця завжди були однакові, то з віддалення орбіти Місяця можна розрахувати вік супутника — 1,5 млрд років. Це приблизна цифра, оскільки деякі місячні породи мають набагато більший вік — 4,5 млрд років, що можна порівняти з віком Землі.

Отже, Місяць віддаляється від Землі зі швидкістю, що збільшується, і поки що причину цього явища до кінця не з'ясовано. Можливо, причина в тому, що північна частина Атлантичного океану в наш час набагато ширша, ніж це було 50 млн років тому. Через це утворюються дуже великі хвилі і високі припливи, які відштовхують Місяць сильніше.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Назвіть основні характеристики планети Земля.
2. Яка будова Землі?
3. Який склад атмосфери Землі і яка її роль?
4. Схарактеризуйте Місяць — супутник Землі.
5. Які особливості має Місяць?

233



Виконайте презентацію на тему «Історія вивчення Місяця».

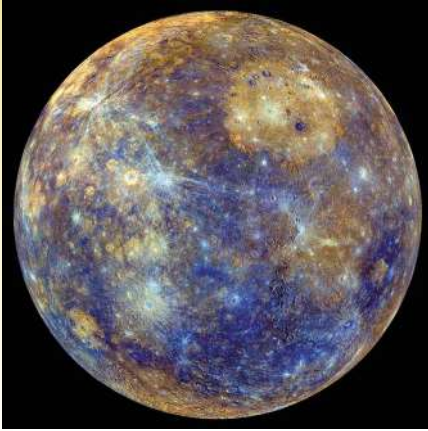


ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

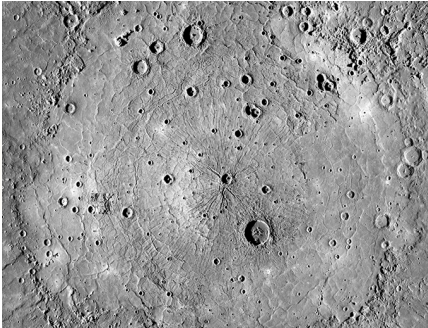
2011 р. у німецькому аерокосмічному центрі було створено найповнішу детальну 3D-карту Місяця, яка охоплює понад 98 % місячної поверхні. Для генерації об'ємної моделі, що відображає безліч деталей рельєфу, учені обробили понад 70 тис. стереокадрів Місяця, знятих американським супутником LRO з висоти 50 км. Безліч сусідніх знімків було зіставлено піксель за пікселем з урахуванням позиції апарата на момент зйомки і напрямку променя зору. У результаті 40 комп'ютерів за два тижні машинного часу склали цифрову модель місячного рельєфу з 100 млрд точок.

§ 8. ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

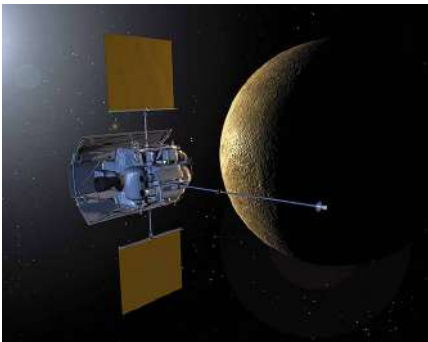
Меркурій — найближча до Сонця планета (мал. 2.7). Вона постійно «ховається» у сонячних променях, і тому її дуже важко побачити із Землі. За розмірами і масою Меркурій більше подібний до Місяця, ніж до Землі. У Меркурія немає атмосфери, і його поверхня не захищена від палючих сонячних променів удень і космічного холоду вночі. Удень на поверхні планети температура піднімається до $+430^\circ\text{C}$, а вночі опускається до -200°C . Перепад температур відбувається повільно, тому що сонячна доба на Меркурії дорівнює 176 земним. Тривалість року — 88 земних діб.



Мал. 2.7



Мал. 2.8



Мал. 2.9

За формою Меркурій подібний до кулі з екваторіальним радіусом ($2439,7 \pm \pm 1,0$) км (діаметр 4900 км), що приблизно в 2,6 раза менший, ніж у Землі. Екваторіальне й полярне стиснення незначні. Геометричний центр планети відхилений від центра мас — у межах 1,5 км. Площа поверхні Меркурія менша в 6,8 раза від поверхні Землі, а об'єм — у 17,8 раза.

Маса Меркурія дорівнює $3,30 \cdot 10^{23}$ кг, це приблизно в 18 разів менше за масу Землі. Середня густина близька до земної й становить $5,43 \text{ г/см}^3$. Прискорення вільного падіння поблизу поверхні — $3,70 \text{ м/с}^2$ (0,38 від земного). Відстань до Сонця — 58 млн км. Магнітне поле планети дуже слабе, його напруженість у 300 разів менша від земної. Природних супутників немає.

Уся кам'яниста поверхня Меркурія покрита численними кратерами, більшість з яких утворилася в результаті падіння метеоритів. Кратери на Меркурії названо на честь видатних представників світової культури: Бетховен, Гомер, Шевченко та ін. Винятками є променистий кратер Койпер, названий на честь видатного планетолога Джерарда Койпера, та маленький кратер Хун Каль, до якого прив'язано систему довгот: він лежить на меридіані 20° , його назва мовою давніх майя означає «двадцять».

Кут нахилу осі обертання Меркурія перпендикулярний до його орбіти, тому дно полярних кратерів ніколи не освітлюється Сонцем. Ці області слугують сховищами водяного льоду, перемішаного з гірськими породами.

Гори на Меркурії сягають усього 2–4 км. На планеті виявлено кратери та уступи висотою 2–3 км, що тягнуться на сотні кілометрів (мал. 2.8). Імовірно, вони з'явилися під час утворення планети через нерівномірний стиск у ході охолодження.

Поблизу поверхні Меркурія виявлено атоми гелію і водню, а також аргону й

натрію. Їхніми джерелами є сонячний вітер і речовина планети, піддана нагріванню й опроміненню Сонцем.

Меркурій — найменше вивчена планета земної групи. На її дослідження було спрямовано лише два апарати. Перший був «Марінер-10» (1974–1975 рр.), що тричі пролетів повз Меркурій (максимальне зближення становило 320 км). У результаті було отримано кілька тисяч фото із середньою роздільною здатністю 1 км/пікс, що охоплюють приблизно 45 % поверхні планети. Подальші дослідження із Землі дали змогу отримати деякі

дані про поверхню та атмосферу Меркурія, зокрема вказали на можливість існування водяного льоду в полярних кратерах.

У 2008–2015 рр. планету досліджував апарат НАСА «Мессенджер» (мал. 2.9). Його запустили в 2004 р. Апарат летів складною траєкторією з кількома гравітаційними маневрами біля Землі, Венери та Меркурія. Повз останній він пролітав тричі, і в березні 2011 р. нарешті став його супутником. «Мессенджер» відзняв усю поверхню планети та отримав багато інших даних. Його внесок у дослідження Меркурія став революційним.

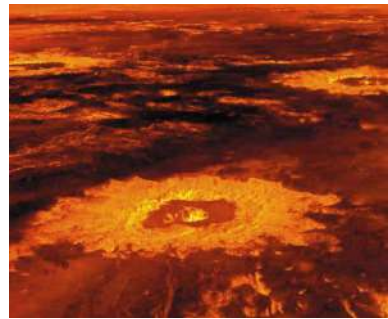
Венера — друга від Сонця планета Сонячної системи (мал. 2.10). Вона майже такого самого розміру, як і Земля, а її маса становить більше як 80 % земної маси. На небі Венеру можна спостерігати уранці або увечері у вигляді дуже яскравого світила. Густа атмосфера Венери довго приховувала таємниці її поверхні. Учені ще в середині ХХ ст. думали, що планета вкрита тропічними лісами. Але космічні апарати, що досягли планети, сфотографували безжиттєву розпечену пустелю. Температура поверхні сягає $+470\text{ }^{\circ}\text{C}$ і майже не змінюється протягом доби. Густі хмари пропускають мало сонячного світла й створюють «сутінкову» освітленість навіть тоді, коли Сонце перебуває високо над горизонтом. Води на цій планеті немає, кисню — практично теж. Діаметр становить 12 100 км. Відстань до Сонця — 108 млн км. Тривалість року — 224,7 земної доби, а тривалість доби — 117 земних діб. Венера — третій за яскравістю об'єкт на небі, її блиск поступається лише блиску Сонця та Місяця. Венера відома людству з найдавніших часів. Орбіта планети має форму майже правильного кола, швидкість руху по орбіті — 35 км/с. Напрямок обертання зворотний до напрямку обертання навколо Сонця. Природних супутників немає.

Більшу частину поверхні Венери займають рівнини. Найвищі гори — гори Максвелла — піднімаються на 11 км над середнім рівнем поверхні. На Венері виявлено кратери діаметром до сотень кілометрів (мал. 2.11). Великі кратери названо на честь видатних жінок: Ахматова, Войнич, Дункан, Орлова або просто жіночими іменами: Антоніна, Валентина, Зоя, Ірина, Нана, Ольга та ін. Великі височини-материка мають назви: Земля Афродіти, Земля Іштар, Земля Лади тощо.

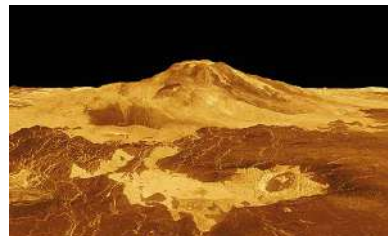
Близько 500 млн років тому на Венері відбулася глобальна геологічна катастрофа. Сотні тисяч діючих вулканів викинули величезну кількість лави, що вкрила всю поверхню. Найвищий згаслий вулкан (мал. 2.12) — гора Маат, названий на честь єгипетської богині істини й порядку, підіймається над навколишньою рівниною майже на 8 км.



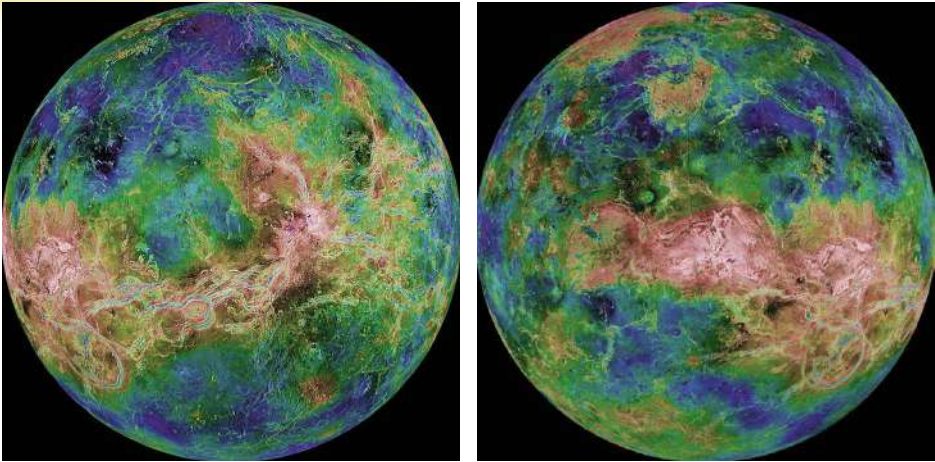
Мал. 2.10



Мал. 2.11



Мал. 2.12



Мал. 2.13

Для дослідження рельєфу планети було використано метод радіолокації. Автоматична міжпланетна станція «Магеллан» у 1990–1994 рр. провела глобальну радіолокацію поверхні Венери. На основі отриманих даних було складено рельєфні карти, і з'явилася можливість відтворити деталі поверхні в об'ємному зображенні (мал. 2.13).

236 Атмосфера Венери складається в основному з вуглекислого газу. Тиск на поверхні планети в 95 разів більший, ніж на поверхні Землі. Завдяки такому хімічному складу, а також великій густині атмосфера Венери є величезним «парником». Парниковий ефект й обумовлює високу температуру на поверхні. Хмари Венери мають пластову структуру. Вони розташовуються на висотах від 48 до 70 км і містять крапельки сірчаної кислоти. Швидкість вітру на поверхні становить близько 1 м/с. В атмосфері спостерігаються блискавки.

Магнітне поле Венери дуже слабе через повільне обертання планети навколо осі зі сходу на захід. Його напруженість у 104 рази менша від земної. Магнітосфера майже повністю відсутня, тому потік заряджених частинок, що йде від Сонця, зіштовхується з атмосферою планети й захоплює за собою її речовину, формуючи йонний шлейф. Космічна обсерваторія *SOHO* визначила, що цей «хвіст» тягнеться на 45 млн км, тобто сягає Землі.

Марс — четверта від Сонця планета Сонячної системи (мал. 2.14). Для спостерігача вона з'являється на небосхилі у вигляді яскравого червоного світила. За допомогою аматорських телескопів можна побачити полярні шапки на Марсі та деякі великі деталі його поверхні з темніших ліній і плям. На думку вчених, це річки, озера і моря. Марс і Земля кожні 15–17 років зближуються, це називають великим протистоянням. Тоді Марс не зникає з неба всю ніч і світиться особливо яскраво, червоно-помаранчевим кольором.



Мал. 2.14

Марс — невелика планета, більша за Меркурій, але майже вдвічі менша від Землі за діаметром (6800 км). Марс має екваторіальний радіус 3396 км і середній

полярний радіус 3379 км (обидва значення точно визначив космічний апарат *Mars Global Surveyor*, який почав свою місію на орбіті навколо планети 1999 р.). Маса Марса становить $6,418 \cdot 10^{23}$ кг, що вдесятеро менше за масу Землі, а прискорення вільного падіння на його поверхні — $3,72 \text{ м/с}^2$. Це означає, що об'єкти на Марсі важать лише третину своєї земної ваги. Відстань до Сонця 228 млн км. Температура на поверхні від $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Тривалість року — 687 земних діб (1,9 земного року), а тривалість доби — 24 год 39 хв. Марс має слабе магнітне поле напруженістю в 500 разів меншою від земної. Природних супутників два — Фобос (з грец. — «страх») і Деймос («жах»).

Отримані за допомогою космічних апаратів зображення поверхні Марса показали, що вона є мертвою пустелею, значна частина якої — червоний пісок і камені. Колір поверхні Марса червоний, тому що у ґрунті високий вміст оксидів заліза (мал. 2.15).

На поверхні Марса атмосфера дуже розріджена, тому існують великі добові коливання температури: удень на екваторі температура піднімається іноді до $+15 \text{ }^\circ\text{C}$, уночі опускається до $-65 \text{ }^\circ\text{C}$. Узимку на поверхні Марса спостерігається сніг та іній, але вода в рідкому стані там існувати не може. Тиск на поверхні планети в 100–170 разів менший, ніж на Землі. В умовах низького атмосферного тиску вода закипає за температури $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ і відразу випаровується.

На Марсі дуже багато ударних кратерів великого розміру. Це свідчить про те, що планета пережила безліч катастроф, які змінили умови на її поверхні. Кратери на Марсі названо на честь учених, які вивчали Марс і планети Сонячної системи. Поверхня Марса характеризується чітко вираженою асиметрією. Південна гориста півкуля в середньому на 5 км вища від Північної. На фото марсіанської поверхні добре видно численні великі й дрібні каньйони. Їхня ширина сягає 600 км, глибина — 5 км. Найбільший каньйон — Долина Марінера — тягнеться майже на 5000 км.

Вражають своїми масштабами згаслі вулкани Марса. Найвищий — гора Олімп (мал. 2.16) — піднімається над поверхнею на 27 км. Діаметр її основи сягає 600 км. Вік таких структур — приблизно 400 млн років.

Знамениті полярні шапки Марса утворені товстими шарами льоду (близько 3 км), змішаного з пилом. Верхній шар полярних шапок складається із «сухого льоду» (замерзлого вуглекислого газу — CO_2) з невеликою домішкою звичайного льоду (H_2O). Температура тут опускається нижче від $-110 \text{ }^\circ\text{C}$. Коли на одній з півкуль починається зима, то відповідна полярна шапка починає рости і сягає 57° широти в Північній півкулі та 45° у Південній. Навесні шапки починають танути. Восени, коли формуються полярні шапки, можна спостерігати блакитнувато-білі хмари в атмосфері планети.

Загадкові марсіанські долини, схожі на русла річок (мал. 2.17), утворилися від водяних потоків, які висохли понад мільярд років тому. У 1999 р. було опубліковано дослідження, які доводять, що на Марсі раніше існував океан води. Це вдалося встановити за допомо-



Мал. 2.15



Мал. 2.16



Мал. 2.17

гою фото, переданих на Землю станцією *Mars Global Surveyor*, за особливостями рельєфу. Океан міг існувати, поки температура поверхні Марса була досить висока. Потім планета охолоджувалася близько мільярда років. Тонка атмосфера Марса не перешкоджала «зникненню» води в міжпланетний простір. Зі зниженням температури замерзла вода упереміш з піском утворила підповерхневу крижану оболонку — кріосферу, яка має кількість води, еквівалентну шару завтовшки приблизно 1 км по всій планеті.

Атмосфера Марса має малу густину і складається в основному з вуглекислого газу. Швидкість вітру на поверхні планети не перевищує 15 м/с. Марс — єдина планета, де спостерігаються глобальні пилові бурі. Вони створюють антипарниковий ефект, тому що хмари пилу не пропускають сонячне випромінювання до поверхні. Поверхня планети сильно охолоджується, а пил і навколишня атмосфера, навпаки, розігріваються. В атмосфері Марса спостерігаються піщані вихори, що закручують стовпи пилу заввишки до 8 км. Хмари складаються із силікатного і крижаного пилу, який піднімається так високо в атмосферу, що навіть закриває гору Олімп.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чому Меркурій не може утримувати сталу атмосферу?
2. Яка планета обертається навколо осі у протилежному напрямку порівняно із Землею?
3. На яких планетах земної групи відбувається зміна пір року?
4. Венера міститься далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
5. Які є докази того, що на поверхні Марса колись була вода в рідкому стані?
6. На яких планетах земної групи можливе існування життя?



Дослідіть відмінності складу атмосфери на планетах земної групи.

§ 9. ПЛАНЕТИ-ГІГАНТИ

Юпітер — п'ята та найбільша планета Сонячної системи (мал. 2.18).

Маса його в 2,5 рази більша за масу всіх разом узятих планет системи і в 318 разів більша за масу Землі. Юпітер є газоподібним тілом з надзвичайно потужною атмосферою, яка складається переважно з водню й гелію.



Мал. 2.18

Діаметр планети — 43 000 км. Відстань від Сонця змінюється в межах від 4,95 до 5,45 а. о. (740–814 млн км), середня відстань — 5,203 а. о. (778,57 млн км). Орбітальний період дорівнює 11,86 року. Оскільки ексцентриситет орбіти Юпітера дорівнює 0,0488, то різниця відстаней до Сонця в перигелії та афелії становить 76 млн км. Юпітер обертається навколо своєї осі швидше, ніж будь-яка інша планета Сонячної системи. Період обертання на екваторі — 9 год 50 хв 30 с, а на середніх широтах — 9 год 55 хв 40 с. Через швидке обертання екваторіальний радіус Юпітера (71 492 км) більший від полярного (66 854 км). Відстань між Юпітером і Землею змінюється в межах від 588 до 967 млн км. Температура на поверхні —

140 °С. Під час великих протистоянь Юпітер може досягати видимої зоряної величини $-2,94^m$. Він один з найяскравіших об'єктів на нічному небі після Місяця та Венери. Природних супутників у Юпітера — 79. Це найбільша кількість відкритих супутників серед усіх планет Сонячної системи. Крім того, Юпітер має систему кілець.

Юпітер схожий на зорі, бо за середньою густиною на ньому переважають водень і гелій. На відміну від планет земної групи, у гігантів немає твердої поверхні. Те, що ми спостерігаємо, — це вершини хмар, що плывуть в атмосфері. Через швидке обертання планет-гігантів і сильні вітри хмари витягаються у смуги паралельно екватору. Хмари бувають різного кольору завдяки домішкам аміачних, метанових та інших складних сполук. Світлі й темні смуги атмосфери Юпітера пояснюються різними зонами тиску. Світлі зони — це області високого тиску, а темні — низького. Теплі гази піднімаються нагору і, досягнувши верхньої межі хмар, охолоджуються. Потім вони падають у сусідні смуги, де тиск менший.

Для Юпітера, як і для всіх планет-гігантів, характерні світлі й темні овальні плями. Найпомітніша з них — Велика Червона Пляма (мал. 2.19), що спостерігається протягом трьох століть. Це величезний і дуже стійкий вихор, схожий на земний ураган.

У полярних хмарах Юпітера спостерігається явище, подібне до земного північного саява (мал. 2.20).

Внутрішню будову Юпітера можна уявити у вигляді оболонок з густиною, що збільшується в напрямку до центра планети. На дні атмосфери завтовшки 1500 км розташований шар газорідкого водню завтовшки 7000 км. На рівні 0,88 радіуса планети, де тиск становить $0,69 \cdot 10^{11}$ Па, а температура — 6200 °С, водень переходить у рідкомолекулярний стан і ще через 8000 км — у рідкий металевий стан. Поряд з воднем і гелієм шари містять невелику кількість важких елементів. У центрі Юпітера є тверде ядро, що складається з оксидів кремнію, магнію й заліза з домішками. Внутрішнє ядро діаметром 25 000 км — металосилікатне, із часткою води, аміаку й метану, оточене гелієм. Температура в центрі становить 23 000 °С, а тиск — $50 \cdot 10^{11}$ Па. Така висока температура пояснюється повільним гравітаційним стисканням планети.

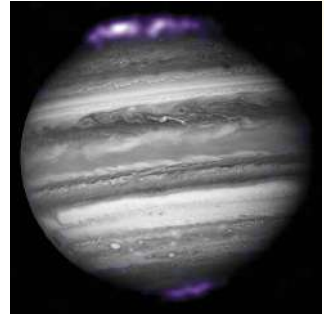
На рівні приблизно 0,77 радіуса планети починається оболонка, де водень набуває властивостей металу. Тут він стискається так сильно ($4 \cdot 10^{12}$ Па), що електрони залишають свої атоми і вільно переміщуються. Це є причиною появи магнітного поля Юпітера, напруженість якого на межі хмар у 12 разів вища, ніж у земного магнітного поля.

У 1979 р. космічні апарати «Вояджер-1» і «Вояджер-2» виявили в Юпітера кільця (мал. 2.21). Вони складаються з дуже дрібних пилинок (0,2–200 мкм). Ці пилинки поступово падають в атмосферу Юпітера, а їхнє місце займають інші, які утворюються під час зіткнення малих супутників, особливо Амальтеї, з метеоритними тілами.

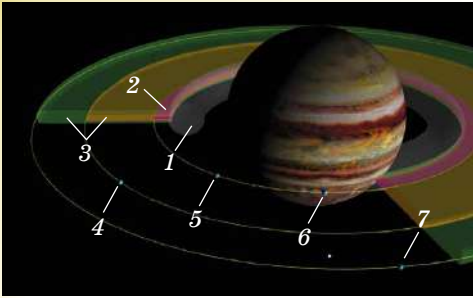
Система кілець Юпітера є слабкою та складається переважно з пилу. Товстий тор із частинок відомий як «кільце-гало» (англ. *halo ring*). Відносно яскраве, дуже тонке «головне кільце» і два широкі та слабкі



Мал. 2.19



Мал. 2.20



- 1 — гало
- 2 — головне кільце
- 3 — зовнішнє павутинне кільце
- 4 — Амальтея
- 5 — Адрастея
- 6 — Метіда
- 7 — Теба

Мал. 2.21

зовнішніх кільця — «павутинні кільця» (англ. *gossamer rings* — кільця тонкі та прозорі, як павутина), які названо за матеріалом супутників, які їх формують: Амальтеї та Теби.

Розмір пилинок у кільцях різний, але площа поперечного перерізу найбільша для несферіодальних частинок з радіусом 15 мкм у всіх кільцях, крім «кільця-гало». Загальна маса системи кілець невідома, але це приблизно від 10^{11} до 10^{16} кг. Вік системи кілець невідомий, але вони могли існувати з моменту остаточного формування Юпітера.

Сатурн — це друга за величиною планета-гігант, оточена гарними кільцями (мал. 2.22). Диск планети помітно сплюснутий біля полюсів. Екваторіальний радіус планети дорівнює 60 300 км, а полярний — 54 400 км.

240

Екваторіальний діаметр верхньої межі хмар — 120 536 км, а полярний — на кілька сотень кілометрів менший. Це спричинено тим, що в Сатурна найменша густина з усіх планет Сонячної системи. Оскільки ексцентриситет орбіти Сатурна дорівнює 0,056, то різниця у відстані до Сонця в перигелії та афелії становить 162 млн км.

Середня відстань між Сатурном і Сонцем становить 9,58 а. о. (1430 млн км). Середня температура на поверхні — 170 °С. Рухаючись із середньою швидкістю 9,69 км/с, Сатурн обертається навколо Сонця приблизно за 29,46 року (10 759 днів). Відстань від Сатурна до Землі змінюється в межах від 8,0 до 11,1 а. о. (1195–1660 млн км), середня відстань під час протистояння — близько 1280 млн км. Сатурн і Юпітер обертаються майже в точному резонансі (2:5). Періодом обертання Сатурна навколо осі вважають 10 год 34 хв 13 с. Точне значення періоду обертання внутрішніх частин планети залишається невідомим. Природних супутників — 62, найбільший з них Титан.

Кільця Сатурна (мал. 2.22) помітив ще Галілео Галілей. У 1610 р. він виявив по обидва боки диска незрозумілі придатки. Але лише Крістіан Гюйгенс у 1656 р. розрізнув тонке плоске кільце, що не стикається з планетою. Із Землі в телескоп можна побачити кілька кілець, відділених одне від одного темними проміжками.



Мал. 2.22

На основі спектральних досліджень у 1895 р. науковець **Аристарх Белопольський** (1854–1934) установив, що кільця не монолітні, а складаються з окремих дрібних тіл.

Фото, отримані космічними апаратами, показали, що кільця Сатурна утворені величезною кількістю кілець, що складаються із частинок криги, пилу, кам'яних уламків різних розмірів. Вони рухаються навколо планети, ніби супутники, і так близько розміщені одне до одного,

що здалеку здаються суцільним поясом планети. Товщина кілець не перевищує 2 км, а товщина окремого кільця — понад 30 м. Учені передбачають, що в атмосфері Сатурна міститься 94 % водню і 6 % гелію (за об'ємом). Його маса в 95 разів більша за масу Землі, напруженість магнітного поля трохи слабша від земного.

Площина кілець розташована в площині екватора Сатурна, яка нахилена під кутом 27° до площини орбіти. Під час руху Сатурна по орбіті кільця, зберігаючи положення в просторі, двічі за один оберт планети навколо Сонця повернуті до Землі своєю площиною. Оскільки їхня товщина мала, то в невеликі телескопи їх у цей час не видно. Діаметр по зовнішньому краю кільця становить 272 тис. км, а по внутрішньому — 144 тис. км. Сумарна маса кілець становить приблизно $3 \cdot 10^{-8}$ маси Сатурна.

Уран — третя за розмірами планета-гігант. Планета має дуже гарні зеленувато-блакитнуваті кольори (мал. 2.23). Причина цього — склад атмосфери планети та її температура.

За температури -217°C у верхніх шарах воднево-гелієвої атмосфери Урана утворюється метановий туман. Метан добре поглинає червоні промені й відбиває блакитні й зелені. Тому планета має гарні бірюзові кольори. В атмосфері Урана не спостерігається жодних помітних збурень.

Інкили Уран помітно незброєним оком, він темнуватий і повільно рухається, тому раніше його вважали дуже віддаленою зорею. Вісь обертання Урана майже горизонтальна. Напрямок обертання протилежний до напрямку обертання навколо Сонця. Уран рухається навколо Сонця майже коловою орбітою (ексцентриситет 0,047), середня відстань від Сонця у 19 разів більша, ніж у Землі, і становить 2871 млн км. Діаметр — 51 000 км. Середня температура на поверхні -200°C . Площина орбіти нахилена до екліптики під кутом $0,8^\circ$. Один оберт навколо Сонця Уран здійснює за 84,01 земного року. Період власного обертання Урана становить приблизно 17 годин. Природних супутників — 27. Темних кілець — 11. У складі планети є велика кількість льоду, тому її вважають крижаним гігантом.

У 1977 р. було відкрито кільця Урана. Фото, зроблені «Вояджером-2» в 1986 р., підтвердили їхнє існування. Уран оточений одинадцятьма вузькими кільцями, що розміщуються в площині екватора на відстані від 42 до 51,4 тис. км (або 1,65–2,02 радіуса) від центра планети. Типова ширина кілець від 1 до 8 км, тільки в найбільшого вона змінюється від 22 до 93 км. Товщина кілець не перевищує 1 км. Кільця Урана складаються з дрібного пилу та невеликих твердих темних частинок.

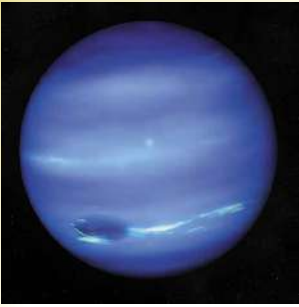
Уран важчий за Землю в 14,5 раза, що робить його найменш масивним з планет-гігантів Сонячної системи. Густина Урана — $1,270 \text{ г/см}^3$, він другий після Сатурна за найменшою густиною серед планет Сонячної системи. Уран складається в основному з різних льодів — водного, аміачного та метанового. Їхня маса за різними оцінками становить від 9,3 до 13,5 земної маси.

Водень і гелій складають лише малу частку від загальної маси (між 0,5 і 1,5 земних мас), інша частка (0,5–3,7 земних мас) припадає на гірські породи, які становлять ядро планети.

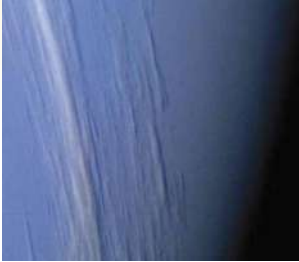
Магнітне поле Урана має цікаву особливість. Вісь обертання планети майже збігається з площиною орбіти, і лінії магнітного поля скручені обертанням Урана в довгий вихор за планетою. Напруженість магнітного поля приблизно дорівнює земній.



Мал. 2.23



Мал. 2.24



Мал. 2.25

Нептун — третя за масою планета Сонячної системи, рухається навколо Сонця майже коловою орбітою. Нептун став першою планетою, яку було відкрито не за спостереженнями, а завдяки математичним розрахункам у 1846 р.

Він розміщений майже на краю Сонячної системи й одержує дуже мало сонячної енергії. Але, незважаючи на це, планета дуже активна. На фото Нептуна добре видно хмари, що з'являються й зникають в атмосфері планети. Примітною деталлю Нептуна є й Велика Темна пляма (мал. 2.24), схожа за структурою на Велику Червону пляму Юпітера. Швидкість вітру в атмосфері Нептуна сягає рекордного значення — 640 м/с. Атмосфера складається з водню, гелію і метану. У складі планети є значна кількість льоду. Планета належить до крижаних гігантів.

Маса Нептуна у 17,2 раза більша за земну, а діаметр екватора — у 3,9 раза (тобто Нептун має масу $1,0243 \cdot 10^{26}$ кг та екваторіальний радіус — 24 764 км). Нептун рухається навколо Сонця еліптичною, близькою до колової, орбітою (ексцентриситет 0,009). Його середня відстань від Сонця у 30 разів більша, ніж в Землі, і становить приблизно 4497 млн км. Це значить, що світло від

242 Сонця до Нептуна йде трохи більше ніж 4 години. Тривалість одного повного оберту навколо Сонця — 164,8 земного року. Власне обертання досить швидко — доба на Нептуні триває всього 16 годин. Прискорення вільного падіння на поверхні цієї планети в середньому в 1,14 раза більше за земне (більше має лише Юпітер). Середня густина Нептуна ($1,66 \text{ г/см}^3$) майже втричі менша за земну. Нептун має магнітне поле, напруженість якого на полюсах приблизно вдвічі більша, ніж на Землі. Ефективна температура поверхні планети становить приблизно 38 К. У центрі ядра Нептуна температура сягає 7000 К при тиску $7\text{--}8 \cdot 10^{11}$ Па. Природних супутників — 14, кілець — 4.

Припущення про існування кілець у Нептуна було висунуто в 1984 р. на основі спостережень за перекриттям зір планетою. Одне незамкнуте і три замкнуті кільця видно на фото, отриманих космічним кораблем «Вояджер-2» у 1989 р. Розташовуються кільця на відстані від 1,7 до 2,5 радіуса планети. Ширина кілець — 1700, 15, 5000 й 50 км відповідно. Вони складаються з дрібних силікатних пилинок, що відбивають 6 % сонячного світла.

Атмосфера Нептуна складається з водню (приблизно 67 %), гелію (31 %) і метану (2 %). На верхніх шарах це 80 % водню і 19 % гелію. Крім них також є незначні домішки речовин: ацетилен C_2H_2 , діацетилен C_4H_2 , етилен C_2H_4 й етан C_2H_6 , а також чадний газ CO і молекулярний азот N_2 .

Основний шар хмар (мал. 2.25) міститься на рівні тиску близько 3 атмосфер, він складається із замерзлого сірководню H_2S , можливо, із невеликою домішкою аміаку NH_3 . Температура в цій області становить близько 100 К (-173°C). Вище від основного шару, у холодній прозорій атмосфері конденсуються рідкісні білі хмари замерзлого метану CH_4 . Ці хмари підіймаються на висоту 50–150 км і відкидають тіні на основний хмарний покрив, як це видно на фото «Вояджера-2».

Нижче від першого шару хмар, на рівні тиску близько 20 атмосфер і температури близько 200 К (-70°C) є другий шар хмар — з гідросульфиду амонію NH_4SH . Ще глибше розташовані хмари з водяного льоду.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Укажіть відмінності основних фізичних характеристик планет-гігантів від планет земної групи.
2. Яка особливість обертання планет-гігантів навколо осі?
3. Схарактеризуйте особливості будови планет-гігантів.
4. Яка планета Сонячної системи важить більше від інших планет і Місяця, разом узятих?
5. Що являють собою кільця планет? Чому іноді навіть у великі телескопи не видно кільця Сатурна? Які спостереження доводять, що кільце Сатурна не є суцільним?



Дослідіть відмінності між планетами земної групи і планетами-гігантами.

§ 10. СУПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Станом на березень 2019 р. у Сонячній системі відкрито 185 супутників великих планет і 9 супутників карликових планет. Також відомі супутники деяких астероїдів. Сім супутників, включаючи Місяць, мають діаметр більше як 2500 км, а Титан (супутник Сатурна) і Ганімед (3-й супутник Юпітера) у 1,5 раза більші, ніж Місяць, і трохи більші, ніж Меркурій. Титан — єдиний супутник з потужною атмосферою, яка здебільшого складається з азоту.

Невеликі супутники розміром десятки кілометрів є кам'яними або крижаними тілами неправильної форми. Їхні поверхні засіяні кратерами та вкриті дрібним пилом. Середні супутники (кілька сотень кілометрів) в основному кулясті й мають малу густину. За зовнішнім виглядом їхня поверхня нагадує місячну. Відрізняються розмаїтістю 7 найбільших супутників. За своєю будовою вони більше схожі на планети земної групи. Найбільші супутники Юпітера відкрив ще в 1610 р. Галілей. Однак основні відомості про природу великих супутників планет-гігантів отримано в результаті досліджень за допомогою космічних апаратів. За допомогою автоматичних міжпланетних станцій вдалося отримати чіткі фото супутників Марса та багатьох супутників планет-гігантів з близької відстані. На них добре видно численні деталі поверхні: кратери, тріщини, нерівності. Супутники Юпітера і більш віддалених планет вкриті шаром льоду з пилом завтовшки десятки кілометрів. На супутнику Юпітера — Іо (мал. 2.26) — було сфотографовано кілька діючих вулканів. Усі супутники вкриті кратерами ударного (метеоритного) походження. Багато супутників, зокрема і Місяць, повернуті до своєї планети одним боком. Зоряні періоди їхнього обертання дорівнюють періодам обертання навколо своїх планет. Чотири найбільших супутники Юпітера ми можемо побачити у призматичний бінокль. Якщо дивитися в телескоп, то за кілька годин можна помітити, як вони переміщуються, іноді проходять між Юпітером і Землею, а іноді відходять за диск Юпітера чи в його тінь.

Модель внутрішньої будови великих супутників передбачає наявність у них трьох оболонок: кори, мантії і ядра. Ядра, що містять сполуки заліза і становлять 0,3–0,6 радіуса супутника, мають Іо, Європа (мал. 2.27) та Ганімед.



Мал. 2.26



Мал. 2.27

У Тритона й Каллісто (мал. 2.28) кам'янисті ядра такого самого або навіть більшого розмірів. Силікатна (кам'яниста) кора Іо завтовшки 30 км. Під нею на глибині 100 км є рідка магма, температура якої сягає 2000 К. Магма живить численні вулкани Іо. Інші супутники вкриті крижаною оболонкою різної товщини, під якою є кам'яниста мантія.



Мал. 2.28



Мал. 2.29



Мал. 2.30

На поверхні Тритона і Ганімеда видно сліди тектонічної діяльності: розлами, стиски, тріщини, дрібні хребти. Каллісто відрізняється від них наявністю численних кратерів ударного походження. Крижану оболонку Європи перетинає мережа світлих і темних вузьких смуг. Це тріщини в товстій крижаній корі, спричинені приливними впливами Юпітера. Багаторічні спостереження за тріщинами показали, що крижані маси незначно зміщуються одна відносно одної. Це значить, що під льодом є вода. У деяких місцях крижаного панцира Європи космічний апарат «Галілео» сфотографував дивні хаотичні накопичення старих крижин, уморозених у свіжий лід. Ці структури називають хаосами (мал. 2.29). Вони свідчать про те, що час від часу лід тоне, але потім знову замерзає. Не встигнувши розтанути, крижини вморожуються в новий лід. Крижана поверхня Європи — молода, про це свідчить майже повна відсутність на ній ударних кратерів.

На Іо немає ознак існування значної кількості води і всередині, і на поверхні супутника. На ньому відбулися численні вулканічні виверження. Сполуки сірки, викинуті вулканами, які осідають на поверхні, надають супутникові кольори від білого до яскраво-червоного і чорного. При цьому кольори залежать від температури речовини. З жерла вулканів газу викидаються на висоту близько 200 км зі швидкістю приблизно 1 км/с. Газові гейзери помічено над полярною шапкою Тритона. Струмені темної речовини вириваються нагору з його поверхні і сягають висоти 8 км.

Найпотужнішу атмосферу має супутник Сатурна — Титан (мал. 2.30). Вона на 60 % гущіша, ніж на Землі, і приблизно на 85 % складається з азоту. Тиск на поверхні в 1,5 раза перевищує земний. Метанові хмари й туман не дають змоги розглянути поверхню Титана.

Розріджену атмосферу з азоту й метану має супутник Нептуна — Тритон (10^{-5} земної). Слабка атмосфера з молекулярного кисню огортає супутники Юпітера — Ганімед та Європу (10^{-9} і 10^{-11} земної).

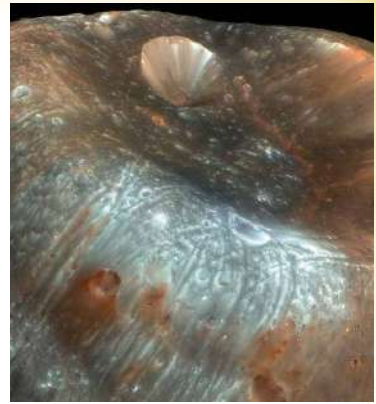
Утворюється вона так: сонячне світло, космічні промені та мікрометеорити вибивають з крижаної поверхні молекули води, які під дією ультрафіолетового випромінювання розпадаються на атоми Гідрогену й Оксигену. Атоми Гідрогену відразу залишають атмосфе-

ру, а атоми Оксигену об'єднуються в молекули. Розріджена атмосфера з вуглекислого газу існує в Каллісто, розріджену атмосферу з оксидів сірки й вулканічних газів має Іо (10^{-9} земної).

У кількох великих супутників виявлено власні магнітні поля. З планет земної групи, крім Землі, тільки Марс має 2 супутники. Їх відкрив у 1877 р. американський астроном Асаф Холл (1829–1907). Це невеликі кам'янисті тіла неправильної форми розміром 27×19 км — Фобос (мал. 2.31) і 16×11 км — Деймос (мал. 2.32).

Деякі супутники планет Сонячної системи зображено на малюнку 2.33: а — Міранда — супутник Урана, б — Мімас — супутник Сатурна, в — Енцелад — супутник Сатурна.

Супутники планет рухаються по-різному. Наприклад, Фобос обертається навколо Марса втричі швидше, ніж сама планета обертається навколо своєї осі. Тому, якщо спостерігати з Марса, він двічі на добу буде сходити на заході й двічі повністю змінює всі фази, проносячись по небосхилу назустріч добовому обертанню зір. Супутники Марса розміщені близько до поверхні планети. Фобос — на відстані меншій за діаметр планети. Далекі супутники Юпітера й Сатурна дуже малі і мають неправильну форму. Деякі з них обертаються в протилежний бік до обертання самої планети. Площини орбіт супутників Урана лежать близько до площини екватора планети і майже перпендикулярні до площини орбіти Урана.

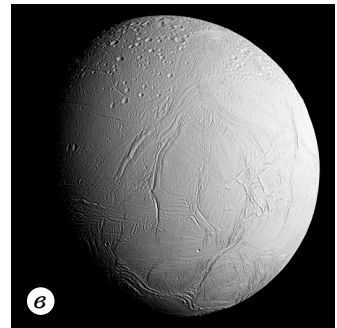
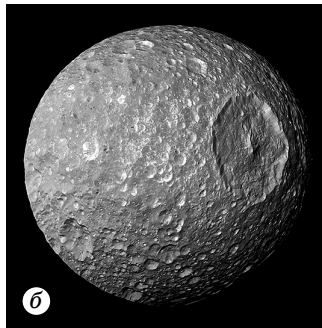
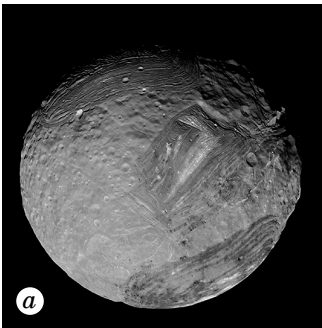


Мал. 2.31



Мал. 2.32

245



Мал. 2.33



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Назвіть найбільші супутники планет Сонячної системи. Розкажіть про деякі характерні риси кожного з них.
2. Чим пояснюється дивовижне забарвлення Іо?
3. Про що свідчать численні кратери на супутниках Юпітера?
4. Які супутники планет мають атмосферу?
5. Що спричиняє існування досить густої атмосфери на Титані?



Дослідіть, на яких супутниках можливе життя.

§ 11. КАРЛИКОВІ ПЛАНЕТИ ТА МАЛІ ТІЛА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

У серпні 2006 р. на Асамблеї Міжнародного астрономічного союзу було прийнято нове визначення планети і вперше введено поняття «карликова планета».

Карликовими планетами вважають об'єкти, що обертаються навколо зорі та мають гідростатично рівноважну форму (кулясту) і не є супутниками планет.

До серпня 2006 р. Плутон, який у 1930 р. відкрив американський астроном Клайд Томбо (1906–1997), вважався дев'ятою планетою Сонячної системи.

Однак за динамічними та фізичними характеристиками він істотно відрізнявся від інших планет. У 1978 р. у Плутона було відкрито супутник — Харон. Його діаметр становить 1205 км, ледве більше за половину діаметра Плутона, а співвідношення мас становить 1:8. Деякі астрономи зараховували Харон до супутників, інші — систему Плутон–Харон вважали подвійною планетою.

Відповідно до рішення Міжнародного астрономічного союзу відмінність подвійної планети від системи планета–супутник (наприклад, Земля–Місяць) полягає у розміщенні барицентру — загального центра мас. У першому випадку цей центр перебуває у відкритому космосі, у другому — у середині основної планети, що має супутники.

Стало очевидним, що Плутон — лише один з найбільших відомих на цей час об'єктів поясу Койпера, принаймні один з об'єктів (Ерида) поясу є більшим тілом, ніж Плутон. На малюнку 2.34 показано порівняльні розміри Землі, Місяця та деяких карликових планет.

246



Мал. 2.34

Пояс Койпера — це дископодібна область крижаних об'єктів за орбітою Нептуна, у мільярдах кілометрів від Сонця. Плутон та Ерида є найвідомішими із цих крижаних світів (там можуть бути ще сотні крижаних карликів). Пояс Койпера і хмара Оорта, що міститься ще далі, є «домом» для тіл, що обертаються навколо Сонця.

Відомі астероїди і комети в обох областях значно менші, ніж Місяць. Поясом Койпера є кільце, яке починається за орбітою Нептуна на відстані приблизно від 30 до 60 а. о.

Хмара Оорта є сферичною оболонкою, що займає простір на відстані від 50 до 100 тис. а. о. (до 1 св. р.). Це становить майже чверть відстані до Проксими Центавра — найближчої до Сонця зорі. Пояс Койпера та розсіяний диск, дві інші відомі області транснептунових об'єктів, у тисячу разів менші за хмару Оорта. Зовнішня межа хмари Оорта визначає гравітаційний кордон Сонячної системи — сферу Гілла, яка розраховується для Сонячної системи у 2 світлових роки.

Деякі карликові планети в межах поясу Койпера мають тонкі атмосфери, які руйнуються, коли їхні орбіти несуть їх на найдовшу відстань від Сонця. Кілька карликових планет у поясі Койпера мають крихітні супутники. Не існує відомих кілець навколо астероїдів у будь-якій ділянці простору. Пояс Койпера та хмару Оорта названо на честь астронома: **Джерарда Койпера (1905–1973)** і **Яна Оорта (1900–1992)**, які передбачили їхнє існування в 1950-х роках.

Планети і карликові планети — це два різних класи об'єктів Сонячної системи. Крім Плутона, карликовими планетами вважають Харон, «колишні» астероїди Цереру, Весту, Палладу, що містяться між орбітами Марса і Юпітера, і об'єкти поясу Койпера — Ериду, Седну та ін., що перебувають ще далі від Сонця, ніж Плутон.

На думку астрономів, в області поясу Койпера є десятки карликових планет, подібних до Плутона, але їхнє відкриття — справа часу.

Усі інші об'єкти, крім карликових планет, які обертаються навколо Сонця і не є супутниками, називають **малими тілами** Сонячної системи. До цього типу належить більшість астероїдів між Марсом і Юпітером, а також транснептунові об'єкти поясу Койпера, комети і всі інші тіла, що обертаються навколо Сонця.

Після 1801 р. між орбітами Марса і Юпітера було виявлено кілька карликових планет і безліч астероїдів.

Астероїд (мала планета) — мале тіло Сонячної системи, що має неправильну форму і перебуває на геліоцентричній орбіті.

До початку ХХ ст. було виявлено близько 500 астероїдів, діаметри яких становлять десятки кілометрів. У наш час в базі даних Центру малих планет налічується близько 100 млн об'єктів. У понад 600 тис. визначено орбіти, і їм надано сталий номер. Близько 18 тис. з них мають офіційно затверджені назви. Дослідники припускають, що в головному поясі астероїдів має бути від 1,1 до 1,9 млн об'єктів, що мають розмір понад 1 км у діаметрі.

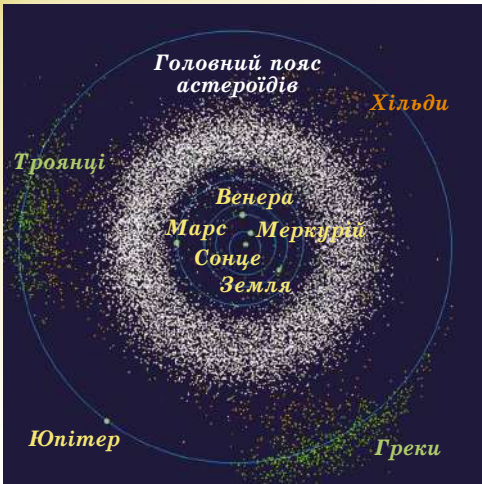


Джерард Койпер

247



Ян Оорт



Мал. 2.35



Мал. 2.36

з іншою версією, астероїди виникли в результаті руйнування гіпотетичної планети, що перебувала між Марсом і Юпітером.

У 1951 р. французький астроном Джерард Койпер передбачив існування поясу астероїдів за орбітою Нептуна. Теоретично цей пояс має міститися на відстані 35–50 а. о. від Сонця. Можливо, це залишок первісної туманності, з якої сформувалася Сонячна система. Сумарна маса тіл поясу Койпера порівнянна з масою Землі.

Уперше сфотографував поверхню астероїдів міжпланетний космічний апарат «Галілео». Наближаючись до Юпітера, він сфотографував астероїди Гаспра та Іда із супутником Дактиль (мал. 2.36).

Першу вдалу посадку на поверхню астероїда зробив космічний апарат NEAR у 2001 р. Астероїд Ерос виявився кам'янистим тілом неправильної форми розмірами $33 \times 13 \times 13$ км і густиною 2700 кг/м^3 , близькою до густини порід земної кори. Поверхня астероїда вкрита пилом, всіяна кратерами і валунами (діаметром до 100 м).

Нині у Сонячній системі на відстані, що не перевищує 100 а. о., перебуває близько 1 млн малих тіл розмірами до 1 км. Орбіти астероїдів збільшують свій ексцентриситет до 0,8 через гравітаційні сили з боку планет-гігантів. Через це деякі астероїди проникають усередину орбіт Марса, Землі і навіть Меркурія. Такі небесні тіла можуть зіштовхуватися із Землею не рідше ніж раз на 20 млн років. Існує не менше ніж 200 тис. астероїдів діаметром від 100 м, орбіти яких можуть перетинати орбіту Землі. Імовірність

Астероїди вважають залишками протопланетного диска, що утворився після формування Сонячної системи. Сумарна маса оцінюється лише як 0,1 маси Землі. Нові астероїди відкривають щороку. Значна частина (98 %) астероїдів рухається в площинах, близьких до екліптики, по орбітах з малим ексцентриситетом, розташовуючись між орбітами Марса і Юпітера на відстані 2,2–4,5 а. о. від Сонця. Навколо Сонця астероїди рухаються в той самий бік, що й планети. Область простору між орбітами Марса і Юпітера, де перебуває більшість астероїдів, називають **головним поясом астероїдів** (мал. 2.35).

За однією з гіпотез, астероїди є залишками існуючої колись безлічі планетезималей (планетезималь — небесне тіло на орбіті навколо зорі, що утворюється в результаті поступового осідання на ньому менших об'єктів та частинок). Процес формування їх у планету колись припинився через збурення з боку Юпітера — гіганта, що швидко обертається. У результаті цього об'єднання речовини змінилося на подріблення. Збурення планет-гігантів змінюють орбіти астероїдів, змушуючи їх зіштовхуватися один з одним, з планетами і їхніми супутниками. Згідно

зіткнення з таким тілом — приблизно 1 раз на 5 тис. років, при цьому на Землі утвориться кратер діаметром близько 1 км.

31 жовтня 2015 р. приблизно о 19:00 за київським часом на небезпечно близькій відстані від Землі (486 тис. км, у 1,3 раза далі відстані до Місяця) пролетів астероїд. Тому в багатьох країнах, у тому числі і в Україні, створено служби спостереження за небезпечними астероїдами, щоб у разі загрози для Землі від будь-якого з них провести роботу зі зміни орбіти або його знищення.

Спочатку астероїдам давали імена міфологічних богинь, потім — жіночі імена. Коли вони закінчились, астероїди стали називати на честь відомих учених різних країн. Серед астероїдів є такі, назви яких пов'язані з Україною, — Житомир, Одеса, Херсон, Кобзар, Сковорода, Всехсвятський, Чурюмов, Яцків та ін.

Найвідоміші астероїди: Паллада, Юнона, Веста, Ерос, Амур, Гідальго, Ікар.

У міжпланетному просторі рухається величезна кількість кам'яних і залізних тіл, найрізноманітніших за розмірами, формою і хімічним складом. Ці тіла одержали назву **метеоритні тіла**. Коли таке тіло вторгається в атмосферу Землі з космічною швидкістю, у результаті тертя об повітря воно нагрівається, починає плавитися і світитися — на небі з'являється яскрава вогненна куля. Це явище одержало назву **болід** (від грец. βολίς — «метальний спис»). У нічний час болід яскраво висвітлює місцевість на десятки й сотні кілометрів навколо. Дуже яскраві боліди видно навіть удень при повному сонячному освітленні. За вогненною кулею вздовж її траєкторії залишається слід у вигляді світіння іонізованих молекул повітря та закінчується струменями пилу. Пил — це продукт руйнування метеоритного тіла під час його руху в атмосфері, тому що під час польоту з величезною швидкістю тіло нагрівається до кількох тисяч градусів. Речовина на його поверхні безупинно розплавляється і частково випаровується: зривається потоками повітря й розприскується у вигляді дрібних крапель. Вони й становлять пиловий слід боліда. Наростаюче згущення повітря створює навколо метеоритного тіла ударну хвилю. Вона спричиняє звукові явища — гуркіт і гул.

Уцілілий від повного руйнування залишок метеоритного тіла падає на поверхню Землі. Це і є метеорит. **Метеорити** є уламками небесних тіл Сонячної системи. Метеоритне тіло, що має величезну початкову масу десятки й сотні тисяч тонн, проходить усю товщу атмосфери, зберігаючи космічну швидкість — кілька кілометрів за секунду. У результаті удару відбувається вибух, і утворюється метеоритний кратер. Він може мати розміри від кількох метрів до 100 км. Найвідоміший Арізонський кратер діаметром 1200 м, глибиною 180 м і висотою вала близько 50 м (мал. 2.37). Можливо, він з'явився 30 тис. років тому. Сьогодні виявлено понад 180 астроблем — **зоряних ран** (як їх образно називають учені), які знаходяться на всіх земних континентах. На території України, поблизу Вінниці, є зоряна рана, яка має назву **Іллінецька астроблема**. Після падіння метеорита, що сталося кілька мільйонів років тому, утворився гігантський кратер діаметром 5 км.

Бовтиський кратер було виявлено у 2002 р. в околицях Кропивницького. Діаметр кратера — 24 км, глибина — понад 500 м. Зона розльоту викинутих порід вкриває всю Центральну Україну, сягає Криму, Румунії, Росії.

Усі метеорити за складом діляться на три основних класи: кам'яні, залізокам'яні й залізні. Кам'яні метеорити близькі за хімічним складом до земних гірських порід: містять оксиди заліза, кремнію, магнію.



Мал. 2.37



Мал. 2.38

Близько 90 % кам'яних метеоритів містять хондри — сферичні частинки розміром від мікроскопічних зерен до горошини. Такі кам'яні метеорити називають **хондритами**, інші кам'яні метеорити — **ахондритами**.

Найбільший метеорит знайдено в 1920 р. біля населеного пункту Гоба в Південно-Західній Африці. Це залізний метеорит масою близько 60 т. Метеорит Княгиня знайдено в 1866 р. у Закарпатській області, його маса становить 500 кг, частину його показано на малюнку 2.38.

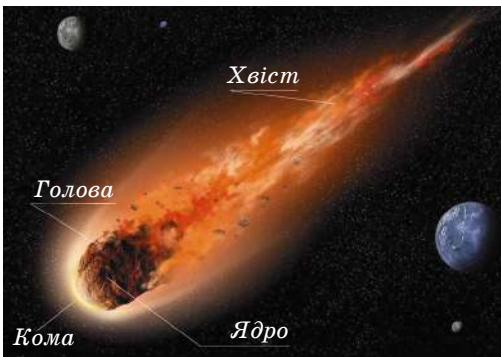
Усього в Україні було знайдено 43 метеорити. Останній з них — залізний метеорит Верхній Салтів масою 9,5 кг — знайшли у 2001 р. під час розкопок стародавнього хазарського поселення у Харківській області.

Про **комети**, «хвостаті зорі», було відомо з давніх часів. Перші китайські записи про комети датуються III тисячоліттям до н. е. Віддалені від Сонця комети мають вигляд слабких туманних об'єктів. Наближаючись до Сонця, вони стають яскравішими, збільшуються у розмірах, у них з'являється хвіст, спрямований у протилежний бік від Сонця.

За всю історію людства спостерігалось близько 3500 комет. Зареєстровано в каталогах близько 1000 таких малих тіл Сонячної системи й визначено елементи їхніх орбіт. Майже всі комети рухаються по витягнутих орбітах з ексцентриситетом, близьким до одиниці. Комети поділяються на **короткоперіодичні** (з періодом обертання менше ніж 200 років) і **довгоперіодичні**. Першу періодичну комету виявив англійський астроном Едмунд Галлей (1656–1742).

Він обчислив орбіти 24 яскравих комет. Аналізуючи свій кометний каталог, Галлей помітив подібність елементів орбіт комет 1531, 1607 й 1682 років і припустив, що це послідовне повернення тієї самої комети, що рухається по сильно витягнутій еліптичній орбіті з періодом майже 76 років. Відповідно до пророкування Галлея її виявили в 1758 р. За цією кометою закріпилася назва **комета Галлея** (мал. 2.40). Вона рухається по орбіті з більшою піввіссю $a = 17,94$ а. о. у напрямку, протилежному до руху Землі. У будові комети виділяють такі елементи (мал. 2.39): ядро, кома, голова і хвіст.

Ядро комети — це невелике тверде крижане тіло, що включає тугоплавкі частинки та органічні сполуки. До 80 % ядра комети складається з водяного льоду, а також із замерзлого вуглекислого газу, чадного газу, метану, аміаку та вкраплених у лід металевих частинок. Є в кометних



Мал. 2.39



Мал. 2.40

льодах і більш складні речовини, аж до амінокислот. За результатами досліджень, виконаних космічними апаратами, наприклад, ядро комети Галлея є монолітним тілом неправильної форми розмірами 16×8 км, масою $3 \cdot 10^{14}$ кг і малою густиною близько 600 кг/м^3 .

При наближенні до Сонця (на відстані кількох а. о.) у комети утворюється голова. Вона виникає в результаті нагрівання ядра, випаровування і виділення з його поверхні газів і пилу. Видимі діаметри голів комет з наближенням до Сонця сягають розмірів 10^4 – 10^6 км. Під дією тиску сонячного випромінювання на гази, що оточують голову комети, утворюється хвіст. Хвості яскравих комет тягнуться на сотні мільйонів кілометрів. Наприклад, хвіст комети Хякутаке (комета С/1996 В2 (*Hyakutake*) — довгоперіодична комета, яку відкрив у 1996 р. японський астроном-аматор Юдзі Хякутаке) тягнеться приблизно на 300 млн км. Густина частинок у хвостах комет дуже мала, її можна порівняти з міжпланетним середовищем.

Залежно від форми, кометні хвості ділять на кілька типів:

1. Хвіст утворюється при прискоренні сонячним вітром кометних йонів і спрямований у бік, протилежний від Сонця.
2. Хвіст трохи зігнутий і складається з пилинок, що мають розмір до десятків мікрометрів.
3. Хвіст, що складається з більшого пилу, сильно зігнутий під впливом магнітного поля.
4. «Антихвіст» — викидання з голови комети, спрямоване прямо до Сонця.

Кожне повернення комети до Сонця не проходить безслідно. Ядро комети втрачає близько $1/1000$ своєї маси. Тому, наприклад, час існування комети Галлея — близько 20 тис. років. Але комети можуть існувати й менше часу, тому що вони піддаються руйнуванню внаслідок внутрішніх напружень, що виникають через нагрівання їх Сонцем або приливним впливом Сонця і Юпітера. Гинуть комети також під час зіткнення з планетами й метеоритними тілами. Документально зареєстровано понад 30 комет, що розпалися на окремі компоненти на очах спостерігачів. Так, у 1992 р. комета Шумейкерів–Леві зблизилася з Юпітером. У результаті потужного гравітаційного впливу вона роздібилася на 22 уламки. Через 2 роки, обігнувши по орбіті Юпітер, уламки увійшли в атмосферу планети зі швидкістю 60 км/с (мал. 2.41). У результаті виникли гігантські вихрові темні утворення, порівнянні за розмірами з розмірами Землі. Існує імовірність зіткнення ядер комет із Землею.

Під час руху навколо Сонця комети розпадаються. Уздовж їхніх орбіт витягаються шлейфи пилу, які можуть перетинати земну орбіту. Частинки, входячи з величезною космічною швидкістю в атмосферу Землі, згорають, утворюючи світлий слід (у народі кажуть: упала зоря). Це явище називають **метеором** (мал. 2.42). Саму частинку називають **метеорним тілом**.

Розміри метеорних тіл, що спричиняють явище метеора, — від кількох мікронів пилинок (тоді їх можна спостерігати тільки в телескоп) до кількох сантиметрів (дають дуже яскраве світіння). За деякими оцінками, входження в атмосферу Землі метеорної речовини становить близько 50 тис. тонн у рік.

Близько 1 % метеорних тіл, що стикаються із Землею, прилітають з міжзор'я-



Мал. 2.41



Мал. 2.42

ного простору. Метеорні тіла влітають у земну атмосферу зі швидкістю від 11 до 72 км/с, натрапляючи на своєму шляху на сильно і швидко зростаючий опір повітря. Поверхня метеорного тіла розігривається до кількох тисяч градусів і перетворюється в розпечений газ, що йонізує навколишні молекули повітря. У результаті чого спостерігач на Землі бачить світлий вогняний слід.

Світіння метеорного тіла починається на висоті 120 км і зникає на висоті 60–80 км від поверхні Землі, коли тіло повністю випарується в земній атмосфері. Весь політ метеорного тіла триває від десятих часток до кількох секунд. Час спостереження явища метеора залежить від швидкості метеорного тіла.



Мал. 2.43

Властивості й природу метеорної речовини допомагають вивчати візуальні, фотографічні, спектральні й радіолокаційні спостереження. Дослідження показали, що весь комплекс метеорної речовини ділиться на випадкові метеорні тіла й метеорні частинки, що належать до метеорних роїв.

Метеорні тіла, що з'являються в певну пору року й падають десятками за годину, належать до метеорних потоків, або зоряних дощів. Метеорні потоки спостерігаються, коли Земля перетинає орбіту метеорного рою. Метеори кожного потоку рухаються у просторі майже паралельними траєкторіями, але нам здається, що вони вилітають з однієї точки. Саме цю точку і називають **радіантом** (мал. 2.43).

252

Метеорний потік має назву того сузір'я або зорі, поблизу яких перебуває радіант, наприклад Драконіди, Оріоніди тощо. Серед метеорних потоків трапляються такі, інтенсивність яких з роками не змінюється. Це значить, що метеорні частинки розподілено майже рівномірно вздовж орбіти рою. Найвідоміший такий потік — потік Персеїдів, що спостерігається щорічно в серпні.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під карликовою планетою? Які карликові планети ви знаєте?
2. Які небесні об'єкти називають малими тілами?
3. Чому в астероїдів немає атмосфер? Яка форма й розміри більшості астероїдів? Чи існує небезпека зіткнення Землі з астероїдом?
4. Які, на ваш погляд, причини утворення поясу астероїдів між орбітами Марса і Юпітера?
5. Як можна на зоряному небі відрізнити астероїд від зорі?
6. Який найбільший метеоритний кратер виявили на території України?
7. Чому хвости комет спрямовані у бік, протилежний від Сонця? Що є ядром і хвостом комети? Який зв'язок комет з метеорами й астероїдами?



Використовуючи різні інформаційні джерела, дослідіть, які комети спостерігалися з території України.

§ 12. КОСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ. РУХ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ТА АВТОМАТИЧНИХ МІЖПЛАНЕТНИХ СТАНЦІЙ

Найпростіший випадок руху тіл поблизу поверхні Землі під дією сили тяжіння — вільне падіння з початковою швидкістю, що дорівнює нулю. У цьому випадку тіло рухається прямолінійно з прискоренням вільного падіння в напрямку до центра Землі. Якщо тіло має початкову швидкість і

її вектор спрямований не по вертикалі, то тіло під дією сили тяжіння почне рухатися з прискоренням вільного падіння по криволінійній траєкторії.

Розглянемо тіло, що перебуває за межами земної атмосфери. Припустимо, що вектор початкової швидкості цього тіла спрямований по дотичній до поверхні Землі. Залежно від значення початкової швидкості подальший рух тіла може бути різним: а) за малих початкових швидкостей (v_{01}, v_{02}, v_{03}) тіло впаде на Землю; б) за деякого значення швидкості v_1 (**перша космічна швидкість**) тіло стане штучним супутником і почне обертатися навколо Землі подібно до природного супутника — Місяця; в) при ще більшому збільшенні швидкості й досягненні наступного певного значення v_2 (**друга космічна швидкість**) тіло відлетить від Землі так далеко, що сила земного притягання практично не буде впливати на його рух. Тіло почне обертатися навколо Сонця подібно до штучної планети; г) якщо швидкість тіла досягне певного значення v_3 (**третя космічна швидкість**), то воно назавжди покине Сонячну систему і відлетить у світовий простір.

Розглянемо випадок, коли тіло стає штучним супутником Землі, тобто визначимо першу космічну швидкість v_1 . Знайдемо її за другим законом Ньютона з умови, що під дією сили тяжіння тіло набуває доцентрового прискорення:

$$G \frac{mM}{R_{\text{орб}}^2} = ma_{\text{доц}}$$

де $R_{\text{орб}} = R + h$ — середній радіус орбіти тіла (мал. 2.44); R — радіус Землі; h — висота тіла над поверхнею Землі; M — маса Землі; m — маса тіла (супутника).

$$\text{Для доцентрового прискорення } a_{\text{доц}} = \frac{v_1^2}{R_{\text{орб}}} = \frac{v_1^2}{R + h}.$$

Підставляючи цей вираз у попередній, після скорочень отримуємо:

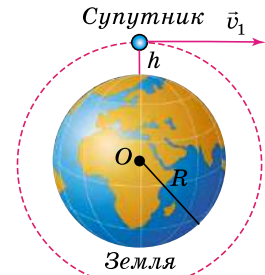
$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R + h}}.$$

Біля поверхні Землі з урахуванням виразу для прискорення вільного падіння $g = G \frac{M}{R^2}$, де $h = 0$. Тоді перша космічна швидкість (не враховуючи опір повітря) дорівнює: $v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,8 \cdot 6,37 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3$ м/с.

Отже, тіло, швидкість якого дорівнює $7,9 \cdot 10^3$ м/с і спрямована по дотичній до поверхні Землі, стає штучним супутником Землі, що рухається по коловій орбіті над Землею. У небесній механіці першу космічну швидкість називають також **коловою швидкістю**.

Друга космічна швидкість визначається з умови, коли тіло повинне вийти зі сфери земного тяжіння і стати супутником Сонця. Розрахунки дають такий вираз для визначення другої космічної швидкості (не враховуючи опір повітря): $v_2 = \sqrt{2gR}$ (R — радіус Землі). Використовуючи вираз $v_1 = \sqrt{gR}$, визначаємо: $v_2 = v_1 \sqrt{2}$. Підставляючи в це рівняння значення першої космічної швидкості, одержимо, що біля поверхні Землі $v_2 = 11,2 \cdot 10^3$ м/с. Другу космічну швидкість називають **параболічною швидкістю**.

Третя космічна швидкість, або **гіперболічна швидкість**, — це найменша початкова швидкість, з якою тіло має перебороти земне притягання і вийти на навколосонячну орбіту зі швидкістю, потрібною для того, щоб назавжди покинути межі Сонячної системи.



Мал. 2.44

Розрахунки дають таке рівняння для знаходження значення цієї швидкості:

$$v_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_2^2},$$

де $v \approx 29,8 \cdot 10^3$ м/с — швидкість Землі на коловій орбіті під час руху навколо Сонця.

Підставивши значення другої космічної швидкості v_2 в останнє рівняння і провівши розрахунки, одержимо, що тіло повинне мати мінімальну швидкість $v_3 = 16,7 \cdot 10^3$ м/с, щоб покинути межі Сонячної системи.

Розрахунки траєкторій польотів космічних апаратів пов'язані з використанням законів небесної механіки. Зауважимо, що рух космічних апаратів описується законами небесної механіки тільки після вимикання реактивних двигунів. На пасивній ділянці траєкторії (тобто після вимикання двигунів) космічні апарати рухаються під дією притягання Землі й інших тіл Сонячної системи.

Елементи орбіти штучних супутників Землі взаємопов'язані формулою:

$$v_0^2 = gM \left(\frac{2}{r_0} - \frac{1}{a} \right),$$

де v_0 — початкова швидкість супутника; M — маса Землі; r_0 — відстань від точки виходу супутника на орбіту до центра Землі; a — більша піввісь орбіти супутника.

Ексцентриситет орбіти e під час горизонтального запуску супутника

дорівнює: $e = 1 - \frac{q}{a}$, де q — відстань перигею (найближчої точки орбіти від

254

центра Землі). У випадку еліптичної орбіти (мал. 2.45):

$$q = a(1 - e) = R + h_{\text{п}},$$

де $h_{\text{п}}$ — лінійна висота перигею над поверхнею Землі. Відстань апогею (найбільш віддаленої точки орбіти від центра Землі):

$$Q = a(1 + e) = R + h_{\text{а}},$$

де $h_{\text{а}}$ — висота апогею над землею поверхнею; R — радіус Землі.

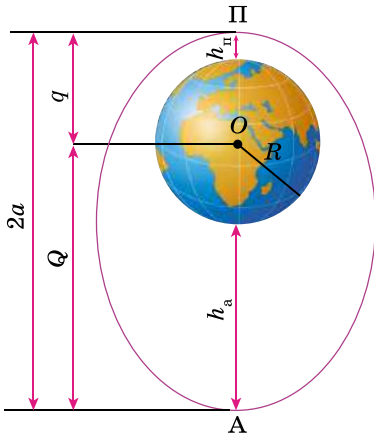
На малюнку 2.46 показано орбіти космічних апаратів без урахування збурень, тобто коли апарати залишаються поблизу Землі: 1 — колова, 2 — еліптична, 3 — параболічна, 4 — гіперболічна.

Але коли космічний апарат відійде від Землі на значну відстань, то на подальший його рух впливатиме перш за все притягання Сонця. Радіус сфери дії Землі приймають рівним 930 тис. км. На межі цієї сфери вплив Сонця й Землі на космічний апарат однаковий. Момент досягнення межі сфери дії Землі вважається моментом виходу космічного апарата на орбіту Сонця.

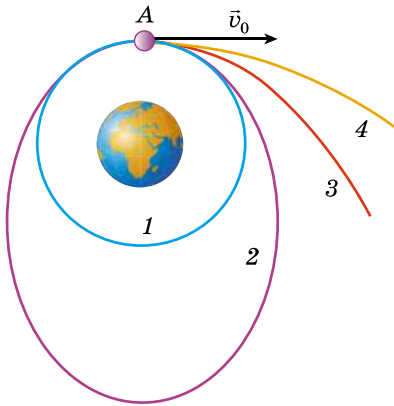
Запускаючи космічні апарати до інших планет, слід враховувати такі моменти.

1. Геоцентрична швидкість космічного

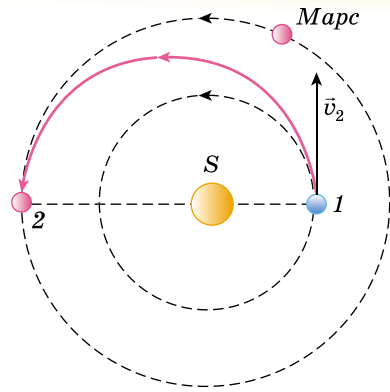
апарата при виході на орбіту відносно Землі має перевищувати другу космічну швидкість. 2. Геліоцентрична орбіта космічного апарата має перетинатися з орбітою цієї планети. 3. Момент запуску потрібно вибрати так, щоб орбіта була найоптимальнішою з погляду часу польоту, витрат палива і ряду інших вимог.



Мал. 2.45



Мал. 2.46



Мал. 2.47

Одним із класів міжпланетних траєкторій є енергетично оптимальні орбіти, які відповідають найменшій геоцентричній швидкості космічних апаратів у момент досягнення межі сфери дії Землі. На малюнку 2.47 показано таку траєкторію перельоту на Марс, побудовану на припущенні, що орбіти Землі й Марса колові. Цю орбіту назвали гоманівською, на честь німецького астронома **Вальтера Гомана** (1880–1945), який займався теорією міжпланетних польотів.

У момент запуску космічного апарата Земля перебуває в точці 1. Геліоцентрична швидкість v_2 космічного апарата має бути спрямована так само, як і геліоцентрична швидкість Землі, — по дотичній до орбіти Землі. Момент запуску слід підібрати так, щоб космічний апарат і Марс, рухаючись по своїх орбітах, досягли одночасно точки 2. Літерою S позначено Сонце. Розрахунки показують, що час польоту із Землі до Марса по зазначеній траєкторії складає 259 діб (не враховуючи порівняно короткого часу польоту до межі сфери дії Землі).

255



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке перша, друга і третя космічні швидкості?
2. По яких орбітах можуть рухатися космічні апарати? Яким геометричним лініям відповідають орбіти космічних апаратів для першої, другої і третьої космічної швидкості?
3. Чому космічні ракети не можуть пересуватися всередині Сонячної системи найкоротшими шляхами (прямолінійно)?
4. Чому вигідніше космічні ракети запускати із заходу на схід?
5. Які орбіти космічних апаратів називають гоманівськими?

§ 13. РОЗВИТОК КОСМОНАВТИКИ

Космонавтика — комплексна галузь науки й техніки, що забезпечує дослідження та використання космічного простору за допомогою автоматичних і пілотованих космічних апаратів.

У березні 1881 р. український винахідник **Микола Кибальчич** (1853–1881) спроектував реактивний літальний апарат, зокрема розробив будову порохового ракетного двигуна, запропонував керування польотом шляхом зміни кута нахилу двигуна, програмний режим горіння, забезпечення стійкості апарата тощо. Цей проект було вперше опубліковано лише в 1918 р. в журналі «Былое».

Костянтин Цюлковський (1857–1935) — один з перших висунув ідею про використання ракет для космічних польотів. Ракету для міжпланетних сполучень він спроектував у 1903 р. Учений запропонував схеми космічних кораблів, пояснив доцільність створення в навколосемному просторі проміжних станцій для польотів на інші тіла Сонячної системи.

Надзвичайно багато важливих ідей у галузі космонавтики висловив український учений **Юрій Кондратюк (1897–1941)**.

Знання про космічні швидкості дали змогу запуснути штучний супутник Землі (4 жовтня 1957 р.). Станція «Луна-2» 14 вересня 1959 р. уперше досягла поверхні Місяця. Ці польоти було здійснено на ракетах, сконструйованих під керівництвом **Сергія Корольова (1906–1966)**, який народився в м. Житомирі і навчався в Україні.

Головними завданнями космонавтики є: виведення штучного супутника на орбіту Землі, політ людини в космос, політ людини на Місяць, політ людини на інші планети, політ до зір. Перші три мети досягнуто.

Початок космічної ери було покладено запуском першого штучного супутника. Друга найважливіша дата космічної ери — 12 квітня 1961 р. У цей день **Юрій Гагарін (1934–1968)** уперше в історії людства здійснив політ у космос на космічному кораблі «Восток».

Третя історична подія космонавтики — перша місячна експедиція, яку здійснили 16–24 липня 1969 р. американські астронавти **Ніл Армстронг, Майкл Коллінз і Едвін Олдрін**.

Першим космонавтом незалежної України став **Леонід Каденюк (1951–2018)**, який піднявся на навколосемну орбіту в американському космічному кораблі. Питання про політ Каденюка в космос вирішувалося на міждержавному рівні між Україною і США. Після чого космонавт відправився на трирічну підготовку в НАСА.

Політ відбувся 19 листопада 1997 р. у складі міжнародного екіпажу на американському космічному кораблі *Columbia*. У космосі Леонід Каденюк пробув 15 днів і 16 годин. За цей час він виконав безліч біологічних дослідів.

Сьогодні польоти людини в космос стали звичним повсякденним явищем.

Сучасна теорія космічних польотів — **астродинаміка** — ґрунтується на класичній небесній механіці і теорії керування рухом літальних апаратів. Космонавтика має потребу в ретельній розробці оптимальних траєкторій космічних апаратів з урахуванням ряду умов та обмежень.

Створення ракетно-космічних комплексів — надзвичайно складна науково-технічна проблема. Ракетносії досягають стартової маси до 3000 т і мають висоту понад 100 м. Потужність реактивних двигунів вимірюється десятками мільйонів кіловат. При цьому доводиться розв'язувати надзвичайно складні завдання охолодження працюючого двигуна, забезпечувати стійкість процесу горіння, синхронність роботи двигунів тощо. Космічні апарати повинні мати здатність до тривалого самостійного функціонування в умовах космічного простору, крім того, виникає ряд додаткових медико-біологічних проблем (захист від космічного середовища, життєзабезпечення екіпажу тощо). Усе це вимагає розробки спеціальних систем. Забезпечення польоту космічних апаратів здійснюється широкою мережею наземних служб керування.

Одним із значних космічних досягнень України стало створення безлічі потужних космічних апаратів і ракетносіїв. Таких як, наприклад, супутники для дистанційного зондування землі «Січ», ракетносії «Дніпро» і «Зеніт-3SL», а також «Циклон-3». 1 серпня 1995 р. на навколосемну орбіту запустили перший український штучний науково-дослідний супутник «Січ-1». А провели запуск за допомогою ракетносія «Циклон-3».

У 2014 р. на орбіту було запущено перший наносупутник — *PolyITAN-1*. Через три роки запустили і другий такий супутник, який було створено в Київському політехнічному інституті. Станом на 2017 рік Україна запустила в космос понад 150 ракетносіїв і 375 космічних апаратів.

В Україні активно розвивається космічна галузь, виробляється безліч комплектуючих для космічного устаткування: ракетно-космічні комплекси, ракетноносії, космічні апарати, а також двигуни, агрегати і вузли до ракетноносіїв та окремі системи космічних апаратів. У 2017 р. ДП «ВО „Південмаш“ ім. О. Макарова» відновило виробництво ракетноносіїв «Зеніт».

Передбачається створення 12 ракетноносіїв, які будуть використовуватися в міжнародних програмах «Морський старт» і «Наземний старт» для досліджень космосу і використання в мирних цілях. Підприємство тісно співпрацює з іншими країнами і постачає їм комплектуючі та обладнання. Серед основних замовників — компанії із США, Кореї, Італії, Індії тощо. Ілон Маск, засновник компанії *SpaceX*, назвав «Зеніт» кращою ракетою після своїх.

Паралельно космонавтиці виникли й існують такі науки, як космічна біологія і медицина, що вивчають вплив умов невагомості та інших чинників на живі організми; космічна геофізика, що досліджує Землю і вплив на неї інших космічних тіл. У фізиці та хімії з'явилися розділи, які займаються експериментами з речовинами та процесами за межами земних умов. Кожна із цих наук робить свій внесок у вивчення космосу і отримує від цих досліджень імпульс для власного розвитку.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

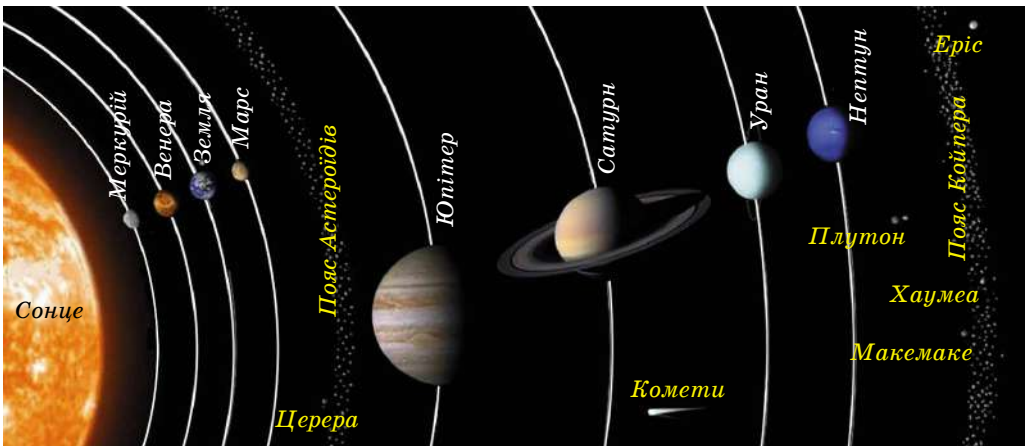
1. Хто є першовідкривачем космічного освоєння Всесвіту?
2. Які досягнення України в освоєнні космічного простору?



Створіть мультимедійну презентацію на тему «Внесок українських учених та інженерів у розвиток космонавтики».

§ 14. КОСМОГОНІЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Під Сонячною системою розуміють увесь космічний простір і всю матерію, що перебувають у сфері притягання Сонця. Сонячна система містить зорю Сонце, розташовану в центрі системи; планети із супутниками; карликові планети; малі тіла (астероїди, комети, метеоритні та метеорні тіла), а також міжпланетний пил, плазму і фізичні поля в зазначених межах (мал. 2.48). У Сонячній системі є 8 великих планет. З віддаленням



Мал. 2.48

від Сонця вони розміщені в такому порядку: Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун.

Планетою називають небесне тіло, що рухається навколо зорі в її гравітаційному полі, має подібну до сферичної форму, відбиває від зорі світло.

Виділяють планети земної групи (Меркурій, Венера, Земля, Марс) і планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун). Маса будь-яких планет, порівняно з масою Сонця, занадто малі, щоб усередині них могли відбуватися характерні для зір ядерні реакції. Навколо планет, крім Меркурія та Венери, обертаються супутники, яких на сьогодні відомо вже 185.

По геліоцентричних орбітах рухаються карликові планети, астероїди (малі планети) і метеоритні тіла. Крім того, по дуже витягнутих орбітах рухаються крижані тіла — комети.

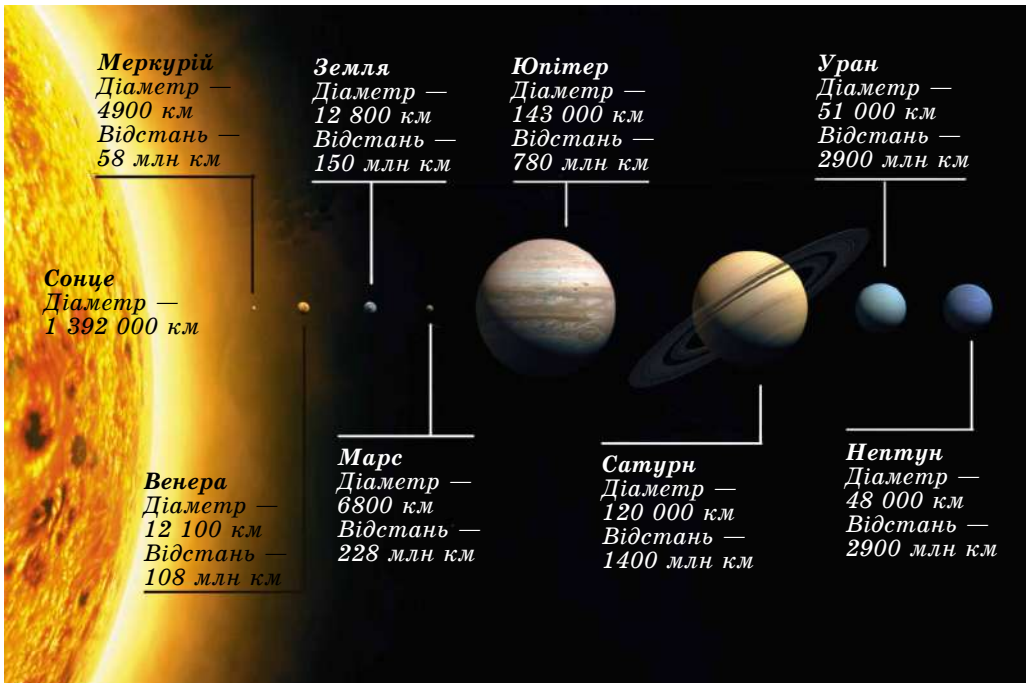
Планети та інші тіла Сонячної системи під час свого руху по орбітах зіштовхуються з метеорними тілами, міжпланетним пилом, взаємодіють з електромагнітним випромінюванням Сонця і сонячною плазмою.

Розглянемо характерні риси будови Сонячної системи за результатами астрономічних спостережень і космічних досліджень.

1. Основна маса речовини Сонячної системи зосереджена в Сонці, яке є типовою зорею. На масу всіх інших складових системи припадає 1/750 частина маси Сонця (мал. 2.49). Отже, у Сонячній системі переважає гравітаційне поле Сонця.

258 2. Орбіти планет і більшості астероїдів лежать майже в одній площині, нахиленій до площини сонячного екватора під кутом $7^{\circ}15'$. Орбіти планет майже колові, тобто їхні ексцентриситети мало відрізняються від нуля.

3. Усі планети й астероїди обертаються навколо Сонця в одному напрямку. Обертання Сонця навколо своєї осі відбувається в той самий



Мал. 2.49

бік, що й рух планет навколо Сонця. Планети обертаються навколо своїх осей у напрямку, що збігається з напрямком їхнього обертання навколо Сонця. Виняток становлять Венера й Уран, які обертаються в протилежний бік. Причому вісь обертання Урана майже лежить в площині орбіти планети. Нахил осі обертання інших планет не перевищує 60° до площин їхніх орбіт.

4. Планети поділяють на дві групи: **планети земного типу** й **планети-гіганти** (мал. 2.50). Планети земної групи — тверді тіла, порівняно невеликі та немасивні, але з великою середньою густиною, з повільним обертанням та з малою кількістю супутників або без них. Вони розташовані поблизу Сонця. Планети-гіганти — Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун — масивніші за планети земної групи, більші за розмірами, з великою швидкістю обертання та з меншою середньою густиною і численними супутниками. Планети-гіганти мають потужні атмосфери, що складаються в основному з водню й гелію.



Мал. 2.50

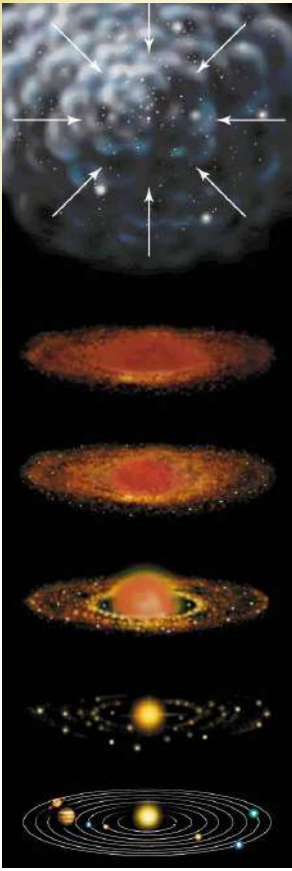
5. Момент кількості руху (mvr) між Сонцем і планетами розподіляється нерівномірно. На частину Сонця, у якому зосереджена майже вся маса Сонячної системи, припадає тільки 2 % її повної кількості руху.

6. Орбіти більшості супутників планет наближені до колових. Рух більшості супутників по орбітах відбувається в тому напрямку, у якому рухаються планети навколо Сонця. Орбіти великих супутників в основному мають малий нахил до площин екваторів своїх планет.

Ці особливості потрібно враховувати під час побудови моделі (теорії) формування всього комплексу тіл Сонячної системи мільярди років тому.

Для побудови теорії походження Сонячної системи потрібно знати вік небесних тіл. Відповідно до сучасних даних вік найдавніших порід Землі сягає 4,64 млрд років. Аналіз порід, доставлених з Місяця, відповідає віку від 2 до 4,5 млрд років. Вік залізних і кам'яних метеоритів оцінюється від 0,5 до 5 млрд років. Вік Сонця та інших окремих зір визначається на основі теорії будови й еволюції зір. Для Сонця це приблизно 5 млрд років, що збігається з віком інших тіл системи. Останнє дає змогу зробити припущення, що Сонце й планети сформувалися з єдиної хмари газу й пилу.

Уперше ідею про утворення Сонця й планет з речовини єдиної газової туманності висунув **Іммануїл Кант** (1724–1804) у 1755 р., а розвинув її **П'єр Лаплас** (1749–1827) у 1796 р. Відповідно до цієї гіпотези Сонячна система утворилася з обертової гарячої газової хмари, що стискалася



Мал. 2.51

з довколишнього простору. З дрібних частинок утворювалися дедалі більші брили, з яких із часом формувалися зародки майбутніх планет (розмірами кілька кілометрів) — планетезималі, а пізніше й самі планети. У внутрішній зоні легкі елементи (водень, гелій) під дією світлового тиску залишали центральні області диска, переміщуючись на периферію. Тому поблизу Сонця планетезималі формувалися повністю з кам'янистих мінералів і сполучень металів та зрештою перетворилися в планети земної групи. Частинки в середній холодній зоні покривалися льодом, ядра майбутніх планет-гігантів швидко росли, захоплюючи навколишній газ. У найхолоднішій зовнішній частині диска конденсуюча речовина була майже крижаною. Безліч окремих крижаних планетезималей і брил породила ядра комет і крижані астероїди. Планети земної групи майже досягли своїх розмірів приблизно через 100 млн років.

3. Наступне гравітаційне стискання підняло температуру в надрах протопланет до температури плавлення заліза. Унаслідок чого важкі компоненти стали відокремлюватися й направлятися до центра планет, а найбільш легкі речовини — підніматися до поверхні. Протягом мільярдів років йшло утворення кори — зовнішнього шару планет земної групи. Розігрівання Землі супроводжувалося виділенням газів і водяної пари. Поступово водяна пара конденсувалася й утворювала моря та океани, а гази — атмосферу. На початковому етапі первинна атмосфера істотно відрізнялася від сучасної.

під впливом гравітації та розпадалася на фрагменти (мал. 2.51). Однак ця гіпотеза не підтвердилася через безліч протиріч. Англійський учений Джеймс Джинс (1877–1946) у 1919 р. висунув гіпотезу, відповідно до якої планетна речовина була «вирвана» із Сонця під впливом зорі, що близько пролітала. Вирвана сонячна речовина розпалася на окремі частини, з яких і утворилися планети.

Дані фізико-хімічних досліджень метеоритів і земних порід підказували, що ці тіла утворилися не з газових згустків, а з твердої речовини. У 1944 р. розробкою теорії утворення планет з твердих частинок навколосонячної допланетної хмари зайнявся Отто Шмідт (1891–1956), який певний час навчався і працював у Києві, його теорія розвивається і в наш час.

Можна виокремити такі основні етапи походження та ранньої еволюції Сонячної системи.

1. Близько 4,6 млрд років тому відбувся вибух наднової зорі поблизу місця народження Сонячної системи. Ударна хвиля від вибуху поширилася в космічному просторі. Під її дією газопилова хмара, яка складалася з водню, гелію й інших різних за складом хімічних частинок — металів і рідкісних ізотопів важких елементів, стала згущатися. Таким чином у ній утворилися згущення, збагачені речовиною наднової зорі.

Споконвічне повільне обертання згущень під дією сил гравітації стало стискатися і перетворюватися в дископодібну газопилову хмару. Надалі в центрі цієї хмари утворюється молоде Сонце.

2. Поступово в диску газопилової хмари дрібні пилінки стали об'єднуватися, захоплюючи гази

Супутники планет, що рухаються в напрямку обертання планет, утворилися в результаті тих самих процесів, що й самі планети. Супутники, що рухаються у зворотному напрямку, були захоплені планетою.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під Сонячною системою?
2. Що називають планетою? Які планети входять до складу Сонячної системи?
3. Укажіть основні особливості будови Сонячної системи.
4. У чому суть гіпотез Канта, Лапласа, Джинса, Шмідта про походження Сонця і планет?
5. Назвіть основні етапи походження та ранньої еволюції Сонячної системи.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Чи видно з Місяця ті самі сузір'я, що й із Землі?

Відповідь. Відстань від Землі до Місяця надзвичайно мала порівняно з відстанню до зір, і вигляд зоряного неба не зміниться під час переміщення спостерігача із Землі на Місяць. Вигляд сузір'їв не змінюється навіть під час переміщення Землі по своїй орбіті.

2. Серп Місяця повернутий опуклістю вправо близько до горизонту. У який бік горизонту ви дивитесь?

Відповідь. У цьому випадку ви дивитесь на захід. Указане положення серпа Місяця показує, що Сонце, яке міститься правіше від Місяця, уже заховалося за горизонт у західній частині неба.

3. Після заходу Сонця на заході перебуває комета. Як відносно горизонту спрямований її хвіст?

Відповідь. Сонце перебуває на заході під горизонтом. Хвіст комети завжди спрямований від Сонця. Отже, комету видно на небі хвостом угору (голова комети ближче до горизонту).

4. Як можна довести, що дійсно зорі з неба не падають?

Відповідь. Доведенням слугують підрахунки числа зір і знання про їхню природу.



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

2.1. Спостерігач фіксує вигляд неба регулярно в той самий зоряний час і постійно бачить Сонце на горизонті. У якому місці Землі і в який зоряний час це може відбутися?

2.2. Коли Земля буває найближче до Сонця і коли найдалше? У чому причина зміни відстані Землі від Сонця?

2.3. Якби орбіта Землі була колом, то як відрізнялися б пори року від тих, які існують? Як змінилися б пори року, якщо ексцентриситет земної орбіти збільшився до 0,5?

2.4. Які зі спостережень показують, що Земля рухається під дією сили тяжіння Сонця?

2.5. Як можна відрізнити зростаючий Місяць від спадаючого?

2.6. Як можна пояснити той факт, що Місяць постійно повернений до Землі одним боком?

2.7. Як розрахувати час падіння Місяця на Землю у випадку раптового припинення його руху навколо Землі?

2.8. Чому радіус диска Місяця, освітленого попелястим світлом, здається меншим, ніж радіус світлого серпа?

2.9. Що спільного в усіх планет? У чому подібність і в чому відмінність планет земної групи від планет-гігантів?

2.10. Земні планети мають найбільш витягнуті орбіти? Орбіта якої планети найбільше схожа на коло?

2.11. Чому Юпітер сплюснутий до полюсів, а Сонце із Землі має вигляд круглого диска при тій самій газовій природі?

2.12. Марс найкраще видно із Землі під час протистояння? Які умови видимості в цей час Землі з Марса?

2.13. Земля для Марса, як Венера для Землі, є нижньою планетою. Через які інтервали часу можна бачити Землю з Марса у східній елонгації?

2.14. На яких планетах виявлено полярні шапки?

2.15. Усі планети через наявність молекул зі швидкостями, більшими ніж швидкості витікання, гублять свої атмосфери. Чому ж атмосфери існують?

2.16. Температура Венери, визначена радіометричним методом, дуже низька ($-54\text{ }^{\circ}\text{C}$). Як це узгоджується з дуже високою температурою на її поверхні і в нижніх шарах атмосфери?

2.17. Як можна пояснити, що Сатурн, який має меншу швидкість обертання навколо осі, ніж Юпітер, більше стиснений біля полюсів, ніж Юпітер?

2.18. Чи існують подвійні астероїди?

2.19. Чи бувають комети без хвостів?

2.20. Як пояснити те, що найбільше метеорів видно в передранковій години, а увечері метеорів видно менше?

2.21. За якими космічними тілами можна спостерігати тільки під час їхнього проходження через земну атмосферу?

2.22. Чому космічний корабель, що відлітає на Місяць зі штучного супутника Землі, може не мати обтічної форми?

2.23. Виберіть відповідь на запитання: які величини змінюються під час посадки космічного апарата на Місяць порівняно з їхніми значеннями на Землі? Маса астронавта; вага астронавта; сила ваги, що діє на астронавта.

2.24. Що втримує штучний супутник Землі на орбіті?

2.25. Штучний супутник Землі одного разу запустили уздовж меридіана, а іншого — уздовж екватора в бік обертання Землі. У якому випадку було витрачено менше енергії?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Де на Землі тривалість дня протягом року не змінюється?
2. Коли Марс видно на небі всю ніч?
3. Чи можна Венеру побачити в той час, коли вона перебуває найближче до Землі?
4. Чому Меркурій важко побачити на небі, хоча він буває яскравішим за Сіріус?
5. Чому спостереження в космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?
6. Сьогодні Місяць спостерігався в першій чверті. Чи буде завтра Місяць відбивати сонячне світло опівночі?
7. Венера розміщена далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
8. Які є докази того, що на поверхні Марса колись була вода в рідкому стані?
9. Які особливості планет-гігантів?
10. Чому Юпітер можна вважати дуже схожим на зорю?
11. Що спричиняє гелієві дощі на Сатурні?
12. Чим пояснюється дивовижне забарвлення Іо?
13. Про що свідчать численні кратери на супутниках Юпітера?

14. Які супутники планет мають атмосферу?
15. Чим відрізняється метеор від метеорита?
16. Хвіст комети притягується до Сонця чи відштовхується від нього?

Що я знаю і вмю робити

● Я вмю розв'язувати астрономічні задачі

1. Обчисліть, за який час світло долітає від Сонця до Землі; до Нептуна; до межі Сонячної системи. Швидкість світла вважати рівною 300 000 км/с.
2. Астероїд обертається навколо Сонця з періодом 3 роки. Чи може цей астероїд зіткнутися із Землею, якщо він в афелії; перебуває на відстані 3 а. о. від Сонця?
3. Кажуть, що деякі люди мають такий гострий зір, що навіть неозброєним оком розрізняють великі кратери на Місяці. Обчисліть достовірність цих фактів, якщо найбільші кратери на Місяці мають діаметр 200 км, а середня відстань до Місяця 380 000 км.

● Я вмю користуватися картою зоряного неба

4. Чи можна користуватися нашою картою зоряного неба на поверхні інших планет Сонячної системи? Під час міжпланетних польотів? На планетах, які обертаються навколо інших зір?

● Я вмю проводити астрономічні спостереження

5. За допомогою бінокля або шкільного телескопа можна спостерігати Галілеєві супутники Юпітера. Визначте моменти затемнення одного із цих супутників — коли він зникає за диском Юпітера.



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

263

1. На Землі спостерігається затемнення Місяця. Що побачать у цей час космонавти на Місяці?
 - А схід Сонця
 - Б кульмінацію Сонця
 - В затемнення Сонця
 - Г затемнення Місяця
 - Д захід Сонця
2. Повний Місяць перебуває на горизонті. У який час доби можна спостерігати таке явище в Україні?
 - А уранці
 - Б удень
 - В увечері
 - Г опівночі
 - Д ніколи
3. Якими із цих приладів космонавти можуть користуватися на поверхні Місяця?
 - А компасом
 - Б телескопом
 - В радіоприймачем
 - Г телевизором
 - Д барометром
4. На яких планетах земної групи у хмарах виявлено сірчану кислоту?
 - А Меркурії
 - Б Венері
 - В Землі
 - Г Марсі
5. Яка планета земної групи має найгустішу атмосферу?
 - А Меркурій
 - Б Венера
 - В Земля
 - Г Марс

6. Які планети обертаються навколо осі у зворотному напрямку?
А Венера, Юпітер
Б усі планети-гіганти
В Юпітер, Сатурн
Г Уран, Венера
7. На якій із цих планет спостерігається найбільша тривалість дня?
А Венері Б Марсі В Юпітері Г Урані Д Землі
8. Чому інколи кільця Сатурна зникають?
А випаровуються
Б ховаються за Сатурн
В закриваються іншими планетами
Г площина кільця збігається з променем зору спостерігача
Д закриваються хмарами
9. Який з великих супутників рухається навколо планети у зворотному напрямку?
А Європа Б Іо В Каллісто Г Ганімед Д Тритон
10. Який із супутників має густу азотну атмосферу з домішками метану?
А Фобос Б Європа В Титан Г Оберон Д Тритон
11. На яких супутниках виявлено постійно діючі вулкани?
А Місяці Б Деймосі В Іо Г Тритоні Д Хароні
12. Метеором називають явище, коли...
А зорі падають на Землю
Б каміння падає на Землю
В порошинки згорають у повітрі
Г блискавки спостерігаються в повітрі
Д пил викидається в атмосферу
13. Із чого складається ядро комети?
А з льоду та пилу Б із заліза В з каміння
Г з розжарених газів Д з пари води
14. З якою найменшою швидкістю метеорити влітають в атмосферу Землі?
А 1 м/с Б 1 км/с В 11,2 км/с Г 22,2 км/с Д 70 км/с Е 100 км/с

Розділ 3

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФІЗИЧНИХ І АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



В астрономії, як і в будь-якій науці, проводять наукові дослідження, щоб розкрити сутність усіх процесів і явищ, які відбуваються у Всесвіті. Для цього потрібно знати астрономічні та фізичні величини, а саме фотометричні величини, які ви вивчали у фізиці в § 36. У зв'язку з тим, що небесні тіла перебувають на значних відстанях від Землі, використовують метод визначення їхньої будови і складу за допомогою спектрального аналізу, про що ви дізналися в § 40. У цьому розділі ви ознайомитеся з іншими методами та засобами астрономічних досліджень.

265

§ 15. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕБЕСНИХ ТІЛ

У дослідженні природи небесних тіл велику увагу приділяють вивченню їхнього електромагнітного випромінювання. Небесні тіла залежно від свого фізичного стану випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини. У вакуумі електромагнітні хвилі завжди поширюються з однаковою для всіх видів випромінювання швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Дуже важливою властивістю електромагнітного випромінювання є те, що швидкість його поширення не залежить від довжини хвилі і від швидкості руху джерела. Хвилі характеризуються частотою ν і довжиною λ , між якими існує залежність: $c = \nu\lambda$. Електромагнітні хвилі, що мають різну довжину хвилі, взаємодіють з речовиною по-різному. Відповідно методи дослідження електромагнітного випромінювання відрізняються. У зв'язку із цим електромагнітне випромінювання умовно ділиться на кілька діапазонів (табл. 3.1).

Випромінювання довжиною хвилі від 390 до 760 нм людське око сприймає як світло, причому різним довжинам хвиль відповідають різні кольори (від фіолетового до червоного). Для виявлення випромінювання в інших діапазонах потрібні спеціальні прилади.

Залежно від свого фізичного стану одні небесні тіла випромінюють енергію у вузьких інтервалах частот спектра електромагнітних хвиль (наприклад, світлі газові туманності), інші — в усьому його діапазоні: від γ -променів до радіохвиль включно (наприклад, зорі). Вивчення фізичної природи небесних тіл у широкому діапазоні електромагнітного випромінювання привело до появи в науці таких розділів: γ -астрономії, рентгєвської астрономії, інфрачервоної астрономії, радіоастрономії тощо.

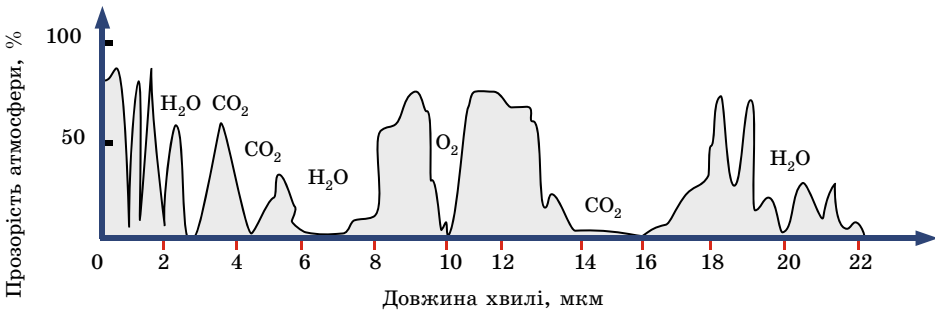
Діапазони електромагнітного випромінювання

Діапазони	Довжина хвилі, λ
Радіохвилі	Більше ніж 1 мм
Інфрачервоні промені	Від 760 нм до 1 мм
Видимі промені	Від 390 до 760 нм
Ультрафіолетові промені	Від 10 до 390 нм
Рентгенівські промені	Від 0,01 до 10 нм
Гамма-промені	Менше ніж 0,01 нм

Вивчення електромагнітних хвиль, що випромінюють небесні тіла, ускладнюється тим, що атмосфера Землі пропускає випромінювання лише в певних діапазонах довжин хвиль: від 300 до 1000 нм, від 1 см до 20 м і в кілька «вікон» інфрачервоного діапазону. Випромінювання, що доходить до поверхні Землі, досліджують за допомогою оптичних телескопів (видиме світло) і радіотелескопів.

Коли пропускна здатність дорівнює нулю, то це означає, що електромагнітне випромінювання з такою довжиною електромагнітної хвилі не сягає поверхні Землі, тобто цілком поглинається атмосферою. Кисень, озон, вуглекислий газ і водяна пара — чотири компоненти атмосфери, які головним чином спричиняють поглинання випромінювання. Поглинання залежить від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. На малюнку 3.1 представлено криву прозорості атмосфери в діапазоні $\lambda = 0-22$ мкм, з якої видно, що майже половина спектрального діапазону виявляється абсолютно непридатною для дослідження, оскільки відповідне випромінювання не може пройти через атмосферу.

266



Мал. 3.1

Сильніше атмосфера поглинає короткохвильову частину діапазону електромагнітного випромінювання: ультрафіолетові, рентгенівські та γ -промені. Спостереження в цих діапазонах можливі тільки за допомогою приладів, піднятих на велику висоту (на літаках або зондах) або встановлених на космічних станціях-лабораторіях, комплексах, штучних супутниках Землі, орбітальних обсерваторіях.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під пропускнуою здатністю атмосфери Землі?
2. Які види електромагнітних хвиль випромінюють небесні тіла? На які діапазони ділиться весь спектр електромагнітного випромінювання?
3. Як земна атмосфера впливає на проходження різних видів випромінювання до поверхні Землі?
4. Чому з поверхні Землі не можливо вивчати небесні об'єкти в усіх діапазонах електромагнітного випромінювання?



РОБОТА У ГРУПАХ

Запропонуйте власні методи дослідження електромагнітного випромінювання небесних тіл.

§ 16. ПРИНЦИП ДІЇ І БУДОВА ОПТИЧНОГО ТА РАДІОТЕЛЕСКОПА, ДЕТЕКТОРІВ НЕЙТРИНО ТА ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ. СУЧАСНІ НАЗЕМНІ ТЕЛЕСКОПИ

Як ви вже знаєте, основним способом дослідження небесних об'єктів і явищ є астрономічні спостереження. **Астрономічні спостереження** — це цілеспрямована й активна реєстрація інформації про процеси та явища, що відбуваються у Всесвіті. Такі спостереження є основним джерелом знань на емпіричному рівні.

Протягом тисячоліть астрономи вивчали положення небесних об'єктів на зоряному небі та їхнє взаємне переміщення із часом. Точні вимірювання положень зір, планет й інших небесних тіл дають матеріал для визначення відстаней до них та їхніх розмірів, а також для вивчення законів їхнього руху. Результатами кутомірних вимірювань користуються в практичній астрономії, небесній механіці, зоряній астрономії.

Для проведення астрономічних спостережень та їхньої обробки в багатьох країнах створено спеціальні науково-дослідні установи — **астрономічні обсерваторії**.

Астрономічна обсерваторія (від грец. *αστρον* — «зоря», лат. *observo* — «спостерігаю») — науково-дослідна установа, у якій проводять спостереження небесних світил, вивчають їх.

Астрономічні обсерваторії виникли в час зародження астрономії. Їхні залишки знайдено в Європі, Азії, Південній Америці, зокрема Стоунхендж в Англії. Першу державну обсерваторію (тобто таку, що фінансувалася державою) було засновано 1671 р. в Парижі.

Сучасні астрономічні обсерваторії, як правило, спеціалізуються в якійсь певній галузі астрономії. Існують астрометричні, астрофізичні, сонячні обсерваторії тощо. З початком космічної ери стали розрізняти наземні й космічні обсерваторії.

Для виконання астрономічних спостережень й обробки отриманих даних у сучасних обсерваторіях використовують спостережні інструменти (телескопи), світлоприймальну апаратуру, допоміжні прилади для спостережень, електронно-обчислювальну техніку тощо.

Вивчати далекі недосяжні небесні об'єкти можна одним способом — зібравши й проаналізувавши їхнє випромінювання. Для цієї мети і слугують телескопи. При всьому своєму різноманітті телескопи, що приймають електромагнітне випромінювання, розв'язують два основні завдання: 1) зібрати від досліджуваного об'єкта якнайбільше енергії випромінювання певного діапазону електромагнітних хвиль; 2) створити по можливості найчіткіше зображення об'єкта, щоб можна було виділити випромінювання від окремих його точок, а також виміряти кутові відстані між ними.

Залежно від конструктивних особливостей оптичних схем телескопи ділять на: лінзові системи — рефрактори; дзеркальні системи — рефлектори; змішані дзеркально-лінзові системи, до яких належать телескопи **Бернхарда Шмідта (1879–1935), Дмитра Макутова (1896–1964)** та ін.

Телескоп-рефрактор в основному використовують для візуальних спостережень (мал. 3.2). Він має об'єктив та окуляр. Телескоп-рефрактор, сполучений з фотокамерою, називають **астрографом**, або **астрономічною**

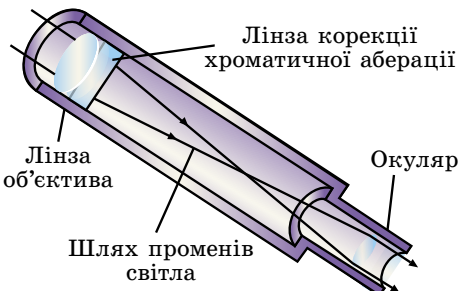
камерою. Астрограф є великим фотоапаратом, у фокальній площині якого встановлено касету з фотопластинкою. Діаметр об'єктивів рефракторів обмежений складністю створювати великі однорідні блоки оптичного скла, їхньою деформацією та світлопоглинанням. Найбільший діаметр об'єктива телескопа-рефрактора, створеного в наш час, — 102 см (Єрксська обсерваторія, США). Недоліками такого типу телескопів вважають велику довжину й спотворення зображення. Для усунення оптичних спотворень використовують багатолінзові об'єктиви з просвітленою оптикою.

Телескоп-рефлектор має дзеркальний об'єктив. У найпростішому рефлекторі об'єктив — це одиночне, зазвичай параболічне дзеркало; зображення отримують у його головному фокусі.

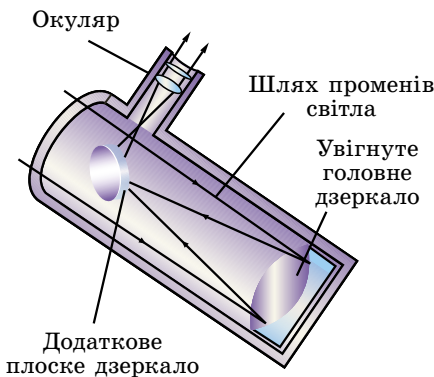
Порівняно з рефракторами сучасні телескопи-рефлектори мають набагато більші об'єктиви. У рефлекторах з діаметром дзеркала понад 2,5 м у головному фокусі іноді встановлюють кабінку для спостерігача. Зі збільшенням розмірів дзеркала в таких телескопах доводиться застосовувати спеціальні системи розвантаження дзеркал, що виключають їхні деформації через власну масу, а також уживати заходів для запобігання їхнім температурним деформаціям.

Створення великих рефлекторів (з діаметром дзеркала 4–6 м) пов'язано з великими технічними труднощами. Тому розробляють конструкції зі складеними з мозаїки дзеркалами, окремі елементи яких вимагають точного налаштування за допомогою спеціальної апаратури, або конструкції, що містять кілька паралельних телескопів, які зводять зображення в одну точку.

У невеликих і середніх за розмірами рефлекторах для зручності спостереження світло відбивається додатковим плоским (вторинним) дзеркалом



Мал. 3.2



Мал. 3.3

до стінки труби, де міститься окуляр (мал. 3.3). Рефлектори використовують переважно для фотографування неба, фотоелектричних і спектральних досліджень.

У дзеркально-лінзових телескопах зображення отримують за допомогою складного об'єктива, що містить дзеркала і лінзи. Це дає змогу значно знизити оптичні спотворення телескопа порівняно з дзеркальними або лінзовими системами.

У телескопах системи Шмідта (Естонія) оптичні спотворення головного сферичного дзеркала усуваються за допомогою спеціальної корекційної пластинки складного профілю, встановленої перед ним. У телескопах системи Максутова (Україна) спотворення головного сферичного або еліптичного дзеркал виправляються меніском, встановленим перед дзеркалом (мал. 3.4).

Меніск — це лінза з мало відмінними радіусами кривизни поверхні. Така лінза майже не впливає на загальний хід променів, але помітно виправляє спотворення оптичного зображення.

Основними оптичними параметрами телескопа є: видиме збільшення, роздільна здатність і проникаюча сила.

Видиме збільшення (G) оптичної системи — це відношення кута, під яким спостерігається зображення, що дає оптична система приладу, до кутового розміру об'єкта під час спостереження його безпосередньо оком. Видиме збільшення телескопа можна розрахувати за формулою:

$$G = \frac{F_{об}}{F_{ок}}$$

де $F_{об}$ й $F_{ок}$ — фокусні відстані об'єктива і окуляра.

Для отримання значного збільшення об'єктиви в телескопах мають бути довгофокусними (фокусна відстань кілька метрів), а окуляри — короткофокусними (від кількох сантиметрів до 6 мм). Неспокійна атмосфера Землі породжує тремтіння та спотворення зображення, розмиває його деталі. Тому навіть на великих телескопах рідко встановлюють збільшення в понад 500 разів.

Під **роздільною здатністю** (ψ) оптичного телескопа розуміють найменшу кутову відстань між двома зорями, які можна спостерігати в телескоп роздільно. Теоретично роздільна здатність (у секундах дуги) візуального телескопа для жовто-зелених променів, до яких найбільш чутливе око людини, може бути визначена за допомогою формули:

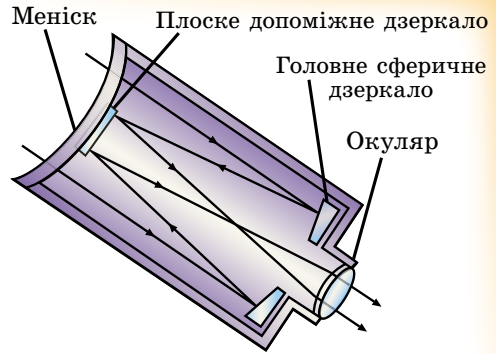
$$\psi = \frac{140'}{D},$$

де D — діаметр об'єктива телескопа в міліметрах. На практиці через постійні переміщення повітряних мас роздільна здатність телескопів знижується. Унаслідок чого наземні телескопи забезпечують роздільну здатність близько $1''$, і тільки іноді за досить сприятливих атмосферних умов вдається досягти роздільної здатності десятих часток секунди.

Також важливою характеристикою телескопа є **проникаюча сила** (m), що виражається граничною зоряною величиною світила, доступного спостереженню за допомогою цього телескопа за ідеальних атмосферних умов. Для телескопів з діаметром об'єктива D (мм) проникаюча сила m , виражена в зоряних величинах під час візуальних спостережень, визначається за формулою: $m = 2,0 + 51gD$.

З 1995 р. працюють два однакових 10-метрових телескопи «Кек-1» і «Кек-2» в обсерваторії Мауна-Кеа. Кожне дзеркало телескопа складається із 36 сегментів. За якість зображення телескопів відповідає адаптивна оптика, що керує кожним сегментом дзеркала. За роздільною здатністю такий телескоп наближається до космічного. Обсерваторія розміщена на висоті 4250 м над Тихим океаном на Гавайських островах.

Значні можливості має телескоп *VLT* (англ. *Very Large Telescope* — Дуже Великий Телескоп), що належить європейським країнам і який встановлено на горі Параналь (висота 2635 м) на півночі Чилі (мал. 3.5).



Мал. 3.4



Мал. 3.5

Він складається із чотирьох телескопів, кожен з яких має діаметр 8,2 м. Крайні телескопи розміщено один від одного на відстань 200 м, що дає змогу всьому комплексу працювати в режимі **оптичного інтерферометра**. Це означає, що якщо телескопи спрямовані на ту саму зорю, то зібране ними випромінювання сумується, а роздільна здатність телескопів, що спільно працюють, еквівалентна застосуванню дзеркала діаметром 200 м.

У світі телескопів з діаметром дзеркала понад 6 м близько двадцяти.

Вивченням космічних радіоджерел випромінювання займається радіоастрономія. Вона зародилася в 1931 р., коли випадково було виявлено радіовипромінювання Чумацького Шляху. Через 15 років у сузір'ї Лебеда знайшли перше точкове джерело радіохвиль — слабку галактику, яку із часом вдалося розглянути в оптичному діапазоні.

Радіовипромінювання більшості небесних об'єктів, що надходить до Землі, надзвичайно слабке. Для виявлення і прийому космічного радіовипромінювання використовують **радіотелескопи**.

Радіотелескопи складаються з антенного пристрою і чутливої прийомної системи. Приймочна система (радіометр) підсилює прийняте антеною радіовипромінювання та перетворює його в зручну для подальшої обробки форму. Основне призначення антенного пристрою — зібрати максимальну кількість енергії, принесеної радіохвилями від об'єкта. За антену використовують суцільне металеве або сітчасте дзеркало, що має форму параболоїда. Антена радіотелескопа відрізняється від звичайних антен радіозв'язку високою спрямованістю, тобто здатністю виділяти радіовипромінювання в невелику ділянку неба. У фокусі параболоїда розміщено опромінювач — пристрій, що збирає радіовипромінювання, спрямоване на нього дзеркалом. Опромінювач передає прийняту енергію на прийомний пристрій, де сигнал підсилюється, детектується і реєструється.

Потужність радіосигналу, що надходить на вхід приймача, прямо пропорційна площі антени. Тому антена більшого розміру з тим самим приймачем дає кращу чутливість, тобто дає змогу виявити слабкі джерела з малою потужністю випромінювання. Антени найбільших радіотелескопів сягають сотень метрів. Великий радіотелескоп з поворотним металевим рефлектором діаметром 100 м розміщено недалеко від м. Бонн (Німеччина). Нерухома антена в Аресібо (Пуерто-Рико), розміщена в кратері згаслого вулкана, має діаметр 305 м (мал. 3.6). Для того щоб змінити напрямок прийому випромінювання, у цьому радіотелескопі роблять перестановку опромінювача.

Радіотелескопи можуть бути побудовані з окремих дзеркал, кожне з яких фокусує прийняте випромінювання на один опромінювач. Якщо радіовипромінювання джерела одночасно сприймається двома і більше антенами, розміщеними на деякій відстані одна від одної, а потім ці сигнали сумуються, то внаслідок інтерференції радіосигналів роздільна здатність телескопів значно збільшується. Такий інструмент називають **радіоінтерферометром**. Радіоінтерферометри з наддовгою базою поєднують радіотелескопи, рознесені на тисячі кілометрів. З їхньою допомогою вдалося одержати кутову роздільну здатність близько $0,0001''$.

Прикладом є Дуже Великий Масив (англ. *Very Large Array, VLA*) — радіотелескоп-інтерферометр, Нью-Мексико, США (мал. 3.7).

Радіохвилі вільно проходять крізь величезні міжзор'яні газопилові хмари й атмосферу Землі. Тому методи радіоастрономії дуже важливі для вивчення, наприклад, центральних районів Чумацького Шляху



Мал. 3.6

та інших галактик, тому що оптичні хвилі від них повністю поглинаються.

У Харкові розміщено найбільший у світі радіотелескоп декаметрових хвиль УТР-2 Радіоастрономічного інституту НАН України. Астрономи, які працюють на УТР-2, перші у світі виявили в міжзоряному середовищі спектральні лінії вуглецю (головні «цеглинки», необхідні для появи органічного життя), каталогізували джерела випромінювань у далекому космосі, розробили теорію гравітаційних лінз, згідно з якою світло від далеких зір і галактик викривляється, вивчили механізми радіовипромінювання Сонця і Юпітера.



Мал. 3.7

Як відомо, у надрах зір, де відбувається синтез гелію, реакції супроводжуються перетворенням протонів в нейтрони з випромінюванням нейтрино. Нейтрино вільно пронизують усю товщу зорі і виходять у міжзоряний простір.

Спроби вловити нейтрино розпочав **Раймонд Девіс (1914–2006)** (США) у 1955 р. У 1967 р. у штаті Південна Дакота в закинутій шахті на глибині 1455 м змонтували установку — горизонтальний циліндричний бак завдовжки близько 14,4 м і діаметром 6 м, що містить 400 000 л (615 т) чотирихлористого вуглецю C_2Cl_4 . У цій сполуці кожен четвертий атом Хлору є ізотопом ^{37}Cl . Порядком спостережень на цьому «телескопі» такий: після кожних 100 днів роботи через бак пропускають 20 000 л газоподібного гелію, що здатний захопити із собою ізотопи Аргону ^{37}Ar , які утворилися в баці. Їх, за обчисленнями, у кожний момент часу має бути кілька десятків. Суміш газів (гелій з поодинокими атомами Аргону) пропускають через вугільні фільтри, охолоджені до 77 К. Результати вимірювань такі: у баці за кожні 2,3 доби утворюється один атом ізотопу ^{37}Ar .

Інший варіант **нейтринного «телескопа»** — галієвий або літєвий детектор. Труднощі полягають у тому, що для отримання надійних результатів детектор повинен містити десятки тонн галію або літію, тоді як видобувається цих металів у світі дуже мало. Детектори на галії працюють, наприклад, в італійських Альпах під горою Монблан та в надрах гори Андирчі поблизу Ельбруса (Північний Кавказ).

Існують так звані **водяні детектори нейтрино**, у яких використовують звичайну воду H_2O або важку воду D_2O (кожний атом Гідрогену тут містить, окрім протона, додатковий нейтрон). Принцип роботи водяних детекторів такий. Нейтрино, проходячи крізь товщу звичайної води, збуджує електрони в молекулах H_2O або реагує з нейтроном молекули D_2O з утворенням протона й електрона. Надлишок енергії швидко висвічується (відомий з фізики ефект *черенковського випромінювання*). Реєстрація цього випромінювання дає змогу не тільки підрахувати кількість нейтрино, які взаємодіють з речовиною детектора за одиницю часу, а ще й вказати напрямок руху нейтрино, а отже, встановити напрямок на джерело цього випромінювання.

У 1916 р. було з'ясовано, що в природі можуть існувати слабкі збурення поля тяжіння, які, як і електромагнітні хвилі, є поперечними і також поширюються зі швидкістю поширення світла. Під дією гравітаційної хвилі розподіл пробних зарядів (тобто пробних масових частинок) періодично зазнає певної деформації, яка залежить від енергії хвилі.

Найпростішим **детектором гравітаційних хвиль** можуть бути дві кулі, з'єднані пружиною. Якщо на них перпендикулярно до осі, що з'єднує центри куль, падає гравітаційна хвиля, то відстань між кулями буде позмінно збільшуватися і зменшуватися.

Джерелом гравітаційних хвиль є будь-який асиметричний рух речовини. Це може бути зоря, якщо вона здійснює так звані квадрупольні пульсації, тобто стискається і розтягується уздовж осі її обертання. Джерелами гравітаційних хвиль є подвійні зорі, а також зоря, яка зазнає різкого стиску — колапсу, якщо лише внаслідок дії певних причин (обертання, дія магнітних сил) цей колапс не є сферично-симетричним.

З 1958 р. **Джозеф Вебер (1919–2000)** (США) пробував зареєструвати гравітаційні хвилі. Його детектор — алюмінієвий циліндр завдовжки 1,54 м, діаметром 0,6 м і масою 1,5 т, підвішений на спеціальній тонкій нитці в рамі зі сталевих блоків і поміщений у вакуумну камеру, оточену чутливими акустичними фільтрами. Розтяг і стиск циліндра під дією гравітаційної хвилі датчики можуть реєструвати з надзвичайною точністю.

Щоб уникнути похибок, пов'язаних, наприклад, з коливанням земної кори або електричним розрядом в атмосфері, Вебер встановив два аналогічні детектори на відстані 1000 км. Система реєструє лише ті сигнали, початки яких збігаються з точністю до 0,2 с. Ці детектори і справді впродовж багатьох місяців реєстрували в середньому один імпульс на кожні п'ять діб. Однак дотепер жодна інша лабораторія цього не підтвердила, і питання про природу сигналів, які зареєстрував Вебер, залишається нез'ясованим.

Нині розроблено твердотільні гравітаційні антени другого покоління, у яких п'ятитонні алюмінієві циліндри охолоджуються до 2 К, а датчики яких здатні реєструвати амплітуди коливань до $2 \cdot 10^{-17}$ см. У США введено в дію велику лазерно-інтерференційну гравітаційно-хвильову обсерваторію ЛІГО, один інтерферометр якої з базою 4 км встановлено у штаті Луїзіана, другий — з такою самою базою — у штаті Вашингтон. Інструменти об'єднано за допомогою комп'ютерної мережі. Є плани будівництва великих інтерферометрів для цієї самої мети і в інших країнах, а також встановлення супутникових гравітаційних антен, у яких база досягала б сотень мільйонів кілометрів.

11 лютого 2016 року було оголошено про експериментальне відкриття гравітаційних хвиль, існування яких передбачив ще Альберт Ейнштейн.

Гравітаційна хвиля — це поширення змінного гравітаційного поля у просторі. Вважають, що вивчення гравітаційних хвиль допоможе пролити світло на історію Всесвіту і не тільки.

272



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Які основні завдання розв'язують в астрономії за допомогою телескопів?
2. Як можна визначити видиме збільшення оптичної системи телескопа?
3. Що розуміють під роздільною здатністю телескопа? Проникаючою силою?
4. Чим відрізняються оптичні системи рефрактора, рефлектора й дзеркально-лінзових (камера Шмідта) телескопів?
5. Чим відрізняються: оптичні телескопи від радіотелескопів; радіоінтерферометр від радіотелескопа?



Дослідіть, які астрономічні обсерваторії працювали і працюють на території України.

§ 17. ПРИЙМАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ВСЕСВІТУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Випромінювання, яке зібрав об'єктив телескопа, реєструється та аналізується приймачем випромінювання. Протягом перших двох з половиною століть з початку телескопічної ери єдиним приймачем випромінювання

слугувало людське око. Однак це не тільки не дуже чутливий, але й досить суб'єктивний приймач випромінювання.

Із середини XIX ст. в астрономії стали широко застосовуватися фотографічні методи. Фотографічний матеріал (фотопластинки, фотоплівки) мають багато переваг порівняно з людським оком. Фотоемальсія здатна накопичувати енергію, яка падає на неї, тобто, збільшуючи витримку на негативі, можна зібрати більше світла.

Фотографія дає змогу документувати події, тому що негативи можуть зберігатися протягом тривалого часу. Фотопластинки мають панорамність, тобто можуть одночасно й точно фіксувати безліч об'єктів.

Найбільші сучасні телескопи управляються комп'ютерами (та іншою електронною технікою), а отримані зображення космічних об'єктів фіксуються у формі, що обробляється комп'ютерними програмами. Фотографія майже вийшла з використання. В останні десятиліття широко застосовують **фотоелектричні приймачі випромінювання**, відомості від яких передаються безпосередньо на електронний обчислювальний пристрій – комп'ютер. До таких приладів належать ПЗЗ-матриці (прилади із зарядовим зв'язком). ПЗЗ-матриця — це інтегральна схема, розміщена на напівпровідниковому матеріалі, що перетворює світлову енергію випромінювання в енергію електричного струму. Сила струму пропорційна інтенсивності світлового потоку.

Комп'ютерна обробка зображення дає змогу позбутися перешкод і фону, створених розсіюванням світла в атмосфері Землі та турбулентністю її атмосфери.

Ще недавно позаатмосферна астрономія була мрією багатьох учених-астрономів. Тепер вона перетворилася у розвинену галузь науки. Результати, отримані на космічних телескопах, без перебільшення повернули багато наших уявлень про Всесвіт.

Величезний обсяг інформації про космос цілком залишається за межами земної атмосфери. Більша частина інфрачервоного й ультрафіолетового діапазону, а також рентгенівські й γ -промені космічного походження недоступні для спостережень з поверхні Землі. Для того щоб вивчати Всесвіт у цих променах, потрібно винести прилади для спостережень у відкритий космос.

Для успішної роботи космічної обсерваторії потрібні спільні зусилля різних фахівців. Космічні інженери готують телескопи до запуску, виводять їх на орбіту, стежать за забезпеченням енергією всіх приладів та їхнім нормальним функціонуванням. Кожен об'єкт може спостерігатися протягом кількох годин, тому особливо важливо втримувати орієнтацію супутника, що обертається навколо Землі, у тому самому напрямку, щоб вісь телескопа залишалася націленою строго на об'єкт.

Астрономи збирають заявки на проведення спостережень, відбирають з них найважливіші, готують програму спостережень, стежать за одержанням і обробкою результатів. Дані, отримані космічними телескопами, протягом деякого часу доступні лише авторам програми спостережень. Потім вони надходять у комп'ютерні мережі, і будь-який астроном може використовувати їх для своїх досліджень.

У 1946 р. американський астрофізик **Лайман Спітцер (1914–1997)** опублікував статтю «Астрономічні переваги позаземної обсерваторії». Учений зауважив дві головні переваги позаземного телескопа: 1) його кутова роздільна здатність буде обмежена лише дифракцією, а не турбулентними потоками в атмосфері; 2) космічний телескоп міг би вести спостереження в інфрачервоному, ультрафіолетовому, рентгенівському та гамма-діапазонах, у яких випромінювання поглинається земною атмосферою.

7 жовтня 1959 р. радянська автоматична міжпланетна станція «Луна-3», облетівши Місяць, уперше сфотографувала його зворотну півкулю.

У 1962 р. Велика Британія запустила орбітальний телескоп «Аріель» для дослідження Сонця. У 1966 р. НАСА запустила в космос першу орбітальну обсерваторію ОАО-1. Місія не мала успіху, бо акумулятори за 3 дні після старту вийшли з ладу. У 1968 р. було запущено ОАО-2, яка проводила спостереження ультрафіолетового випромінювання зір і галактик аж до 1972 р., значно перевищивши розрахований термін експлуатації.

У 1967 р. американська космічна обсерваторія ОСО-3 виявила γ -випромінювання нашої Галактики, а в 1975–1982 рр. європейський супутник СОС-В склав першу γ -променеву карту Чумацького Шляху. Протягом 70–80 рр. ХХ ст. на навколосеземній орбіті працювало кілька десятків штучних супутників Землі та орбітальних космічних станцій, що використовувались для проведення астрономічних досліджень у різних спектральних діапазонах.

Місії ОАО та ОСО продемонстрували можливості орбітальних телескопів. Тому НАСА в 70–90 рр. ХХ ст. спроектувала та побудувала чотири великі космічні обсерваторії, кожна з яких досліджувала Всесвіт у певній частині спектра.

Вивчення інфрачервоного випромінювання в астрономії почалося з того, що за допомогою орбітального телескопа провели точні вимірювання температури поверхні й атмосфери планет Сонячної системи. Так в атмосферах Марса, Венери та Юпітера було виявлено вуглекислий газ. Інфрачервоні спостереження планет-гігантів дали змогу дізнатися про структуру їхніх атмосфер і виявити лід на супутниках.

Сенсаційним відкриттям інфрачервоної астрономії стала вода, виявлена в космосі у великій кількості. Вона присутня в газопилових туманностях, кометах і на малих планетах.

Першу інфрачервону обсерваторію було запущено в січні 1983 р. у рамках спільного американсько-європейського проекту *IRAS*. До складу комплексу *IRAS* входив телескоп-рефлектор з діаметром дзеркала 57 см (мал. 3.8).

Другою великою космічною обсерваторією стала γ -обсерваторія ім. Комптона, яку названо на честь нобелівського лауреата з фізики **Артура Комптона** (1892–1962). Запустили її 5 квітня 1991 р. на борту космічного човна «Атлантіс». За її допомогою вперше проводився огляд усього неба в γ -променях, а також спостереження Сонця, квазарів, пульсарів, наднових зір, чорних дір. За десять років роботи обсерваторія виявила понад 400 джерел космічного γ -випромінювання, у 10 разів більше ніж було відомо до цього запуску. Вона також зареєструвала понад 2,5 тис. γ -спалахів, тоді як раніше було зафіксовано близько 300.

Третю велику космічну обсерваторію для дослідження Всесвіту в рентгенівському діапазоні було виведено на орбіту в 1999 р. Інформація, отримана цією орбітальною обсерваторією, свідчить, що у Всесвіті існує не менше як 300 млн чорних дір. «Чандра» — космічна рентгенівська обсерваторія НАСА (мал. 3.9) уперше зафіксувала процес руйнування звичайної зорі, яка дуже близько підійшла до чорної діри. А в 2004 р. уперше було зареєстровано потужні рентгенівські джерела, які можуть бути чорними дірами нового типу з масою кілька сотень мас Сонця.

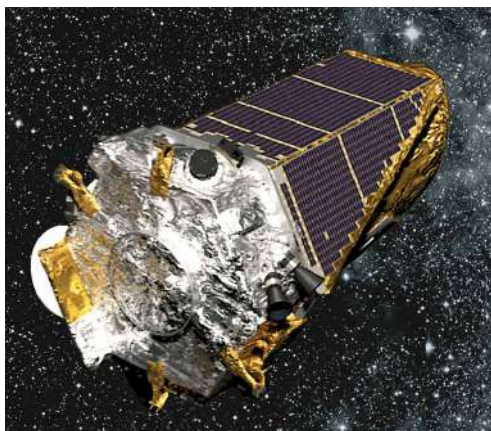
У 2009 р. з космодрому на мисі Канаверал у штаті Флорида було запущено **орбітальний телескоп «Кеплер»** — космічний телескоп НАСА, призначений для пошуків екзопланет (мал. 3.10). На момент запуску астрономи виявили близько 350 екзопланет, а станом на 20 січня 2015 р. встановлено існування 1900 екзопланет у 1202 планетних системах, у 480 з яких більше ніж одна планета. Екзопланетний архів НАСА визнає відкритими 1795 позасонцевих планет. Кількість «кандидатів» на отримання цього статусу більша: за проектом «Кеплер», нині є 4175 небесних тіл, що є потенційними екзопланетами, але для офіційного підтвердження їхнього статусу потрібна повторна реєстрація наземними телескопами.



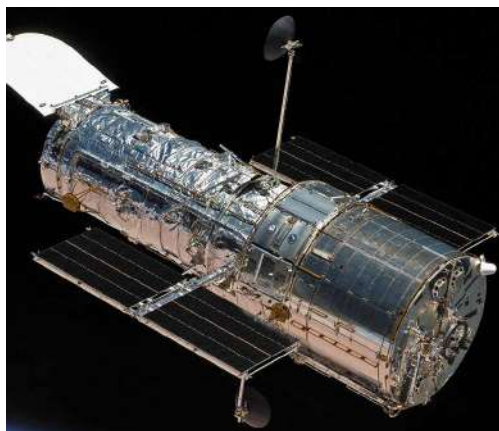
Мал. 3.8



Мал. 3.9



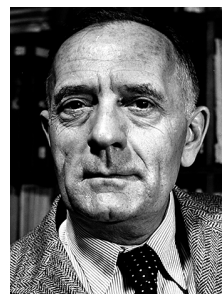
Мал. 3.10



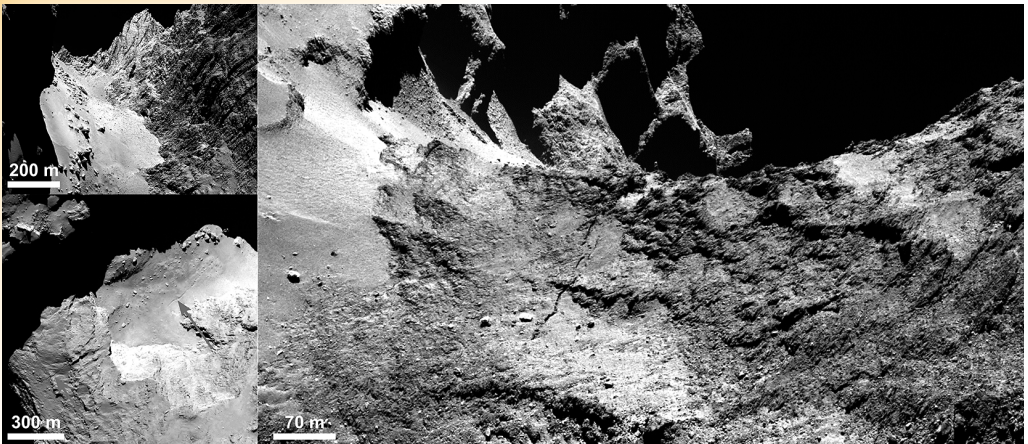
Мал. 3.11

Оптика космічного телескопа (мал. 3.11) Едвіна Габбла (1889–1953) наближається до ідеальної оптичної системи. Поза атмосферою дзеркало цього телескопа діаметром 2,4 м дає змогу досягти роздільної здатності 0,06''.

Космічний апарат «Розетта» стартував 2 березня 2004 р. з космодрому Куру (Французька Гвіана) у напрямку до ядра комети Чурюмова–Герасименко, яка є короткоперіодичною, має період обертання приблизно 6 років і 7 місяців. З моменту відкриття комети (її відкрили українські науковці Клим Іванович Чурюмов та Світлана Іванівна Герасименко) вона вже поверталася до Землі 7 разів. Перед її сьомою появою поблизу Сонця до комети відправлено космічний апарат «Розетта», що досяг її ядра в 2014 р. І разом з ним комета пройшла перигелій у 2016 р. восьмий раз. Учені одержали перші знімки, зроблені спусковим модулем «Філі» європейського зонда «Розетта», який здійснив посадку на поверхню ядра комети. Європейське космічне агентство оприлюднило фото, зроблене «Розеттою», комети Чурюмова–Герасименко (мал. 3.12).



Едвін Габбл



Мал. 3.12

За результатами космічної місії встановлено, що комета складається з двох частин. Вважається, що раніше вони були двома різними небесними тілами, а потім зіткнулися, утворивши одне. Дослідники розділили поверхню комети на 19 районів, які назвали на честь стародавніх єгипетських божеств. Також учені підтвердили наявність водяного льоду на поверхні комети. Його було виявлено під зовнішньою оболонкою комети і в деяких регіонах на її поверхні. Разом з тим аналіз поверхні комети вказує на те, що вона складається з темної сухої речовини з невеликою домішкою водяного льоду.

276



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під позаатмосферною астрономією?
2. Які орбітальні обсерваторії ви знаєте?
3. Що ви знаєте про космічну місію «Розетта»?



Дослідіть через мережу Інтернет, які наукові дослідження проводять найбільші у світі астрономічні обсерваторії.



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Поясніть, чому зоря, що для неозброєного ока виглядає як одна, під час спостереження в телескоп може розділитися на дві близько розташовані зорі, тобто виявитися подвійною зоряною системою.

Відповідь. Роздільна сила людського ока становить приблизно $1'$. Роздільна сила телескопа пропорційна діаметру об'єктива, а діаметр об'єктива телескопа набагато більший за діаметр зіниці.

2. З якою кутовою швидкістю має рухатися небесне світило, щоб завжди перебувати в полі зору нерухомо встановленого телескопа, спрямованого в точку небесної сфери, що лежить на небесному екваторі?

Відповідь. Рух має відбуватися зі швидкістю обертання небесної сфери на екваторі, тобто $\omega = 2\pi : T = 6,28 : 86400 = 7,2 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

3. Яке збільшення слід застосувати в шкільному телескопі, для того щоб Марс під час протистояння мав в окулярі телескопа такий самий кутовий діаметр, як Місяць для неозброєного ока? Кутовий діаметр Марса $20''$.

Відповідь. Місяць має кутовий діаметр $30' = 1800''$. Збільшення телескопа має бути у $\frac{1800}{20} = 90$ разів.

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ**

3.1. Поясніть, у чому полягають фундаментальні відмінності між телескопом-рефлектором і телескопом-рефрактором.

3.2. Назвіть дві основні частини телескопа і поясніть їхнє призначення.

3.3. Чому під час спостережень із Землі нам здається, що протягом ночі зорі переміщуються по небесній сфері?

3.4. Що б ви порадили астрономам, які хочуть вивчати Всесвіт, використовуючи γ -промені, рентгенівські промені й ультрафіолетове випромінювання?

3.5. Перелічіть переваги радіотелескопів.

3.6. Припустимо, ми розглядаємо в телескоп Сонце або Місяць. Який вигляд матиме те, що ми будемо бачити їхні обернені зображення? У який бік будуть рухатися ці світила в полі зору телескопа?

3.7. Чому в телескоп видно більше зір, ніж неозброєним оком? Чому яскравість зір, видимих неозброєним оком, під час розглядання їх у телескоп помітно збільшується?

3.8. Чому, спостерігаючи в один і той самий телескоп різні планети і Місяць, помічаєте, що зі збільшенням їхня яскравість дедалі більше слабшає?

3.9. Чому приміщення, де розміщено телескопи, не опалюються?

3.10. На якій відстані ми спостерігатимемо Місяць у вигляді світлої точки, тобто під кутом $1'$? Діаметр Місяця — 3473,4 км.

3.11. На якій відстані ми спостерігатимемо Сонце у вигляді світлої точки? Діаметр Сонця 1 390 600 км. З яких планет Сонячної системи Сонце спостерігається як зоря?

3.12. На якій відстані система Земля–Місяць здавалася б спостерігачеві одним небесним тілом? Звичайно, за умови, що він спостерігає цю систему неозброєним оком. (Радіус Землі — 6378,2 км, радіус Місяця — 1736,7 км, середня відстань між Землею й Місяцем 384 400 км). З яких планет Сонячної системи Земля–Місяць спостерігалися б як одне тіло?

3.13. Чому сьогодні більшість обсерваторій розміщують у горах?

3.14. Космічний корабель летить над Україною на висоті 200 км. Чи можуть космонавти неозброєним оком побачити річку Дніпро, якщо її ширина — 500 м?

277

**ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ****Контрольні запитання**

1. Які основні завдання розв'язують в астрономії за допомогою телескопів?

2. Чим відрізняються оптичні телескопи від радіотелескопів? Радіоінтерферометр від радіотелескопа?

3. Чим відрізняються оптичні системи рефрактора, рефлектора й дзеркально-лінзових телескопів?

Що я знаю і вмю робити

● **Я знаю, для чого використовуються телескопи і як їх можна виготовити**

1. Які телескопи дають більш чітке зображення — з великим збільшенням чи з великим діаметром об'єктива?

2. Чому зорі в телескоп видно як яскраві точки, а планети в той самий телескоп — як диски?

3. Виготовте телескоп-рефрактор, використовуючи лінзу з окулярів +11 діоптрій, а як окуляр — об'єктив фотоапарата або іншу лінзу для окулярів +10 діоптрій.

● **Я вмію розв'язувати астрономічні задачі**

4. Бінокль, як і телескоп, має об'єктив і окуляр. Чому ж тоді в біноклях зображення пряме, а в телескопах — перевернуте?

5. Чому спостереження у космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Телескоп — це такий оптичний прилад, який...

А наближує до нас космічні світила

Б збільшує космічні світила

В збільшує кутовий діаметр світила

Г наближує нас до планети

Д приймає радіохвилі

2. Чому великі астрономічні обсерваторії будують у горах?

А щоб наблизитися до планет

Б у горах більша тривалість ночі

В у горах менша хмарність

Г у горах більш прозоре повітря

Д щоб збільшити світлові перешкоди

3. У який із цих телескопів можна побачити найбільше зір?

А у рефлектор з діаметром об'єктива 5 м

Б у рефрактор з діаметром об'єктива 1 м

В у радіотелескоп з діаметром 20 м

Г у телескоп зі збільшенням 1000 і з діаметром об'єктива 3 м

Д у телескоп з діаметром об'єктива 3 м та збільшенням 500

4. Де перебуває найбільший у світі радіотелескоп для декаметрового діапазону хвиль?

А у Японії

Б у США

В у Китаї

Г в Україні

Д у Росії

5. Чому астрономи під час спостережень за космічними тілами віддають перевагу телескопам з великим діаметром об'єктива?

А такий телескоп дає велике збільшення

Б великий об'єктив збирає більше світла, і в такий телескоп можна побачити більш віддалені світила

В у такий телескоп можна побачити космічні тіла, що випромінюють енергію в інфрачервоній частині спектра

Г у такий телескоп можна побачити космічні тіла, що випромінюють енергію в ультрафіолетовій частині спектра

Д великий об'єктив дає чіткіше зображення та збільшує роздільну здатність телескопа

6. Чи можна за допомогою того самого телескопа отримувати різні збільшення?

А можна, якщо застосовувати окуляри з різною фокусною відстанню

Б не можна, бо телескоп — стаціонарний прилад, який дає постійно однакове збільшення

В можна тільки в космічному просторі

Г можна, якщо в телескоп дивитися в окулярах

Д можна тільки в астрономічних обсерваторіях, що розміщені в горах

7. Чому в телескоп ми бачимо більше зір, ніж неозброєним оком?

8. Чому спостереження у космосі дають більше інформації, ніж наземні телескопи?

9. Які телескопи дають більш чітке зображення — з великим збільшенням чи з великим діаметром об'єктива?

10. Чому зорі в телескоп видно як яскраві точки, а планети в той самий телескоп — як диск?

11. Зараз у космосі будується міжнародна космічна станція, на якій Україна матимете космічний блок. Які астрономічні прилади ви могли б запропонувати для проведення досліджень Всесвіту?

12. Які телескопічні спостереження небесних об'єктів можна вести вдень у хмарну погоду?



Розділ 4

ЗОРІ І ГАЛАКТИКИ

280

Якщо ви подивитесь на небо безхмарної ночі, то побачите тисячі зір. Здавна людський розум намагався проникнути в таємниці цього величезного нескінченного світу. Індійські, грецькі та римські вчені задовго до нашої ери припускали існування безлічі світів, схожих на наш. Уже тоді весь світ отримав назву «Всесвіт», або «космос». Він фантастично великий, а наша крихітна Земля і навіть зорі, які ми бачимо, становлять незначну частину космосу. Всесвіт складається з великої кількості зоряних світів — галактик. Однією з них є наша Галактика, до якої входить Сонячна система. Сонячна система розміщена на краю Галактики, тому основну частину нашої Галактики можна бачити ніби збоку як світлу смугу з безлічі зір, що проходить через усе зоряне небо. Це — Молочний Шлях. Український народ здавна називав його Чумацьким Шляхом.

У цьому розділі ви дізнаєтеся багато цікавого про зорі та галактики.

§ 18. СОНЦЕ, ЙОГО ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, БУДОВА ТА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Сонце — центральне й наймасивніше тіло Сонячної системи, потужне джерело енергії, яку воно постійно випромінює в усіх ділянках спектра електромагнітних хвиль — від рентгенівських і ультрафіолетових променів до радіохвиль. Це випромінювання впливає на всі тіла Сонячної системи: нагріває їх, впливає на атмосфери планет, дає світло й тепло, необхідні для життя на Землі.

Маса Сонця приблизно в 333 000 разів більша за масу Землі та в 750 разів перевищує масу всіх інших планет, разом узятих. Його діаметр дорівнює 1 млн 392 тис. км (109 діаметрів Землі). Вимірювання за межами земної атмосфери показали, що на площу 1 м^2 , розташовану перпендикулярно до сонячних променів, щосекунди надходить $1,37 \text{ кВт}$ енергії. Це значення практично не змінюється протягом тривалого інтервалу часу, тому воно одержало назву **сонячна стала**. Максимум сонячного випромінювання припадає на оптичний діапазон.

Світність Сонця або повну кількість енергії, випромінювану Сонцем в усіх напрямках за одиницю часу, визначають так: значення сонячної сталої множать на площу сфери радіуса $r = 1 \text{ а. о.}$ ($1 \text{ а. о.} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ м}$). $L_{\odot} = 4\pi r^2 \cdot 1370 \text{ Вт} = 3,85 \cdot 1026 \text{ Вт}$. На Землю потрапляє сонячна енергія, яка складає близько половини мільярдної частини її значення.

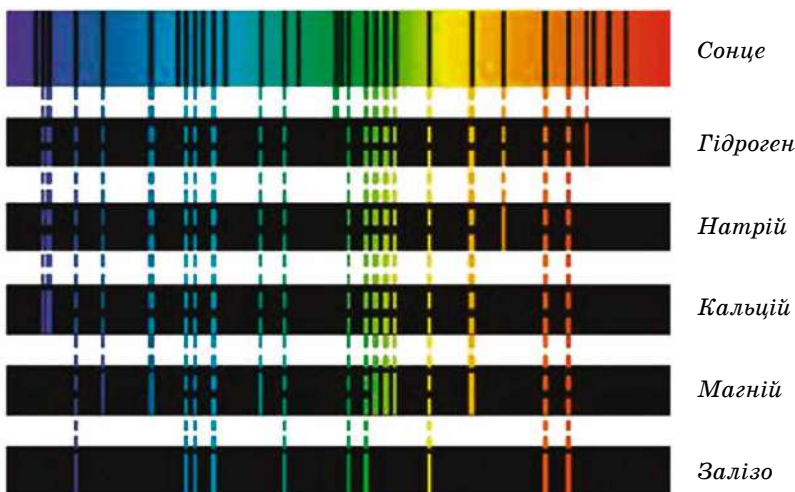
Майже всі наші знання про Сонце ґрунтуються на вивченні його спектра. Хімічні елементи, які наявні в атмосфері Сонця, поглинають із суцільного спектра, випромінюваного фотосферою, світло певної частоти. У результаті в суцільному спектрі з'являються темні лінії. Йозеф Фраунгофер уперше вивчив і змалював 576 темних ліній сонячного спектра (мал. 4.1). Учений правильно вказав, що джерело темних спектральних ліній — сонячна атмосфера. За положенням у спектрі (тобто довжинами хвиль) та інтенсивністю цих фраунгоферових ліній можна встановити, які хімічні елементи присутні в сонячній атмосфері.

На цей час досліджено понад 30 тис. ліній для 70 хімічних елементів, що є в атмосфері Сонця. Фраунгоферові лінії за інтенсивністю та шириною надзвичайно різноманітні. Аналіз спектральних ліній показав, що переважним елементом на Сонці є Гідроген — на його частину припадає понад 70 % маси Сонця, близько 25 % припадає на Гелій і близько 2 % — на інші елементи.

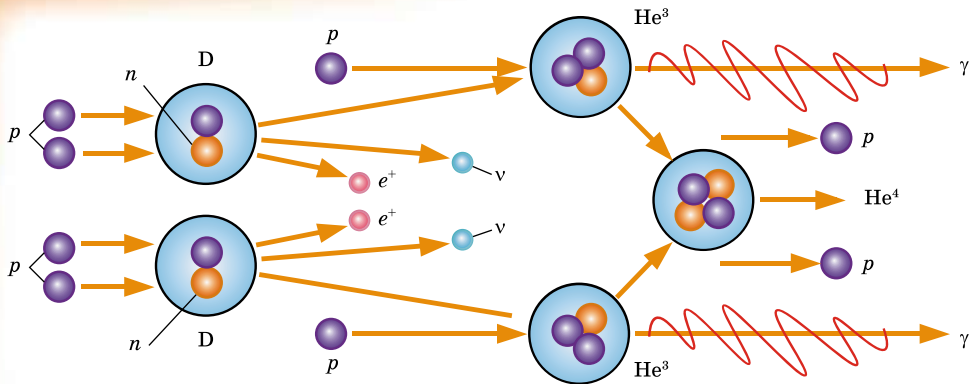
Знаючи дані про радіус, масу, світність Сонця, та використовуючи фізичні закони, можна одержати дані про тиск, густину, температуру та хімічний склад на різних відстанях від центра Сонця. З наближенням до центра Сонця збільшуються, сягаючи максимальних значень, температура, тиск і густина. Хімічний склад Сонця також відрізняється: процентний вміст водню найменший у центрі.

Високий тиск усередині Сонця обумовлений дією вище розміщених шарів. Сили тяжіння прагнуть стиснути Сонце. Їм протидіє пружність гарячого газу й тиск випромінювання, що йдуть із надр. Ці сили прагнуть розширити Сонце. Тяжіння, з одного боку, а пружність газів і тиск випромінювання, з іншого боку, врівноважують одне одного. Рівновага має місце в усіх шарах від поверхні до центра Сонця. Такий стан Сонця й зір називають **гідростатичною рівновагою**. Цю просту ідею висунув у 1924 р. англійський астрофізик **Артур Еддінгтон** (1882–1944). Вона дала змогу скласти рівняння, за яким розраховують моделі внутрішньої будови Сонця, а також інших зір.

Такі моделі є сукупністю параметрів зоряної речовини (температура, тиск, густина тощо) на різних глибинах. За обчисленнями та розрахунком моделі випливає, що температура в центрі Сонця сягає 15 млн градусів. Саме в цій частині й генерується енергія Сонця.



Мал. 4.1



Мал. 4.2

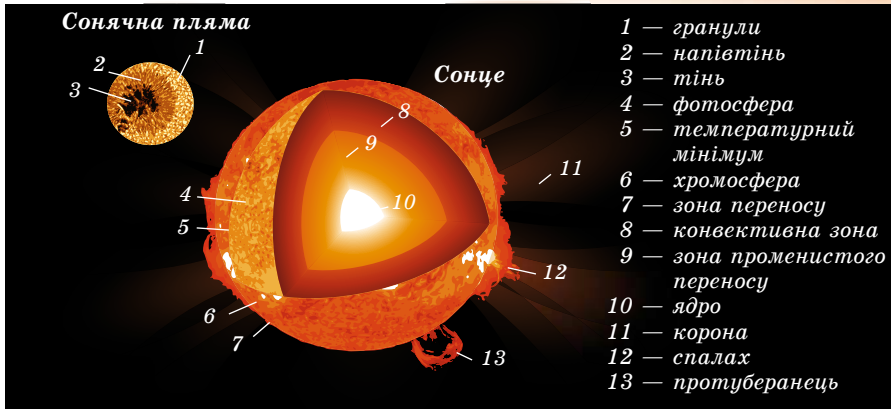
282

Ми вже знаємо, що сонячна речовина в основному складається з водню. За величезних тисків і температур протони (ядра Гідрогену) рухаються зі швидкостями сотні кілометрів за секунду. Усередині Сонця (на відстанях до 0,3 радіуса від центра) створюються умови, сприятливі для термоядерних реакцій перетворення атомів легких хімічних елементів у більш важкі атоми. З ядер Гідрогену утворюється другий з легких елементів — Гелій. Для утворення одного ядра Гелію потрібно 4 ядра Гідрогену. На проміжних стадіях утворюються ядра важкого Гідрогену (Дейтерію) і ядра ізоотопу He^3 . Цю реакцію називають протон-протонною (мал. 4.2). Під час реакції невелика кількість маси реагуючих ядер водню втрачається, перетворюючись у величезну кількість енергії, яка й підтримує випромінювання Сонця. Через шари, що оточують центральну частину зорі, ця енергія передається назовні. Усередині від 0,3 до 0,7 радіуса від центра Сонця є зона променистої рівноваги енергії, де енергія поширюється через поглинання й випромінювання γ -квантів.

Народжені в центрі Сонця γ -кванти мають енергію в мільйони разів більшу, ніж енергія квантів видимого світла. Довжина хвилі γ -квантів дуже мала. У процесі поглинання квантів атомами й подальшого їхнього перевипромінювання відбувається поступове зменшення їхньої енергії та збільшення довжини хвилі. Кількість квантів під час цього процесу збільшується. Потужні γ -кванти поступово діляться на кванти з меншою енергією: виникають рентгенівські, ультрафіолетові, видимі й інфрачервоні промені.

У частині останньої третини радіуса Сонця є **конвективна зона**. Тут енергія передається не випромінюванням, а за допомогою конвекції (будова Сонця, мал. 4.3). Причина виникнення конвекції в зовнішніх шарах Сонця та сама, що й у посудині з водою, що кипить: кількість енергії, що надходить від нагрівача, набагато більша від тієї, що передається теплопровідністю. Тому речовина починає рухатися і сама починає переносити тепло. Конвективна зона практично проходить до видимої поверхні Сонця (фотосфери).

Аналіз хімічного складу земних, місячних порід і метеоритів указує на те, що Сонячна система утворилася близько 4,7 млрд років тому. Сонце, за сучасними даними, існує близько 5 млрд років. За останні 3 млрд років світність його майже не змінилася. Повна енергія Сонця, виділена за цей час, дорівнює $E_{\odot} \approx L_{\odot} t = 3,5 \cdot 10^{43}$ Дж. Поділивши це значення на повну масу Сонця, одержимо, що кожен кілограм сонячної речовини виділив близько $1,8 \cdot 10^{13}$ Дж енергії. Реально це значення ще більше, тому що ми



Мал. 4.3

не врахували ще перші 2 млрд років. Жодне хімічне паливо не може забезпечити таке значення внутрішньої енергії, яку виділяє 1 кг сонячної речовини.

У середньому Сонце втрачає приблизно 4 млн тонн водню за секунду. На перший погляд це значення може здатися величезним. Однак воно незначне порівняно з повною масою Сонця. Розрахунки показують, що водню в надрах досить для підтримки світіння на сучасному рівні ще протягом 5 млрд років.

283



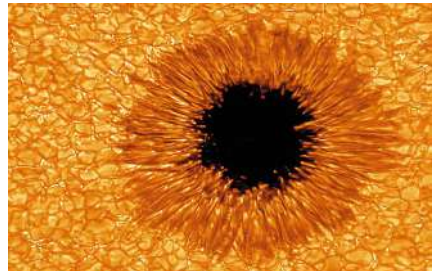
ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що таке сонячна стала? Як її визначили?
2. Що розуміють під світністю Сонця? Чому вона дорівнює?
3. Які хімічні елементи є переважними для Сонця?
4. За рахунок яких джерел енергії випромінює Сонце? Які при цьому відбуваються зміни з його речовиною?
5. Якими способами здійснюється перенесення енергії з надр Сонця до поверхневих шарів?

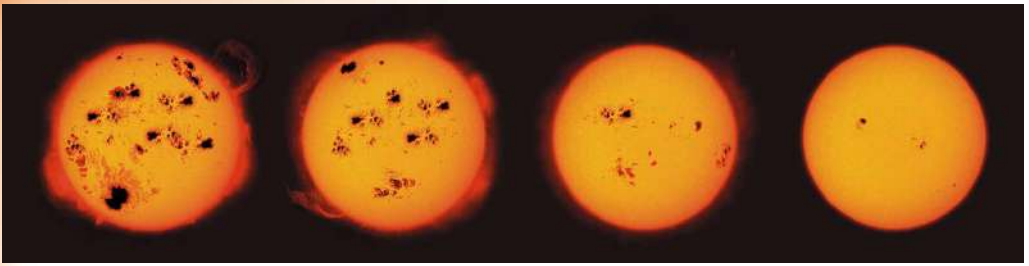
§ 19. БУДОВА СОНЯЧНОЇ АТМОСФЕРИ. ПРОЯВИ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ЗЕМЛЮ

Диск Сонця здається різко окресленим. Це тому, що практично все видиме випромінювання Сонця виходить з дуже тонкого шару — **фотосфери**. Слабке випромінювання більш високих шарів Сонця можна спостерігати під час повного сонячного затемнення, коли диск Місяця повністю закриває фотосферу й стає видно хромосферу та корону. Фотосфера, хромосфера й корона утворюють атмосферу Сонця.

Товщина фотосфери не перевищує 300 км. Найпомітніші об'єкти на Сонці — це темні плями, одну з яких у збільшеному вигляді показано на малюнку 4.4. Діаметри плям іноді сягають 200 тис. км. Зовсім маленькі плями називають **порами**. Уся фотосфера Сонця нагадує сукупність яскравих плям — гранул, розділених між собою вузькими



Мал. 4.4



Мал. 4.5

й менш яскравими проміжками. Розмір кожної з гранул — близько 700 км. Малюнок, який утворюють гранули, постійно змінюється (буквально за 5–10 хв вони встигають з'явитися і зникнути). Плазма в гранулах піднімається вгору, а в міжгранульних просторах опускається вниз. Тому різниця температур гранул і темних проміжків сягає 600 К. Процес постійного виникнення і зникнення гранул у фотосфері називають **грануляцією**.

Картина **сонячних плям** постійно змінюється, але повільніше: плями з'являються, ростуть і розпадаються (мал. 4.5). Час життя груп плям становить 2–3 оберти Сонця навколо своєї осі. Плями холодніші від фотосфери на 2–2,5 тис. градусів, тому на загальному фоні сонячного диска вони темніші.

Сонячні плями зазвичай з'являються групами в межах невеликої області, витягнутої паралельно екватору. За розмірами у групі виділяють дві плями: головна (західна) пляма, що йде попереду за обертанням Сонця, і хвостова.

Постійні спостереження за сонячними плямами показують, що Сонце обертається в напрямку руху планет і площина сонячного екватора нахилена до площини екліптики під кутом $7^{\circ}15'$.

Також виявлено, що кутова швидкість обертання Сонця зменшується від екватора до полюсів. Період обертання Сонця змінюється від 25 діб на екваторі до 30 діб на полюсах. Багаторічні спостереження утворення плям на Сонці показали, що є циклічні коливання числа плям. Іноді їх не буває зовсім, а іноді одночасно виникають десятки великих плям. Середня тривалість такого циклу становить приблизно 11 років.

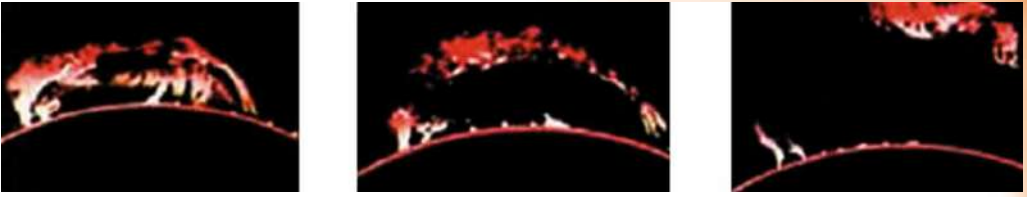
Крім плям, у фотосфері спостерігаються **факели** — яскраві утворення, видимі в білому світлі переважно поблизу краю диска Сонця. Факели мають складну волокнисту структуру, їхня температура на кілька сотень градусів перевищує температуру фотосфери.

Утворення плям і факелів пов'язане з магнітним полем Сонця. Як показують дослідження, індукція магнітного поля Сонця в середньому вдвічі вища, ніж на поверхні Землі, однак у місцях появи сонячних плям вона збільшується в тисячі разів, сягаючи 0,5 Тл. Це призводить до ослаблення конвекції й зменшення температури всередині сонячної плями.

У неперервному спектрі Сонця максимальна енергія випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda_{max} = 470$ нм. Тоді за законом зміщення Віна

одержуємо температуру:
$$T = \frac{0,0029}{\lambda_{max}} = 6170 \text{ К.}$$

Над фотосферою розміщена **хромосфера** Сонця. Загальна її довжина 10–15 тис. км. Температура в хромосфері з висотою підвищується від 4500 К до кількох десятків тисяч. Випромінювання хромосфери в сотні разів менше від фотосфери, тому для її спостереження застосовують спеціальні методи, що дають змогу виділяти слабке випромінювання. Хромосфера досить неоднорідна, і для спостерігача вона ніби довгасті витягнуті язички або зубчики — **спікули** — завдовжки близько 10 тис. км, що надають їй вигляду палаючої трави. Спікули викидаються з нижньої хромосфе-



Мал. 4.6

ри зі швидкістю до 30 км/с; час їхнього життя — кілька хвилин. Одночасно на Сонці існує до 250 тис. спікул.

На краю сонячного диска добре видно **протуберанці** — гігантські арки або виступи, що ніби спираються на хромосферу. Зміна й форма протуберанців (мал. 4.6) тісно пов'язані з магнітним полем Сонця. Протуберанці виділяються на фоні корони, тому що мають більш високу густину й температуру близько 10^4 К. Швидкість руху речовини активних протуберанців сягає 200 км/с, а висота підйому — 40 радіусів Землі.

У хромосфері спостерігаються й швидко розвиваються потужні процеси — **спалахи** (мал. 4.7). Ці яскраві утворення існують від кількох хвилин до 3 годин. Зазвичай сонячні спалахи проходять поблизу груп сонячних плям, які швидко розвиваються та супроводжуються викидами речовини зі швидкістю до 100 тис. км/с.

Сонячна корона — найбільш розріджена й гаряча оболонка Сонця, що поширюється від нього на кілька сонячних радіусів і має температуру плазми до 1 млн градусів (мал. 4.8). Яскравість сонячної корони в мільйон разів менша, ніж фотосфери. Тому спостерігати сонячну корону можна під час повних сонячних затемнень або за допомогою спеціальних телескопів-коронोगрафів. Високу температуру й розрідженість корони підтверджено спектральним аналізом, а також її радіо- і рентгенівським випромінюванням.

Маса, радіус, кількість енергії, випромінюваної Сонцем, залишаються практично сталими, але на всіх рівнях сонячної атмосфери спостерігаються структурні утворення, що змінюють свої фізичні параметри в часі. Сукупність нестационарних процесів, що періодично виникають у сонячній атмосфері, називають **сонячною активністю**. Проявом сонячної активності є плями, факели у фотосфері, протуберанці, спалахи й викиди речовини в атмосфері й короні. Місця, де вони виникають, називають **активними областями** (мал. 4.9).

У середині XIX ст. швейцарський астроном **Рудольф Вольф** (1817–1893) запропонував характеризувати стан сонячної активності відносними числами плям (названих згодом числами Вольфа) $W = 10g + f$, де g — кількість груп плям; f — загальна кількість усіх плям, які є в цей момент на диску Сонця.

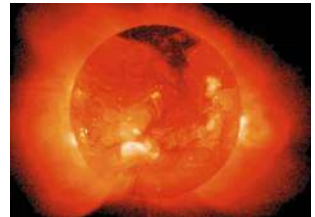
Сонячну активність характеризують також сумарна площа плям, потік радіовипромінювання в сантиметровому діапазоні хвиль тощо. На початку 11-річного циклу, після мінімуму W , плями з'являються досить далеко від сонячного екватора — на широтах близько 30° . Протягом циклу зона



Мал. 4.7



Мал. 4.8



Мал. 4.9

плям спускається до екватора до 15° у максимумі W і до 8° у наступному мінімумі. Далі на високих широтах 30° утворюються плями нового циклу. Ці закономірності стосуються й активних областей у цілому.

Не тільки поява плям, але й сонячна активність у цілому мають 11-річну циклічність (коливання циклів фактично проходить у межах від 7,5 до 16 років).

Електромагнітне випромінювання Сонця, максимум якого припадає на видиму частину спектра, не все проходить через земну атмосферу. Вона «прозора» тільки для видимого світла й частково ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювань, а також для радіохвиль у порівняно вузькому діапазоні.

В ультрафіолетовому й рентгенівському діапазонах потужність сонячного випромінювання різко зменшується — у сотні тисяч разів порівняно з потужністю випромінювання в оптичному діапазоні. Але якщо в оптичному діапазоні Сонце є постійною зорею, то випромінювання в короткохвильовій області спектра залежить від сонячної активності, збільшуючись або зменшуючись у кілька разів протягом 11-річного сонячного циклу. Сильно зростає потік короткохвильового випромінювання під час хромосферних спалахів. З нижніх шарів хромосфери виходить ультрафіолетове випромінювання, максимальна інтенсивність якого може вдвічі перевищувати мінімальне значення в 11-річному циклі. Основне рентгенівське випромінювання виходить з корони Сонця.

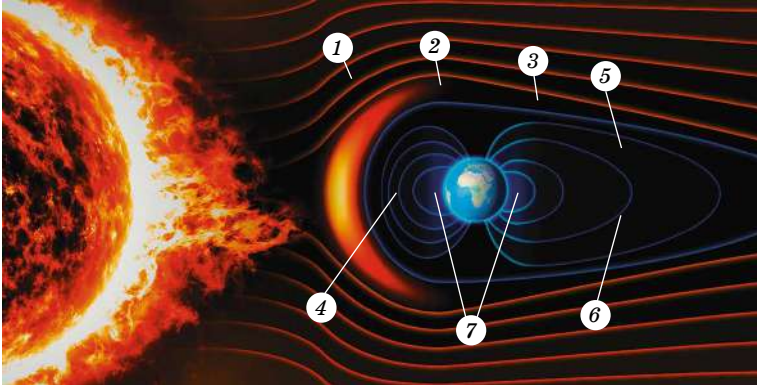
Рентгенівське та ультрафіолетове випромінювання Сонця поглинається у верхніх шарах атмосфери Землі. Воно йонізує гази земної атмосфери. Йонізований шар верхньої атмосфери Землі називають **йоносферою**, яка повністю визначає поширення коротких радіохвиль між віддаленими пунктами земної поверхні. Під час сильних сплесків сонячного рентгенівського випромінювання через хромосферні спалахи порушується зв'язок на коротких радіохвилях.

Довгохвильове ультрафіолетове випромінювання Сонця здатне проникати на 30–35 км в атмосферу Землі. Там воно розділяє молекули Оксигену O_2 на дві складові — атоми. Вільні атоми, з'єднуючись з молекулами Оксигену, утворюють нову речовину — **озон**, кожна молекула якого складається з трьох атомів Оксигену.

Озоновий шар поглинає практично все ультрафіолетове випромінювання Сонця, залишаючи лише малу частину, що досягає поверхні Землі, і людина має можливість засмагати. Коли товщина озонового шару зменшується, сонячне ультрафіолетове випромінювання може зрости в 1,5–2 рази. Тоді це випромінювання стає дуже активним і може спричинити рак шкіри.

Потік розрідженої плазми, що радіально поширюється від Сонця вздовж ліній напруженості магнітного поля й заповнює собою міжпланетний простір, називають **сонячним вітром**. У його складові входять протони, електрони, а також α -частинки та в незначних кількостях ряд високоіонізованих атомів Оксигену, Силіцію, Сульфуру, Феруму. Швидкість частинок сонячного вітру збільшується з віддаленням від Сонця. Поблизу Землі швидкість сонячного вітру сягає 450 км/с, а густина становить кілька частинок у кубічному сантиметрі.

Потік сонячної плазми не може перебороти протидію магнітного поля Землі й обтікає його. При цьому утворюється простір — **магнітосфера** (мал. 4.10). Магнітосфера має краплеподібну форму: 1) ударна хвиля; 2) перехідна зона; 3) магнітопауза; 4) магнітосфера; 5) північна пелюстка магнітного хвоста; 6) південна пелюстка магнітного хвоста; 7) плазмосфера. З боку Сонця магнітосфера стиснута тиском сонячного вітру. Межа магнітосфери повернена до Сонця й перебуває на відстані в середньому 10–12 радіусів Землі. З протилежного (нічного) боку магнітосфера витягнута подібно до хвоста комети й має довжину близько 6000 радіусів Землі.



Мал. 4.10

Зі зміною швидкості та густини частинок сонячного вітру змінюється і форма магнітосфери.

Сонячна активність впливає, у першу чергу, на зовнішні оболонки Землі — магнітосферу та йоносферу. Під час потужних сонячних спалахів частинки можуть розганятися до 100 000 км/с, тобто виникають космічні промені сонячного походження. Під їхнім впливом утворюється окис азоту NO , взаємодіючи з озоном, активно його руйнує за рахунок реакції $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Після потужних спалахів на Сонці спостерігається зниження вмісту озону в стратосфері над полярними шапками Землі.

За допомогою коронографів, установлених на космічних апаратах, реєструють грандіозні викиди речовини зі збудженої корони Сонця (мал. 4.11). Згусток відірваної корональної плазми несе всередині себе замкнуту петлю магнітного поля, що називають **корональним викидом маси**.

Зіткнення плазмової хмари з магнітосферою Землі спричиняє її сильне збудження. Вплив коронального викиду призводить до виникнення сильних магнітних бур та розігріву й прискорення плазми всередині магнітосфери. При цьому швидкі протони та електрони, зіштовхуючись із молекулами повітря на висоті 100–200 км, йонізують їх і змушують світитися. При подібній йонізації повітря на певній частоті починає світитися. У результаті йонізації на Землі, переважно в навколополярних широтах, спостерігаються полярні сяйва (мал. 4.12). За високої геомагнітної активності полярні сяйва з'являються на висоті 300–400 км.

Під час магнітної бурі змінюються електричні поля над поверхнею Землі. Це призводить до виникнення перевантажень у лініях електропередач (до кількох сотень ампер) та їхнього відключення й до наведення сильних струмів у трубах газо- і нафтопроводів та до виходу з ладу їхніх систем керування. Також наслідки магнітної бурі позначаються на бортових електронних системах космічних апаратів. Магнітні бурі спричиняють зміни тиску в тропосфері (нижньому шарі атмосфери Землі), у результаті чого розвиваються циклони.

Уперше ще в 1915 р. **Олександр Чижевський** (1987–1964) звернув увагу на те, що Сонце впливає на біологічні об'єкти та на



Мал. 4.11



Мал. 4.12

здоров'я людини. Проаналізувавши історичні документи, учений дійшов висновку, що в минулому масові стихійні лиха, соціальні «вибухи» і спалахи епідемій припадали переважно на роки максимумів сонячної активності. На підставі цього вчений спробував передбачати деякі епідемії на 35 років уперед. Його прогнози збулися в сімох випадках з восьми.

Щоб усебічно досліджувати явища, що відбуваються на Сонці, учені проводять безперервні спостереження за Сонцем, які називають **Службою Сонця**. Служба Сонця — сукупність заходів у різних астрономічних обсерваторіях світу для систематичного вивчення всіх проявів сонячної активності.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. З яких оболонок складається атмосфера Сонця?
2. Що таке фотосфера Сонця?
3. Які об'єкти характерні для фотосфери Сонця?
4. Чому сонячні плями темніші, ніж фотосфера?
5. Що розуміють під грануляцією?
6. Що розуміють під хромосферою та короною Сонця?
7. Які явища спостерігаються в хромосфері й короні Сонця?
8. Що таке сонячна активність і яка її циклічність? Які прояви сонячної активності спостерігаються в різних шарах атмосфери Сонця?
9. Що таке сонячний вітер? Як він виникає?
10. Які причини походження полярних сьвів?
11. Які причини й наслідки магнітних бур на Землі і який їхній вплив на живі організми?

288



Дослідіть з точки зору фізики причину виникнення полярних сьвів.



ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО...

- Чижевський є одним із засновників геліобіології. Ця наука, що виникла на стику фізики Сонця та біології, вивчає вплив циклічної активності Сонця на біологічні об'єкти, здоров'я людини й соціальні катаклізми.
- До коливань сонячної активності особливо чутлива нервова система людини. Встановлено, що число хворих різко збільшується в дні підвищеної сонячної активності. Сонячна активність впливає на людину через збурення магнітного поля Землі. Поява магнітної бурі погіршує вироблення мелатоніну в організмі, у корі надниркових залоз стимулюється вироблення величезної кількості кортизолу, який спричиняє стрес. Це явище провокує загальну слабкість організму, а також занепокоєння, тахікардію, звуження артеріальних судин і підвищення артеріального тиску.
- Якщо магнітна буря триває довгий період, це може призвести до збою біоритмів і спровокувати неврози та порушення гормонального фону.
- Навіть невеликі бурі можуть бути приводом для серйозного нездужання. Лікарі відзначають, що саме в період магнітних бур спостерігається підвищена кількість інсультів та інфарктів, частішають гіпертонічні кризи. Найпоширенішою реакцією на магнітні бурі є посилені головні болі, а також пришвидшення серцевого ритму. Найчастіше виникають і різні запаморочення, зниження активності та безсоння.

§ 20. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

При першому ознайомленні із зоряним небом ми розглядали поняття «зоряна величина» *m*. Ви знаєте, що зорі 1-ї зоряної величини створюють в 2,5 раза більшу освітленість (точніше, у 2,512 раза), ніж зорі 2-ї зоряної величини, які, у свою чергу, дають світлові потоки в 2,5 раза більше, ніж зорі 3-ї зоряної величини і т. д. Таким чином, за інтервал в одну видиму

зоряну величину (позначають 1^m) прийнято відношення освітленостей (E) в 2,512 рази. Це число обрано для зручності так, щоб його десятковий логарифм точно дорівнював 0,4, а інтервал 5^m відповідав відношенню в 100 разів. У вигляді формули ці відношення записав **Норман Погсон** (1829–1891):

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

Вимірюючи за допомогою фотометра відношення блиску зір, можна визначити різницю зоряних величин за формулою Погсона. Нульове значення вибирають умовно. При цьому узгоджено, щоб стандартна зоря 1-ї зоряної величини (середня з 20 найяскравіших зір) давала б у 100 разів більше світла, ніж зоря 6-ї зоряної величини, що ще може сприйняти око людини.

Видима зоряна величина Місяця в повні дорівнює $-12,7^m$, а у фазі першої чверті становить $-9,0^m$. За формулою Погсона можемо знайти, що освітленість Місяця в повні ($E_{\text{п}}$) більша від освітленості Місяця у фазі першої чверті (E_1) у 30 разів:

$$\frac{E_{\text{п}}}{E_1} = 2,512^{m_1 - m_2} = 2,512^{-9+12,7} = 2,512^{3,7} \cong 30.$$

Видиму зоряну величину Сонця визначив **Вітольд Цераський** (1849–1925). Її значення $-26,8^m$. Шкала зоряних величин дає змогу виражати в зоряних величинах блиск слабких світил, невидимих неозброєним оком. У цей час найбільші телескопи з діаметром дзеркал 8–10 м і сучасною прийомною апаратурою дають змогу реєструвати об'єкти до 28-ї зоряної величини.

Видимий блиск зір не характеризує їхнього реального випромінювання. Він визначається дійсним випромінюванням зорі та відстанню до неї. Сонце, наприклад, набагато ближче до Землі, ніж будь-яка інша зоря, тому воно є найяскравішим світилом на небі. Отже, для порівняння дійсного блиску зір потрібно обчислювати їхню зоряну величину на певній однаковій відстані. За таку однакову (або стандартну) відстань прийнято 10 пк. Видиму зоряну величину, яку мала б зоря, якби перебувала від нас на відстані 10 парсеків, називають **абсолютною зоряною величиною**.

Нехай видима зоряна величина зорі на відстані r дорівнює m , а освітленість, створювана цією зорею, — E . За означенням видима зоряна величина з відстані $r_0 = 10$ пк буде дорівнювати абсолютній зоряній величині M , а E_0 — освітленість (або випромінювання) зорі з відстані 10 пк.

Тоді, використовуючи формулу Погсона, можемо записати:

$$\frac{E}{E_0} = 2,512^{M-m}.$$

З фізики відомо, що освітленості, створювані одним джерелом випромінювання, обернено пропорційні квадратам відстаней до нього:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}.$$

Підставляючи це рівняння в попереднє, одержимо, що $2,512^{M-m} = \frac{100}{r^2}$.

Прологарифмувавши цю рівність і спростивши, одержимо: $M = m + 5 - 5 \lg r$,

а враховуючи, що $r = \frac{1}{\pi''}$, це рівняння можна записати так: $M = m + 5 + 5 \lg \pi''$.

За цією формулою обчислимо абсолютну зоряну величину Сонця. Відстань до Сонця $r = 1$ а. о. = $1/206\,265$ пк; видима зоряна величина Сонця дорівнює $-26,8^m$. Після підстановки цих значень у формулу одержимо, що $M_{\odot} = -26,8^m + 5^m + 26,6^m = 4,8^m$. Це означає, що із стандартної відстані 10 пк Сонце має вигляд слабкої зорі майже 5-ї зоряної величини.

Абсолютні зоряні величини зір коливаються від -9^m до 19^m , тобто відрізняються на 28^m одна від одної або за освітленістю в 160 млрд разів.

Знаючи абсолютну зоряну величину зорі, можна обчислити дійсне загальне випромінювання зорі або її світність. **Світністю** L називають повну енергію, випромінювану зорею за 1 с. Світність зорі можна виразити у ватах, але частіше її виражають у світностях Сонця. Нагадаємо, що світність Сонця — $3,85 \cdot 10^{26}$ Вт.

Зорі-надгіганти з абсолютною зоряною величиною $M = -9^m$ мають потужність випромінювання більшу від Сонця в 330 тис. разів, а неяскраві зорі з абсолютною зоряною величиною $M = 19^m$ випромінюють світло в 480 тис. разів слабше від Сонця.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняється абсолютна зоряна величина від видимої зоряної величини?
2. Як можна визначити абсолютну зоряну величину зорі, якщо відомо відстань до неї або річний паралакс?
3. Що розуміють під світністю зорі? Яка світність Сонця?



Зробіть історичний огляд питання про те, як астрономи визначали абсолютну зоряну величину.

§ 21. ТЕМПЕРАТУРА ТА РОЗМІРИ ЗІР. ЗОРІ ТА ЇХНЯ КЛАСИФІКАЦІЯ. МАСА ЗІР. ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ ІНШИХ ЗІР

290

Будемо вважати, що зорі випромінюють як абсолютно чорні тіла — тіла, які цілком поглинають промені (усіх довжин хвиль), що падають на них. Температуру T поверхні (фотосфери) зір можна визначити, скориставшись законом Стефана–Больцмана, так само як ми це вже робили під

час визначення температури Сонця:
$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}},$$

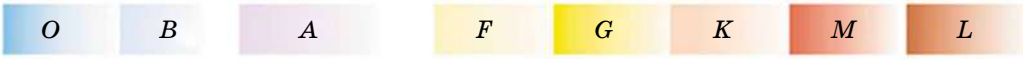
де $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — стала Стефана–Больцмана.

Визначену таким методом температуру називають **ефективною температурою**. Однак цей метод застосовується обмежено, тому що досить точне значення радіусів визначено приблизно для кількох десятків яскравих гігантських зір.

Температури зір дуже різняться. Холодні червоні зорі мають температуру близько 3000 К. Сонце з температурою фотосфери 6000 К належить до жовтих карликів. Температура гарячих зір сягає 50 000 К. Основна частина випромінювання гарячих зір припадає на ультрафіолетову частину спектра, і ми їх сприймаємо як зорі блакитних кольорів. Найбільш гарячими є молоді зорі типу Вольфа–Райе, температури фотосфер яких дуже високі: від 60 000 до 100 000 К.

Зорі відрізняються великою розмаїтістю, однак серед них можна виділити окремі групи, що мають загальні властивості. При першому ознайомленні із зоряним небом видно, що зорі відрізняються за кольорами. Особливо це помітно коли розглядати їхній спектр. Найважливіші розходження спектрів зір полягають у кількості та інтенсивності спостережуваних спектральних ліній, а також у розподілі енергії в безперервному спектрі. З урахуванням видів спектральних ліній і їхньої інтенсивності побудовано **спектральну класифікацію зір**, яку було затверджено в 20-х рр. ХХ ст.

У Гарвардській обсерваторії (США) було розроблено класифікацію спектрів зір, у якій послідовність спектральних класів позначається великими літерами латинського алфавіту. Розходження всередині кожного



Мал. 4.13

класу додатково підрозділяють на 10 підкласів — від 0 до 9. Наприклад, Сонце належить до спектрального класу G2.

Ця послідовність спектральних класів відображає зменшення температури атмосфери (фотосфер) зір від класу O до класу L. Спектральна послідовність одночасно є й колірною: зорі класу O мають блакитний колір, класу B — блакитно-білий, A — білий тощо (мал. 4.13).

Хімічний склад атмосфер більшості зір майже однаковий. Зовнішні шари зір складаються з воднево-гелієвої суміші з дуже малою добавкою більш важких елементів. Наприклад, аналогічно до Сонця інші зорі містять у своїх атмосферах 73 % водню, 25 % гелію та 2 % усіх інших елементів.

Розходження в спектрах зір визначаються, головним чином, розходженнями температур. У фотосферах холодних зір можуть існувати найпростіші молекули. Тому характерними деталями спектрів зір класів M і L є широкі смуги поглинання молекул, наприклад CrH. За більш високих температур молекулярні сполуки розпадаються. У таких спектрах пропадають спектральні смуги молекулярних сполук, проте з'являються лінії, що відповідають нейтральним металам. Таким чином, спектральна класифікація зір — це температурна класифікація зоряних спектрів, що ґрунтується на оцінках відносної інтенсивності й вигляду спектральних ліній. У наш час спектральною класифікацією охоплено понад 500 тис. зір.

291

Лінійний радіус R зорі можна визначити, якщо відомо її кутовий радіус ρ'' і відстань до зорі r або річний паралакс π'' за формулою: $R = r \sin \rho''$.

Якщо $r = \frac{205265''}{\pi''}$ а. о., а для кутового радіуса $\sin \rho'' = \frac{\rho''}{205265''}$, то маємо

$$R = \frac{\rho''}{\pi''} \text{ а. о.}$$

Лінійні радіуси зір прийнято виражати в радіусах Сонця. У радіусах Сонця $1 \text{ а. о.} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ км} : (0,696 \cdot 10^6) \text{ км} = 215$.

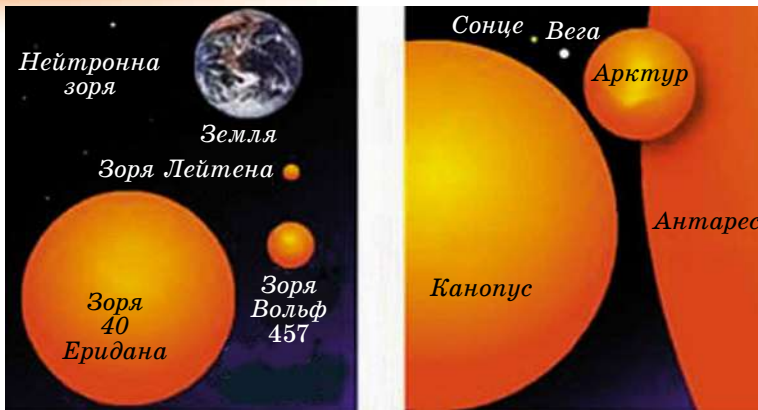
Використовуючи це співвідношення, одержимо формулу для визначення лінійних радіусів зір у радіусах Сонця в такому вигляді: $R = 215 \frac{\rho''}{\pi''}$.

Зорі так віддалені від нас, що їхні кутові розміри менші від межі роздільної здатності найбільших телескопів. Для яскравих близьких зір кутовий радіус визначають за інтерференційною картиною, яка виходить у результаті перекриття зображень зорі, за допомогою двох далеко розміщених телескопів. Наприклад, за допомогою оптичного інтерферометра, що складається із двох сферичних дзеркал діаметром 6,6 м кожне, розташованих на максимальній відстані 180 м одне від одного, вдалося виміряти кутовий діаметр ϵ Оріона. Він виявився рівним $0,00072''$, а якщо

річний паралакс зорі дорівнює $\pi'' = 0,0024''$, то $R = 215 \frac{0,00036''}{0,0024''} = 32R_{\odot}$.

Радіуси зір можуть бути обчислені за їхньою потужністю випромінювання (світністю) і температурою. Запишемо значення повної потужності випромінювання для якої-небудь зорі та для Сонця: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$, $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$, де L і L_{\odot} , R і R_{\odot} , T і T_{\odot} — відповідно світності, лінійні радіуси й абсолютні температури зорі й Сонця.

Приймаючи $L_{\odot} = 1$ й $R_{\odot} = 1$, одержимо: $L = R^2 T^4 / T_{\odot}^4$ або остаточно в лінійних радіусах Сонця: $R = \sqrt{L T_{\odot}^2 / T^2}$.



Мал. 4.14

Розміри зір дуже відрізняються: від діаметрів, порівнянних з діаметром орбіти Юпітера (червоні надгіганти), до розмірів планет Сонячної системи (білі карлики) або навіть до кількох кілометрів у нейтронних зір (мал. 4.14).

Спостереження показують, що багато зір у Всесвіті утворюють пари або є членами складних систем. **Подвійними зорями** називають близько розташовані пари зір. Розрізняють оптично- й фізично-подвійні зорі. **Оптично-подвійні зорі** (пари) складаються з досить віддалених одна від одної в просторі зір, які випадково проєктуються на небесну сферу за променем зору. **Фізично-подвійні зорі** — це системи близько розташованих у просторі зір, зв'язаних силами тяжіння, що обертаються біля загального центра мас.

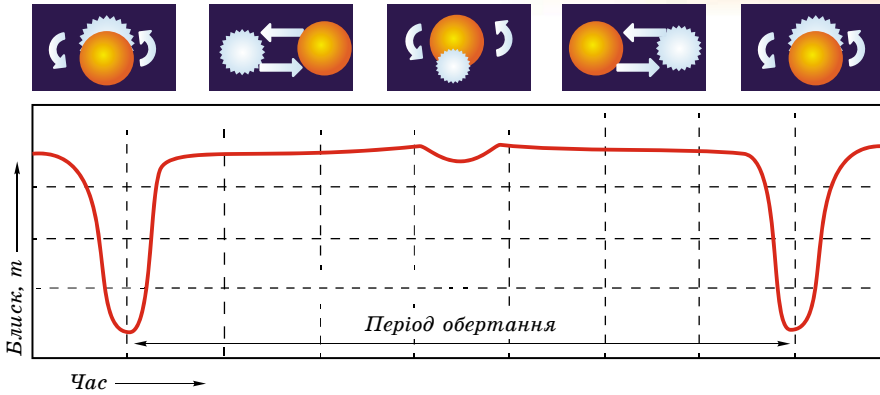
Зорі фізично-подвійних пар часто мають різні кольори. Так, Антарес — дуже яскрава червона зоря в сузір'ї Скорпіона — має слабкий зелений (при спостереженні в телескоп) супутник.

Перша, відома ще в давні часи зоряна пара — це Міцар (Кінь) і Алькор (Вершник). Міцар — середня зоря ручки ковша сузір'я Великої Ведмедиці, що має видиму зоряну величину $2,2^m$. На кутових відстанях $12'$ від неї розташована слабка зоря Алькор, зоряна величина якої $4,0^m$. Зоряна пара Міцар і Алькор — приклад оптично-подвійної зорі. Навіть у шкільний телескоп добре видно: Міцар складається з двох дуже близьких зір, які не можна розрізнити неозброєним оком. Компоненти зоряної пари Міцар А і Міцар В містяться один від одного на відстані $14''$ і мають зоряні величини $2,4^m$ і $4,0^m$ відповідно. Зоряна пара Міцар — приклад фізично-подвійної зорі.

Фізично-подвійні зорі, залежно від способу їх спостережень, поділяються на **візуально-подвійні зорі** (їхні компоненти можна побачити за допомогою телескопа візуально або сфотографувати), **затемнювано-подвійні зорі** (їхні компоненти періодично затуляють один одного від спостерігача), **спектрально-подвійні зорі** (подвійність проявляється в періодичних зсувах або роздвоєннях ліній їхніх спектрів), **астрометрично-подвійні зорі** (одну зорю, яка впливає на правильний рух сусідньої, не видно).

Перший список подвійних зір склав у 1803 р. англійський астроном Вільям Гершель. Цей перелік містив кілька сотень об'єктів.

Періоди обертання компонентів у візуально-подвійних системах мають від кількох років до кількох тисяч років. Подвійні зорі є окремим випадком кратних зір, що складаються іноді з кількох компонентів. Існують зорі потрійні й навіть більш високої кратності. До кратних зір прийнято зараховувати зорі, що мають менше ніж 10 компонентів. Системи з біль-



Мал. 4.15

шим числом зір називають **зоряними скупченнями**. Подвійність і кратність у зоряному світі — широко розповсюжене явище.

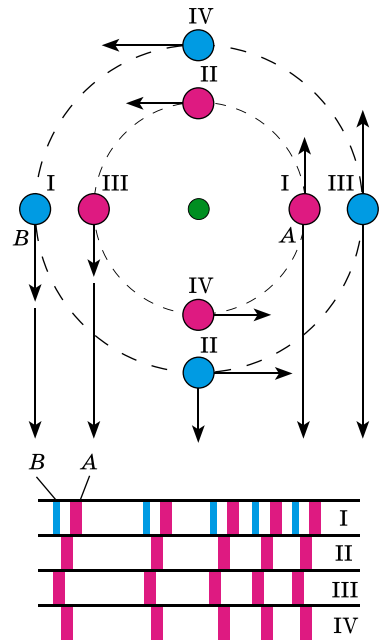
Затемнювано-подвійні, або затемнювано-змінні, зорі є тісними парами, що обертаються з періодом від кількох годин до кількох років по орбітах, більша піввісь яких порівнянна із самими зорями. Через ці причини ми не можемо побачити окремо їхні компоненти, тому що кутова відстань між зорями дуже мала. Судити про подвійність системи можна лише за періодичним коливанням блиску.

У зв'язку з тим, що промінь зору при спостереженні таких зір і площини їхніх орбіт практично збігаються, то у таких зір виявляється явище затемнень, коли один з компонентів проходить попереду або позаду другого відносно спостерігача. Цю ситуацію пояснює малюнок 4.15, на якому зображено криву зміни блиску m затемнювано-подвійної зорі, пов'язаної з періодичними затемненнями одного компонента іншим. Значення блиску на графіку належать до відповідних положень одного з компонентів зорі на орбіті. Різницю зоряних величин у мінімумі й максимумі блиску називають **амплітудою**, а інтервал часу між двома послідовними найменшими мінімумами — **періодом змінності**.

Типовим прикладом затемнювано-змінної зорі є зоря β Персея (Алголь), що регулярно затемнюється на 9,6 години з періодом 2,867 доби. Падіння блиску в мінімумі цієї зорі становить $2,3^m$.

Зорі, подвійність яких установлюється лише на підставі спектральних спостережень, називають **спектрально-подвійними**.

Припустимо, що спостерігач перебуває в площині орбіти подвійної системи, що складається з більш масивної і яскравішої зорі A та менш масивної і яскравішої зорі B (мал. 4.16). Кожний з компонентів — A і B , обертаючись навколо центра мас системи, то наближається до спостерігача, то віддаляється від нього. Унаслідок ефекта Доплера в першому випадку лінії в спектрі зорі будуть зміщені до фіолетової



Мал. 4.16

області спектра, у другому — до червоної, причому період цих зміщень дорівнює періоду обертання. На малюнку римські цифри позначають відповідність спектрів положенням зір на орбітах.

На цей час методом променевої швидкостей у більш ніж 700 зір виявлено планетні системи. Вони одержали назву — **екзопланети**.

Екзопланета (від грец. $\epsilon\chi\omega$, exo — «поза», «зовні»), або **позасонячна планета** (від лат. $extra$ — «поза», «зовні») — планета, що обертається навколо зорі, тобто за межами нашої Сонячної системи.

На початок жовтня 2018 р. підтверджено існування 3851 екзопланети в 2871 планетній системі, з яких у 636 — є більше ніж одна планета.

Астрометрично-подвійні зорі. Трапляються такі тісні зоряні пари, коли одна із зір або дуже мала за розмірами, або має малу світність. Тоді таку зорю розглянути не вдається, але виявити подвійність можна. Яскравий компонент буде періодично відхилятися від прямолінійної траєкторії то в один, то в інший бік, начебто по прямій рухається центр мас системи. Такі збурювання пропорційні масі супутника.

Дослідження однієї з найближчих до нас зір Росс 614 (її блиск $11,4^m$ і паралакс $0,25''$) показали, що амплітуда відхилень зорі від очікуваного напрямку сягає $0,36''$. Період обертання зорі щодо центра мас дорівнює 16,5 року.

Тривалі спостереження візуально-подвійних зір переконали астрономів, що відносний видимий рух компонентів відбувається по еліпсу й задовольняє закон площин. Із цього випливає, що в подвійних системах обертання зір відбуваються відповідно до законів Кеплера та підкоряються закону всесвітнього тяжіння Ньютона.

294

За даними спостережень подвійних зір, отримано оцінки мас для зір різних типів. Аналіз цих даних привів до таких результатів.

1. Маса зір містяться в межах від 0,03 до 60 мас Сонця. Найбільша кількість зір має від 0,4 до 3 мас Сонця.

2. Існуюча залежність між масами зір та їхньою світністю дає змогу оцінювати маси одиноких зір за їхніми світностями. В інтервалі мас $0,5M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$ світність зорі пропорційна четвертому степеню її маси $L \sim M^4$. При $M > 10M_{\odot}$ показник степеня дорівнює 2, тобто $L \sim M^2$.

3. Маса зорі в момент її формування є найважливішим параметром, що визначає її наступну еволюцію.

4. Радіуси зір мають досить широкі межі, тому середня густина зір коливається від $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^8$ кг/м³ (порівняйте із Сонцем — 1400 кг/м³).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. За яким принципом здійснюється спектральна класифікація зір?
2. Від чого залежать кольори зір?
3. Які зорі називають подвійними? Як їх класифікують?



Розкрийте методи, за допомогою яких визначають вид подвійних зір.

§ 22. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР. БІЛІ КАРЛИКИ

Існує залежність між основними фізичними характеристиками зір. На основі спостережень визначаються спектральні класи зір, а за відомою відстанню до них — абсолютні зоряні величини або світність зір.

На початку ХХ ст. незалежно один від одного датський астроном **Ейнар Герцшпрунг** (1873–1967) і трохи пізніше американський астрофізик **Генрі Рассел** (1877–1957) встановили зв'язок між цими характеристиками.

Цю залежність можна подати у вигляді діаграми: по горизонтальній осі відкладається спектральний клас (або температура) зір, а по вертикальній — їхня світність (в абсолютних величинах або в одиницях світності Сонця). Кожній зорі відповідає точка на цій діаграмі. Таку діаграму називають **діаграмою Герцшпрунга–Рассела**, або **діаграмою «спектр–світність»** (мал. 4.17).



Ейнар Герцшпрунг

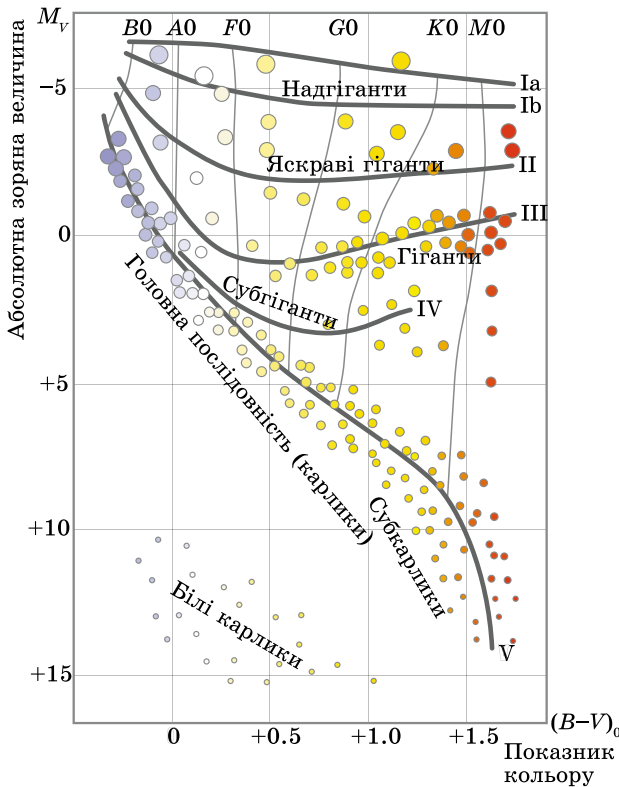


Генрі Рассел

Зорі на діаграмі не розподіляються випадково по всій її площі, а утворюють кілька груп, названих **послідовностями**.

Більшість зір на діаграмі лежить у межах чітко вираженої смуги, що проходить від лівого верхнього до правого нижнього кута, яку називають **головною послідовністю**.

У лівій верхній частині головної послідовності перебувають масивні гарячі зорі спектрального класу *O*, які в десятки тисяч разів перевищують світність Сонця. Такі зорі називають гарячими **надгігантами**. Зі зменшенням температури світність зір зменшується. Потім смуга головної послідовності проходить через область, де перебувають схожі на Сонце зорі класу *G*. І нарешті, головна послідовність опускається до нижньої правої частини діаграми. Тут перебувають зорі класу *M* і *L* з малою масою й відносно низькою температурою. Ці зорі називають **червоними карликами**.



Мал. 4.17

До зір головної послідовності належать добре відомі зорі — Сіріус (α Великого Пса), Вега (α Ліри), Сонце. Зорі з відносно низькою температурою фотосфери ($3\text{--}5 \cdot 10^3$ К) і світністю в 100–1000 разів більшою від світності Сонця утворюють послідовність червоних гігантів. До цієї послідовності належать, наприклад, Арктур (α Волопаса), Альдебаран (α Тельця). У верхній частині діаграми «спектр–світність» розташовується послідовність надгігантів. Це зорі з дуже високою світністю, низькою густиною, діаметрами у десятки й сотні разів більшими, ніж у Сонця. До надгігантів належить зоря Бетельгейзе (α Орiona).

У лівій нижній частині діаграми розташовані гарячі зорі слабкої світності — послідовність **білих карликів**. Їхні розміри близькі до розмірів Землі, а маси близькі до маси Сонця. Тому середня густина білих карликів перевищує густину земних порід у 100 тис. разів. З іншого боку, середня густина зір-надгігантів дуже мала — у тисячі разів менша за густину земної атмосфери. Густина речовини в атмосфері зорі впливає на ширину спектральних ліній. Тому, наприклад, у червоних карликів спектральні лінії ширші, ніж у гігантів і надгігантів. За виглядом спектральних ліній визначається, до якої послідовності належить зоря (головна, карлики, гіганти).

За послідовністю оцінюється абсолютна зоряна величина, а потім і відстань $M = m + 5 - 5 \lg r$. Цей метод визначення відстаней називають **методом спектральних паралаксів**.

Найбільша кількість зір — червоні карлики: на 10 млн червоних карликів припадає близько 1 млн білих карликів, 1000 гігантів і лише 1 надгігант.

У Єрксській обсерваторії розроблено двовимірну спектральну класифікацію, у якій кожен спектр зорі враховує особливості спектральних ліній і світність зір. Ця класифікація розділяє всі зорі на кілька класів **світності** (від I до VII, табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Клас	Назва	Абс. зор. величини M_v
O	Гіпергіганти	
Ia ⁺	Найяскравіші надгіганти	-10
Ia	Яскраві надгіганти	-7,5
Ib	Нормальні надгіганти	-4,7
II	Яскраві гіганти	-2,2
III	Нормальні гіганти	+1,2
IV	Субгіганти	+2,7
V	Зорі головної послідовності	+4
VI	Субкарлики	+5...+6
VII	Білі карлики	+13...+15

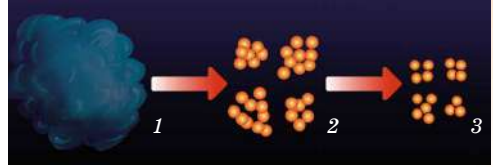
Процес зореутворення йде в Галактиці безупинно — з моменту її виникнення. Підтвердженням народження зір у наш час є існування масивних гарячих зір класів O і B, час життя яких не перевищує 10 млн років. Тривалість життя зір — від мільйонів до десятків мільярдів років. Це час занадто великий, щоб простежити життєвий шлях зір, або їхню еволюцію. Тому основним методом дослідження еволюції зір є побудова **моделей внутрішньої будови зір**.

Будуючи модель, задають початкові умови фізичного стану газу: хімічний склад, тиск (густина), температуру, масу. Потім на підставі фізичних законів (газових законів, законів тяжіння) розраховують зміни цих параметрів із часом.

За сучасними даними, зорі утворюються в результаті стиску (гравітаційної конденсації) речовини міжзор'яного середовища (мал. 4.18, 1). Зорі народжуються групами з гігантських газопилових комплексів розмірами до 100 пк і масою десятки, а іноді й сотні тисяч сонячних мас. Газ у цих комплексах перебуває в молекулярному стані з температурою близько 10 К.

Під дією гравітаційних сил комплекс стискається, густина його збільшується, і він розпадається на окремі згустки, або газопилові хмари (мал. 4.18, 2).

У газопиловій хмарі випадково або під дією зовнішніх причин виникають гравітаційно-нестійкі фрагменти, які продовжують стискатися. Зовнішніми причинами, що стимулюють зореутворення, можуть бути зіткнення молекулярних хмар; зоряний вітер від молодих гарячих зір; ударні хвилі, породжені спалахами наднових зір. Якщо маса фрагмента досить велика, то відбувається подальший розпад на окремі фрагменти-згустки (мал. 4.18, 3).



Мал. 4.18

Фрагменти зоряної маси, що стискається під дією власного тяжіння, називають **протозорями**. При гравітаційному стисканні газ у протозорі розігрівається, і вона починає випромінювати в інфрачервоному діапазоні спектра. Речовина, що оточує ядро протозорі, падає на нього, збільшуючи його масу й температуру. Коли тиск, який створює випромінювання зорі, стає досить великий, падіння речовини припиняється. Тиск випромінювання обмежує масу майбутніх зір величиною десятків мас Сонця. Тривалість стадії стискання залежить від маси протозорі: при масі, меншій від сонячної, — сотні мільйонів років, при більшій — сотні тисяч років.

Обертання протозорі відіграє важливу роль у її подальшій еволюції. Часто в протозорі, яка обертається, утворюється навколо центрального згущення протяжний газопиловий диск, з якого потім утворюється планетна система. Зоря, що формується, наприкінці стадії стискання має значні розміри за ще відносно низької температури поверхні. Стискання протозорі припиняється, коли температура в центрі ядра сягне кількох мільйонів градусів, тоді включаються термоядерні джерела енергії, реакції протон-протонного циклу. Момент початку термоядерних реакцій є моментом народження зорі. У цей час температура і густина внутрішніх шарів стають такими, що сила їхньої пружності може протидіяти вазі зовнішніх шарів. Після початку водневих реакцій і встановлення рівноважного стану зоря потрапляє на головну послідовність діаграми «спектр-світність». Новонароджені зорі з'являються на головній послідовності по всій її довжині (залежно від їхньої маси).

Від маси, у першу чергу, залежить, яку температуру буде мати ядро зорі в момент установаження стійкої рівноваги. Що більша маса стискуваного газопилового комплексу, потім протозорі й нарешті зорі, то більшу вагу вищих шарів доводиться витримувати її ядру. Тому потрібна більш висока температура, щоб газовий тиск міг протистояти цій вазі. Спостереження показують, що світність зір пропорційна масі в четвертому степені.

Наймасивніші зорі (розміром 30–50 мас Сонця) породжують найбільш гарячі зорі класу *O*. Температура центральних областей таких зір становить 30–35 млн градусів.

Більшу частину часу зоря перебуває на головній послідовності. Але тому, що запаси водню пропорційні масі, а витрата енергії (світність) пропорційна четвертому степеню маси, водень у масивних зорях вигорає швидше. Час перебування зорі на головній послідовності визначається



Мал. 4.19

залежністю $t = 10^{10} \frac{1}{M^3}$ (років), де M — маса зорі в масах Сонця. За цією

формулою можна підрахувати, що Сонце вичерпає свій запас водневого палива приблизно за 10 млрд років (отже, Сонце, вік якого оцінюється близько 5 млрд років, «прожило» на головній послідовності лише половину свого життя). Зорі, маси яких дорівнюють 10 масам Сонця, вичерпають своє паливо всього за 10 млн років, червоні карлики, які слабо випромінюють, масою близько 0,5 маси Сонця — за 80 млрд років. Гарячих молодих зір-гігантів спостерігається менше через малий час існування. Тому найбільш заповнена права нижня частина головної послідовності діаграми «спектр–світність».

Після вигорання водню в надрах зорі утворюється гаряче гелієве ядро. Подальша еволюція зорі залежить від маси цього ядра. Якщо вона менша від 1,4 маси Сонця, то під дією гравітаційного стискання гелієве ядро знову розігрівається (температура підвищується до 100 млн градусів). Зовнішні шари зорі при цьому розширюються й проохолоджуються. Зоря немов розбухає. Світність її збільшується, а температура знижується. Зоря сходить з головної послідовності й, залежно від маси, стає червоним гігантом або надгігантом (мал. 4.19).

Атмосфера зорі, яка розростається, поступово віддаляється від ядра, утворюючи **планетарну туманність**. Кінцевою стадією еволюції цих зір є білі карлики. **Білий карлик** — компактна зоря масою, що дорівнює приблизно масі Сонця, радіус приблизно в 100 разів менший від Сонця. Густина таких зір більше ніж у 100 тис. разів перевищує густину води.

Стадії еволюції, як і всі зорі, проходить і Сонце. Через 5–8 млрд років воно перетвориться спочатку в червоного гіганта, потім, скинувши оболонку, стане білим карликом. Зорі, набагато масивніші від Сонця, із часом перетворюються в нейтронні зорі (при масі від 1,4 до 2,5 маси Сонця) або в чорні діри (при масі понад 2,5 маси Сонця).



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. За яким принципом будується діаграма «спектр–світність» (діаграма Герцшпрунга–Рассела)?
2. Як на діаграмі «спектр–світність» розташовуються зорі різного розміру?
3. Дайте коротку характеристику зір: надгіганти, червоні гіганти, білі карлики, червоні карлики.

4. Що розуміють під еволюцією зір?
5. Опишіть загальний процес утворення зір.
6. Що розуміють під класами світності?
7. Які зорі найгарячіші? Найхолодніші?
8. Які зорі розміром із Землю?

§ 23. ФІЗИЧНО-ЗМІННІ ЗОРІ. НЕЙТРОННІ ЗОРІ. ЧОРНІ ДІРИ

Багато зір змінюють свої фізичні характеристики протягом відносно короткого часу. Такі зорі називають **нестационарними**. На відміну від затемнювано-змінних зір вони змінюють свою світність у результаті фізичних процесів, що відбуваються в самих зорях. Тому їх називають **фізично-змінними зорями**. Залежно від характеру процесів, що протікають у середині зорі, фізично-змінні зорі бувають пульсуючими й еруптивними.

Пульсуючі змінні зорі — фізично-змінні зорі, у яких відбуваються періодичні коливання блиску (наприклад, цефеїди, зорі типу *RR* Ліри, міриди).

Еруптивні зорі — фізично-змінні зорі, що проявляють свою змінність у вигляді спалахів, які пояснюються викидами речовини (наприклад, нові й наднові зорі).

Усі змінні зорі мають спеціальні позначення, якщо їм не було присвоєно раніше літер грецького алфавіту. У кожному сузір'ї перші 334 змінні зорі позначаються послідовністю літер латинського алфавіту *R, S, T, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, ..., AZ, QQ, ...* з додаванням назви відповідного сузір'я. Наступні змінні, яким не вистачило комбінації цих букв у сузір'ї, позначаються *V 335, V 336* тощо.

Першу **пульсуючу зорю** відкрив німецький астроном **Давид Фабріціус** (1564–1617) у 1596 р. у сузір'ї Кита і назвав Мірою. Період зміни блиску цієї зорі становить 331,6 доби.

Довгоперіодичні змінні зорі (з періодами від кількох тижнів до року й більше; зорі типу Міри Кита) називають **міридами**. Практично всі зорі цього типу — старі червоні гіганти величезних розмірів і великої світності. Амплітуди зміни блиску таких зір можуть сягати десяти зоряних величин.

При еволюційному перетворенні зорі на зорю-гіганта відбувається збільшення її об'єму й зменшення середньої густини речовини. У цей час внутрішня будова зорі змінюється докорінно, що може супроводжуватися порушенням рівноваги між силами гравітаційного притягання й променевого тиску. Це приводить до періодичних коливань об'єму зорі: її оболонка то розширюється, то стискується (повертається до свого колишнього об'єму). Такі періодичні коливання змінних зір називають **пульсаційними**.

Великий клас дуже яскравих змінних зір-гігантів та надгігантів класів *F* й *G* називають **цефеїдами**. Це пульсуючі змінні зорі, блиск яких плавно й періодично змінюється (від 0,5 до 2 зоряних величин). Період зміни блиску становить від 1 до 146 діб. Назва походить від зорі δ Цефея — однієї з найтиповіших для цього класу змінних зір. Вони вже пройшли стадію головної послідовності (де мали спектральний клас *B*), у них розпочалося термоядерне горіння гелію, і вони прямують до стадії червоних надгігантів. Тривалість перебування на цьому шляху становить кілька мільйонів років. За цей час зоря може неодноразово потрапляти до смуги нестабільності на діаграмі Герцшпрунга–Рассела.

За сучасною класифікацією цефеїди поділяють на: **класичні** (або цефеїди плоскої складової Галактики, типи змінності за класифікацією *GCVS: DCep, DCepS, CepB*); **сферичної складової Галактики** (або змінні типу *W Діви: CWa, CWb*). Останні відрізняються від класичних цефеїд (з таким

самим періодом) меншою світністю: приблизно вчетверо, або на $1,5^m$ (тобто для них залежність між періодом та світністю має дещо інший вигляд, ніж для класичних цефеїд).

Одночасно з видимою зоряною величиною в цефеїд змінюється їхній спектр. За зсувом його інтенсивності виявлено, що в цефеїд періодично (з періодом зміни блиску) змінюється температура в середньому на 1500 градусів.

Теоретичні розрахунки й практичні спостереження показують, що тільки зорі-гіганти й надгіганти проходять через стадію цефеїд. Період пульсацій зорі залежить від середньої густини її речовини й підкоряється

такій закономірності: $P = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho}} = \frac{0,12}{\sqrt{\rho}}$, де P — період пульсацій у добах;

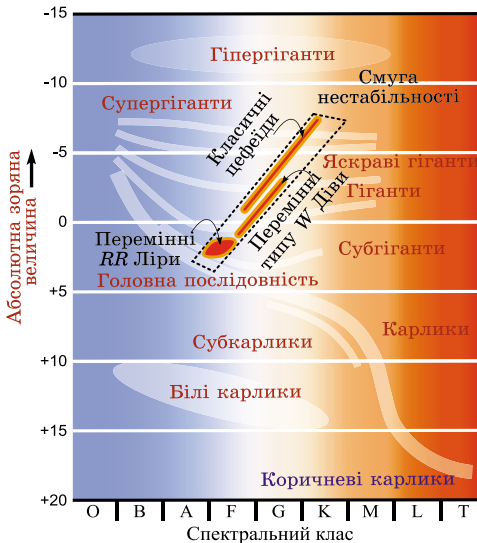
ρ — середня густина (в одиницях середньої густини Сонця). Середня густина речовини цефеїди становить близько 10^{-2} кг/м³.

Цефеїди з більшою масою мають більшу світність, більший радіус, але меншу густину і відповідно більший період пульсації, тобто цефеїди мають важливу залежність «період–світність» (мал. 4.20). Ця залежність описується виразом: $M = -1,25 - 3,00 \lg P$, де P — період зміни блиску в добах; M — середня абсолютна зоряна величина. Таким чином, за відомим зі спостережень періодом можна визначити абсолютну зоряну величину або світність зорі. Порівнюючи її із спостережуваною видимою зоряною величиною, можна визначити відстань до цефеїди. Велика світність і змінність блиску дають змогу виявляти цефеїди аж до відстаней 20 Мпк. Їх спостерігають у найближчих галактиках, визначаючи таким способом відстані до цих зоряних систем.

Цефеїди образно називають маяками Всесвіту. На цей час у нашій Галактиці відомо понад 800 класичних цефеїд, а їхня очікувана кількість перевищує 6000. Також відомо кілька тисяч їх у Магелланових Хмарах та інших галактиках. Телескоп «Габбл» вирізняє кілька десятків класичних цефеїд у галактиці NGC 4603, відстань до якої становить 100 млн світлових років.

Зорі, блиск яких раптово збільшується в тисячі й мільйони разів за кілька діб, після чого їхній блиск слабшає до початкового блиску протягом року

й більше, називають **новими зорями**. Термін «нова зоря» не має на увазі, що зоря народилася. Так називають зорі, які раніше були тьмяними, а потім раптово їхній блиск збільшився. Наприклад, одна з нових зір, що спалахнула в червні 1918 р., збільшила свій блиск за 4 дні з 11-ї до 0,5-ї зоряної величини (тобто в 40 тис. разів), а потім прийняла попереднє значення блиску за період близько 1,5 року. Спостереження показують, що новими зорями, що спалахують, є гарячі білі карлики спектральних класів O – B , які мають абсолютну зоряну величину близько 4^m – 5^m . Під час спалаху ці зорі збільшують свій блиск на 7^m – 16^m зоряних величин. За час спалаху нова зоря випромінює енергію близько 10^{38} Дж (така енергія випромінюється Сонцем приблизно за 100 тис. років!).



Мал. 4.20

Причиною вибуху нових зір є обмін речовини між компонентами тісних подвійних пар, до яких належать всі детально досліджені колишні нові зорі. Часто нові зорі спалахують неодноразово. Якщо спалах повторюється, таку зорю називають **повторною новою**.

Наднові зорі — одне з найграндіозніших і захоплюючих космічних явищ. Надновими називають зорі, що спалахують подібно до нових і досягають у максимумі абсолютної зоряної величини від -18^m до -19^m . Окремі наднові в максимумі блиску перевищують світність Сонця в десятки мільярдів разів, досягаючи абсолютної зоряної величини $M = -20^m \div -21^m$.

У китайських літописах згадується про раптову появу в 1054 р. у сузір'ї Тельця «зорі-гості», яку спостерігали китайські та японські астрономи, що здавалася яскравішою від Венери, її було видно навіть удень. Через 2 місяці ця зоря почала згасати, а ще через кілька місяців зовсім зникла з поля зору.

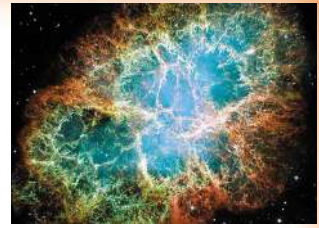
У наш час за допомогою досить потужних телескопів у цьому сузір'ї можна побачити туманність загадкової форми, що нагадує краба, який пливе у воді. Туманність так і назвали — Крабоподібною (мал. 4.21). Спостереження показали, що вона розширюється. З урахуванням швидкості розширення можна вважати, що Крабоподібна туманність — це залишок вибуху наднової зорі в 1054 р.

Уперше термін «нова зоря» застосував **Тихо Браге (1546–1601)**, описуючи яскраву зорю, що з'явилася в 1572 р. у сузір'ї Кассіопеї. Незважаючи на те що за нинішніми уявленнями ця назва є не зовсім правильною (спалах означає не народження зорі, а її загибель), вона й зараз використовується в астрономії. Найпотужніші вибухи зір, що гинуть, стали за аналогією називати надновими.

У нашій Галактиці за останнє тисячоліття зареєстровано кілька випадків спалахів наднових зір. Найяскравіша наднова зоря, яку спостерігали за допомогою сучасної техніки, з'явилася в 1987 р. в одній з найближчих галактик — Великій Магеллановій Хмарі (мал. 4.22).

Зоря спалахує внаслідок колапсу свого масивного ядра. Відбувається це так. На різних етапах життя масивної зорі в її ядрі проходять термоядерні реакції, при яких спочатку водень перетворюється на гелій, потім гелій на вуглець і т. д. до утворення ядер елементів групи заліза (Fe, Ni, Co). Поступово зоря ще більше «розширюється» (мал. 4.23).

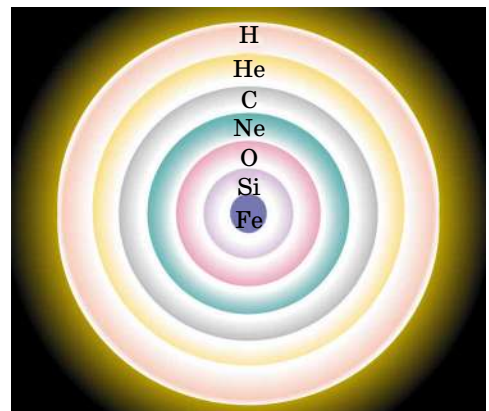
Ядерні реакції з утворенням ще більш важких хімічних елементів відбуваються з поглинанням енергії, тому зоря починає охолоджуватися й стискатися. Внутрішні шари немов обвалюються до центра зорі; виникає ударна хвиля, що рухається назад від центра зорі, унаслідок чого зовнішні шари зорі викидаються з величезною швидкістю. У результаті катастрофічної зміни структури зорі відбувається спалах наднової.



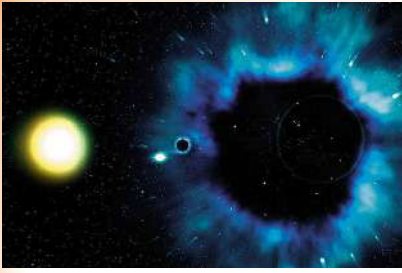
Мал. 4.21



Мал. 4.22



Мал. 4.23



Мал. 4.24



Мал. 4.25



Мал. 4.26

Під час вибуху звільняється енергія порядку 10^{46} Дж. Таку енергію наше Сонце здатне випромінювати мільярди років. Від величезної зорі залишаються тільки газова оболонка, що розширюється з великою швидкістю, і нейтронна зоря (або пульсар). **Пульсар** — нейтронна зоря, яка швидко обертається і для якої характерне радіовипромінювання, що пульсує з періодом, який дорівнює періоду обертання зорі. Густина цієї кулі — **нейтронної зорі** — дивовижно велика: вона може становити 10^{17} – 10^{18} кг/м³.

Якщо в надрах зорі відсутні сили, які протидіють її стисканню під дією сил гравітації, то зоря й надалі стискатиметься. Густина речовини продовжуватиме збільшуватися. У результаті масивна зоря на заключному етапі своєї еволюції перетворюється у надзвичайно стиснутий об'єкт — **чорну діру** (мал. 4.24). Поле тяжіння на межі чорної діри таке велике, що сигнали від цього об'єкта не виходять назовні (звідси походить її назва).

Інакше кажучи: гравітаційне поле чорної діри таке сильне, що навіть світло не в змозі його подолати.

Критичний радіус, до якого має стиснутися зоря, щоб перетворитися на чорну діру, називають гравітаційним радіусом (r_g), або радіусом Шварцшильда. Для

масивних зір r_g становить кілька десятків кілометрів, і його можна визначити за формулою: $r_g = \frac{2GM}{c^2}$, де G — гравітаційна стала; M — маса зорі;

c — швидкість поширення світла. За теорією відносності, речовина має бути стиснутою в мікроскопічно малому об'ємі простору в центрі чорної діри. Цей стан називають **сингулярністю**.

Межу чорної діри називають **горизонтом подій**. Якщо чорні діри безпосередньо спостерігати не можна, то пошуки їх становлять великі труднощі. Найчастіше чорну діру виявляють так: 1) якщо діра утворилася в подвійній системі зір, то її положення можна визначити за обертанням другого компонента навколо «порожнього місця» (мал. 4.25); 2) під час падіння речовини на чорну діру має виникати потужне рентгенівське випромінювання. Джерела такого випромінювання (Лебідь X-1, Скорпіон X-1 тощо) зареєстровані як «кандидати» в чорні діри. Чорні діри також можуть існувати й спостерігатися як постійно взаємодіючі з речовиною в ядрах галактик і в квазарах.

Нещодавно НАСА вперше сфотографувала гігантську чорну діру в центрі далекої галактики (мал. 4.26). Надмасивна чорна діра масою 21 млн Сонць розміщена в середині надгустої галактики *M60-UCD1*. Карликова галактика настільки густа, що мільйони зір заповнюють небо. Оскільки світло не може вирватися із чорної діри, вона є просто силуетом на зоряному фоні. Інтенсивне гравітаційне поле чорної діри спотворює світло фонових зір, утворюючи кільцеві зображення прямо за темними краями горизонту подій чорної діри.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Чим відрізняються фізично-змінні зорі від затемнено-змінних зір?
2. Що таке цефеїди? Чому їх називають «маяками Всесвіту»?
3. Яка причина пульсацій цефеїд?
4. У чому відмінність нової зорі від наднової?
5. Чи часто спостерігають нові й наднові зорі?
6. Які причини вибуху нових і наднових зір?
7. Який об'єкт називають чорною дірою? Якими властивостями володіє чорна діра?



Розкрийте механізм радіовипромінювання пульсара.

§ 24. НАША ГАЛАКТИКА. МОЛОЧНИЙ ШЛЯХ. БУДОВА ГАЛАКТИКИ. МІСЦЕ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ В ГАЛАКТИЦІ

Ще в далеку давнину люди помічали на безхмарному нічному небі в ясну безмісячну ніч, що із заходу на схід через зеніт тягнеться добре помітна світла смуга — **Чумацький Шлях (Молочний Шлях)**. Вона нагадувала їм розлите молоко, яке, за легендою, розлила Гера, що спускалася на Землю.

Українці здавна по-різному називали нашу Галактику. **Чумацький Шлях** — найпоширеніша з них. Згідно з легендою чумаки їздили до Криму по сіль, орієнтуючись уночі на світлу смугу на небі. **Божа Дорога** — давня українська назва Чумацького Шляху. Цією дорогою нібито в золотій колісниці їздить пророк Ілля (християнський наступник давньоукраїнського Перуна) і гримить, метаючи золоті стріли блискавиць у демонів.

Давні греки Чумацький Шлях назвали Галактикою (від грец. γαλα — «молоко»). У 1609 р. Галілей у телескоп виявив, що Чумацький Шлях складається з величезної кількості слабких зір. Тоді виникла гіпотеза про те, що Сонце, усі видимі зорі, у тому числі й зорі Чумацького Шляху, належать до однієї величезної системи. Таку систему назвали **Галактикою**.

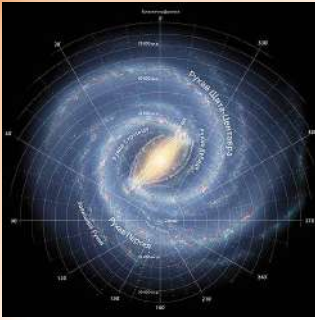
Наша Галактика — це велетенський зоряний острів, до складу якого входить Сонце й Сонячна система. Більшість зір Галактики, а їх за сучасними оцінками налічується понад 200 млрд, сконцентрована в плоскому диску, що його ми бачимо на небі як світлу смугу Чумацького Шляху, а також у спіральних відгалуженнях. У центрі Галактики є компактне згущення речовини — ядро, фізична природа якого та фізичні процеси, що відбуваються в ньому, є предметом детального вивчення.

Чумацький Шлях проходить через обидві півкулі по великому колу небесної сфери (мал. 4.27). Лінію, що йде вздовж середини Чумацького Шляху, названо **галактичним екватором**, а площину, що його утворює, — **галактичною площиною**. Галактична площина нахилена до площини небесного екватора під кутом 63°. Слід розуміти, що термін «галактика» належить до зоряної системи, а термін «Молочний Шлях» — до її світлої проекції на небесну сферу.

Кількісні підрахунки зір у різних напрямках від галактичного екватора почав ще Гершель у 70-х рр. XVIII ст. Вибіркові підрахунки показали, що число зір різко зменшується по обидва боки від галактичної площини. Подальшими дослідженнями було встановлено, що всі зорі неба утворюють єдину зоряну систему.



Мал. 4.27



Мал. 4.28



Мал. 4.29

У Чумацькому Шляху зосереджена основна частина зір Галактики — величезної зоряної системи, що має форму плоского лінзоподібного диска (мал. 4.28, 4.29 комп'ютерні моделі).

Дуже довгими були суперечки про її розміри, масу, структуру розміщення зір. Тільки у XX ст. було встановлено, що вона є спіральною галактикою у вигляді великого диска з перемичкою. Діаметр Галактики складає близько 30 тис. парсеків (близько 100 000 св. років, 1 квінтільйон км), а середня товщина близько 1000 св. років. Галактика містить близько 200 млрд зір (за сучасними даними, від 200 до 400 млрд). Основна частина зір розміщена у формі плоского диска. Згідно з останніми даними, маса Галактики оцінюється в $3 \cdot 10^{12}$ мас Сонця, або $6 \cdot 10^{42}$ кг. Більша частина маси Галактики міститься не в зорях і міжзоряному газі, а в темному гало з темної матерії.

Сонячна система в Галактиці перебуває далеко від центра на відстані 10 кпк (30 000 св. р.) і лежить майже на галактичній площині. Центр Галактики міститься в сузір'ї Стрільця в напрямку на $\alpha = 17^h 46,1^m$, $\delta = -28^\circ 51'$.

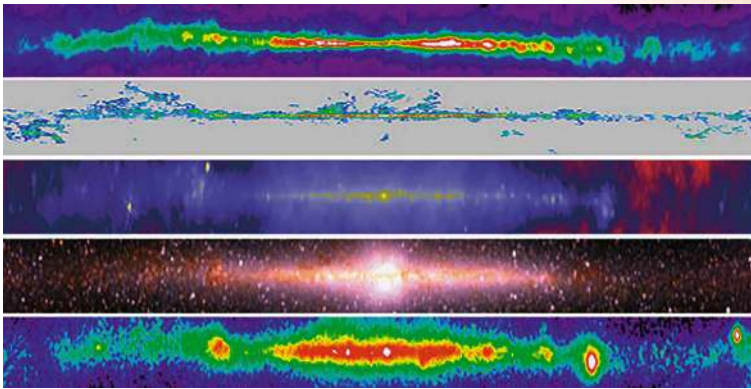
Частина зір нашої Галактики не входить до складу диска, а утворює сферичну складову — **зоряне гало**, радіус якого не менше ніж 20 кпк. Гало оточує дуже розріджена й величезна за розмірами (50–60 кпк) зовнішня частина Галактики — **корона**. Галактика має складну спіральну структуру у вигляді спіральних рукавів. Кулясте стовщення в середині диска одержало назву **балдж** (від англ. *bulge* — «здуття»). Найбільш густу й компактну центральну частину Галактики, розташовану в сузір'ї Стрільця, називають **ядром**.

Дослідження процесів, що відбуваються в центральній частині Галактики, дають змогу припустити, що в ядрі є надмасивна чорна діра. Ядро Галактики — малодосліджена частина, тому що схована від нас газопиловими хмарами й зорями. Ця частина нашої зоряної системи має дуже високу активність і випромінює в радіо-, інфрачервоному й рентгенівському діапазонах довжин хвиль. Маса ядра — кілька десятків мільйонів мас Сонця.

Якщо говорити про масу видимої речовини нашої Галактики, то приблизно 95 % її припадає на зорі, а близько 5 % — на міжзоряний газ і пил. Простір Галактики пронизано потоками заряджених частинок величезних енергій, а на міжзоряний газ діє магнітне поле.

Під час вивчення Галактики труднощі спричиняє наше внутрішнє положення в цій зоряній системі; поглинання випромінювання далеких галактичних об'єктів міжзоряною матерією. Ці труднощі можна подолати, якщо вивчати Галактику в усіх діапазонах електромагнітних хвиль. Там, де ми чогось не можемо спостерігати безпосередньо, слід звертатися до теоретичних міркувань та комп'ютерних моделей (мал. 4.30), що допомагають відновлювати ті ланки процесів та явищ, яких не вистачає.

За межами нашої Галактики є безліч інших зоряних систем, які ми можемо спостерігати збоку, у різних ракурсах і на різних стадіях розвитку. Порівнюючи їх одна з одною та з нашою Галактикою, виявляючи їхні подібність і відмінність, з'ясовуючи причини цього, ми пізнаємо загальні закономірності будови та еволюції цих зоряних систем, а отже, і нашого зоряного острова.



Атомний Гідроген

Ча́дний газ

Радіодіапазон

ІЧ-діапазон

Гамма-діапазон

Мал. 4.30

Структурними складовими Галактики є **зоряні скупчення**. Зоряні скупчення — це гравітаційно пов'язані групи зір, які мають загальне походження. Зоряні скупчення рухаються в полі тяжіння Галактики як єдине ціле. За зовнішнім виглядом вони поділяються на розсіяні й кулясті.

Розсіяні зоряні скупчення не мають правильної форми порівняно з групою зір, що містить від кількох сотень до кількох тисяч зір. Розміри таких скупчень — від 6 до 14 пк. Найближчі до нас розсіяні зоряні скупчення — Плеяди й Гіади — розміщені в сузір'ї Тельця. Неозброєним оком можна розрізнити в Плеядах 5–7 слабких зір, що розміщуються у вигляді маленького ковша (мал. 4.31).

Скупчення Гіади не досить компактне, але містить багато яскравих зір. На цей час відомо понад 1500 розсіяних зоряних скупчень. Усі вони концентруються у галактичній площині та, подібно до інших об'єктів плоскої складової Галактики, беруть участь в обертанні навколо її центра. Загальне число розсіяних скупчень у Галактиці — $2 \cdot 10^4$ об'єктів.

Кулясті зоряні скупчення мають сферичну або еліпсоїдальну форму, вони нараховують від десятків тисяч до мільйонів зір. Діаметри таких зоряних скупчень — у межах від 20 до 100 пк. Просторова концентрація зір різко зростає до центра скупчення, досягаючи десятків тисяч у кубічному парсеку (на околицях Сонця — $0,13 \text{ пк}^{-3}$). Кулясті скупчення утворюють протяжне гало навколо центра Галактики, сильно концентруючись до нього. Усього в Галактиці відкрито близько 200 кулястих скупчень, а їхнє загальне число — близько 500 (мал. 4.32). Зоряне «населення» кулястих скупчень складається з давно проеволюційонованих зір — червоних гігантів і надгігантів. Кулясті скупчення нашої Галактики — одні з найстаріших. Їхній вік становить 10–15 млрд років.

Зоряні асоціації — угруповання гравітаційно не пов'язаних або слабо пов'язаних між собою молодих зір (віком до кількох млн років), об'єднаних спільним походженням.

Туманність — внутрішньогалактична хмара розріджених газів і пилу. За типом зоряного «населення» асоціації поділяють на: **ОВ-асоціації**,



305

Мал. 4.31



Мал. 4.32

що здебільшого складаються з гарячих зір спектральних класів *O* та *B*; ***T*-асоціації**, характерні об'єкти яких — змінні зорі типу *T* Тельця.

Поділ на *OB*- та *T*-асоціації є досить умовний, оскільки зорі типу *T* Тельця виявлено в усіх близьких до Сонця *OB*-асоціаціях. Однак багато *T*-асоціацій не мають зір класів *O* або *B*. Пізніше Сідні ван ден Берг (1929) запропонував позначення *R* для асоціацій, що висвітлюють відбивні туманності.

Зоряні асоціації виявив Віктор Амбарцумян (1908–1996) у 1948 р. й передбачив їхній розпад. Пізніше дослідження астрономів підтвердили факт розширення зоряних асоціацій. Згодом було виявлено, що високі концентрації та малі дисперсії швидкостей зір у *T*-асоціаціях свідчать про їхню стійкість.

На відміну від молодих розсіяних скупчень, зоряні асоціації мають більші розміри — десятки парсеків (ядра розсіяних скупчень — одиниці парсеків) та меншу густину зоряного «населення»: кількість зір в асоціації становить від кількох десятків до сотень, маса — 10^2 – $10^4 M_{\odot}$, тоді як розсіяні скупчення налічують сотні тисяч і більше зір.

Своїм походженням зоряні асоціації завдячують областям зореутворення з масивним комплексом молекулярних хмар.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яка будова нашої Галактики? Які об'єкти входять до складу нашої Галактики?
2. Яке положення Сонячної системи в Галактиці?
3. Чим відрізняються зорі диска Галактики від зір гало?
4. Як розподілені кулясті скупчення в Галактиці? Чим вони відрізняються від розсіяних скупчень?



Дайте характеристику різним видам галактик і розкажіть, де їх можна спостерігати.

§ 25. МІЖЗОРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

На фоні світлих областей Чумацького Шляху чітко виділяються темні плями неправильної форми й різних кутових розмірів. Ці плями й області доводять існування поблизу галактичної площини холодної розрідженої матерії.

Міжзоряне середовище — це речовина й поля, що заповнюють міжзоряний простір усередині Галактики. Велика частина маси міжзоряної речовини — це розріджений газ і пил.

Усе міжзоряне середовище пронизується магнітними полями, космічними променями, електромагнітним випромінюванням. Основний компонент міжзоряного середовища — міжзоряний газ, що складається з водню (70 % маси) і гелію (28 %). Інша частина маси міжзоряної речовини — це більш важкі хімічні елементи (O, C, N, Ne, S, Ar, Fe тощо).

Загальна маса міжзоряної речовини нашої Галактики (без корони) становить 2 % від загальної маси всієї Галактики. Залежно від температурних умов і густини міжзоряного газу вона може перебувати в трьох різних станах: йонізованому, атомарному та молекулярному.

Основні дані про міжзоряний газ отримано радіоастрономічними методами, після того як у 1951 р. було виявлено радіовипромінювання нейтрального атомарного водню на хвилі завдовжки 21 см. Виявилося, що атомарний водень, що має температуру 100 К, утворює у диску Галактики тонкий шар завтовшки 200–300 пк, що збільшується до кількох кілопарсеків на відстані 15–20 кпк від її центра.

Основна частина міжзоряного газу зосереджена в спіральних гілках Галактики, де він розподілений нерівномірно: зібраний у клоччасті утво-

рення розмірами десятки, а то й сотні, парсеків із середньою концентрацією декілька атомів в 1 см^3 . Близько половини маси міжзоряного газу міститься в гігантських молекулярних хмарах із середньою масою 10^5 мас Сонця та діаметром близько 40 пк. Через низьку температуру (близько 10 К) і підвищену густину (до 10^3 частинок в 1 см^3) водень й інші елементи в цих хмарах об'єднані в молекули.

Області йонізованого водню з температурою 8000–10 000 К проявляють себе в оптичному діапазоні як світлі дифузні туманності. Їхнє світіння збуджується ультрафіолетовим випромінюванням близькорозміщених гарячих зір (спектральних класів *B* і *O*).

Світла туманність випромінює світло, якщо її освітлює прилегла зоря. Зорі класу *W*, *O*, *B* здатні спричиняти йонізацію атомів Гідрогену на відстані приблизно 500 св. років.

Світлі дифузійні туманності мають неправильну, клоччасту форму й досягають розмірів до 10 пк, а їхня густина — від 10^{-17} до 10^{-20} кг/м^3 . Розподіляються області такого йонізованого водню в плоскій підсистемі Галактики. Так, у Великій туманності Оріона за допомогою космічного телескопа «Габбл» виявлено протозорі, оточені протопланетними дисками.

Туманність Оріона (мал. 4.33) — найяскравіша дифузна туманність, яку можна спостерігати із Землі навіть неозброєним оком (блиск становить 4^m). Відстань до цієї туманності близько 1000 св. років.

Якщо прилеглі зорі не такі гарячі й не можуть йонізувати водень, то туманність світиться за рахунок відбивання зоряного світла. Ці туманності містять багато пилу.

У центрі планетарної туманності перебуває залишок загиблого червоного гіганта — гарячий білий карлик або нейтронна зоря. Під дією внутрішнього тиску газу планетарна туманність розширюється приблизно зі швидкістю 20–40 км/с, при цьому густина газу зменшується. Ці об'єкти збагачують міжзоряне середовище речовиною.

Планетарна туманність Піскові Годинники (мал. 4.34) показує, які складні процеси можуть відбуватися на останній стадії еволюції зорі.

У міжзоряному просторі розсіяні дрібні тверді частинки (металеві, силікатні або графітові) розмірами від 0,01 до 1 мкм. Тугоплавкі частинки утворюються й попадають у міжзоряне середовище за рахунок розширення оболонки нових і наднових зір, планетарних туманностей, холодних червоних гігантів і надгігантів. У міжзоряному просторі пил скрізь супроводжує газ. Його частка становить близько 1 % від маси газу.

У міжзоряних хмарах дрібні порошини швидко обростають оболонками з найпоширеніших елементів (H, C, N, O). За мільйони років навіть за низької температури в оболонках відбуваються складні хімічні процеси з утворенням молекул води, етилену, синильної кислоти, етилового спирту тощо. Зареєстровано близько 90 типів молекул, деякі з них містять до 13 атомів.

Через пил найгустіші газові утворення — молекулярні хмари — практично непрозорі й мають вигляд на небі як темні області, майже позбав-



Мал. 4.33



Мал. 4.34



Мал. 4.35



Мал. 4.36

лені зір (мал. 4.35). Такі газопилові утворення називають **темними дифузними туманностями**.

Завдяки розвитку позаатмосферної астрономії з'явилася можливість спостерігати міжзоряний пил не тільки в нашій, але й у сусідніх галактиках. У результаті вчені дійшли висновку, що властивості пилу у Всесвіті мало чим відрізняються від властивостей пилюнок Чумацького Шляху. Космічним телескопом «Габбл» було зафіксовано, який вигляд має сузір'я Оріона в променях Сонця (мал. 4.36).

Таким чином, міжзоряний пил — це дрібні тверді частинки неправильної форми розміром від 0,01 до 1 мкм. Вони складаються з тугоплавкого ядра й оболонки з летких сполук. Пил відіграє активну роль і як істотний компонент бере участь у процесах, що протікають у Всесвіті.

308

Крім розрідженого газу й пилу, у міжзоряному просторі з величезними швидкостями, близькими до швидкості поширення світла, рухається велика кількість елементарних частинок і ядер різних атомів. Потоки цих частинок називають **космічними променями**. Вони пронизують весь міжпланетний і міжзоряний простір. На площу в 1 м² щомиті потрапляє в середньому близько 10 тис. різних частинок. У складі космічних променів є електрони, ядра атомів Гелію та більш важких елементів, але в основному переважають протони (понад 90 %), які мають середню енергію $1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Не всі частинки, що утворюють космічні промені, приходять до нас із глибин Всесвіту. Багато з них мають сонячне походження, народжуючись під час спалахів Сонця. Основними джерелами космічних променів у Галактиці є залишки наднових зір і пульсарів. Перший доказ існування міжзоряного магнітного поля отримав італійський фізик **Енріко Фермі** (1901–1954) та американський учений **Едвард Теллер** (1908–2003) під час вивчення космічних променів.

Електрони, що входять до складу космічних променів, поступово гальмуються в магнітному полі, втрачаючи енергію на випромінювання радіохвиль. Таке випромінювання називають синхротронним. Воно реєструється радіотелескопами. Потужними джерелами синхротронного випромінювання є залишки наднових зір. Спостереження показують, що синхротронне випромінювання приходить до нас з областей міжзоряного простору, де немає залишків наднових зір. Отже, магнітне поле існує й там.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що розуміють під міжзоряним середовищем? Чим воно заповнене?
2. Яка маса міжзоряної речовини нашої Галактики?
3. Що розуміють під туманностями? Назвіть основні види туманностей. Чому одні туманності світлі, інші — темні?
4. З яких спостережень можна зробити висновок про існування міжзоряного пилу? Що собою являє міжзоряний пил?
5. Чи можна побачити без приладів міжпланетний пил? Яке походження газопилових туманностей і молекулярних хмар?

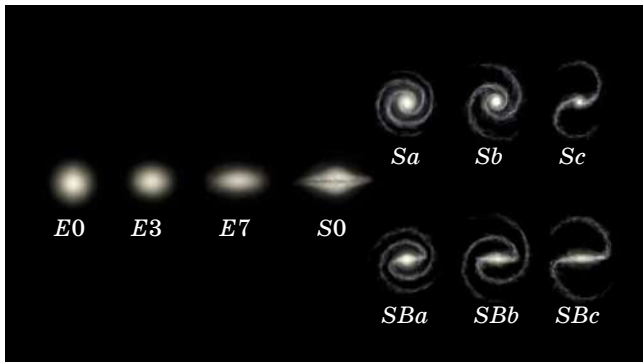
§ 26. ЗОРЯНІ СИСТЕМИ — ГАЛАКТИКИ. СВІТ ГАЛАКТИК

У 1924 р. за допомогою найбільшого на той час телескопа (обсерваторія Маунт Вілеон, США) Едвін Габбл установив, що Туманність Андромеди утворена величезною кількістю зір, що зливаються в суцільну туманну пляму через величезну віддаленість. Більшість інших відомих туманностей виявилися такими самими гігантськими системами, що складаються з мільйонів і мільярдів зір. Гігантські гравітаційно зв'язані системи зір і міжзоряну речовину, розташовані поза нашою Галактикою, стали називати **галактиками**. Сучасні потужні телескопи зробили доступною реєстрацію сотень мільярдів галактик.

Фото показали, що галактики розрізняються за зовнішнім виглядом та структурою. Габбл запропонував класифікувати галактики за їхньою формою, його класифікація стала основою сучасної класифікаційної схеми. Відповідно до сучасної класифікації розрізняють галактики таких основних типів: еліптичні (*E*), спіральні (*S*), неправильні (*I*,) і лінзоподібні (*S*₀) (мал. 4.37).

Еліптичні галактики (мал. 4.38) у проекції на небесну сферу мають вигляд кола або еліпса. Число зір у них плавно зменшується від центра до краю. Зорі обертаються в таких системах у різних площинах. Самі еліптичні галактики обертаються дуже повільно. Вони містять тільки жовті й червоні зорі, практично не мають газу, пилу й молодих зір високої світності. Фізичним характеристикам цих галактик властивий досить широкий діапазон: діаметри — від 5 до 50 кпк, маси — від 10^6 до 10^{13} мас Сонця, світності від 10^6 до 10^{12} світностей Сонця. Близько 25 % вивчених галактик належать до галактик еліптичного типу.

309



Мал. 4.37



Мал. 4.38

Близько половини вивчених галактик належать до спірального типу. **Спіральні галактики** — це сильно сплюснені системи із центральним згущенням (у якому є ядро галактики) і з помітною спіральною структурою. Розміри цих галактик сягають 40 кпк, а світності — 10^{11} світностей Сонця. Навколо згущеного диска є дві або більше клоччастих спіральних гілок (рукавів, мал. 4.39). Так, до габблівських типів спіральних галактик належить галактика *M81*, тип *Sa*, система з туго закрученими спіральними краями, куляста частина яскрава й протяжна (мал. 4.39, *a*). Галактика *M51* належить до типу *Sb*, має могутні й чіткі спіралі, центральна частина менш виділяється (мал. 4.39, *б*). Галактика *M101* належить до типу *Sc*, це система з розвинутою спіральною структурою, куляста частина якої слабо проглядається на загальному фоні (мал. 4.39, *в*).



а



б



в

Мал. 4.39



Мал. 4.40



Мал. 4.41



Мал. 4.42



Мал. 4.43

Приблизно половина спіральних галактик у центральній частині має майже пряму зоряну перемичку — **бар**, від якої починають закручуватися спіральні рукави (мал. 4.40). Такі галактики називають **спіральними з перемичкою**.

У спіральних гілках галактик зосереджено найяскравіші й молоді зорі, яскраві газопилові туманності, молоді зоряні скупчення та зоряні комплекси. Тому спіральний візерунок чітко видно навіть у далеких галактик, хоча на частину спіральних рукавів припадає всього кілька відсотків маси всієї галактики. Наша Галактика є спіральною. Найближча зоряна система, схожа за структурою й типом на нашу Галактику, — це Туманність Андромеди (мал. 4.41). Світло від цієї галактики доходить до нас приблизно за 2 млн років.

До неправильних галактик належать галактики малої маси з неправильною структурою. У них не спостерігається чітко вираженого ядра та обертальної симетрії. Видиму яскравість таких галактик створюють молоді зорі високої світності та ділянки йонізованого водню. Маси неправильних галактик становлять від 10^8 до 10^{10} мас Сонця, розміри цих галактик сягають 10 кпк, а їхні світності не перевищують 10^{10} світності Сонця. У таких галактиках міститься багато газу — до 50 % їхньої загальної маси. Найближчими до нас яскравими неправильними галактиками є Магелланові Хмари (Велика й Мала). Вони ніби дві тьмяні хмарини, що сріблясто світяться в гарну погоду на нічному небі. Вони розташовані в Південній півкулі й тому невидимі з території України.

Велика Магелланова Хмара (мал. 4.42), що має в діаметрі 7 кпк, розташована від нас на відстані 52 кпк. На думку деяких астрономів, у Магелланових Хмарах можна розрізнити зачатки спіральної структури.

Лінзоподібні галактики. Зовні, якщо видно їх у площині, вони дуже схожі на еліптичні, але мають сплюснений зоряний диск (мал. 4.43).



Мал. 4.44

За своєю структурою подібні до спіральних галактик, однак не мають плоскої і спіральної складових. Від спіральних галактик, спостережуваних з ребра, лінзоподібні галактики відрізняються відсутністю смуги темної матерії. Німецький астроном **Карл Шварцшильд** (1873–1916) висунув теорію, відповідно до якої лінзоподібні галактики можуть утворюватися зі спіральних у процесі «вимітання» газопилової матерії.

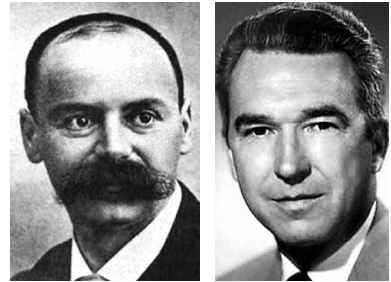
У більшості галактик можна виділити яскраву центральну частину — ядро (мал. 4.44). Ця область відрізняється великою зоряною густиною — 10^6 – 10^8 пк³. Але, незважаючи на це, зіткнень ядер і зір у цій області не відбувається.

Дослідження останніх років показали, що ядро — не просто велике густе місце галактики: у самому центрі його можна виявити ще одне згущення — ядерце. Так, при спостереженні ядра Туманності Андромеди (його розміри близько 100 пк) вдалося виділити яскраве ядерце з поперечником 1–14 пк. Воно обертається як тверде тіло (з періодом обертання 500 тис. років).

Маса ядерця становить приблизно 13 млн сонячних мас. Густина — близько 1500 сонячних мас на 1 пк³, це в 20 тис. разів більше, ніж біля Сонця. Ядерце поводить себе так, начебто це самостійне утворення, «вкладене» у галактику. Радіодослідження нашої Галактики показали, що в її центрі також є ядерце розміром приблизно 6 пк.

У ядрах деяких галактик відбувається величезне виділення енергії, яке не можна пояснити випромінюванням або вибухами звичайних зір. Такі галактики одержали назву **галактики з активними ядрами** або **сейфертівські галактики** (на честь американського астронома **Карла Сейферта** (1911–1960), який уперше описав їх у 1943 р.).

Форми прояву активності ядер сейфертівських галактик, або просто сейфертів, різні. Це може бути величезна потужність випромінювання в інфрачервоній, оптичній або рентгенівській області спектра, причому змінюється за порівняно невеликий час (за кілька років, місяців або навіть

Карл
ШварцшильдКарл
Сейферт



Мал. 4.45



Мал. 4.46

днів). У деяких випадках спостерігається швидкий рух газу в ядрі (зі швидкостями, близькими до 1000 км/с).

Іноді газ утворює довгі прямолінійні газові струмені (**джети**, мал. 4.45).

Найімовірніша гіпотеза, що пояснює активність ядер, припускає наявність чорної діри в центрі галактики.

Близько розташовані одна до іншої галактики іноді бувають пов'язані між собою смугою світної матерії. Часто ці світлі блакитного кольору смуги є продовженням спіральних областей. Смуги складаються з гарячих молодих зір. Нерідко галактики занурені в загальний «зоряний туман», тоді їх називають **взаємодіючими**.

Багато дослідників вважають, що взаємодіючі галактики зближаються, а спостереження в сучасні великі телескопи показують, що серед них дуже багато таких, що зіштовхуються. Навіть наша Галактика є взаємодіючою.

Унікальний знімок телескопа «Габбл» наблизив до розгадки таємниці зародження Всесвіту. Те, що було зафіксовано на кадрі, виглядало катастрофічно: зіткнення двох величезних галактик *NGC 4490* і *NGC 4485*, що розташовані на відстані 24 млн св. років у сузір'ї Гончих Псів (мал. 4.46). Упродовж багатьох мільйонів років вони наближалися одна до одної, і зрештою це сталося. Щоправда, нині ми побачили світло події, що покинуло галактики 24 млн років тому і тільки зараз потрапило в об'єкти телескопа. Ця всесвітня катастрофа була осяяна рожевим світлом, що свідчить про скупчення йонізованого водню. Так, на думку науковців Європейської космічної агенції, зароджуються зорі.

Галактики зіштовхуються під впливом гравітаційного стиснення, результатом цього може бути гравітаційний колапс — катастрофічно швидке стискання масивних тіл під дією гравітації. Утворення зір вважається природним етапом еволюції Всесвіту.

Червоними кольорами світяться газопилові хмари, що падають на чорні діри в ядрах галактик, блакитним — молоді гарячі зорі, що народжуються завдяки збурюванню газопилових мас.

На початку 60 рр. XX ст. за радіовипромінюваннями було виявлено об'єкти, подібні до активних ядер галактик, — **квасари**. Слово «квazar» утворено від словосполучення «квазізоряні радіоджерела», тобто подібні до радіовипромінюючих зір.

Спектри квазарів мають яскраві емісійні лінії, сильно зміщені в червоний бік, як у далеких галактик. Відстані, визначені за червоним зміщенням, становлять більше ніж 5 млрд св. років. На фото квазари мають дуже яскравий вигляд порівняно з віддаленими галактиками й у радіодіапазоні випромінюють так само сильно, як близькі радіоджерела.

Природу активності радіовипромінювання квазарів точно не встановлено, однак впевнено можна стверджувати: 1) квазари — найвіддаленіші об'єкти, спостережувані у Всесвіті; 2) значна частина квазарів — ядра далеких галактик у стані дуже високої активності; 3) квазари — найпотужніші з відомих у природі джерел видимого й інфрачервоного випромінювань, тобто це космічні об'єкти з величезною поверхневою яскравістю випромінювання.

Відстані до далеких галактик визначають за їхніми кутовими розмірами або за видимою зоряною величиною, а до дуже далеких галактик — винятково за червоним зміщенням в їхньому спектрі.

Червоне зміщення (z) зазвичай вимірюється відносною зміною довжини хвилі спектральних ліній: $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$.

Ще в 1912–1914 рр. американський астроном **Весто Слайфер** (1875–1969) виявив, що лінії в спектрах далеких галактик зміщені відносно їхнього нормального положення у бік червоної області спектра. Це означало, що галактики віддаляються від нас зі швидкостями сотні кілометрів за секунду. Пізніше Габбл визначив відстані до деяких галактик та їхні швидкості. Зі спостережень випливало, що далі від нас перебуває галактика, то з більшою швидкістю вона віддаляється. Закон, за яким швидкість віддалення галактики пропорційна відстані до неї, одержав назву **закону Габбла: відносне збільшення довжин хвиль ліній у спектрах галактик пропорційне відстані r до них, тобто $r \sim (\lambda - \lambda_0) : \lambda_0$.**

Припускаючи, що явище червоного зміщення обумовлене рухом галактик зі швидкістю v_r за променем зору в напрямку від спостерігача, можемо визначити променеву швидкість галактики за виміряним відносним зміщенням довжини хвилі спектральних ліній: $v_r = c(\lambda - \lambda_0) : \lambda_0$.

З урахуванням закону Габбла останнє рівняння можна записати у вигляді:

$$v_r = Hr,$$

де H — коефіцієнт пропорційності — **стала Габбла**, яка показує, на скільки кілометрів за секунду збільшується швидкість галактик зі збільшенням відстані до них на 1 Мпк. Значення H постійно уточнюється, за різними оцінками воно міститься у межах від 50 до 80 км/(с·Мпк). Під час розрахунків найчастіше приймають $H = 75$ км/(с·Мпк). Закон Габбла виконується тільки для далеких галактик, відстань до яких перевищує 5–10 Мпк.

Вивчаючи велику кількість квазарів за допомогою космічного телескопа «Габбл», у 1995 р. вчені дійшли висновку, що недалеко квазари (із червоним зміщенням $z = 0,5$) пов'язані з взаємодіючими еліптичними галактиками. Багато квазарів розташовується в центрах подібних зоряних систем. Це підтверджує припущення, що квазари є масивними чорними дірами в центрах галактик, на які відбувається падіння речовини.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Схарактеризуйте типи галактик за класифікацією Габбла.
2. Чим еліптичні й неправильні галактики відрізняються від спіральних?
3. До якого типу належить наша Галактика?
4. Як, ґрунтуючись на спостереженнях, можна відрізнити зорі від квазарів?
5. Якими особливостями володіють квазари?



РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ

1. Сонце обертається навколо своєї осі в тому самому напрямку, як і Земля, тобто із заходу на схід. Яким ми бачимо це обертання, спостерігаючи із Землі?

Відповідь. З погляду земних спостерігачів і земних орієнтирів Сонце обертається навколо своєї осі зі сходу на захід проти годинникової стрілки, як і Земля.

2. Які явища характерні для Землі й Сонця в період високої сонячної активності?

Відповідь. Для Сонця: велика кількість сонячних плям (у фотосфері), спалахів (у хромосфері) і протуберанців (у короні), посилений сонячний

вітер. Для Землі: підвищена кількість й інтенсивність полярних сляів і збурень геомагнітного поля («магнітних бур»).

3. Головна послідовність на діаграмі «спектр–світність» це смуга, уздовж якої еволюціонують зорі, чи геометричне місце точок, де зорі перебувають більшу частину часу?

Відповідь. На головній послідовності розташовані зорі, у яких у центрі відбуваються термоядерні реакції. Цей стан зорі виявляється досить довгим, тому головна послідовність — це геометричне місце точок у площині «світність–температура», де зорі перебувають більшу частину свого життя.

4. Білий карлик має масу $0,6M_{\odot}$, світність $0,001L_{\odot}$ і температуру $2T_{\odot}$. У скільки разів його середня густина більша від сонячної?

Розв'язання

Як відомо, світність пропорційна R^2T^4 . Густина, таким чином, пропорційна M/R^3 або $MT^6/L^{3/2}$. Густина такого білого карлика в $1,2 \cdot 10^6$ разів перевершує сонячну.

5. Чому в речовині найстаріших зір Галактики дуже мало важких елементів, а в речовині наймолодших, навпаки, їхній уміст підвищений?

Відповідь. Старі зорі утворилися з важких елементів протогалактичної газової хмари. Масивні зорі, швидко еволюціонуючи, вибухали і збагачували газ протогалактики важкими елементами, що утворилися в них. Пізні покоління зір утворилися з речовин з більшим вмістом металів.

6. Характерний час регулярних змін блиску квазара 3С273 близько 10 років. Оцініть власні розміри цього квазара.

Відповідь. Розмір джерела випромінювання не має в цьому випадку перевищувати 10 св. років, тобто відстань, що проходить світло від далекого краю до ближнього краю об'єкта за 10 років. Оцінка розмірів не залежить від механізму зміни блиску.

314



ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ

4.1. Сонце називають жовтою зорею, тоді як для більшості людей воно має білий колір. Як пояснити це протиріччя?

4.2. За допомогою третього узагальненого закону Кеплера визначте масу Сонця.

4.3. На скільки зменшується за 1 рік маса Сонця внаслідок термоядерних реакцій?

4.4. Що знижує температуру всередині сонячних плям?

4.5. Яке явище астрономи називають сонячною активністю?

4.6. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?

4.7. Чому Сонце на горизонті, коли воно сходить і заходить, має червоний колір?

4.8. Коли Сонце заходить, його яскравість зменшується і тоді неозброєним оком можна побачити сонячні плями. Обчисліть мінімальний діаметр плями, яку ще можна побачити без оптичних приладів.

4.9. Які зорі мають найвищу температуру на поверхні і до якого спектрального класу вони належать?

4.10. Зорі якого кольору мають найвищу температуру на поверхні? Найменшу?

4.11. Чи існують зорі, маса яких менша, ніж маса Землі? Радіус яких менший, ніж радіус Землі?

4.12. Визначте радіус однієї з яскравих зір, яку видно ввечері у ваш день народження. Який вигляд мала б ця зоря на нашому небі, якби вона світила на місці Сонця?

4.13. Річний паралакс Веги (α Ліри) дорівнює 0,12. Яка відстань до неї у парсеках та світлових роках?

4.14. Визначте, у скільки разів зоря Капела (0^m) яскравіша за Полярну ($+2^m$).

4.15. Обчисліть радіус зорі Антарес, якщо вона має світність, у 6300 разів більшу, ніж Сонце, і температуру поверхні 3000 К.

4.16. У скільки разів Арктур (α Волопаса) більша від Сонця, якщо її світність більша в 100 разів від сонячної, а температура на поверхні — 4500 К?

4.17. Яка температура зорі порівняно із Сонцем, якщо її розмір такий самий, як і Сонця, а світність у 16 разів більша?

4.18. Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?

4.19. Визначте густину зорі білого карлика, який має діаметр 1000 км, а його маса дорівнює 10^{30} кг.

4.20. Визначте густину зорі Бетельгейзе, якщо її радіус у 400 разів більший від радіуса Сонця, а маса приблизно дорівнює масі Сонця.

4.21. Якою буде світність Сонця, якщо воно в майбутньому перетвориться на червоного гіганта з радіусом, у 10 разів більшим від сучасного, і з температурою 5000 К?

4.22. У центрі Сонця температура сягає 15 000 000 К, а в ядрі білих карликів температура — понад 30 000 000 К. Чому на Сонці відбуваються термоядерні реакції, а в надрах білих карликів — ні?

4.23. З яким періодом пульсувало б Сонце, якби воно перетворилося на цефеїду?

4.24. Які зорі входять у плоску складову Галактики?

4.25. Які структури мають галактики?

4.26. Чи можуть відбуватися зіткнення галактик?

4.27. Скільки обертів навколо центра Галактики зробило Сонце за період свого існування?

4.28. Чому ми не можемо побачити центр Галактики за допомогою оптичних телескопів?

4.29. Як за допомогою спектрів можна визначити відстань до далеких квазарів?



ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

Контрольні запитання

1. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?
2. Що є джерелом енергії Сонця?
3. У чому відмінність між видимою та абсолютною зоряними величинами?
4. Як астрономи вимірюють температуру зір?
5. Чи може зоря червоний карлик перетворитися в білий карлик?
6. Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?
7. Які структури мають галактики?
8. Як за допомогою закону Габбла можна виміряти відстань до галактик?

Що я знаю і вмю робити

● Я вмю розв'язувати астрономічні задачі

1. Визначте радіус однієї з яскравих зір, яку видно увечері у ваш день народження. Який вигляд мала б ця зоря на нашому небі, якби вона світила на місці Сонця?

2. Визначте густину зорі Бетельгейзе, якщо її радіус у 400 разів більший за радіус Сонця, а маса приблизно дорівнює масі Сонця.

3. Космічний корабель стартував з поверхні Землі з третьою космічною швидкістю. Скільки часу триватиме політ до межі Сонячної системи, що перебуває на відстані 100 000 а. о. від Сонця? (*Порада.* Можна вважати,

що корабель летить по величезному еліпсу, у перигелії відстань до Сонця 1 а. о., а в афелії — 100 000 а. о.)

● **Я вмію користуватися картою зоряного неба**

4. Самостійно відшукайте на небі яскраві зорі, які позначено на карті зоряного неба. Намалюйте яскраві зорі на небосхилі відносно орієнтирів на поверхні Землі — дерев або будинків. Порівняйте ваші малюнки з картою зоряного неба. До яких сузір'їв належать ці яскраві зорі?

5. Відшукайте на карті зоряного неба якусь яскраву зорю. За допомогою накладного круга до карти виміряйте моменти, коли сходить, заходить та кульмінує ця зоря.

6. За допомогою карти зоряного неба знайдіть зорі різних спектральних класів *O, B, A, F, G, K, M*. Порівняйте колір цих зір щодо температури на їхній поверхні.

● **Я вмію проводити астрономічні спостереження**

7. Підрахуйте загальну кількість сонячних плям та намалюйте їхнє розміщення на диску Сонця. Зверніть увагу, що плями часто з'являються парами. Через кілька днів повторіть спостереження, і ви помітите обертання Сонця навколо осі — плями змістилися. Кількість плям за цей час теж може змінитися. **Увага! Спостерігаючи Сонце, не можна дивитися на диск Сонця неозброєним оком і в телескоп без спеціального світлофільтра!**

● **Я знаю, для чого використовуються телескопи**

8. Чи можна за допомогою шкільного телескопа побачити, що галактики від нас віддаляються?



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Сонячна стала визначає...

А кількість енергії, що випромінює Сонце за рік

Б кількість енергії, що випромінює Сонце за 1 с

В температуру Сонця

Г кількість енергії, яку отримує вся поверхня Землі за одиницю часу

Д енергію, яку отримує 1 м² поверхні Землі за 1 с, якщо сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні

2. Для визначення світності Сонця потрібно знати...

А радіус Сонця Б радіус Землі В відстань від Землі до Сонця

Г температуру на поверхні Землі Д Температуру на поверхні Сонця

3. Які із цих хімічних елементів найпоширеніші на Сонці?

А Оксиген і Ферум

Б Гідроген і Гелій

В Гідроген і Оксиген

Г Нітроген і Оксиген

Д Ферум і Нітроген

4. У результаті якого процесу виділяється енергія в надрах Сонця?

А ядерної реакції

Б гравітаційного стиснення

В термоядерної реакції

Г горіння водню

Д падіння метеоритів

5. Грануляція у фотосфері утворюється в результаті того, що...

А корона дуже гаряча

Б енергія передається конвекцією

В плями дуже холодні

Г випромінюються нейтрино

Д на поверхні Сонця є хвилі

6. Які одиниці відстані до зір використовують астрономи?

А кілометр

Б астрономічну одиницю

В паралакс

Г світловий рік

Д парсек

7. Видима зоряна величина визначає...

А світність зорі Б радіус зорі В яскравість зорі
Г освітленість, яку створює зоря на Землі Д температуру зорі

8. На якій відстані абсолютна та видима зоряні величини мають однакове значення?

А 1 а. о. Б 10 а. о. В 1 св. рік Г 10 св. років Д 1 пк Е 10 пк

9. Які з наведених спектральних класів зір мають на поверхні найвищу температуру?

А А Б В В F Г G Д К Е М Є О

10. Укажіть температуру на поверхні та спектральний клас, до якого належить Сонце.

А А, +10 000 °С Б В, +10 000 °С В С, +6000 °С
Г G, +6000 °С Д М, +3000 °С Е О, +3000 °С

11. Які із цих зір світять довше за всіх?

А гіганти спектрального класу О
Б білі зорі спектрального класу А
В Сонце
Г червоні гіганти спектрального класу М
Д червоні карлики спектрального класу М

12. Зорі якого спектрального класу мають найкоротше життя?

А А Б В В F Г G Д К Е М

13. Який космічний об'єкт називають пульсаром?

А подвійну зорю, коли одна зоря закриває іншу
Б нейтронну зорю В білого карлика Г пульсуючу зорю Д гіганта

14. Термін «нова зоря» означає...

А у космосі утворилася молода зоря
Б вибухнула стара зоря
В періодично збільшується яскравість зорі
Г відбуваються зіткнення зір
Д космічні катастрофи з невідомим джерелом енергії

15. У майбутньому Сонце може перетворитися...

А у чорну діру Б у нейтронну зорю В у пульсар
Г у червоного гіганта Д у червоного карлика Е у білого карлика

16. Слово «галактика» у перекладі з грецької означає...

А Чумацький Шлях Б сріблястий шлях В чорний шлях
Г велика дорога Д Молочний Шлях

17. Що міститься в центрі Галактики?

А зоряне скупчення Б чорна діра В червоний гігант
Г білий карлик Д чорна хмара

18. Галактичний рік визначає...

А період обертання Галактики навколо осі
Б період обертання Сонця навколо центра Галактики
В відстань, що пролітає світло до галактики в Андромеді
Г період обертання Галактики навколо центра світу
Д період обертання зір сферичної складової навколо центра Галактики



Розділ 5 ВСЕСВІТ

318

Всесвіт — весь матеріальний світ, різноманітний за формами, що їх набуває матерія та енергія, включаючи всі галактики, зорі, планети та інші космічні тіла. Всесвіт такий великий, що його розміри важко уявити. Всесвіт, який досліджують астрономи, — частина матеріального світу, який простягається на $1,6 \cdot 10^{24}$ км, і нікому не відомо, наскільки він великий за межами видимої частини. Частково про це ви дізнаєтесь у цьому розділі.

§ 27. ВСЕСВІТ. ПРОБЛЕМИ КОСМОЛОГІЇ

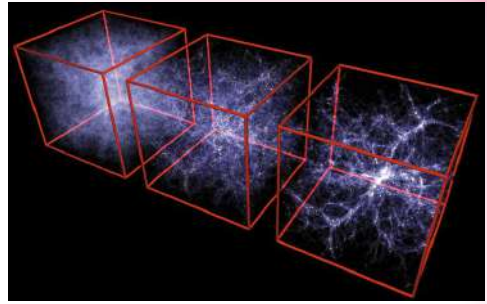
Галактики, як і зорі, утворюють групи й скупчення. Відомо близько 100 000 галактик у нашому місцевому надскупченні, а загальна кількість у всьому видимому Всесвіті оцінюється у 100–200 млрд галактик. Близько 50 найближчих галактик, з яких наймасивніші — наша Галактика й Туманність Андромеди, утворюють систему галактик розмірами кільका сотень кілопарсеків, що має назву **Місцева група галактик**.

Великі скупчення галактик групуються в системи галактик. Вони містять до тисячі галактик, і їхній розмір становить кілька мегапарсеків. Найближче до Землі велике скупчення галактик діаметром приблизно 5 Мпк перебуває в напрямку сузір'я Діви. Відстань від нього становить приблизно 20 Мпк. На спостережуваному небі скупчення має кутовий розмір із центром у сузір'ї Діви, звідси й походить його назва (мал. 5.1).



Мал. 5.1

Найбільш віддалене скупчення галактик, до якого визначено відстань (5200 Мпк), розміщене в сузір'ї Волосся Вероніки. Тільки за допомогою найбільших телескопів можна розрізнити його найяскравіші галактики. Комплекси скупчень галактик розмірами 30–60 Мпк, що містять десятки скупчень, називають **надскупченнями галактик**. Скупчення галактик у сузір'ї Діви є центральним згущенням у надскупченні галактик, у яке входить і наша місцева група галактик. Загальне число галактик нашого надскупчення, крім карликового, — близько 100 000. Нині виявлено близько 60 надскупчень. Скупчень більш високого рангу не виявлено.



Мал. 5.2

Надскупчення й скупчення галактик утворюють у просторі волоконоподібні структури, що нагадують бджолині стільники (мал. 5.2).

Розміри порожніх «осередків» становлять близько 100–150 Мпк, товщина «волокон» — близько 10 Мпк. Середня густина речовини у «волоконах» — близько 10^{-24} кг/м³. Великомасштабна структура Всесвіту має стільниковий вигляд. Середня густина світлої речовини в масштабах більше як 300 Мпк дорівнює $3 \cdot 10^{-28}$ кг/м³. Це і є середнє значення густини світлої речовини в спостережуваній частині Всесвіту, тобто у великих масштабах Всесвіт у середньому однорідний.

Космологія — наука про Всесвіт у цілому, про найзагальніші закони його будови й розвитку.

Це молода й водночас найпривабливіша галузь астрономії. Вона використовує такі поняття, як простір і час, які є не тільки фізичними, але й філософськими категоріями. На її «полі» впродовж століть ведеться запекла боротьба між матеріалістичним та ідеалістичним світоглядом.

Загальні закономірності розвитку Всесвіту вивчаються за допомогою космологічних моделей. Тобто виводяться рівняння, за якими визначається зміна із часом відстані між двома довільно взятими матеріальними об'єктами у Всесвіті (двома галактиками), а також зміна із часом середньої температури й густини речовини. При цьому, як правило, виходять з так званого космологічного принципу: що Всесвіт є однорідним та ізотропним, тобто властивості Всесвіту для кожного заданого моменту часу однакові в усіх його точках і в усіх напрямках.

Сукупність спостережуваних галактик усіх типів та їхніх скупчень, квазарів, міжгалактичного середовища утворює Всесвіт.

Одна з найважливіших властивостей Всесвіту — його постійне розширення, «розліт» скупчень галактик, про що свідчить червоне зміщення в спектрах галактик. Всесвіт перебуває в стані приблизно однорідного й ізотропного розширення. Однорідність означає однаковість усіх властивостей матерії всюди в просторі, а ізотропія — однаковість цих властивостей у будь-якому напрямку. Однорідність свідчить про відсутність виділеної області простору, а ізотропія — про відсутність виділеного напрямку. Припущення про однорідність та ізотропію Всесвіту називають **космологічним принципом**.

Гіпотезу про розширення Всесвіту на основі загальної теорії тяжіння Ейнштейна й точних розрахунків висунув у 1922 р. російський фізик і математик **Олександр Фрідман** (1888–1925).

У 1922–1924 рр., досліджуючи релятивістські моделі Всесвіту та розв'язавши рівняння загальної теорії відносності Ейнштейна, учений

довів, що Всесвіт не може бути статичним. Результати досліджень Фрідмана продемонстрували, що рівняння Ейнштейна не приводять до єдиної моделі Всесвіту, хоч би якою була космологічна стала. З моделі однорідного ізотропного Всесвіту випливає, що під час його розширення спостерігається червоне зміщення, яке пропорційне відстані. Це підтвердив у 1929 р. Едвін Габбл на підставі астрономічних спостережень: спектральні лінії в спектрах галактик виявилися зміщеними до червоного кінця спектра, що свідчить про розбігання галактик.

З розрахунків Фрідмана випливали три можливих наслідки: 1) Всесвіт та його простір розширюються із часом; 2) Всесвіт через певний час почне стискатися; 3) у Всесвіті повторюються через величезні інтервали часу цикли стискання й розширення.

За сучасними оцінками, густина речовини Всесвіту наближена до критичного значення: вона або трохи більша, або трохи менша (не вирішено остаточно питання про облік міжгалактичного газу та «прихованої маси»). Якщо фактична середня густина речовини у Всесвіті більша від критичної, то розширення Всесвіту має змінитися його стисканням. Якщо середня густина речовини у Всесвіті менша від критичної, то розширення продовжиться.

Якщо ми візьмемо навколо Сонця невеликий об'єм, наприклад куб зі стороною 10 пк, то в ньому може виявитися кілька зір і міжзоряна плазма, а в сусідніх 10 пк³ ми можемо не знайти жодної зорі. Це свідчить про нерівномірність заповнення речовиною найближчого до нас простору. Зорі об'єднуються в галактики, а галактики — у скупчення, які також розташовані нерівномірно. Середня відстань між скупченнями становить близько 30 Мпк. Отже, і в таких об'ємах Всесвіт неоднорідний. Але якщо ми візьмемо куб із стороною 100 Мпк, то побачимо, що в будь-якому місці Всесвіту всередині таких об'ємів кількість галактик та їхніх скупчень буде майже однаковою.

«Розмазавши» подумки всі галактики по цих об'ємах, ми отримаємо для кожного з них однакову середню густину речовини. Це приводить до важливого висновку: у великих масштабах Всесвіт однорідний і значення середньої густини речовини в ньому — це один з найважливіших параметрів.

Проте визначити зі спостережень справжню середню густину Всесвіту виявляється дуже складно. З астрономічних спостережень випливає, що середня густина всієї видимої речовини — зір, пилу, газу, а також випромінювання — не перевищує 10 % від критичної густини. Отже, крім речовини, яка спостерігається, у Всесвіті, без сумніву, є загадкова «прихована», або темна, речовина, яка нічим не проявляє себе, крім гравітації. Її маса в багато разів перевищує масу видимої речовини.

За останні роки астрономи отримали цілий ряд прямих вказівок на те, що в основному саме ця темна речовина заповнює Всесвіт. Вона утворює протяжні невидимі темні гало галактик і міститься в міжгалактичному просторі, концентруючись біля скупчень галактик. Яка природа цієї речовини? Можливо, це поки що не відкриті елементарні частинки, а можливо, вакуум має такі властивості, що робить свій внесок у повну густину матерії. Це можуть бути й звичайні несамосвітні тіла невеликої маси, проміжні між зорями й великими планетами. Може бути й «будівельне сміття», що залишилось після епохи утворення галактик. Хоч би як там було, виміряти масу «прихованої» речовини — завдання надзвичайно складне. Це найважливіше космологічне питання досі залишається відкритим.

Стала Габбла дає змогу оцінити час, протягом якого триває процес розширення Всесвіту. Визначено, що він становить не менше ніж 10 млрд і не більше ніж 19 млрд років. Наймовірніше значення середнього віку Всесвіту — близько 15 млрд років. Це значення не суперечить оцінкам віку найстаріших зір.

Реальний Всесвіт безмежний і ніде не закінчується. Якщо спостерігач буде рухатися, то його спостережуваний «горизонт» буде відсуватися все далі. Через скінченність швидкості поширення світла значення червоного зміщення у спектрі далекої галактики є водночас і мірою відстані до неї, і мірою часу, який минув відтоді, коли вона випустила той сигнал, що ми зараз сприймаємо. Спостерігаючи найвіддаленіші галактики, ми зазираємо в їхнє минуле, бо бачимо їх такими, якими вони були мільйони й мільярди років тому.



*Жорж
Леметр*



*Георгій
Гамов*

В основі сучасної астрономічної картини світу про еволюцію Всесвіту лежить модель «гарячого Всесвіту». Відповідно до цієї теорії на ранніх стадіях розширення Всесвіт характеризувався не тільки високою густиною речовини, але й високою температурою. Гіпотезу гарячого Всесвіту висунули бельгійський католицький священник, астроном і математик **Жорж Леметр** (1894–1966) та американський фізик-теоретик, космолог українського походження **Георгій Гамов** (1904–1968). Вона одержала назву **Великий Вибух**.

Згідно із цією теорією, Всесвіт виник спонтанно в результаті вибуху зі стану з дуже високою густиною матерії та величезною енергією. Цей початковий стан матерії називають сингулярністю — точковий об'єм з нескінченною густиною. Розширення Всесвіту не можна розглядати як розширення надгустої матерії у довколишнє середовище, тому що його не існувало. Всесвіт — це все, що існує. Речовина Всесвіту із самого початку однорідно заповнювала весь безмежний простір. Причини початку розширення Всесвіту до кінця не відомі. З його розширенням температура знижувалася від дуже великої до дуже малої, що й забезпечило сприятливі умови для утворення зір і галактик.

На підставі моделей Фрідмана було розроблено поетапну фізичну картину еволюції речовини починаючи з моменту вибуху. Через 3 хв після Великого Вибуху процес формування раннього Всесвіту закінчився і почався процес сполучення протонів і нейтронів у складові ядра. Потім майже 500 тис. років відбувалося повільне охолодження. Коли температура Всесвіту знизилася приблизно до 3 тис. градусів, ядра Гідрогену й Гелію вже могли захоплювати вільні електрони й перетворюватися на нейтральні атоми.

Через мільйон років після початку розширення настала ера речовини, коли з гарячої воднево-гелієвої плазми з малою домішкою інших ядер почало розвиватися різноманіття нинішнього світу.

Неоднорідності у Всесвіті, з яких згодом виникли всі структурні утворення, зародилися у вигляді незначних випадкових відхилень (флуктуацій). А потім підсилилися в епоху, коли йонізований газ у Всесвіті став перетворюватися в нейтральний, тобто коли випромінювання «відірвалося» від речовини.

Після того як речовина стала «прозорою» для електромагнітного випромінювання в дію вступили гравітаційні сили. Вони стали переважати над всіма іншими взаємодіями між масами практично нейтральної речовини, що складала основну частину матерії Всесвіту. Гравітаційні сили створили галактики, скупчення зір і планети.

Яка доля Всесвіту? Існують дві теоретичні моделі майбутнього Всесвіту – закрита і відкрита. **Закрита** модель припускає, що Всесвіт може бути представлений як грандіозна закрита система, що випробовує безліч

еволюційних циклів. Цикл розширення змінюється циклом наступного стискання до повернення в сингулярний стан, потім новий вибух тощо. Повний цикл розширення та стискання Всесвіту становить приблизно 100 млрд років. Щоразу, повертаючись до сингулярності, Всесвіт втрачає «пам'ять» про минулий стан і може знову «народитися» із зовсім новим набором фізичних констант.

У відкритих моделях Всесвіту розглядаються різні варіанти його «теплової смерті». Передбачається, що вже через 10^{14} років багато зір охолонуть, і це надалі приведе до відриву планет від своїх зір, а ті, у свою чергу, почнуть залишати галактики. Потім центральні частини галактик колапсують, утворюючи чорні діри, унаслідок чого припиняють своє існування.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Опишіть просторовий розподіл галактик у Всесвіті. Який вік галактик і зір?
2. У чому сутність теорії розширення Всесвіту?
3. До яких висновків про стаціонарність Всесвіту дійшов Фрідман?
4. Опишіть модель гарячого Всесвіту.
5. Що розуміють під закритою та відкритою моделями Всесвіту?



Опишіть основні ери в історії Всесвіту.

§ 28. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ В ПРИРОДІ. РОЛЬ ФІЗИЧНОЇ ТА АСТРОНОМІЧНОЇ НАУК У ФОРМУВАННІ НАУКОВОГО СВИТОГЛЯДУ СУЧАСНОЇ ЛЮДИНИ. ЄДИНА ПРИРОДНИЧО-НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ

Фізики встановили існування чотирьох видів взаємодії між частинками: **сильна, електромагнітна, слабка та гравітаційна** (у порядку зменшення інтенсивності). Сучасні теорії всіх взаємодій є квантовими.

Найуніверсальнішою із взаємодій є **гравітаційна**, вона виникає між будь-якими тілами, що мають масу. У фізиці частинок гравітаційна взаємодія не відіграє майже ніякої ролі на відстанях, більших за 10–35 м. При менших відстанях або дуже великих енергіях ця взаємодія за значенням порівнюється з іншими взаємодіями.

Електромагнітна взаємодія виникає між тілами, що мають електричний заряд. Слабка і сильна взаємодії — ядерні. **Слабка взаємодія** керує розпадом більш важких частинок на більш легкі та змінює внутрішню природу частинок. **Сильна взаємодія** — це взаємодія між кварками (складові частинки ядра), яка й обумовлює ядерну взаємодію, а також різні ядерні реакції. Ця взаємодія майже в 1037 разів сильніша за гравітаційну.

Кожній фундаментальній взаємодії відповідає своя частинка, яка переносить цю взаємодію. *Як же здійснюються ці взаємодії?* Механізм взаємодій один: за рахунок обміну іншими частинками — переносниками взаємодії.

Електромагнітна взаємодія: переносник — фотон. Гравітаційна взаємодія: переносники — кванти поля тяжіння — гравітони. І фотони, і гравітони не мають маси (маси спокою) і завжди рухаються зі швидкістю поширення світла. Слабкі взаємодії: переносники — векторні бозони. Істотною відмінністю переносників слабкої взаємодії від фотона й гравітона є їхня масивність. Переносники сильних взаємодій — глюони (від англ. *glue* — «клей») з масою спокою, що дорівнює нулю.

Ряд істотних відкриттів, зроблених у фундаментальній фізиці, особливо у фізиці високих енергій, важливі експериментальні результати відкривають глибокий взаємозв'язок частинок і прихованих сил, що діють усередині

ні речовини. Учені висунули ідею, згідно з якою вся природа підпорядкована дії якоїсь суперсили, досить потужної, щоб створити наш Всесвіт і наділити його світлом, енергією, матерією та надати йому структури. У суперсилі матерія, простір-час і взаємодія злиті в нероздільне гармонійне ціле, що породжує таку єдність Всесвіту, якої раніше ніхто й не припускав.

Класична механіка має чотири фундаментальних закони: три закони Ньютона і закон всесвітнього тяжіння. Фундаментальні закони є досить абстрактними формулюваннями і не є наслідком експериментів. Зазвичай вони «вгадуються», а не виводяться з емпіричних. Численні емпіричні закони є наслідками (іноді зовсім не очевидними) фундаментальних. Критерієм їх істинності є відповідність конкретних наслідків експериментальним спостереженням. Усі відомі на сьогодні фундаментальні закони описуються простими математичними виразами. Межі застосування фундаментальних законів обмежені. Ця обмеженість не пов'язана з математичними неточностями, а має більш фундаментальний характер: при виході за межі застосування фундаментального закону починають втрачати сенс самі поняття, що використовуються у формулюваннях. Так, для мікрооб'єктів виявляється неможливим строге визначення понять прискорення й сили, що обмежує застосування законів Ньютона.

Обмеженість застосування фундаментальних законів приводить до питання про існування ще більш загальних законів. Такими є закони збереження. Наявний досвід розвитку природознавства показує, що закони збереження не втрачають свого змісту при заміні однієї системи фундаментальних законів на іншу. У більшості випадків закони збереження не здатні дати такого повного опису явищ, яке дають фундаментальні закони, а лише накладають певні заборони на реалізацію тих чи інших станів при еволюції системи.

Кожен фізичний закон має свої межі застосування. Закон збереження механічної енергії має такі обмеження. 1) Система розглядуваних тіл має бути ізольована від зовнішніх впливів, таку систему називають замкнутою; 2) не завжди робота однозначно визначається зміною потенціальної енергії тіла під час переміщення його з однієї точки поля в іншу. Однозначне визначення роботи як міри зміни потенціальної енергії має місце лише для певних типів полів, які називають потенціальними. Прикладами таких полів є гравітаційне або електростатичне поле. Потенціальними вважаються поля, робота сил яких не залежить від траєкторії руху тіла в полі. Відповідно, сили цих полів називають консервативними. Якщо робота сил залежить від форми шляху або сили залежать від швидкості руху, то механічна енергія системи не зберігається. Наприклад, сили тертя, які не є консервативними, присутні в усіх випадках. Отже, закон збереження механічної енергії справджується лише для ідеалізованих ситуацій.

Люди завжди прагнули зрозуміти природу спостережуваних об'єктів та явищ, тому будували картину навколишнього світу відповідно до тих знань, якими володіли. Поступово з появою нових фактів і теорій, а також з можливістю перевірити ці теорії завдяки спостереженням та вимірюванням, з використанням досягнень науки, особливо фізики, картина поглядів на світ уточнювалася й змінювалася.

Нерідко стверджується, що наука не дає нам вірогідних знань про світ, що її висновкам начебто не можна довіряти.

У зв'язку із цим ми розглянемо питання, пов'язане з вірогідністю тих наукових даних про Всесвіт, які є одними з найістотніших елементів сучасної наукової картини світу. Ці дані відіграють також першорядну роль і у формуванні світогляду людини, адже світогляд — це і є ставлення людини до світу, усвідомлення свого місця в ньому. На перший погляд, з усієї сукупності знань, що їх має наука, саме знання про космічні об'єкти та космічні процеси є найменш надійними.

Справді, майже всі астрономічні дані здобуто шляхом дослідження різних випромінювань, що надходять до нас з космосу, аналізу й інтерпретації тієї інформації, яку вкладає в них сама природа. Але таке непряме дослідження є досить складним завданням. Між фізичним процесом, що відбувається в космосі, і висновками вчених, які цей процес спостерігають із Землі, пролягає ланцюжок з багатьох ланок. І при переході від кожної з них до наступної можливі ті чи інші помилки, неточності й неправильні умовиводи. А перевірити щось безпосередньо так, як це робиться, скажімо, у фізиці чи хімії, немає можливості. Крім того, астроном спостерігає не саме явище, а лише ту зміну, яку це далеке космічне явище спричиняє у приладі, що реєструє. Скажімо, відхилення стрілки, чи почорніння фотопластинки, чи криву лінію, накреслену на стрічці самописця. І на основі цих змін він має, виходячи з певної моделі, зробити висновки про характер явища, що вивчається. Проте зв'язок між показами астрономічних приладів і природою того чи іншого космічного процесу може виявитися зовсім не однозначним. Такі самі показники можуть бути спричинені зовсім різними явищами, що відбуваються у Всесвіті. Тому під час витлумачення результатів тих чи інших астрономічних спостережень нерідко є можливість різних пояснень тих самих фактів, а отже, і різних висновків про їхню природу.

Отже, висновкам, які ґрунтуються на астрономічних дослідженнях, не можна довіряти? І чи здатні взагалі дистанційні дослідження давати вірогідні відомості про навколишній світ? Щоб отримати відповіді на ці запитання, потрібно мати змогу перевіряти здобуті дані. Завдяки швидкому розвитку ракетно-космічної техніки й успішному освоєнню космічного простору така можливість нарешті з'явилася, а саме народилася «космічна астрономія». За допомогою космічних апаратів вимірювальна й телевізійна апаратура доставляється безпосередньо в райони найближчих небесних тіл та на їхню поверхню. Здобуті в результаті таких досліджень дані дають змогу зіставити знання про планети Сонячної системи, старанно нагромаджені багатьма поколіннями астрономів, з новою «космічною інформацією».

Звичайно, космічні методи дослідження дають можливість отримувати порівняно з наземною астрономією більший обсяг додаткової інформації, особливо про деталі різних явищ у світі планет. Але в цілому, як з'ясувалося, вони не тільки не спростували загальної системи уявлень про Сонячну систему, що склалася на основі астрономічних досліджень, але й, навпаки, підтвердили її правильність. Цей факт свідчить про те, що, незважаючи на дистанційний характер, астрономічні дослідження дають нам вірогідні знання про Всесвіт. Якоюсь принциповою відмінністю між процесом наукового пізнання космічних об'єктів і процесом пізнання в інших природничих науках, скажімо у фізиці елементарних частинок, не існує. Зрозуміло, що є багато недоступного нашому безпосередньому втручання, як у будь-якій науці на певному етапі її розвитку є свої «межі безпосередньої доступності». Але і в цих науках, як і в астрономії, подібні межі успішно долаються.

Тільки природничі науки здатні розв'язувати завдання, пов'язані з вивченням тих чи інших конкретних властивостей реального світу, поповнюючи наукові дані реальною інформацією.

В астрономічних дослідженнях широко застосовується «принцип порівняння». Якщо потрібно вивчити закономірності розвитку та будови якогось космічного об'єкта, наприклад Землі, то слід відшукати у Всесвіті подібні об'єкти й намагатися виявити їхні подібності і відмінності щодо об'єкта, який нас цікавить. Подібність указує на спільність факторів, які впливають на еволюцію досліджуваних об'єктів; відмінності допомагають знаходити ті причини, які зумовили різні шляхи їхнього розвитку. При вивченні навіть найбільш абстрактних наукових проблем кінцевою

метою досліджень є застосування нових знань на практиці. Така спрямованість обумовлена соціальною природою науки як однієї з форм людської діяльності. Не виняток й астрономія. Вивчаючи космічні явища, астрономи думають у першу чергу про Землю та людство, що дає змогу краще пізнати наш власний космічний дім.

Під науковою картиною світу розуміється цілісна система уявлень про світ, його загальні властивості та закономірності, що виникають у результаті узагальнення і синтезу основних природничо-наукових понять та принципів. Загальна наукова картина світу складається в результаті синтезу знань, одержуваних різними науками, і містить загальні уявлення про світ, що виробляються на різних стадіях історичного розвитку науки. Загальна наукова картина світу включає уявлення про природу та суспільство.

Природничо-науковою картиною світу називають частину загальної наукової картини світу, яка включає в себе уявлення про природу.

Створення єдиної природничо-наукової картини світу передбачає встановлення зв'язків між науками. У структурі конкретних наук у їхніх головних компонентах виражена власна цілісна картина природи, яку називають **спеціальною** (або **локальною**) **картиною світу**. Ці картини є в певній мірі фрагментами навколишнього світу, які вивчаються методами даної науки (наприклад, біологічна картина світу, хімічна картина світу, фізична картина світу). У рамках картин світу здійснюється систематизація знань відповідної науки (або групи наук), вони є наочним втіленням системи взаємодіючих елементів знань — теорій (фундаментальних і прикладних), які становлять собою розвинені системи наукових понять і зв'язків між ними.

У рамки картин світу вписуються відомі наукові факти. Картини світу забезпечують цілісність наукової галузі (науки), формують нам методи наукового пізнання і визначають стратегію наукового пошуку, ставлять завдання емпіричних і теоретичних досліджень, наочно відображають їхні результати.

Отже, розрізняють: загальнонаукову картину світу, яка виступає як форма систематизації знань, що виробляються в природничих і гуманітарних науках; природничо-наукову картину світу (картину природи); соціально-історичну картину світу (картину суспільства); спеціальні (локальні) картини світу окремих наукових галузей (фізичну, хімічну, біологічну, астрономічну, політичну, економічну, демографічну тощо).

Найперші картини світу було розроблено в рамках античної філософії, і вони мали натурфілософський характер. Істинно наукові картини світу виникли у XVI–XII ст. Раніше від інших виникла фізична картина світу як загальна теоретична основа для всіх наук про неживу природу.

Ядром єдиної природничо-наукової картини світу в цілому є фізична картина світу, оскільки фізика є фундаментальним базисом сучасного світорозуміння. Багатовіковий розвиток фізики привів до створення цілісної природничо-наукової картини нашого світу і його розвитку.

Деякі сучасні дослідники беруть за основу таку категорію, як інформація. На їхню думку, ми переживаємо етап становлення нової інформаційної картини світу, яка дасть змогу наочно й цілісно представити загальні зв'язки й взаємозумовленість явищ у процесі історичного розвитку.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Яка роль фізичної та астрономічної науки у формуванні наукового світогляду сучасної людини?
2. Яке значення для людства мають наукові фізичні та астрономічні відкриття?
3. У чому полягає суть «принципу порівняння»?
4. Які ви знаєте фундаментальні взаємодії?
5. Чому вводять поняття «межі застосування» закону або теорії?

6. Наведіть приклади законів, які мають певні межі.
7. Що розуміють під науковою картиною світу?
8. Що є ядром єдиної природничо-наукової картини світу?



З'ясуйте, із чого складається загальна наукова картина світу.

§ 29. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ УЯВЛЕНЬ ПРО ВСЕСВІТ

Астрономія виникла в далеку давнину. Ще первісні люди спостерігали зоряне небо й потім на стінах печер малювали те, що бачили. З розвитком людського суспільства, з виникненням землеробства з'явилася потреба в лічбі часу, у створенні календаря. Помічені закономірності в русі небесних світил, зміні вигляду Місяця дали змогу давній людині знайти й визначити одиниці рахунку часу (доба, місяць, рік) і врахувати настання певних сезонів року, щоб вчасно провести посівні роботи та зібрати врожай.

Спостереження зоряного неба з найдавніших часів формувало людину як мислячу істоту. І якщо орієнтація в просторі й часі за Сонцем, іншими зорями та Місяцем доступна тваринам на рівні рефлексів, то тільки людині властиво пророкувати земні явища за небесними спостереженнями. Здавна люди замислювалися над таємницею походження життя і Всесвіту. Кожна цивілізація створювала свої міфи про виникнення світу і людини. А тепер людство сподівається, що життя існує ще де-небудь окрім Землі. Тому сьогодні проблема існування та пошуку життя у Всесвіті стала ще більш актуальною і хвилюючою.

326

Як і будь-яка інша наука, астрономія включає ряд розділів, тісно пов'язаних між собою. Вони відрізняються один від одного предметом дослідження, а також методами й засобами пізнання. Розглянемо виникнення й розвиток розділів астрономії в історичному аспекті.

Правильні, наукові дані про Землю як небесне тіло з'явилися в Давній Греції. Александрійський астроном Ератосфен у 240 р. до н. е. досить точно визначив за спостереженнями Сонця розміри земної кулі. З розвитком торгівлі й мореплавства виникла потреба в розробці методів орієнтації, визначенні географічного положення спостерігача, точному вимірюванні часу, виходячи з астрономічних спостережень. Вирішенням цих завдань стала займатися практична астрономія.

Геліоцентрична система світу Міколая Коперника, викладена в праці «Про обіг небесних сфер» (1543 р.), дала ключ до пізнання Всесвіту. Однак століттями вкорінена думка про нерухому Землю як центр Всесвіту довго не поступалася місцем новим прогресивним науковим даним. Остаточно утвердив теорію Коперника, одержавши безперечні докази її істинності, італійський фізик, механік й астроном Галілео Галілей. Астрономічні відкриття Галілей зробив за допомогою найпростішого телескопа. На Місяці вчений побачив гори й кратери, відкрив 4 супутники Юпітера. Виявив зміну фаз Венери, що свідчило про те, що ця планета обертається навколо Сонця, а не навколо Землі.

Сучасник Галілея Йоганн Кеплер (будучи асистентом великого астронома Тихо Браге) одержав доступ до результатів високоточних спостережень планет, що проводилися майже 20 років. Особливо Кеплера зацікавив Марс, у русі якого виявилися значні відступи від усіх колишніх теорій. Після тривалих обчислень ученому вдалося знайти закони руху планет. Ці 3 закони зіграли важливу роль у розвитку знань про будову Сонячної системи. Розділ астрономії, що вивчає рух небесних тіл, одержав назву **небесної механіки**. Вона дала змогу пояснити й попередньо обчислити з дуже високою точністю майже всі рухи, спостережувані як у Сонячній системі, так і в Галактиці.

В астрономічних спостереженнях використовувалися дедалі удосконаленіші телескопи. Зорову трубу Галілея вдосконалив Кеплер, а потім Крістіан Гюйгенс. Ісаак Ньютон винайшов новий вид телескопа — телескоп-рефлектор. За допомогою модернізованих оптичних приладів було зроблено нові відкриття слабких і далеких зір.

У 1655 р. Гюйгенс розглянув кільця Сатурна й відкрив його супутник Титан. У 1761 р. Ломоносов відкрив атмосферу Венери й провів дослідження комет. Приймаючи за еталон Землю, учені порівнювали її з іншими планетами й супутниками. Так зароджувалася наука **планетологія**.

Вивчення фізичної природи й хімічного складу зір дало відкриття спектрального аналізу (1859–1862). Детальні дослідження темних ліній у спектрі Сонця, які провів німецький учений Фраунгофер, стали першим кроком до одержання спектральної інформації про небесні тіла. Швидкий розвиток лабораторної спектроскопії та теорії спектрів атомів і йонів на основі квантової механіки привів до розвитку на цій основі фізики зір і, в першу чергу, фізики зоряних атмосфер. У 60-ті рр. XIX ст. спектральний аналіз стає основним методом у вивченні фізичної природи небесних тіл. Розділ астрономії, що вивчає фізичні явища й хімічні процеси, що відбуваються в небесних тілах, їхніх системах у космічному просторі, називають **астрофізикою**.

Подальший розвиток астрономії пов'язаний з удосконаленням техніки для спостережень. Великих успіхів досягнуто в створенні нових типів приймачів випромінювання різних діапазонів частот. Фотоелектронні примножувачі, електронно-оптичні перетворювачі, методи електронної фотографії та телебачення підвищили точність і чутливість фотометричних спостережень, і це ще більше розширило спектральний діапазон досліджуваних випромінювань. Став доступним для спостережень світ далеких галактик, що перебувають на відстані мільярдів світлових років. Виникли нові напрямки астрономії: зоряна астрономія, космологія й космогонія. Зародженням зоряної астрономії прийнято вважати 1837–1839 рр., коли було отримано перші результати у визначенні відстаней до зір.

Зоряна астрономія вивчає закономірності в просторовому розподілі й русі зір у нашій зоряній системі — Галактиці, досліджує властивості й розподіл інших зоряних систем. **Космологія** — розділ астрономії, що вивчає походження, будову та еволюцію Всесвіту як єдиного цілого. Висновки космології ґрунтуються на законах фізики й даних спостережливої астрономії, а також на всій системі знань певної епохи. Інтенсивно цей розділ астрономії став розвиватися в першій половині XX ст., після того як Ейнштейн розробив загальну теорію відносності. **Космогонія** — розділ астрономії, що вивчає походження й розвиток небесних тіл та їхніх систем. Оскільки всі небесні тіла виникають і розвиваються, ідеї про їхні еволюції тісно пов'язані з даними про природу цих тіл. Під час дослідження зір і галактик використовують результати спостережень багатьох подібних об'єктів, що виникають у різний час і перебувають на різних стадіях розвитку. У сучасній космогонії широко застосовуються закони фізики й хімії.

Нагромаджують та обробляють значну кількість інформації про певні об'єкти Всесвіту такі розділи астрономії, як фізика Сонця, фізика планет, фізика зір і туманностей, кометна астрономія, метеорна астрономія, метеоритика. Земля може розглядатися як одна з планет Сонячної системи — у цьому виражається зв'язок астрономії з географією та геофізикою. Рельєф земної кулі, кліматичні та сезонні зміни погоди, магнітні бурі, потепління, льодовикові періоди — для вивчення всіх цих та ще багатьох явищ географі використовують астрономічні знання.

Астрономія перебуває в тісному зв'язку з іншими науками. Знання, які астрономи набули протягом тисячоліть, часто ставали в пригоді представникам інших наук, і, навпаки, досягнення фізики, математики, хімії, космонавтики суттєво вплинули на розвиток астрономії.

**ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО**

1. Як виникла наука астрономія? Схарактеризуйте основні періоди її розвитку.
2. Яка причина того, що саме астрономія є найстарішою із сучасних наук?
3. Яку роль відіграють спостереження в астрономії?
4. Які об'єкти і їхні системи вивчає астрономія? Перелічіть їх у порядку збільшення розмірів.
5. З яких розділів складається астрономія? Коротко схарактеризуйте кожний з них.



Розкрийте значення астрономії для практичної діяльності людства.

§ 30. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Рух будь-якого тіла відносний: його положення, швидкість, вид траєкторії залежать від того, відносно якої системи відліку (тіла відліку) цей рух розглядається. Щоб описати рух тіла, зручно вибирати інерціальну систему відліку (ІСВ), оскільки в цій системі відліку зміна швидкості тіла зумовлена лише дією на нього інших тіл.

Інерціальними системами відліку називають такі системи відліку, у яких виконується перший закон Ньютона. Уперше твердження про рівноправність усіх інерціальних систем відліку висловив Галілей, тому його називають принципом відносності Галілея (або принципом відносності класичної фізики): **в усіх інерціальних системах відліку за однакових початкових умов усі механічні явища протікають однаково.**

Із цього принципу випливає, що не існує якоїсь виділеної системи відліку, яку можна було б назвати «такою, що перебуває в стані спокою», усі ІСВ цілком рівноправні. А це означає, що швидкість будь-якого тіла є **відотною**: її можна визначити лише відносно певного тіла.

Принцип відносності класичної фізики правильно описує звичайні механічні явища, але виникає запитання: *чи можна поширити принцип відносності на всі фізичні явища, не обмежуючись лише механічними? Чи можна, наприклад, поширити його й на електромагнітні явища?*

Здавалося б, що на це запитання можна дати ствердну відповідь, тому що взаємодії електричних зарядів і електричних струмів у різних інерціальних системах відліку є однаковими. Однак тут виникла проблема з поширенням світла. Як відомо, світло є електромагнітною хвилею (це вперше теоретично довів англійський фізик Дж. Максвелл). Німецький фізик Г. Герц підтвердив цей факт дослідним шляхом. Але, відповідно до теорії Максвелла, швидкість поширення світла в усіх ІСВ має бути тією самою, тобто не відотною, як швидкості звичайних тіл, а абсолютною. Але, відповідно до ньютонівської механіки, швидкість може дорівнювати c тільки у вибраній системі відліку. У будь-якій іншій, яка рухається зі швидкістю v , швидкість поширення світла має дорівнювати $c - v$. А це означає, що при переході з однієї до іншої ІСВ закони електродинаміки мають змінюватися так, щоб у новій системі відліку швидкість світла була уже не c , а $c - v$.

Суперечності, які виникли між теоріями, намагалися подолати так: 1) оголосити недоречним принцип відносності стосовно електромагнітних явищ; 2) оголосити неправильними рівняння Максвелла й змінити їх так, щоб вони не змінювалися при переході з однієї до іншої ІСВ; 3) відмовитися від класичних уявлень про простір і час для того, щоб зберегти як принцип відносності, так і закони Максвелла. Перші два шляхи, як виявилось, суперечили експерименту. Єдиним правильним виявився третій

шлях. Усі суперечності блискуче розв'язав 26-річний Альберт Ейнштейн, який видав невелику, всього на 30 сторінок, роботу під назвою «До електродинаміки рухомих середовищ». І вона за короткий термін спричинила справжню революцію у фізиці та збагатила ідеями, практична значущість яких — безмежна. У ній Ейнштейн без жодного нового експерименту, проаналізувавши й узагальнивши уже відомі дослідні факти, уперше виклав ідею теорії відносності.

Американські фізики А. Майкельсон і Е. Морлі наприкінці XIX ст. вирішили порівняти швидкість світла, що поширюється за напрямком руху Землі її орбітою і в протилежному напрямку. Досліди, які провели вчені, переконаливо довели, що світло у вакуумі поширюється завжди з однією й тією самою швидкістю (близькою до 300 000 км/с).

Щоб правильно пояснити досліди Майкельсона й Морлі, потрібно було відмовитися від звичних уявлень про простір і час. Виникла суперечність, розв'язати яку на початку XX ст. намагалося багато видатних фізиків. Але зробити це вдалося скромному службовцеві патентного бюро у швейцарському місті Берн Альберту Ейнштейну.

Теорія відносності — це фізична теорія, яка описує властивості простору й часу, а також закономірності відносного руху тіл, зумовленого цими властивостями.

Альберт Ейнштейн стверджував, що законом природи є цілковита рівноправність усіх інерціальних систем відліку щодо не лише механічних, але й електромагнітних процесів. Немає жодних відмінностей між станом спокою й рівномірною прямолінійною руху. Він узяв дослідно установлені факти як основні положення теорії, названої згодом спеціальною теорією відносності.

329

Ці положення називають постулатами теорії відносності:

1. Принцип відносності Ейнштейна: усі явища природи (фізичні, хімічні, біологічні) протікають однаково в усіх інерціальних системах відліку.
2. Принцип сталості швидкості світла: швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних системах відліку.

Аналізуючи перший постулат, ми бачимо, що Ейнштейн розширив рамки принципу відносності Галілея, застосувавши його до будь-яких фізичних явищ, у тому числі й електромагнітних. Аналізуючи другий постулат, можна стверджувати, що швидкість поширення світла не залежить від руху джерела світла й від приймача. Жоден матеріальний об'єкт не може рухатись зі швидкістю, більшою від швидкості світла у вакуумі. Але другий постулат суперечить першому, якщо поширити на електромагнітні явища не тільки принцип відносності Галілея, але й галілеєве правило додавання швидкостей, що впливає з правила перетворення координат. Тобто перетворення Галілея для координат і часу, а також його правило додавання швидкостей до електромагнітних явищ застосовувати не можна.

Головний внесок Ейнштейна в пізнання законів природи полягав навіть не у відкритті нових формул, а в радикальній зміні основних фундаментальних уявлень про простір, час, речовину та рух.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. Що у фізиці розуміють під системою відліку?
2. Які системи відліку називають інерціальними? Наведіть приклади.
3. Скільки існує інерціальних систем відліку?
4. У чому полягають відмінності принципу відносності Галілея та принципу відносності Ейнштейна?
5. Чи можна стверджувати, що фізичні процеси та явища, які коли-небудь іще відкриють, підпорядковуватимуться принципу відносності?
6. Які причини привели до створення теорії відносності?
7. У чому відмінність першого постулату теорії відносності від принципу відносності в механіці?

§ 31. ЛЮДИНА У ВСЕСВІТІ. АНТРОПНИЙ ПРИНЦИП. ІМОВІРНІСТЬ ЖИТТЯ НА ІНШИХ ПЛАНЕТАХ. УНІКАЛЬНІСТЬ НАШОГО ВСЕСВІТУ. ПИТАННЯ ІСНУВАННЯ ІНШИХ ВСЕСВІТІВ

Життя є однією з великих таємниць Всесвіту. На Землі є різноманітні живі організми, але ми нічого не знаємо про інші форми життя на інших планетах. Усі живі істоти народжують дітей, а потім рано чи пізно помирають, їхні тіла перетворюються в неживу матерію. Але на Землі ще ніхто не спостерігав безпосереднє зародження живих біологічних клітин з неживих хімічних сполук. Із цього приводу англійський біолог Ф. Крік говорив: «Ми не бачимо шляху від первісного бульйону до природного відбору. Можна дійти висновку, що походження життя — чудо, але це свідчить лише про наше незнання».

Загальні характеристики живих істот можна описати за допомогою деяких термінів теорії складних систем, поведінку та еволюцію яких вивчає нова наука **синергетика**.

Об'єм інформації, який зберігає тільки одна клітина живого організму, оцінюється в 1022–1023 біти. Для порівняння: об'єм інформації, яку зберігають сучасні комп'ютерні диски, у мільярди разів менший. Завдяки комп'ютерам на сучасному етапі розвитку нашої цивілізації також спостерігається значне збільшення потоку інформації, якою володіє людство. За допомогою автоматичних міжпланетних станцій (АМС) ми почали збирати інформацію на далеких планетах та приступили до безпосередніх пошуків позаземних форм життя. Імовірність існування життя на інших тілах Сонячної системи досить мала, тому пошуки позаземних цивілізацій зараз ведуться поблизу інших зір. Нещодавно виявлено десятки темних супутників зір, що свідчить про існування інших планетних систем, де можуть бути досі невідомі цивілізації.

Контакти між цивілізаціями перш за все означають обмін інформацією. Якщо у Всесвіті існують інші цивілізації і вони мають певний обсяг інформації про свою частину Галактики, то обмін інформацією між ними може привести до загального зростання інформації, тому такий процес згідно з теорією біологічної еволюції можна вважати прогресивним.

Поява життя, розуму є невід'ємною частиною Всесвіту, природним наслідком його еволюції, у цьому й полягає сутність **антропного принципу**. Наш Всесвіт дивно пристосований до виникнення й розвитку в ньому життя. Так, з нескінченної розмаїтості початкових умов і значень фізичних сталих, які, імовірно, виникали в ранньому Всесвіті, реалізувалися тільки придатні для існування розумного життя. Ось кілька прикладів. 1. Ми живемо в просторі трьох вимірів. Але тільки в такому просторі можливі стійкі планетні рухи (гравітаційна взаємодія). 2. Якби гравітаційна стала була в кілька разів більшою, то й час життя Сонця як стійкої кулі, яка є гарячою плазмою, вимірювався б кількома десятками мільйонів років. 3. Якби маса електрона була втричі більшою від сучасної, то й час життя протона був би малий. При взаємодії протона з електроном протон розпадався б на нейтрон і нейтрино. Тоді зорі й галактики склалися б з нейтронів, а більш складних форм не могло існувати. 4. Якби середня густина речовини у Всесвіті була значно меншою, то сили інерції (розльоту) переважали б над силами тяжіння. Тому не встигли б утворитися зорі й галактики і т. п. Отже, висновок один: наш Всесвіт являє собою єдине зв'язне ціле, погоджену систему, дивно пристосовану до існування життя.

За рахунок збільшення нестабільності в доквіллі збільшується об'єм інформації всередині живого організму, а потім ця інформація передається нащадкам у майбутнє. Земля за багатьма параметрами є закритою

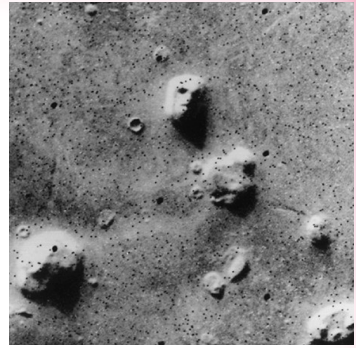
системою, тому проблема виживання людства пов'язана з освоєнням космосу. Наша цивілізація почала дослідження Сонячної системи.

Інтерес до інших форм життя в Сонячній системі переслідує людство віддавна. Колись люди думали, що населено всі планети, навіть Місяць. Але що більше дослідники дізнавалися про інші планети, то менш оптимістичними ставали їхні прогнози. Із часом вчені дійшли висновку про можливість існування життя на Венері та Марсі. Однак вивчення поверхні Венери показало, що жодні живі організми не можуть існувати на цій планеті. Найбільш імовірно придатною до життя планетою дослідники вважають Марс.

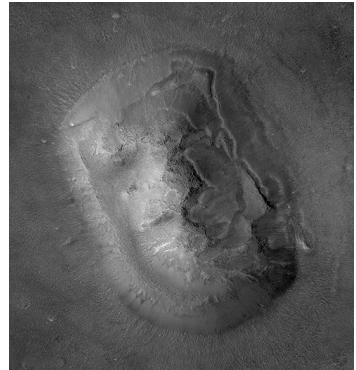
Головною метою польотів автоматичної орбітально-посадкової станції «Вікінг» до Марса був пошук життя на цій планеті. Було виконано кілька складних біологічних експериментів. У ході аналізу марсіанського ґрунту не було виявлено жодних слідів органічних сполук — продуктів життєдіяльності мікроорганізмів. Такий самий прилад при пробах антарктичного ґрунту знайшов значну кількість вичорпаних органічних сполук. У 1976 р. станція «Вікінг» передала на Землю фото загадкового об'єкта (з області Сідонія) розміром $\approx 1,5$ км, який назвали «головою сфінкса» (мал. 5.3).

Було висунуто гіпотезу, що це архітектурне спорудження давньої цивілізації. Але дослідники Марса заявили, що це природний об'єкт. Суперечки не вщухали до 2001 р., доки космічний апарат *Mars Global Surveyor* не передав на Землю більш детальний знімок цього об'єкта (мал. 5.4). На новому зображенні добре видно, що «голова сфінкса» — природна структура. У той час космічний апарат «Галілео», що вивчав систему Юпітера, передав повідомлення, що на одному з більших супутників — Європі — виявлено океан теплої води, що перебуває під крижаним панциром. Поверхню Європи вкрито водяним льодом із тріщинами й «хаосами». Аналіз отриманих у різний час зображень показав, що лід трохи зміщується (подібну картину можна спостерігати на земних полярних морях у час весняного танення льоду). Виходячи з розмірів і геометрії крижаних тріщин, учені припустили, що на супутнику Європа тонкий крижаний шар закриває воду або талий лід. Імовірно причиною появи таких структур може бути дія гідротермальних джерел (гейзерів). Отже, якщо на Європі є тепла вода, то можуть існувати й які-небудь форми життя. Однак виявити їх можна, лише «приземлившись» на поверхню.

Сучасна наука визначає позаземні цивілізації як гіпотетичні суспільства розумних істот, які можуть виникнути й існувати поза Землю. Для оцінки числа позаземних цивілізацій у Галактиці американський радіоастроном **Френсіс Дрейк** запропонував таку формулу: $N = RfnkdQ$, де N — число позаземних цивілізацій у Галактиці; R — швидкість утворення зір у Галактиці (близько 10 зір за рік); f — частина зір, що мають планетні системи; n — середнє число планет, що входять у планетні системи й екологічно придатні для життя; k — частина планет, на яких дійсно виникло життя; d — частина планет, на яких після виникнення життя



Мал. 5.3



Мал. 5.4

розвинулися розумні форми; q — частина планет, на яких розумне життя досягло фази, що забезпечує можливість зв'язку з іншими світами, цивілізаціями; L — середня тривалість існування таких неземних (космічних, технічних) цивілізацій. У цій формулі всі величини, крім першої, мають дуже невизначений характер і визначаються на основі експертних оцінок учених. Тому створюється значна невизначеність в оцінці загальної величини N . Одні підрахунки показують, що в цей час лише кілька геоподібних цивілізацій Галактики (у яких 10^{11} зір) готові до контакту з нами. Згідно з іншими, більш оптимістичними, — таких цивілізацій може бути значно більше. Як один з аргументів на користь того, що позаземні цивілізації — явище досить рідкісне, висувається відсутність видимих проявів їхньої діяльності.

Перші роботи з пошуку сигналів позаземних цивілізацій провів у 1960 р. Дрейк. Він досліджував радіовипромінювання найближчих зір (τ Кита й ϵ Еридан) на хвилі 21 см. Штучні сигнали виявити не вдалося. У наш час космічний простір прослуховується одночасно на багатьох частотах. Прийняті радіотелескопом сигнали обробляються комп'ютерами.

У 1967 р. вперше зареєстрували періодичні сигнали, які надходили з міжзоряного простору, і їх назвали пульсарами. Аналіз сигналів показав, що пульсари жодного стосунку до інопланетних цивілізацій не мають, бо періодичні сигнали випромінюють нейтронні зорі.

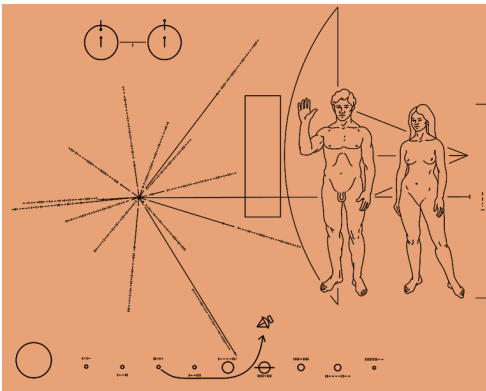
Паралельно ведеться робота з повідомлення позаземним цивілізаціям інформації про нашу земну цивілізацію. У 1974 р. з радіоастрономічної обсерваторії в Аресібо в бік кульового скупчення $M31$ (сузір'я Геркулес), що перебуває від Землі на відстані 24 тис. світлових років, було спрямоване послання, що містить закодований текст про життя й цивілізацію на Землі.

Інформаційні повідомлення про земну цивілізацію було запущено в космос на борту 4 автоматичних станцій: «Піонер-10» (старт 3.03.1972), «Піонер-11» (6.04.1973), «Вояджер-2» (20.08.1977) і «Вояджер-1» (5.09.1977). На борту «Піонерів» були прикріплені позолочені таблички з даними про землян (координати щодо пульсарів і щодо планет, зовнішній вигляд чоловіків, жінок, дітей тощо). «Вояджери» крім того несли пластинку з сотнями кольорових і чорно-білих зображень Землі, тварин, людей, міст, техніки, звукозаписами привітань на багатьох мовах планети, пісень, голосів тварин та природних шумів (мал. 5.5). Інформація про нас звичайно не повна, але загальні подання отримати можна. Шкода, що ці зонди летітимуть мільйони років, і малоімовірно, що їх взагалі коли-небудь знайдуть представники іншого розуму.

Створено міжнародну організацію SETI (англ. *Search of Extra Terrestrial Intelligence* — пошуки позаземного розуму), яка розробила широкую програму пошуків життя у Всесвіті.

Якщо інша цивілізація за інтелектом набагато випередила землян, то вона може вже здійснювати міжзоряні перельоти. Контакти між цивілізаціями можуть призвести до міжзоряних конфліктів, і ми маємо бути готовими до цього.

Останнім часом серед учених і філософів дедалі більше стверджується думка, що людство самотнє, якщо не у всьому Всесвіті, то принаймні в нашій Галактиці. Із цього



Мал. 5.5

впливає найважливіший висновок про значення, цінність й унікальність нашої цивілізації. Отже, людство несе величезну відповідальність не тільки за нашу планету, але й за Всесвіт у цілому.

А що загрожує нашій цивілізації й планеті? Екологічна катастрофа, яка може виникнути внаслідок забруднення довколишнього середовища промисловими відходами наших підприємств. Зміна клімату на Землі через збільшення кількості вуглекислого газу в атмосфері, збільшення парникового ефекту та підвищення температури. Збільшення озонних дір в атмосфері може спричинити підвищення частки ультрафіолетового випромінювання Сонця, унаслідок чого можуть загинути флора й фауна нашої планети. Катастрофічне зіткнення з астероїдом або кометою може призвести до різкого зниження температури та виникнення нового льодовикового періоду. Цивілізація може закінчити життя самогубством через атомну війну. Події останніх років показують, що така загроза існує, поки атомна зброя поширюється серед держав, які не в змозі її належно контролювати.

Отже, Земля, на якій є не просто життя, а життя розумне, є унікальним витвором природи і чи не єдиним носієм того дивовижного збігу космічних обставин, що забезпечили появу життя й розуму. І якщо Чумацький Шлях справді позбавлений присутності інших представників розумного життя, то важливо робити все, щоб зберегти його бодай на Землі.

У нашому Всесвіті, з нашим комплексом фізичних явищ, зв'язків і фундаментальних фізичних сталих, його стабільність забезпечується саме тими законами природи, які реалізувалися в довколишньому світі. Але можуть існувати й інші, незвичні для нас комплекси явищ, стабільність яких забезпечується іншими законами. Можна припустити існування всесвітів з іншими законами, іншими властивостями простору-часу й світовими константами, не менш організованих, ніж наш, і навіть таких, що забезпечують існування негуманоїдних форм життя й розуму. Отже, ми існуємо в тому Всесвіті, властивості якого сприяють формуванню живих організмів; можуть існувати інші всесвіти, де діють інші фундаментальні закони, і можливе існування принципово інших форм життя.

«Мультивсесвіт», «Великий Всесвіт», «Мультиверс», «Гіпервсесвіт», «Надвсесвіт» — різні переклади англійського терміна *multiverse*.

Питання про нескінченну кількість можливих мультивсесвітів у фізиці та космології стикається з непорозуміннями. Якщо інші мультивсесвіти існують, то їхнє існування підкоряється принципово іншим законам, ніж існування нашого Всесвіту. А це означає, що ми не можемо отримати від них інформацію, адже фізичний зв'язок між різними об'єктами можливий тоді, коли вони живуть за подібними законами.

Як здійснити зв'язок з тим, що принципово не схоже на наш світ? Окремі вчені припускають, що каналами зв'язку можуть слугувати чорні діри. Можливо, що бар'єри простору-часу, які відокремлюють наш Всесвіт від інших всесвітів, не такі вже й неприступні. Можливо, із часом наука подолає ці бар'єри і виведе наші уявлення про космос на якісно новий рівень.



ЗАПИТАННЯ ДО ВИВЧЕНОГО

1. У чому полягає сутність антропного принципу?
2. На яких планетах Сонячної системи вчені передбачають можливість існування життя?
3. Як можна оцінити кількість позаземних цивілізацій у нашій Галактиці?
4. Чому формула Дрейка дає значну невизначеність в оцінці кількості цивілізацій у Галактиці, готових до контакту з нами?
5. Як людство намагається встановити контакти з неземними цивілізаціями?
6. Що таке Мультивсесвіт?



Покажіть, чим відрізняються поняття: Всесвіт, космос, Метагалактика.

**РОЗВ'ЯЗУЄМО РАЗОМ**

Деякі теорії космологічних моделей передбачають, що повний Всесвіт має розмір набагато більший, ніж спостережуваний. Які висновки із цього можна зробити?

Розв'язання

Теоретично межа спостережуваного Всесвіту доходить до самої космологічної сингулярності, однак на практиці межею спостережень є реліктове випромінювання (космічне електромагнітне випромінювання з високим ступенем ізотропності та спектром). Саме воно (точніше, поверхня останнього розсіювання) є найвіддаленішим об'єктом Всесвіту, які спостерігаються сучасною наукою. На сьогодні спостережувана поверхня останнього розсіювання збільшується в розмірах так, що межі Метагалактики збільшуються і збільшується маса спостережуваної речовини у Всесвіті.

Спостережуваний Всесвіт можна уявити як кулю зі спостерігачем у центрі. Розмір спостережуваного Всесвіту, виражений у світлових роках, відповідає віку рівномірного розширення простору і дорівнює радіусу від 13 до 18 млрд світлових років. Причому останні визнані оцінки відповідають значенню 13,4–15 млрд світлових років.

**ЗАДАЧІ ТА ВПРАВИ**

334

- 5.1. Які промені з космосу можна бачити із закритими очима?
- 5.2. Яке випромінювання з космосу свідчить про Великий Вибух?
- 5.3. З якої події почалося розширення Всесвіту?
- 5.4. Галактика перебуває на відстані 100 млн пк. Обчисліть, скільки років летить світло від неї до Землі.
- 5.5. Чому утворення важких хімічних елементів не відбувалося спочатку в молодому Всесвіті, а відбувається тепер у надрах зір?
- 5.6. З якою швидкістю віддаляється від нас галактика, яка перебуває на відстані 10^9 св. років від Землі?
- 5.7. Від найближчої зорі (α Центавра) світло доходить до Землі за 4,3 року. Яка відстань до зорі? Оцініть відстані (у км), які світло проходить за 1 хв, 1 год, 1 рік.
- 5.8. Яку роль відіграють космічні катастрофи в еволюції життя на Землі?
- 5.9. Які існують підстави для пошуків життя за межами Сонячної системи?
- 5.10. Скільки часу сучасні космічні кораблі летіли б до найближчої зорі?
- 5.11. Чи можна за допомогою сучасних радіотелескопів установити контакт з позаземними цивілізаціями?
- 5.12. Що означає вислів «звичайне життя»? Які інші форми життя могли б існувати у Всесвіті?
- 5.13. Чому пілотовані космічні кораблі для міжпланетних польотів треба будувати в космічному просторі за межами земної атмосфери?
- 5.14. Скільки часу буде летіти космічний корабель на Марс по еліпсу з найменшою витратою енергії?

**ПЕРЕВІР СВОЮ КОМПЕТЕНТНІСТЬ****Контрольні запитання**

1. Яких хімічних елементів найбільше у Всесвіті і коли вони утворилися?
2. Чи однорідний Всесвіт?
3. Скінченний чи нескінченний спостережуваний Всесвіт?
4. Який вік Всесвіту?
5. Які органічні речовини виявлено в космосі?

Що я знаю і вмю робити

● Я вмю розв'язувати задачі з астрономії

1. Під час тривалих космічних польотів виникає проблема невагомості та створення штучного тяжіння. З яким періодом має обертатись навколо осі станція з діаметром 2 км для того, щоб створити земне тяжіння?
2. На небі з'явився диск НЛО, який за кутовими розмірами такий, як Місяць. Які вимірювання слід провести додатково, щоб визначити висоту НЛО над поверхнею Землі та його лінійний діаметр у метрах?

● Я знаю, що відбувається у Всесвіті

3. Якому «космічному прибульцеві» встановлено єдиний у світі пам'ятник і який посланець із космосу сам є своєрідним пам'ятником?
4. Коли у Всесвіті не буде галактик?
5. Чи зворотний процес еволюції речовини у Всесвіті?



ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Термін «Велика Стіна» в астрономії означає...

- А зародження нових зір та планетних систем
 Б величезне скупчення галактик у напрямку сузір'їв Діва і Волосся Вероніки
 В оборонні споруди, які створили галактичні цивілізації
 Г скупчення газу та пилу в міжгалактичному просторі
 Д скупчення невідомої темної речовини, яка поглинає світло далеких галактик

2. Згідно із законом Габбла всі галактики розлітаються в різних напрямках. Що міститься в центрі цього розширення?

- А Земля Б Наша Галактика В Галактика М31 у сузір'ї Андромеди
 Г скупчення галактик у сузір'ї Діви
 Д центра не існує, тому що в безмежному Всесвіті відсутні центр та околиці

3. Що означає в астрономії термін «Великий Вибух»?

- А вибух нової зорі
 Б вибух ядра галактики
 В зіткнення галактик
 Г момент, коли почалося розширення космічного простору
 Д момент, коли утворилися галактики

4. Коли утворилася Сонячна система?

- А 6000 років до н. е.
 Б 100 000 років до н. е.
 В 1 000 000 років до н. е.
 Г 5 млрд років до н. е.
 Д 15 млрд років до н. е.

5. Синергетика — це нова наука, що вивчає...

- А космічне право Б еволюцію складних систем
 В світову економіку Г світову екологію Д екологію космосу

6. Над якою проблемою працює міжнародна організація SETI?

- А пошуки життя у Всесвіті
 Б пошуки життя за межами Всесвіту
 В пошуки радіосигналів від інших цивілізацій
 Г пошуки інопланетних космічних кораблів
 Д пошуки марсіан

7. У якому діапазоні електромагнітних хвиль доцільно вести пошуки сигналів від позаземних цивілізацій?

- А γ-діапазон
- Б радіохвилі
- В інфрачервоні хвилі
- Г оптичний діапазон

8. Що означає термін «антропний принцип»?

А усе в космосі існує для того, щоб на Землі жили люди
Б необхідною умовою виникнення розумного життя є певні фізичні властивості Всесвіту

- В у космосі можуть бути розумні істоти, які схожі на людей
- Г з усіх розумних істот у Всесвіті найрозумнішими є люди на Землі
- Д перші розумні істоти у Всесвіті з'явилися тільки на Землі

9. Як розшифровується абревіатура ДНК?

- А демографічна невизначеність космосу
- Б дихлофосонуклеїнова кислота
- В добровільна народна команда
- Г дезоксирибонуклеїнова кислота
- Д диксонуклеїнова кислота

10. Які речовини є основою всіх живих організмів на Землі?

- А водень
- Б кисень
- В кремній
- Г вода
- Д вуглець

336

11. Який об'єм інформації передає людина своїм нащадкам за допомогою генів?

- А 10 Гбайт
- Б 1023 байт
- В 1020 Кбайт
- Г 1023 Мбайт
- Д 1033 байт

12. На яку відстань від Землі вже поширились у космос «розумні сигнали» наших радіостанцій?

- А 100 св. р.
- Б 1000 св. р.
- В 200 св. р.
- Г 50 св. р.
- Д 10 св. р.

ПРАКТИКУМ З РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

У 10-му класі ви ознайомилися з різними методами і способами розв'язування задач. Для того щоб полегшити процес розв'язування задач в 11-му класі, вам пропонуються такі алгоритми.

Алгоритм розв'язування задач із електродинаміки

1. Ознайомтеся з умовою задачі, визначте розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротко умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі, встановіть закони, які потрібно застосувати.
4. Виконайте малюнок — схему електричного кола. На ній вкажіть напрямок електричного струму, напрямок обходу.
5. Визначте види з'єднання споживачів, джерел струму.
6. У складних колах виділіть ділянки з паралельним та послідовним з'єднаннями.
7. Визначте загальний опір кола, за потреби використовуючи еквівалентні схеми.
8. Застосуйте закон Ома для вказаних в умові задачі ділянок.
9. За наявності на вказаних ділянках джерел струму для замкнених контурів застосуйте закон Ома для повного кола.
10. Проаналізуйте коло на наявність точок з однаковим потенціалом та виключіть із розгляду провідники, які ці точки з'єднують.
11. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
12. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загальному вигляді.
13. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
14. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
15. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач на електричний струм у різних середовищах

1. Ознайомтеся з умовою задачі, визначте розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротко умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Визначте середовище, у якому проходить електричний струм, з'ясуйте наявність вільних носіїв заряду.
4. Проаналізуйте фізичну суть задачі, встановіть закони, які потрібно застосувати в ній.
5. За потреби виконайте малюнок, указавши напрямок руху носіїв заряду, сили, що діють на частинку.
6. Застосуйте визначені закони до вказаних в умові явищ.
7. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
8. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загальному вигляді.
9. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
10. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
11. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач на магнітне поле

1. Ознайомтеся з умовою задачі, встановіть розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.

2. Запишіть коротку умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі, встановіть закони, які потрібно застосувати в цій задачі.
4. Виконайте малюнок, вказавши на ньому напрямок силових ліній магнітного поля, напрямок руху провідника або зарядженої частинки.
5. Визначте, чи є магнітне поле однорідним.
6. Визначте напрямок сили струму в провіднику, вид траєкторії зарядженої частинки.
7. Визначте та позначте на малюнку сили, які діють на провідник або частинку в магнітному полі.
8. Застосуйте до вказаних в умові задачі явищ закони Ампера, Лоренца, правила свердлика, лівої руки тощо.
9. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
10. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загальному вигляді.
11. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
12. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
13. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач на коливальний рух

1. Ознайомтеся з умовою задачі, встановіть розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротку умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі, встановіть характер коливального руху, рівняння, якими цей коливальний рух описується.
4. Якщо закон руху не описано явно, то розгляньте сили, які діють на тіла коливальної системи.
5. За наявності сил тертя проаналізуйте можливості застосування законів гармонічного руху.
6. Для квазіпружних сил встановіть їхню залежність від видовження.
7. Упевніться в наявності сили, яка повертає тіло в положення рівноваги, та інертних властивостей тіла.
8. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
9. За відсутності додаткових умов пам'ятайте, що пружини можна вважати невагомими, абсолютно пружними; силові поля — однорідними та потенціальними; тіла — матеріальними точками.
10. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загальному вигляді.
11. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
12. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
13. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач на електромагнітні коливання і хвилі

1. Ознайомтеся з умовою задачі, встановіть розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротку умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі.
4. Визначте, чи розглядаються процеси, які відбуваються в закритому коливальному контурі, чи процеси проходження змінного електричного струму в колах, які містять конденсатори, котушки індуктивності, трансформатори та активні опори.

5. З'ясуйте, чим визначається частота коливань змінного струму, напру- ги, ЕРС.
6. У деяких випадках обчислення слід проводити не на заключному етапі, а в процесі розв'язування задачі для того, щоб можна було передбачити подальший хід процесів.
7. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
8. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загально- му вигляді.
9. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
10. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
11. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач із оптики

1. Ознайомтеся з умовою задачі, визначте розділи фізики, які охоплюють явища, що розглядаються в задачі.
2. Запишіть коротко умову задачі, виразивши всі дані в СІ.
3. Проаналізуйте фізичну суть задачі. Визначте, до яких розділів опти- ки належать явища, описані в умові задачі.
4. Визначте, у яких оптично прозорих середовищах поширюється світ- ло. З'ясуйте, чи має місце перехід з одного оптично прозорого середовища в інше.
5. Виконайте потрібні геометричні побудови променів — падаючих, відбитих, заломлених.
6. Розгляньте співвідношення між кутами. Застосуйте закони відби- вання та заломлення для розрахунку шуканих величин.
7. Якщо потрібно побудувати зображення в плоскому дзеркалі, скорис- тайтеся властивостями дзеркального відбивання. Пам'ятайте, що зобра- ження міститься на такій самій відстані від площини дзеркала і має такі самі розміри, що й предмет.
8. Будуючи зображення, які дають сферичні лінзи, оберіть два проме- ні, хід яких після лінзи ви знаєте. На перетині заломлених променів або їхніх продовжень утворюється дійсне або уявне зображення. Розрахо- вуючи оптичні системи і визначаючи оптичну силу лінзи, фокусну від- стань та інші параметри, у деяких випадках обчислення слід проводити не на заключному етапі, а в процесі розв'язування задачі.
9. Визначте, які хвильові процеси характеризують явища, що розгля- даються в задачі.
10. У випадку, якщо кілька джерел випромінюють світло, впевніться в тому, що джерела когерентні і в результаті накладання хвиль спостері- гається інтерференція. Визначте умови інтерференційного максимуму та мінімуму.
11. У випадку, якщо світлова хвиля огинає перешкоду, визначте спів- відношення між розмірами перешкоди та довжиною хвилі. Застосуйте правила обчислення умов дифракційного мінімуму та максимуму.
12. Якщо йдеться про випромінювання або поглинання світлової енер- гії, визначте взаємне розташування джерела та освітлюваної поверхні, характеристики джерела.
13. За потреби запишіть додаткові рівняння з інших розділів фізики, математичні формули.
14. Розв'яжіть систему рівнянь відносно шуканої величини в загально- му вигляді.
15. Перевірте за одиницями фізичних величин правильність отриманої відповіді.
16. Виконайте обчислення, запишіть відповідь.
17. Перевірте результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач із квантової фізики

1. Ознайомтеся з умовою задачі.
2. Запишіть коротку умову, виразивши дані величини в СІ.
3. Розв'язуючи задачі, пов'язані з випромінюванням та поглинанням енергії атома, визначте: 1) у якому стані перебуває речовина (атомарному чи молекулярному); 2) у якому енергетичному стані є атоми (збудженому чи незбудженому); 3) у якому напрямку відбувається перехід з одного стаціонарного рівня на інший; 4) чи є випромінювання самочинним, чи це результат взаємодії електромагнітного поля з речовиною.
4. Під час розв'язування задач на радіоактивні перетворення: 1) проаналізуйте умову виконання закону збереження енергії, імпульсу, маси, кількості нуклонів, зарядового числа; 2) з'ясуйте умови, за яких відбуваються ці перетворення.
5. Запишіть потрібні рівняння. Розв'яжіть їх відносно шуканої величини.
6. Проаналізуйте отриманий результат на достовірність.

Алгоритм розв'язування задач із астрономії

1. Прочитайте умову задачі. Згадайте, які розділи астрономії та фізики стосуються теми задачі.
2. Пригадайте, які явища та процеси потрібно розглянути, а якими можна знехтувати.
3. Виконайте схематичний малюнок, а якщо потрібно — кілька малюнків, що показують різні стадії процесу, позначивши на ньому потрібні астрономічні та фізичні величини.
4. Переформулюйте умову задачі в астрофізичних термінах.
5. Запишіть коротку умову задачі, виразивши всі величини в СІ.
6. Згадайте закони і формули, що описують взаємозв'язок шуканих та заданих астрофізичних величин.
7. Запишіть закони і формули, що описують взаємозв'язок шуканих та заданих фізичних величин.
8. Знайдіть вираз шуканої величини через відомі в загальному вигляді (у вигляді формули).
9. Перевірте одиниці шуканої величини, що отримується за знайденою формулою.
10. Обчисліть значення шуканої величини.
11. Після отримання відповіді, якщо можливо, проаналізуйте, чи відповідає вона дійсності.

Приклади розв'язування задач із астрономії

Задача 1. Марс далі від Сонця, ніж Земля, в 1,5 рази. Яка тривалість року на Марсі? Орбіти планет вважати коловими.

Дано:	Розв'язання
$a_3 = 1 \text{ а. о.}$ $T_3 = 1 \text{ рік}$ $a = 1,524 \text{ а. о.}$	$\frac{T_3^2}{T^2} = \frac{a_3^3}{a^3}, \quad \frac{1}{T^2} = \frac{1}{1,524^3} = \frac{1}{3,540},$
$T = ?$	звідси тривалість року на Марсі $T = 1,881 \text{ року} = 687 \text{ діб.}$ Відповідь. 687 діб.

Задача 2. Обчисліть, на якій відстані від Землі на лінії Земля–Місяць містяться ті точки, у яких притягання Землею і Місяцем однакове. Відстань між Місяцем і Землею дорівнює 69 радіусам Землі, а маси Землі та Місяця відносяться як 81:1.

Розв'язання

Для точки A , що лежить на лінії Земля–Місяць між Землею і Місяцем, справджується вираз для прискорень, обумовлених притяганням Місяця і Землі:

$$\frac{Gm_1}{x^2} = \frac{Gm_2}{(r-x)^2},$$

де G — гравітаційна стала; m_1 — маса Землі; m_2 — маса Місяця; r — відстань між ними; x — шукана відстань від точки A до Землі.

Аналогічно для точки B , яка лежить на лінії Земля–Місяць, але за Місяцем:

$$\frac{Gm_1}{x^2} = \frac{Gm_2}{(r-x)^2}$$

у тих самих позначеннях.

Очевидно, що розв'язання зводиться до визначення коренів квадратного рівняння: $2x^2 - 243x + 7290 = 0$ (для A і B).

Звідки маємо $x_1 = 54$ і $x_2 = 67,5$, що відповідає 54 радіусам Землі (для A) і 67,5 радіуса Землі (для B). Для точок, які не лежать на прямій, яка сполучає центри Землі та Місяця, розв'язання задачі набагато складніше.

Задача 3. Визначте горизонтальний паралакс Юпітера, який спостерігають із Землі під час протистояння, якщо Юпітер у 5 разів далі від Сонця, ніж Земля.

<p>Дано:</p> $\frac{D}{D_C} = 4$ $p_C = 8,8''$ $p = ?$	<p style="text-align: center;">Розв'язання</p> $\frac{D}{D_C} = \frac{p_C}{p}, \text{ тобто } \frac{p_C}{p} = 4. D = \frac{206205''}{p} R_C.$ $\text{Тоді } p = \frac{p_C}{4} = \frac{8,8''}{4} = 2,2''.$
--	---

341

Задача 4. Через які інтервали часу зорі кульмінують на Місяці?

Відповідь. Цей інтервал часу дорівнює зоряному (сидеричному) місяцю, тобто 27,3 доби.

Задача 5. У телескоп із Землі на Місяці видно предмети розміром 1 км. Який найменший розмір деталей, які видно із Землі на Марсі в такий самий телескоп під час протистояння (на відстані 55 млн км)?

Розв'язання

Якщо з відстані від Землі до Місяця 380 000 км у даний телескоп видно предмети розміром 1 км, то з відстані 55 000 000 км у цей самий телескоп буде видно предмети розміром x . Тоді з пропорції $\frac{1}{x} = \frac{380\,000}{55\,000\,000}$

знаходимо, що $x \approx 145$ км. Цей результат показує, що під час спостережень поверхонь планет із Землі виникають певні труднощі. Після цього неважко зрозуміти, чому поверхні планет вивчено гірше за поверхню Місяця.

Задача 6. На фотографії спектра зорі її лінії зміщені відносно свого нормального положення на 0,02 мм. На скільки змінилася довжина хвилі, якщо в спектрі відстань 1 мм відповідає зміні довжини хвилі на 0,004 мкм? З якою швидкістю рухається зоря? Довжина хвилі нерухомого джерела дорівнює 0,5 мкм.

Потрібно обчислити зміну довжини хвилі. Якщо відстань 1 мм відповідає зміні довжини хвилі на 0,004 мкм, то зміщення 0,02 мм — зміщенню у 50 разів меншому, тобто $8 \cdot 10^{-5}$ мкм.

Отже, можна записати:

Дано: $\lambda_0 = 0,5 \text{ мкм}$ $\lambda - \lambda_0 = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$	Розв'язання $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$, або $\lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c}$. Тоді $v = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0}$. Підставивши значення відомих величин, отримаємо: $v = 48 \text{ км/с}$.
$v - ?$	

Задача 7. Паралакс Веги — 0,11". Скільки часу світло від неї поширюється до Землі?

Дано: $p = 0,11''$ $D - ?$	Розв'язання Використаємо співвідношення між відстанню і паралаксом, знаючи, що відстань, виражена в парсеках, дорівнює оберненій величині річного паралакса, вираженого в секундах дуги, тобто $D = \frac{1}{p}$. Отже, відстань до Веги $D = \frac{1}{0,11} \text{ пк} \approx 9 \text{ пк}$. Оскільки 1 пк = 3,26 св. року, то світло від Веги до Землі поширюється за $D = 9 \cdot 3,26 \text{ св. року} = 29,3 \text{ св. року}$.
----------------------------------	---

Задача 8. Скільки років потрібно було б летіти в напрямку сузір'я Ліри зі швидкістю 30 км/с, щоб Вега стала вдвічі ближчою (або вчетверо яскравішою)?

Розв'язання

Слід звернути увагу на те, що швидкість у задачі у 10^4 разів менша за швидкість поширення світла. Тоді, якщо світло пройде половину відстані, визначеної у попередній задачі, за 14,5 року політ зі швидкістю 30 км/с триватиме у 10^4 разів довше, тобто 145 000 років.

Задача 9. Якщо б по орбіті Землі рухалася зоря з такою самою масою, як у Сонця, то який би був період її обертання?

Розв'язання

Використовуючи третій закон Кеплера, можна записати, що $1 + 1 = \frac{1}{T^2}$, звідки $T = \sqrt{\frac{1}{2}} \text{ року} = 0,707 \text{ року} = 257 \text{ діб}$.

342

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Робота № 1. Визначення ємності та енергії зарядженого конденсатора

Мета роботи: ознайомитися з одним із методів визначення електроємності та енергії зарядженого конденсатора та виміряти їх.

Обладнання: набір конденсаторів, конденсатор невідомої ємності, ампервольтметр (авометр) або мікроамперметр, джерело електроживлення, перемикач двополюсний, комплект з'єднувальних провідників.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 4) і дайте відповідь на запитання:

1. Які види конденсаторів ви знаєте? Яка їхня будова?
2. Що таке ємність конденсатора?
3. Як визначається енергія зарядженого конденсатора?
4. У яких галузях використовують конденсатори?

Хід роботи

1. Складіть електричне коло за схемою (мал. 1), увімкнувши в нього джерело постійного струму, конденсатор відомої ємності, гальванометр і двополюсний перемикач.

2. Зарядіть конденсатор. Для цього з'єднайте його на короткий час із джерелом струму. Потім, зосередивши увагу на стрілці приладу, швидко перекиньте конденсатор на гальванометр і визначте максимальне відхилення (відкид) стрілки, відлічуючи на око десять частини поділки. Дослід

повторіть кілька разів, щоб точніше зняти покази стрілки, і обчисліть коефіцієнт пропорційності k . (Якщо конденсатор постійної ємності заряджати від того самого джерела постійної напруги, а потім розряджати його через гальванометр, то стрілка гальванометра щоразу відхилитиметься по шкалі на те саме число поділок. Якщо змінити ємність конденсатора, то відхилення стрілки гальванометра буде іншим. Маючи конденсатори відомої ємності (еталони), на досліді можна перекопатися, що ємність конденсатора C прямо пропорційна числу поділок n , на яке відхиляється стрілка гальванометра: $C = kn$. Звідси можна визначити коефіцієнт пропорційності $k = \frac{C}{n}$, який є електроємністю, що відповідає одній поділці.

Знаючи його, можна за відхиленням стрілки гальванометра визначити ємність будь-якого іншого конденсатора, повторивши з ним цей дослід.)

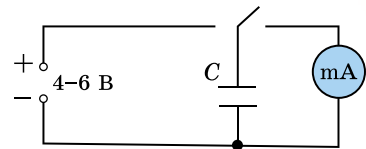
3. Виконайте досліди з конденсаторами іншої ємності і за знайденими даними обчисліть середнє значення k . Результати вимірювань і обчислень запишіть у таблицю.

Номер досліду	Ємність конденсатора C , мкФ	Число поділок на шкалі гальванометра	Коефіцієнт пропорційності	Середнє значення k

4. В електричне коло ввімкніть конденсатор невідомої ємності C_x і визначте, на скільки поділок відхиляється стрілка вимірювального приладу в цьому випадку. Знаючи коефіцієнт пропорційності k , обчисліть C за формулою $C = kn_x$.

5. За формулою $W = \frac{CU^2}{2}$ визначте енергію зарядженого конденсатора.

6. За результатами досліджень зробіть висновки.



Мал. 1

Творче завдання. Розгляньте будь-який конденсатор. За написами на ньому визначте: 1) ємність конденсатора; 2) на яку напругу він розрахований; 3) який заряд він може накопичувати; 4) енергію, яку він може накопичити.

Робота № 2. Перевірка законів послідовного та паралельного з'єднання провідників

Мета роботи: навчитися з'єднувати провідники послідовно та паралельно, визначати опір таких з'єднань, 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.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 5) і дайте відповідь на запитання:

1. Чим відрізняється послідовне з'єднання провідників від паралельного?
2. Назвіть закони послідовного з'єднання провідників.
3. Назвіть закони паралельного з'єднання провідників.
4. Де застосовується послідовне та паралельне з'єднання провідників?

Хід роботи

1. Складіть електричне коло для вивчення послідовного з'єднання елементів за схемою (мал. 2).

2. Запишіть покази амперметра.

3. Вольтметр під'єднайте паралельно: а) до опору R_1 і запишіть покази вольтметра U_1 ; б) до опору R_2 і запишіть покази вольтметра U_2 ; в) до ділянки кола з обома опором і запишіть покази вольтметра U .

4. За даними амперметра та вольтметра визначте значення кожного опору і загальний опір кола.

5. Зробіть висновок, чи виконуються закони послідовного з'єднання елементів.

6. Складіть електричне коло для вивчення паралельного з'єднання елементів за схемою (мал. 3).

7. Запишіть покази вольтметра.

8. Амперметр під'єднайте послідовно: а) до опору R_2 і запишіть покази амперметра I_1 ; б) до опору R_2 і запишіть покази амперметра I_2 ; в) до ділянки кола з R_1 і R_2 і запишіть покази амперметра I .

9. За даними амперметра і вольтметра визначте значення кожного опору і загальний опір кола.

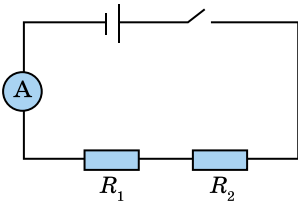
10. Зробіть висновок, чи виконуються закони паралельного з'єднання елементів.

Творче завдання. Ви маєте 3 резистори, опір кожного з них 10 Ом. Які опори можна отримати за їхньою допомогою? Намалюйте ці з'єднання.

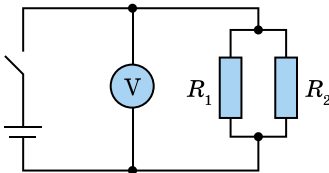
Робота № 3. Визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела струму

Мета роботи: ознайомитися з одним з методів вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.

Обладнання: досліджуваній гальванічний елемент (батарея гальванічних елементів), лабораторний амперметр, лабораторний вольтметр, реостат на 6–8 Ом і 2 А, ключ та з'єднувальні проводи.



Мал. 2



Мал. 3

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 6) і дайте відповідь на запитання:

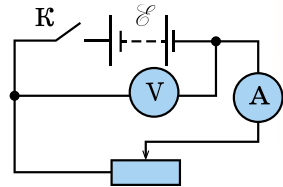
1. Що означає вислів «ЕРС гальванічного елемента дорівнює 1,5 В»?
2. Яка будова джерела струму, внутрішній опір якого вимірюється в роботі?
3. Чи зміняться покази амперметра, якщо переставити реостат з одного боку амперметра на другий?
4. Чи впливає внутрішній опір амперметра на точність вимірювання внутрішнього опору джерела струму?

Хід роботи

1. Визначте та запишіть характеристики засобів вимірювання, що використовуються в роботі, і внутрішній опір вольтметра. Внутрішній опір вольтметра лабораторного (шкільного) магнітоелектричної системи дорівнює 500 Ом.

2. Приєднайте вольтметр до клем джерела струму і виміряйте напругу U_1 . Складіть електричне коло за схемою (мал. 4). Повзунок реостата встановіть посередині. Після того як учителька перевірить електричне коло, замкніть ключ і виміряйте напругу U_2 та силу струму I .

Результати вимірювань U_1 , U_2 і I запишіть у таблицю.



Мал. 4

Позначення величини	Покази приладів	Δ_v	Δ_I	$\Delta = \Delta_v + \Delta_I$	\mathcal{E} , В	$\Delta \mathcal{E}$, В	ε , %	r , Ом	Δr , Ом	ε_r , %
U_1										
U_2										
I										

3. Обчисліть \mathcal{E} (ЕРС) джерела струму і похибку вимірювання.

4. Обчисліть внутрішній опір джерела струму і похибку вимірювання.

Творче завдання. Які ще існують методи вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму?

Робота № 4. Розширення меж вимірювання амперметра та вольтметра

Мета роботи: навчитися виготовляти шунт для розширення меж амперметра та додатковий опір для розширення меж вольтметра.

Обладнання: міліамперметр лабораторний, амперметр лабораторний, вольтметр лабораторний, мікрометр, лінійка з міліметровими поділками, омметр, джерело постійного струму на 6 В, реостат на 30 Ом, змінний резистор на 500 Ом на панелі, мідна або константанова дротина, панель із чотирма клеммами, з'єднувальні проводи.

Підготовка до виконання роботи

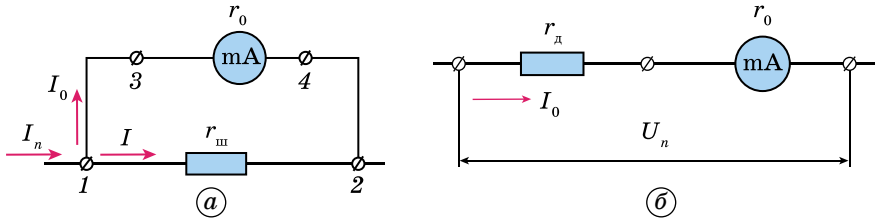
Дайте відповідь на запитання:

1. Яке призначення шунта та додаткового опору?
2. Як можна визначити довжину дроту, щоб він мав потрібний опір?
3. Як можна пристосувати амперметр для вимірювання напруги?
4. Що потрібно зробити, щоб вольтметром можна було вимірювати силу струму?

Теоретичні відомості

Основною частиною будь-якого амперметра і вольтметра є високочутливий прилад магнітоелектричної системи (мікроамперметр або міліам-

перметр). Цей прилад має певну чутливість, і стрілка його відхиляється на всю шкалу при проходженні певного струму I_0 . Коли потрібно виготовити амперметр з номінальним значенням $I_n = nI_0$, де n може бути числом порядку $10-10^5$, до мікроамперметра чи міліамперметра приєднують паралельно резистор з опором $r_{\text{ш}}$ (мал. 5, а).



Мал. 5

Цей резистор називають шунтом. Опір шунта $r_{\text{ш}}$ можна визначити, виходячи з таких міркувань. Оскільки $I_n = I_0 + I$, де I — сила струму, що проходить через шунт, і $I r_{\text{ш}} = I_0 r_0$, де r_0 — опір мікроамперметра, то

$$r_{\text{ш}} = \frac{I_0 r_0}{I} = \frac{I_0 r_0}{I_n - I_0}.$$

Поділивши чисельник і знаменник на I_0 і врахувавши, що $I_n : I_0 = n$,

346 одержимо: $r_{\text{ш}} = \frac{r_0}{n - 1}.$

Щоб виготовити вольтметр для вимірювання напруги з номінальним значенням U_n , до мікроамперметра чи міліамперметра приєднують додатковий резистор, опір якого r_d (мал. 5, б). Значення додаткового опору

визначають з рівності: $U_n = I_0(r_d + r_0)$, звідки $r_d = \frac{U_n}{I_0} - r_0.$

Хід роботи

1. Визначте і запишіть характеристики лабораторного міліамперметра. Його внутрішній опір — 10,7 Ом.

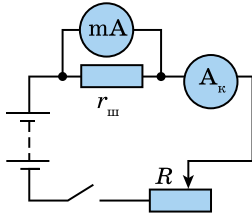
2. Розрахуйте опір шунта до лабораторного міліамперметра на 0,5 А. З мідної або константанової дротини виготовте шунт. Для цього виміряйте діаметр дротини, за довідниковими таблицями визначте питомий опір дротини та, використавши формули $R = \rho \frac{l}{S}$ і $S = \frac{\pi d^2}{4}$, визначте довжину дротини. Дротину закріпіть на панелі (для виготовлення шунта дротину треба взяти такої довжини, щоб був деякий запас, потрібний для закріплення її в клеммах).

3. Підключіть шунт до клем міліамперметра і зберіть коло за схемою (мал. 6, де A_k — контрольний амперметр, яким є лабораторний амперметр; R — змінний резистор на 500 Ом).

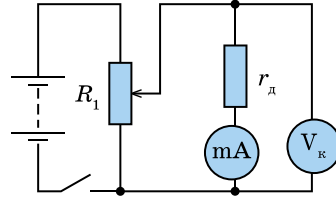
4. Замкніть ключ і, переміщаючи повзунок змінного резистора, перевірте покази виготовленого амперметра за допомогою контрольного. Запишіть результати перевірки і характеристики виготовленого амперметра та його внутрішній опір.

5. Розрахуйте додатковий опір на напругу 5 В. За додатковий опір візьміть змінний резистор, опір якого 500 Ом, встановивши за допомогою омметра потрібний опір. Приєднайте додатковий опір до клем міліамперметра і зберіть коло за схемою (мал. 7), де V_k — контрольний вольтметр, яким є лабораторний вольтметр; R_1 — реостат. Замкнувши ключ і пере-

міщаючи повзунок реостата, перевірте покази виготовленого вольтметра за допомогою контрольного. Запишіть результати перевірки і характеристики виготовленого вольтметра та його внутрішній опір.



Мал. 6



Мал. 7

Творче завдання

1. Розрахуйте опір шунта на 1 А для шкільного лабораторного вольтметра, внутрішній опір якого 500 Ом.
2. Розрахуйте опір додаткового резистора на 100 В для шкільного лабораторного амперметра, внутрішній опір якого 0,48 Ом.

Робота № 5. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом

Мета роботи: вивчити основні властивості напівпровідникового діода.

Обладнання: германієвий напівпровідниковий діод, амперметр, джерело струму, провідники, реостат з ковзним контактом, вимикач, вольтметр.

347

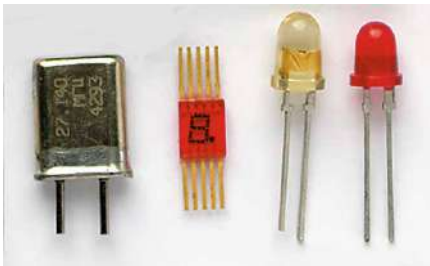
Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 10) і дайте відповідь на запитання:

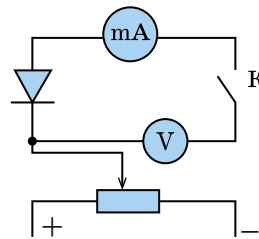
1. Які прилади називають діодами?
2. Як пояснити провідність діода у прямому і зворотному напрямках?
3. Де використовуються напівпровідникові діоди?
4. Чи збережеться одностороння провідність діода за високих температур?

Хід роботи

1. Ознайомтеся із зовнішнім виглядом діода, його маркуванням (мал. 8).
2. Складіть коло із джерела струму, амперметра, реостата і вимикача. Виведіть повзунок реостата на найбільший опір (мал. 9).



Мал. 8



Мал. 9

3. Замкніть коло і стежте за показами амперметра. Встановіть повзунок реостата так, щоб амперметр показував струм 0,1 А.
4. Розімкніть коло і в нього ввімкніть діод послідовно з амперметром.
5. Поступово змінюючи положення повзунка реостата, стежте за показами амперметра і вольтметра.

Результати вимірювань запишіть у таблицю.

Напруга U , В							
Сила струму I , мА							

6. За даними таблиці побудуйте вольт-амперну характеристику діода.

7. Якщо змінити полярність увімкнення діода в коло, то опір p - n -переходу збільшується і сила струму практично дорівнює нулю.

8. Обережно підігріваючи діод, стежте за показами амперметра. Що з ними відбувається?

9. Зробіть висновки.

Творче завдання

1. Чому діод добре проводить струм в одному напрямку (пропускному) і практично не пропускає струм у протилежному (запінному) напрямку?

2. Чому опір напівпровідника (діода) різко зменшується, якщо опір металів з підвищенням температури зростає приблизно лінійно?

Робота № 6. Вимірювання електрохімічного еквівалента міді

Мета роботи: виміряти електрохімічний еквівалент міді і значення елементарного заряду, отримати уявлення про гальваностегію та добування чистих металів за допомогою електролізу.

Обладнання: електролітична ванна, скляна посудина з розчином мідного купоросу, 2 електроди (анод і катод), джерело постійного струму на 4–6 В, секундомір, лабораторний амперметр (шкільний), терези з набором важків, повзунковий реостат на 6 Ом, наждачний папір, сухі серветки, ключ, з'єднувальні проводи.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 11) і дайте відповідь на запитання:

1. Що називають електрохімічним еквівалентом речовини?
2. Які процеси відбуваються в розчині на електродах при електролізі?
3. Яка відмінність між носіями струму в електролітах і в газах?
4. Чому навколо електроліту, усередині якого є заряджені йони, не можна виявити електричне поле?

Теоретичні відомості

На практиці заряд визначають за силою струму I і часом його проходження t через електроліт. Оскільки $q = It$, то $m = kIt$, звідки $k = \frac{m}{It}$.

Величина, обернена до електрохімічного еквівалента $\frac{1}{k} = \frac{It}{m}$, являє

собою заряд, який переносить 1 кг речовини. Заряд, що переносить 1 моль для одновалентної ($n = 1$) речовини, буде в A разів більший від цього виразу, якщо A — атомна маса речовини. Як відомо, в одному молі речовини число атомів дорівнює числу Авогадро N_A , тому заряд одного йона буде:

$q = \frac{ItA}{mN_A}$, а формула обчислення значення елементарного заряду для n валентної речовини матиме вигляд: $e = \frac{ItA}{mN_A n}$.

Опис приладу і схеми

Для вимірювання електрохімічного еквівалента міді складають електричне коло за схемою (мал. 10). На цьому малюнку В — електролітична

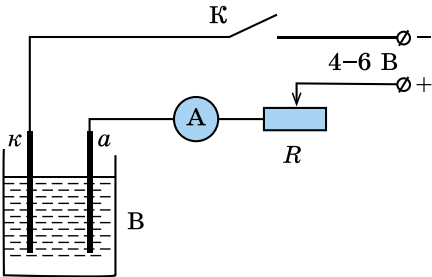
ванна — звичайна скляна посудина з розчином мідного купоросу і мідними електродами k і a ; R — реостат; A — амперметр; K — ключ.

Хід роботи

1. Визначте та запишіть характеристики засобів вимірювання, що використовуються в роботі.

2. Складіть електричне коло за схемою (мал. 10), тобто ввімкніть послідовно джерело струму, ключ K , електролітичну ванну B , амперметр A і реостат R з ковзним контактом.

3. Після того як учителька перевірить схему, замкніть ключем K електричне коло і встановіть силу струму приблизно 1,8 А. Потім розімкніть коло, витягніть катод і добре очистіть його наждачним папером. Промийте й просушіть пластинку сухою серветкою та зважте.



Мал. 10

Примітка. Не слід торкатися руками частини мідної пластинки, призначеної для осаджування металу, щоб там не залишилося масних плям, на яких буде погано осідати метал.

4. Поставте катодну пластинку на місце, установивши її строго паралельно анодній пластинці (щоб густина струму між пластинками була однаковою).

5. Замкніть електричне коло й одночасно запусіть секундомір. Під час досліду стежте, щоб сила струму залишалася незмінною (наприклад, 1,8 А). Через 15 хв припиніть пропускати струм, обережно промийте пластинку проточною водою, висушіть серветкою і зважте.

6. Результати вимірювань сили струму, час проходження струму через електроліт і масу пластинки до і після пропускання струму запишіть у таблицю 1.

Таблиця 1

Позначення величини	Покази приладів	Δ_b	Δ_I	$\Delta = \Delta_b + \Delta_I$	k , кг/Кл	Δk , кг/Кл	ε , %
m							
I							
t							

7. Обчисліть значення електрохімічного еквівалента міді та похибки вимірювання: $k = \frac{m}{It}$, $\varepsilon = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t}$.

8. Обчисліть значення елементарного заряду із строгим обліком похибок (табл. 2).

Вказівка. Для знаходження значення елементарного заряду використати формулу $e = \frac{ItA}{mN_A n}$.

Значення атомної маси міді та числа Авогадро взяти з такою кількістю значущих цифр, щоб їхніми похибками можна було знехтувати (порівняно з похибками вимірювання I і m).

Позначення величини	Покази приладів	Δ_b	Δ_i	$\Delta = \Delta_b + \Delta_i$	e , Кл	Δe , Кл	ε , %
m							
I							
t							

Творче завдання

1. Виміряйте товщину шару міді, що утворився на катоді за час проходження струму.

2. Визначте, яка кількість йонів проходила щосекунди через розчин мідного купоросу під час проведення досліду.

3. За даними, узятими з таблиць, обчисліть число Фарадея.

Робота № 7. Дослідження явищ електромагнітної індукції та самоіндукції

Мета роботи: експериментально вивчити явища електромагнітної індукції та самоіндукції.

Обладнання: дві котушки з осердями, два дугоподібні або штабові магніти, лабораторний міліамперметр, джерело постійного струму на 5–6 В, реостат на 30 Ом, вимикач, дві однакові електролампочки, реостат на 10 Ом, котушка з великою кількістю витків і замкнутим осердям, з'єднувальні проводи.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 17) і дайте відповідь на запитання:

1. Який струм називають індукційним?
2. Як за правилом Ленца визначити напрямок індукційного струму?
3. Що таке потік магнітної індукції?
4. Від чого залежить ЕРС індукції? Чому не виникає в котушці ЕРС індукції, якщо магніт нерухомий відносно котушки або по первинній котушці проходить постійний струм?
5. У котушку двічі з однаковою швидкістю вводять магніт: коли котушка розімкнена і коли замкнена. Коли потрібно розвивати більшу потужність і чому?

Хід роботи

1. Приєднайте котушку з великою кількістю витків до міліамперметра. Швидко введіть магніт у котушку і стежте за показами приладу. Залиште магніт у котушці й зафіксуйте покази приладу.

Швидко витягніть магніт з котушки і стежте за показами приладу. Повторіть попередні досліди, тримаючи магніт у руці нерухомо і переміщуючи котушку. Поясніть, у яких випадках індукується струм.

2. Повільно введіть у котушку, замкнену на гальванометр, або витягніть з неї спочатку один, а потім два магніти, складені однойменними полюсами. Дослід повторіть, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясуйте, у яких випадках сила індукційного струму більша.

3. Послідовно до міліамперметра приєднайте ще реостат і приблизно з однаковою швидкістю введіть у котушку (або витягніть з неї) два магніти: спочатку, коли реостат виведений з кола ($R = 0$), а потім, коли він уведений у коло ($R = 30$ Ом). Зафіксуйте покази приладу. Зробіть висновки.

4. Швидко введіть магніт у котушку, ввімкнену в те саме електричне коло, що використовувалося в п. 3, і зафіксуйте напрямок відхилення стрілки міліамперметра. За відхиленням стрілки визначте напрямок індукційного струму і силових ліній магнітного поля індукційного струму.

Проведіть дослідження магнітного поля індукційного струму під час витягування магнітів. Упевніться в обох випадках, що справджується правило Ленца.

5. З електричного кола, що використовувалося в п. 4, вимкніть реостат, тобто котушку з великою кількістю витків приєднайте лише до міліамперметра. Другу котушку приєднайте послідовно з реостатом, вимикачем і джерелом струму. Одну котушку вставте у другу і введіть у них залізне осердя або надіньте обидві котушки на спільне осердя. Реостат повністю виведіть. Ключем замкніть коло і при цьому стежте за показами приладу. Потім швидко збільшіть опір кола, зменшіть його і вимкніть коло. Весь час стежте за показами приладу, поясніть, у яких випадках індукується струм.

6. Використовуючи те саме електричне коло, що і в п. 5, повністю виведіть реостат, замкніть коло, швидко реостатом збільшіть і зменшіть опір кола; повільно збільшіть і зменшіть опір кола. Запишіть максимальне відхилення стрілки міліамперметра при замиканні кола, швидкому зменшенні опору кола, повільному зменшенні опору кола. Зробіть висновок про значення ЕРС індукції у проведених дослідах.

7. Використовуючи те саме електричне коло, що і в пп. 5 і 6, замкніть і розімкніть його, фіксуйте напрямок відхилення стрілки міліамперметра. За напрямком відхилення стрілки міліамперметра визначте напрямок індукційного струму, напрямок силових ліній магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрямком струму в первинній котушці і напрямком силових ліній його поля.

Поясніть, який напрямок індукційного струму порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, під час збільшення та зменшення його. Перевірте на проведених дослідах виконання правила Ленца.

8. Складіть електричне коло (мал. 11). Спостерігайте світіння електричних лампочок після замикання електричного кола. Поясніть явище, яке спостерігаєте.

9. Складіть електричне коло (мал. 12). Стежте за показами міліамперметра при розмиканні електричного кола. Поясніть явище, яке спостерігаєте.

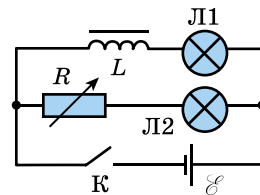
Примітка. Малюючи схеми дослідів, позначте полюси магніту (N і S), напрямок струму на витках котушки. Близьку до спостерігача частину витків котушки накресліть товстими лініями, а дальшу — тонкими.

Творче завдання. Увімкніть регулятор гучності гучномовців на максимум. З'єднайте гучномовці двома проводами і розмістіть їх у різних кімнатах. Зачиніть двері між кімнатами. Попросіть, щоб хтось голосно говорив у один гучномовець, а у другий — слухайте. Поясніть спостережуване явище.

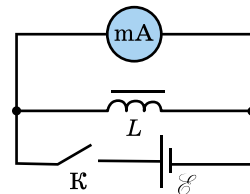
Робота № 8. Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

Мета роботи: визначити прискорення вільного падіння за допомогою маятника.

Обладнання: кулька з отвором, нитка, штатив з муфтою і кільцем, вимірювальна стрічка, годинник із секундною стрілкою або секундомір.



Мал. 11



Мал. 12

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 20) і дайте відповідь на запитання:

1. Хто вперше ввів поняття прискорення вільного падіння тіл?
2. Від чого залежить прискорення вільного падіння тіл?
3. Що таке математичний маятник?



Мал. 13

Хід роботи

1. Установіть на краю стола штатив. У верхній частині штатива за допомогою муфти закріпіть кільце та підвісьте до нього кульку на нитці. Кулька має висіти на відстані 3–5 см від підлоги (мал. 13).
2. Вимірювальною стрічкою виміряйте довжину l маятника.
3. Відхиліть маятник від положення рівноваги та відпустіть його.
4. Виміряйте час 40–60 повних коливань.
5. За формулою $g = 4\pi^2 n^2 l / t^2$ обчисліть g .
6. Повторіть дослід ще 4 рази й обчисліть g .
7. Визначте середнє значення отриманих значень вимірних величин.
8. Одержані результати запишіть у таблицю.

№	l , м	Δl , м	N	t , с	t_c , с	Δt_c , с	T , с	T_c , с	g , м/с ²	g_c , м/с ²	Δg_c , м/с ²	ε , %
1												
2												
3												
4												
5												

9. Порівняйте одержане значення g із значенням $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ та обчисліть похибки вимірювання: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{2T_c}{T}$; $\Delta g = \varepsilon g_c$.

10. Результати запишіть у вигляді: $g = g_c \pm \Delta g_c$. Зробіть висновки.

Творче завдання. Використовуючи знання з фізики, запропонуйте власний спосіб визначення прискорення вільного падіння.

Робота № 9. Дослідження коливань пружинного маятника

Мета роботи: дослідити залежність періоду коливань пружинного маятника від маси тягарця і жорсткості пружини.

Обладнання: набір тягарців з механіки НГМ-100, тримач зі спіральною пружиною, штатив для фронтальних робіт, метр демонстраційний, секундомір або годинник із секундною стрілкою.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 20) і дайте відповідь на запитання:

1. Що таке жорсткість пружини?
2. Як зміниться період коливань вертикального пружинного маятника, коли замість однієї пружини взяти дві такі самі, з'єднані паралельно? Послідовно?
3. Як зміниться період коливань пружинного маятника, коли його перенести з полюса на екватор?
4. Чи можна наручними механічними годинниками виміряти час у стані невагомості?

Хід роботи

1. Закріпіть пружину з тримачем у лапці штатива і підвісьте до неї тягарець масою 100 г. Поряд з тягарцем вертикально закріпіть вимірювальну лінійку та позначте початкове положення тягарця.

2. Підвісьте до пружини ще два тягарці масою по 100 г (мал. 14) і виміряйте її видовження Δx , спричинене дією сили $F = 2$ Н. За виміряними видовженням і відомою силою обчисліть жорсткість пружини: $k = \frac{F}{\Delta x}$.

3. Знаючи жорсткість пружини, обчисліть період T пружинного маятника масою 200 і 400 г за формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

4. Залиште на пружині два тягарці масою по 100 г, виведіть пружинний маятник з положення рівноваги, змістивши його на 5–7 см униз, і експериментально визначте період коливань маятника. Для цього, вимірявши інтервал часу Δt , протягом якого маятник робить 20 повних коливань, визначте період коливань за формулою:

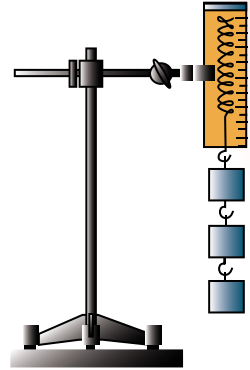
$$T = \frac{\Delta t}{N}$$

5. Такі самі вимірювання та обчислення виконайте з маятником масою 400 г.

6. Складіть таблицю та запишіть у неї результати.

7. Порівняйте результати та зробіть висновки.

Творче завдання. За допомогою пружинного маятника виміряйте прискорення вільного падіння.



Мал. 14

Робота № 10. Визначення роздільної здатності ока

Мета роботи: навчитися визначати роздільну здатність ока людини та інші його властивості.

Обладнання: аркуш білого паперу, аркуш міліметрового паперу, голка, лінійка, екран, метрова стрічка.

Підготовка до виконання роботи

Дайте відповідь на запитання:

1. Що таке роздільна здатність ока людини?
2. Що таке лінійна роздільна здатність?
3. Що таке кутова роздільна здатність?

Теоретичні відомості

Роздільна здатність ока — це величина, що характеризує його здатність давати роздільне зображення двох близьких одна до одної точок об'єкта.

Найменшу лінійну (або кутову) відстань між двома точками, при якій їхні зображення сприймаються роздільно, називають лінійною (або кутовою) роздільною здатністю.

Кутова роздільна здатність — найменший кут зору, при якому око людини ще розрізняє дві точки предмета окремо. На практиці прийнято вважати, що кутова роздільна здатність ока лежить у межах 2–4 кутових хвилин.

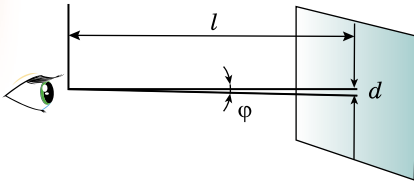
Лінійна роздільна здатність (Z) — найменша відстань між двома точками предмета, що розглядається з відстані найкращого зору, при якому вони помітні роздільно.

Нагадаємо, що мова йде про відстань найкращого зору для цього ока. Для ока з нормальними межами акомодациі $\alpha_0 = 0,25 \text{ м}$ ($25 \cdot 10^4 \text{ мкм}$); $\beta = 2'-4'$ ($5,8-11,6 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$). Використовуючи ці значення, отримуємо таку оцінку для лінійної роздільної здатності нормального ока: $Z = 145-290 \text{ мкм}$.

Для короткозорого ока в межах його акомодациі значення β таке саме, як для нормального ока, а відстань найкращого зору — менша. Пропорційно менша і лінійна межа роздільності. Для далекозорого ока — навпаки.

Хід роботи

1. Для визначення роздільної здатності ока потрібно мати об'єкт спостереження. Доцільно взяти аркуш білого паперу з двома точками на відстані $d = 1 \text{ мм}$ одна від одної (мал. 15) чи лінійку з міліметровими поділками. Закріпіть цей аркуш (лінійку) вертикально.



Мал. 15

2. Виміряйте максимальну відстань, з якої ще можна розрізнити ці точки.

3. Роздільну здатність ока визначте за формулою: $\varphi = \frac{d}{l} \text{ (рад)} \approx \frac{d}{l} 3420'$.

4. Для дослідження залежності роздільної здатності ока від діаметра отвору, через який розглядається об'єкт, у

смужці міліметрового паперу голкою проколiть отвори діаметром 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм і т. д. Визначте роздільні здатності ока при спостереженні об'єкта через ці отвори.

5. Переконайтеся, що зі зменшенням діаметра отвору зменшується і відстань l , тобто збільшується кут φ .

6. За результатами дослідження побудуйте графік залежності роздільної здатності ока від діаметра отвору в екрані.

Творче завдання. Дослідіть інші властивості ока (виявлення сліпої плями, зміна діаметра зіниці, акомодациа ока, зір двома очима).

Робота № 11. Вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки

Мета роботи: виміряти довжину світлової хвилі, знаючи сталу дифракційної ґратки і знаходячи кут відхилення променя світла від прямолінійного напрямку.

Обладнання: прилад для вимірювання довжини світлової хвилі, електрична лампа з прямою ниткою розжарювання.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 34) і дайте відповідь на запитання:

1. Яка будова дифракційної ґратки? Що називають її періодом?

2. Як утворюється дифракційний спектр і чим він відрізняється від призматичного?

3. Які промені дифракційного спектра відхиляються від початкового напрямку на більший кут?

4. Як впливає зміна періоду дифракційної ґратки на кут відхилення променів?

Опис приладу

Прилад для вимірювання довжини світлової хвилі (мал. 16) складається з дерев'яного бруска 2, на якому є шкала з міліметровими поділками, рамки 1 для дифракційної ґратки і повзунка 3 зі щілиною, на якому нанесено міліметрові поділки. Брусок шарнірно



Мал. 16

з'єднаний із стержнем 4. Його вставляють в отвір масивної підставки 5. Така будова приладу дає змогу закріплювати його під різними кутами й розміщувати в будь-якому напрямку. Шкалу 3 зі щілиною і захисним щитком зверху можна переміщувати вздовж бруска.

Хід роботи

1. Визначте та запишіть характеристики шкал, за якими проводяться вимірювання.

2. Джерелом світла для всіх установок буде лампа, яку слід розмістити на демонстраційному столі, підключивши її до освітлювальної мережі.

3. Уставте дифракційну ґратку в рамку й накладіть на брусок 2 повзунком зі шкалою (мал. 16). Дивлячись через дифракційну ґратку, спрямуйте прилад на лампу так, щоб крізь вузьку прицільну щілину повзунка, яка міститься над нульовою міткою шкали 3, було видно нитку розжарювання лампи. Тоді по обидва боки від щілини з'являться дифракційні спектри. Якщо спектри трохи нахилені відносно шкали, то це означає, що штрихи дифракційної ґратки не вертикальні. Повернувши рамку з ґраткою на деякий кут, треба усунути перекіс.

4. Визначте положення червоних і фіолетових променів спектрів першого та другого порядку. Для цього треба переміщувати шкалу вздовж бруска то далі від лампи, то ближче до неї, щоб досліджуваний промінь був на позначці шкали. Так буде зручно встановити його розташування. Нехай досліджуваний промінь буде на позначці шкали h_1 . З другого боку щілини він має бути на тій самій відстані. Якщо при цьому праворуч і ліворуч від 0 ці відстані будуть трохи відрізнятися, то треба знайти їхнє середнє арифметичне значення.

5. Виміряйте відстань l від екрана до дифракційної ґратки. За результатами вимірювання відстаней h і l легко визначити тангенс кута, під яким спостерігається досліджуваний промінь, а за ним і синус цього кута. Справді, тангенс кута φ , під яким розглядається досліджуваний промінь,

визначається за формулою: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{l}$. Оскільки кут φ незначний, то $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$ і формула $n\lambda = d \sin \varphi$ матиме вигляд: $\lambda = \frac{dh}{nl}$.

6. Результати вимірювань запишіть у таблицю.

Позначення величини	Покази приладів	Δ_b	Δ_l	$\Delta = \Delta_b + \Delta_l$	λ , м	$\Delta\lambda$, м	ε , %
d							
h							
l							

Обробка результатів експерименту

7. Обчисліть довжини хвиль досліджуваних променів та похибки вимірювань: $\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta l}{l}$.

8. Знаючи довжину світлової хвилі, визначте її частоту.

Творче завдання. Компакт-диск поставте так, щоб світло від далеко розміщеної лампочки ковзало по його поверхні, а борозенки були перпендикулярні до напрямку зору. Опишіть і поясніть спостережувану картину.

Робота № 12. Спостереження неперервного та лінійчастого спектрів речовини

Мета роботи: ознайомитися з методом якісного спектрального аналізу.

Обладнання: спектроскоп двотрубний з відліковим мікрометричним гвинтом, трубки спектральні, прилад для засвічування спектральних трубок «Спектр», джерело електроживлення, ключ, комплект з'єднувальних провідників, дротина із шматком вати на підставці, колба зі спиртом, сіль кухонна, сірники.

Підготовка до виконання роботи

Повторіть навчальний матеріал (§ 40) і дайте відповідь на запитання:

1. Що таке спектр?
2. Які бувають спектри?
3. Як можна спостерігати різні види спектрів?
4. Які прилади використовують для спектрального вивчення складу речовин?

Хід роботи

1. Уставте трубку з гелієм у тримач приладу для засвічування спектральних трубок і приєднайте прилад через вимикач до джерела постійного струму напругою близько 6 В. Щілину коліматора спектроскопа підведіть упритул до спектральної трубки і звімкніть джерело живлення.

2. Спостерігайте спектр через окуляр зорової труби спектроскопа, обертаючи мікрометричний гвинт, щоб поступово побачити всі спектральні лінії гелію. Переміщуючи окуляр, намагайтеся отримати чітке зображення.

356

3. Мікрометричним гвинтом поверніть зорову трубу вправо так, щоб у полі зору з'явилася крайня червона спектральна лінія. Сумістіть зображення вертикальної нитки із цією лінією і запишіть покази мікрометра в таблицю. Мікрометричний гвинт має крок 1 мм, його головку поділено на 50 рівних частин, отже, ціна поділки шкали на головці становить 0,02 мм. Цілі міліметри відлічують за нерухомою шкалою на циліндрі, а соті частки — за шкалою на головці гвинта.

Колір лінії	Покази мікрометра, мм	Довжина хвилі за довідником, нм
Червоний		728
Оранжевий		668
Жовтий		588
Зелений		502
Блакитний		492
Синій		471
Фіолетовий		447

4. Обертаючи мікрометричний гвинт, пересувайте зорову трубу до суміщення нитки з кожною з наступних спектральних ліній. Для кожної лінії запишіть покази мікрометра в таблицю проти зазначених довжин хвиль гелію, узятих з довідника.

5. За записами показів мікрометричного гвинта і довжинами хвиль, які відповідають цим показам, побудуйте криву. Для цього на осі абсцис відкладіть покази мікрометра, а на осі ординат — довжину світлових хвиль, узявши відповідний масштаб. Через знайдені точки проведіть плавну криву.

6. Змочіть вату на дротині спиртом і закріпіть її за допомогою підстав-

ки на висоті щілини коліматора. Запаліть вату і спостерігайте слабкий суцільний спектр. Посипте вату, на якій горить спирт, дрібною кухонною сіллю і спостерігайте появу на фоні суцільного спектра яскравої жовтої лінії пари натрію. Сумістіть з нею нитку і запишіть покази мікрометричного гвинта. Користуючись побудованою кривою, визначте довжину хвилі жовтої лінії натрію. Для цього на осі абсцис відкладіть покази мікрометричного гвинта, із цієї точки опустіть перпендикуляр і продовжіть його до перетину із побудованою кривою. Опустіть з точки перетину перпендикуляр на вісь ординат і зазначте відповідне значення довжини хвилі.

7. За результатами досліджень зробіть висновок.

Творче завдання. Застосовуючи світлофільтри, спостерігайте спектри. Запишіть, як при цьому змінюються спектри.

Робота № 13. Вивчення властивостей фотодіода і зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ)

Мета роботи: вивчити фотоэффект і зняти ВАХ світлодіодів.

Обладнання: світлодіоди (червоний, зелений ВН-АЛ 307БМ (АЛ 310БМ)), міліамперметр, вольтметр, повзунковий реостат, баластовий резистор, дифракційна ґратка на лінійці, спектроскоп.

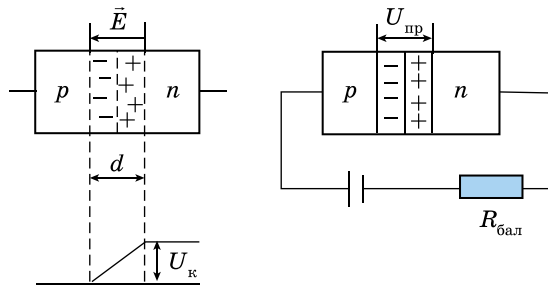
Підготовка до виконання роботи

Дайте відповідь на запитання:

1. Що таке фотоэффект?
2. Хто відкрив явище фотоэффекту?
3. Запишіть рівняння фотоэффекту.
4. Що таке червона межа фотоэффекту?
5. Де застосовують фотодіоди?

Принцип роботи і будова світлодіода

Принцип роботи можна пояснити так: електрони з напівпровідника n -типу дифундують у напівпровідник p -типу, а дірки — навпаки. У результаті поблизу межі розділу утвориться подвійний напружений шар (мал. 17), що є n - p -переходом.



Мал. 17

З утворенням подвійного шару збільшується електричне поле, що перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок. Виникає контактна різниця потенціалів.

Якщо до такого n - p -переходу прикласти напругу прямого зсуву $U_{пр}$, тобто «плюс» з n -електроном, то при $U_{пр} = U_k$ контактні різниці потенціалів виявляться скомпенсованою і через перехід пройде струм. При напругах зсуву $U_{пр} = U_k$ перехід поводить як ділянка кола, що має визначений омичний опір, на якому при збільшенні напруги збільшується і сила струму. Основна особливість цієї ділянки (переходу) — основні носії

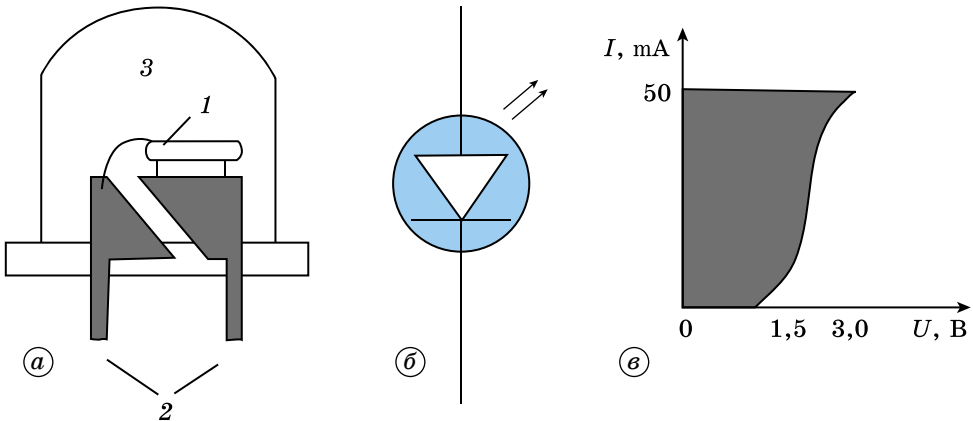
заряду, одержавши надлишкову енергію, рекомбінують з неосновними. У цьому випадку виникає випромінювання, частота якого визначається співвідношенням:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{eU_{\text{пр}}}{h},$$

де ΔE — отримана основними носіями заряду енергія; e — заряд електрона; $U_{\text{пр}}$ — робоча напруга світлодіода, тобто напруга, за якої починається випромінювання. Її значення залежить від матеріалу напівпровідника і становить від 0,8 до 2 В, що відповідає довжині хвилі випромінювання від 1500 до 400 нм.

Найвідоміша і поширена конструкція світлодіода (мал. 18, а), де діоди 2 заливаються пластмасою, 1 — p - n -перехід.

Корпус являє собою лінзу 3, що збирає випромінювання. Схематичне позначення показано на малюнку 18, б, скорочене найменування — VH. Світлодіод підключається до джерела струму в прямому напрямку, його вольт-амперна характеристика (мал. 18, в) подібна до характеристики діода. Для обмеження прямого струму послідовно з ним умикається баластовий резистор.



Мал. 18

У довідковій літературі з радіотехніки є спектральна характеристика світлодіода. Максимум випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda_{\text{max}} = hc / \Delta E$ за будь-якої напруги (мал. 19).

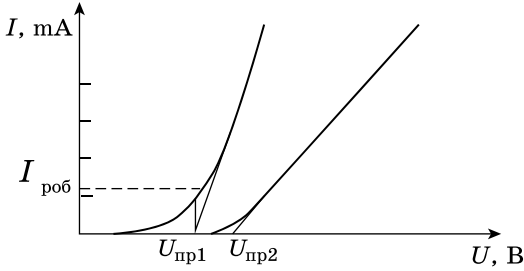
Хід роботи

1. Зберіть схему (мал. 20). VH — світлодіод, АЛ 307БМ (АЛ 310БМ), мА — міліамперметр на 50 мА, V — вольтметр на 4 В, R_1 — повзунковий реостат на 500–1000 Ом, за допомогою якого регулюється напруга на світлодіоді, R_2 — баластовий реостат опору на 51 Ом.

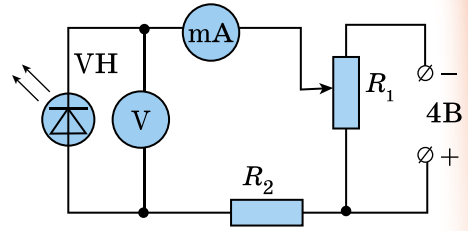
2. Плавно переміщуючи повзунок реостата, стежте за кристалом світлодіода. У момент появи світіння запишіть у таблицю, яку ви склали, струм і напругу. Поступово збільшуючи напругу через 0,2 В, запишіть відповідні значення струмів від напруг. Аналогічні дії виконайте для червоного і зеленого світлодіодів.

3. Для обох світлодіодів побудуйте графіки залежності.

4. Зробіть оцінку точності вимірювання робочої напруги, довжини хвилі, частоти.



Мал. 19



Мал. 20

Творче завдання. Через спектроскоп або крізь дифракційну ґратку розгляньте центр випромінювання світлодіодів. З'ясуйте та установіть залежність виду спектра випромінювання від напруги. Яка спостерігається залежність між яскравістю випромінювання і довжиною хвилі (поблизу максимального випромінювання)?

Робота № 14. Вивчення треків заряджених частинок за готовими фотографіями

Мета роботи: визначити напрямок вектора індукції магнітного поля, виміряти радіуси кривизни треків, обчислити відношення заряду частинки до її маси.

Обладнання: фотографії треків заряджених частинок у камері Вільсона, лінійка з міліметровими поділками, аркуш прозорого паперу, трикутник.

359

Підготовка до виконання роботи

Дайте відповідь на запитання:

1. Від чого залежить товщина треку? Як можна визначити напрямок руху частинки?
2. Як можна визначити напрямок індукції магнітного поля, у якому рухалися частинки?
3. Від яких параметрів залежить радіус кривизни треку частинки?
4. За якої умови кривизна треків буде однаковою?
5. Як визначити радіус кривизни треку частинки?
6. Як урахувати масштаб фотографії при визначенні радіуса кривизни треку частинки?
7. Як знаходять енергію частинки?
8. Як установлюють, якій частинці належить даний трек?

Теоретичні відомості

За допомогою камери Вільсона спостерігають і фотографують треки (сліди) рухомих заряджених частинок.

Якщо камера Вільсона поміщена в магнітне поле, то на рухомі в ній заряджені частинки діє сила Лоренца, яка визначається співвідношенням (для випадку, коли швидкість руху частинки перпендикулярна до ліній поля):

$$F = qvB,$$

де q — заряд частинки; v — швидкість її руху; B — індукція магнітного поля. Правило лівої руки дає змогу показати, що сила Лоренца направлена завжди перпендикулярно до швидкості частинки і, отже, є доцентровою силою:

$$qvB = \frac{mv^2}{R},$$

де m — маса частинки; R — радіус кривизни її трека. Звідси $R = \frac{mv}{qB}$.

Якщо частинка має швидкість набагато меншу, ніж швидкість поширення світла (тобто частинка не релятивістська), то співвідношення між значенням її кінетичної енергії і радіусом кривизни має вигляд:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{B^2 R^2 q^2}{2m}.$$

Хід роботи

На малюнку 21 видно треки ядер легких елементів (останні 22 см їхнього пробігу, I–IV — треки різних частинок). Ядра рухалися в магнітному полі, індукція якого 2,17 Тл напрямлена перпендикулярно до фотографії. Початкові швидкості всіх ядер однакові та перпендикулярні до лінії поля.



Мал. 21

Завдання:

1. Визначте напрямок вектора індукції магнітного поля. Поясніть, чому траєкторіями частинок є дуги кіл. Яка причина відмінності у кривизні траєкторій різних ядер?

2. Чому кривизна кожної траєкторії змінюється від початку до кінця пробігу частинки?

3. Поясніть причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товстіший наприкінці пробігу, ніж на його початку?

4. Виміряйте радіуси кривизни трека частинки I приблизно на початку і наприкінці пробігу.

5. Визначте, на скільки змінилася енергія частинки за час пробігу, якщо відомо, що частинка I ідентифікована як протон.

6. Виміряйте радіус кривизни трека частинки III на початку її пробігу. Знаючи, що початкова швидкість цієї частинки дорівнює початковій швидкості протона (нижній трек), обчисліть для частинки III відношення заряду до маси. За отриманим значенням визначте, ядром якого елемента є ця частинка.

Творче завдання. Решта треків належить ядрам Дейтерію і Тритію. Якому саме ядру належать трек II і трек IV?

ВІДПОВІДІ ДО ЗАДАЧ ТА ВПРАВ

Фізика

1.3. 0,5 мкН. 1.4. 200 Н/Кл. 1.5. 0,5 нКл. 1.6. 0,55 м. 1.7. 10 пФ. 1.9. Ні. 1.10. 200 В.
 1.11. 2,9 мКл. 1.12. Зменшиться. 1.13. 40 пФ. 1.14. 0,1 мм. 1.15. $1,6 \cdot 10^{-2}$ Дж,
 $8 \cdot 10^{-5}$ Кл. 1.16. 7,5 мДж. 1.17. 0,8 Дж. 1.18. 10 В/м. 1.19. $5,4 \cdot 10^5$ Н/Кл.
 1.20. 17,3 кВ/м. 1.21. $4,9 \cdot 10^{-14}$ Кл. 1.23. 15 мкФ. 1.24. 1,23 мН. 1.25. 2 кВ.

1.26. 0,64 Кл. 1.27. Збільшиться в 16 разів. 1.28. 220 мкДж. 1.30. $q = \sqrt{2\varepsilon_0 SF}$.

1.31. $A = \frac{\varepsilon_0 S U^2 (d_1 - d)}{2d^2}$. 1.32. 0,35 м. 1.33. 47 нм. 1.34. 81 см. 1.35. 7. 1.36. 1 А,

2 В, 8 В. 1.37. 0,1 А, 0,3 А, 0,4 А. 1.38. 8 В. 1.39. 20 Ом. 1.41. 18 кДж. 1.42. 2 с.
 1.43. 100 Вт. 1.44. 0,3 А, 216 кВт. 1.48. 12 Кл. 1.49. 4,67 В. 1.50. 2,2 Ом. 1.51. 1 Ом,
 2 В. 1.52. 1 Ом. 1.54. Збільшився у 25 разів. 1.55. 30 Ом, 10 Ом. 1.56. Збільшу-

ється в $\frac{n^2 + 1}{n}$ разів. 1.57. 2 Ом, 3 Ом. 1.58. 5 А. 1.59. $I_1 = 2$ А,

$I_2 = I_5 = 1$ А, $I_3 = 0,5$ А, $I_4 = I_6 = 0,25$ А. 1.61. 4 А, 0,8 А, 3,2 А, 20 В, 9,6 В, 9,6 В.
 1.62. 5 А, 3 А, 2 А, 5 А, 10 В, 30 В, 30 В, 20 В. 1.64. 80 Вт, 40 Вт, 8,9 Вт,

17,8 Вт. 1.65. 13,2 м/с. 1.66. 50 А. 1.67. $\Delta T = \frac{\eta I^2 \rho_1 t}{c S^2 \rho}$. 1.71. 3,7 В, 0,2 Ом. 1.72. 1,5 В,

0,5 Ом. 1.73. 32 В, 30 В. 1.74. 0,5 В. 1.75. $r = \frac{m-n}{\alpha-1} R_1$. 1.76. 12 В. 1.77. З'єднати 361

4 паралельно по 3 елементи в кожному з'єднанні послідовно; 7,5 А. 1.85. Телур.
 1.87. 180 В. 1.103. Опір провідника з більшим перерізом менший. 1.110. Змінить-
 ся в 5 разів. 1.111. $9,6 \cdot 10^{-5} \%$. 1.118. 0,1 В/м. 1.119. 3 Ом. 1.120. $2,2 \cdot 10^{-7}$ Дж.
 1.124. 0,4 Тл. 1.125. 10 см. 1.126. 2 А. 1.127. 1) 3,1 Н; 2) 1,6 Н. 1.128. 30° .
 1.129. а) 2 мВб; б) 1,4 мВб, 1 мВб. 1.130. 50 мТл. 1.131. 0. 1.134. $8 \cdot 10^{-15}$ Н.

1.139. $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_1}{l+S} + \frac{I_2}{S} \right)$. 1.140. $U = \frac{\mu\mu_0 \pi I^2 \rho}{BS}$. 1.141. 2 А. 1.142. 20 мТл. 1.143. 0;

0,21 Вб; 0,3 Вб. 1.144. 9 см, $4 \cdot 10^{15}$ м/с². 1.145. $1,8 \cdot 10^8$ м/с, $3,5 \cdot 10^{-9}$ с. 1.146. 8,9 нс.
 1.147. 20 см. 1.148. $2,8 \cdot 10^{-2}$ Тл. 1.149. $0,89 \cdot 10^{-9}$ Дж. 1.154. Вони намаг-
 нічуються і зупиняються. 1.158. Вони притягуються. 1.159. 0,1 В.
 1.160. 10 мТл. 1.165. 2 В. 1.166. 0,2 Вб/с, 0,2 В. 1.167. 0,5 с. 1.168. 400 мГн.
 1.169. 50 А/с. 1.170. 120 Дж, зменшиться в 4 рази. 1.171. 10 Дж. 1.174. $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

1.176. ≈ 279 . 1.181. $B = \frac{\rho Sa}{I}$. 1.183. 0,5 А. 1.184. 60 мВб. 1.185. 200 мА.

1.186. 125 мГн. 1.187. 200 мГн, 1,5 мВб. 1.193. 79 мкВ. 1.194. 160 мГн, 12 В.
 1.195. 10 Вт. 2.1. 0,02 с, 0,008 с, 0,00227 с. 2.2. 1 м, 0,01 с, 100 Гц, 2 рад. 2.3. 2,5 м.
 2.5. 6,28 с. 2.6. 10 м/с². 2.7. 1,26 с. 2.8. 3,2 Гц. 2.9. 4 кг. 2.10. 4,4 с, 0,23 Гц.
 2.11. 0,8 Дж. 2.14. 0,2 с. 2.15. 4 м/с. 2.16. 0,5 Гц. 2.17. 0,53 м. 2.18. Скористав-
 шись рівнянням $x = x_{max} \sin(2\pi t + \varphi)$. 2.19. x_{max} , $0,6x_{max}$. 2.20. 630 см/с, 0,
 -1300 см/с, $-1,4 \cdot 10^5$ см/с², $-1,6 \cdot 10^5$ см/с², 0. 2.21. 2 см, 2 с, 0,5π, 2π см/с,

$2\pi^2$ см/с². 2.22. $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, $\varphi_3 = \pi$, $\varphi_4 = \frac{3\pi}{2}$, $x = 5 \sin(10\pi t + \varphi)$.

2.23. $x = 0,1 \cos \pi t$, $\frac{3\pi}{2}$, 0, 0,25, 1,75 с. 2.25. Видовжити на 0,5 см. 2.26. 3,2 Гц.

- 2.29. 2,7 км/год. 2.30. 2 с, 2 м/с, 4 м. 2.31. 2,4 м/с. 2.32. 10 м. 2.34. 1,29 м.
 2.35. $\frac{3\pi}{2}$. 2.36. 0,534 рад, 17,2 мм, $3,2 \cdot 10^{-2}$ м/с. 2.37. 8,33 см. 2.38. 1,57 с, 7,07 см,
 $\frac{\pi}{4}$ рад. 2.39. 0,25 мкс. 2.40. 600 кГц. 2.41. 100 кГц, 10 мкс, 2 мкКл. 2.42. 250 мА,
 20 мкс. 2.45. 2 м. 2.46. 500 кГц. 2.47. 5 м. 2.48. 0,02 с, 50 Гц. 2.49. 310 В,
 220 В, 50 Гц, 20 мс, -310 В. 2.50. 10 А, 7,1 А, 5 мс, 200 Гц, -10 А. 2.53. 220 В, 0,4.
 2.54. 0,33, 150. 2.55. 3 Ом. 2.56. 10 В. 2.57. 94 %. 2.60. 160 кГц. 2.61. 10 мкКл, 2 мс,
 100 мГн. 2.62. 2 мс, 680 нФ, 94 В. 2.63. 120 мкДж, 40 мкДж. 2.65. 88 пФ.
 2.69. 0,44 В, $\mathcal{E} = 0,63 \sin 100\pi t$, В. 2.70. 100, $\mathcal{E} = 63 \sin 14\pi t$, В. 2.71. 500 Гц.
 2.72. У перпендикулярному, $\mathcal{E} = -0,31 \sin 10\pi t$, В, 5 об/с, 0,01 Вб. 2.74. 28 В, 24 В.
 2.75. 220 В, 200 Вт. 2.76. 39 %. 2.77. 5 Ом. 2.78. 13 кВт, 98 %. 2.79. 1 мкс, 1,4 мА.
 2.80. $i = 5,1 \cos 100\pi t$, 35 хв. 2.81. 314 Гц, 0,5 А. 2.82. 38 В, 1 А, 95 %. 2.83. 1200 м,
 41 мГн. 2.86. Максимум. 2.87. $3^{\circ}09'$. 2.88. 10 мкм. 2.89. Світло. 2.92. 230 Мм/с,
 190 Мм/с. 2.97. $2 \cdot 10^6$. 2.98. 220 Мм/с. 2.99. 0,3 мкм або кратне значенню цього
 числа. 2.100. 5 мкм. 2.101. 600 нм. 2.106. $5^{\circ}10'$. 2.107. 57 мм. 2.116. У 1,6 раза.
 2.117. 57 мм. 2.118. 124 кд. 2.120. 53° . 2.121. 1,35, 73° . 2.122. 1,4. 2.127. 6,9 см.
 2.128. 1 см. 2.129. 49° . 2.134. 1,2 см, 1 см. 2.135. -27 см, -3,7 дптр. 2.136. 1,9 с.
 3.3. 2,53 еВ. 3.4. 656 нм, червоним. 3.5. 3. 3.10. $8 \cdot 10^{-15}$ Дж. 3.11. 30 кВ. 3.14. 490 нм.
 3.15. 86 нм. 3.16. 630 нм. 3.22. $8 \cdot 10^5$ м/с. 3.23. 345 нм. 3.24. 3. 3.27. $3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж,
 2,3 еВ. 3.28. $1,1 \cdot 10^{15}$ Гц. 3.29. 300 нм. 3.30. $2,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, $5 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 362 3.31. $1,2 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с, 550 нм. 3.32. 25 пм, $8,9 \cdot 10^{-32}$ кг. 3.33. 0,12 еВ,
 $6,6 \cdot 10^{-29}$ кг·м/с. 3.35. 2,2 еВ, $8,6 \cdot 10^5$ м/с. 3.36. 0,324 мкм. 3.37. 820 км/с.
 3.38. 11 В. 3.39. 2,2 еВ. 3.40. 1,87 В. 3.41. 1,6 Мм/с. 3.42. $2,4 \cdot 10^4$ К.
 3.43. $1,1 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с. 3.47. 1) 0,042 а. о. м.; 2) 39 МеВ. 3.48. 60 років.
 3.49. 55,4 року. 3.50. ${}^3_2\text{He}$, ${}^{24}_{11}\text{Na}$, ${}^{25}_{12}\text{Mg}$, ${}^{55}_{26}\text{Fe}$. 3.51. -2,8 МеВ, поглинається.
 3.52. 2,8 МеВ. 3.53. 15 МеВ. 3.56. Z і A не змінюються, маса зменшується на масу
 кванта. 3.57. 1) 1,93 а. о. м.; 2) 7,55 МеВ. 3.58. 5 α - і 3 β -розпади. 3.59. ${}^{215}_{84}\text{Po}$.
 3.61. 88 %. 3.63. $1,95 \cdot 10^{17}$. 3.64. 23 %. 3.67. 17,5 МеВ. 3.72. ${}^8_4\text{Be}$; 55,5 МеВ.
 3.73. 61 875 МеВ. 3.74. 8,6 МДж. 3.75. 1,44 року. 3.76. 21,3 МеВ.

Астрономія

1.2. $156^{\circ}19'$. 1.8. У Північній півкулі для всіх зір зі схиленням $\delta > \varphi$ азимуту
 у верхній і нижній кульмінаціях однакові і дорівнюють 180° . 1.11. Для спостері-
 гача, який перебуває на земному екваторі і спостерігає зорю зі схиленням $\delta = 0$.
 1.12. Для всіх широт — це зоря з $\delta = 0$, на екваторі — будь-яка зоря. 1.14. Яви-
 ща першої появи Сіріуса у променях ранкової зорі після періоду невидимості і
 підняття вод Нілу збігалися в 3100 р. до н. е. На сьогодні через прецесію вони
 розходяться на 43 дні. 1.15. Висота $h = 40^{\circ}$. Азимут $A = 85^{\circ}$. 1.16. Висота $h = 35^{\circ}$.
 Азимут $A = 75^{\circ}$ схід. 1.17. Годинний кут $\alpha = 320^{\circ}$ і схилення $\delta = -20^{\circ}$. 1.18. Має-
 мо годинний кут $t = 5^{\text{h}}30^{\text{m}} = 82,5^{\circ}$. Тоді одержимо: висота $h = 30^{\circ}$. Азимут $A = 45^{\circ}$
 захід. 1.19. Азимут $A = \text{NSK} = 120^{\circ}$ схід. Висота $h = 70^{\circ}$. 1.24. Між $+34^{\circ}05'$ і
 $-43^{\circ}06'$ (крайні зорі Близнюків і Скорпіона). 1.32. Приблизно із силою 100 дин
 ($1 \text{ Н} = 10^5$ дин). Звичайно, така сила мала, але за відсутності інших сил і вона
 може рухати дану масу навколо Сонця. 1.35. Коли в Києві північ, у Нью-Йорку —
 17 год. Коли в Калькутті північ, у Нью-Йорку — 13 год. Отже, індуси праві (час
 узятий поясний). 2.1. Це відбувається на Північному полярному колі при зоряному
 часі 18 годин або на Південному полярному колі при зоряному часі 6 годин.

2.2. Земля рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті. На найбільш близькій відстані до Сонця, у перигелії, Земля буває 1–5 січня, на найбільшому віддаленні від Сонця, в афелії, — 2–5 липня. **2.7.** Необхідно використати 3-й закон Кеплера. Падіння Місяця на Землю буде відбуватися по еліптичній орбіті, більша піввісь якої порівняно з існуючою буде у 2 рази меншою. Час падіння — 4,9 доби. **2.10.** Крайні планети Сонячної системи — Меркурій і Нептун мають орбіти з найбільшими ексцентриситетами. Ближче всього до кола орбіта у Венери, ексцентриситет якої усього 0,007. **2.11.** Сплюснутість планети Юпітер виникає через її швидке обертання (період обертання екваторіальної зони 9 год 50 хв). Сонце також сплюснуте, але внаслідок порівняно повільного обертання (період обертання екваторіальної зони 25,4 доби) ця сплюснутість дуже мала — 73 км і не піддається вимірюванням (0,1''). **2.13.** Період цих явищ дорівнює синодичному періоду Марса ($S = 780^d$). **2.18.** Так. Улітку 1989 р. відкрито перший подвійний астероїд (1989 PB), що складається із двох майже сферичних тіл діаметром 750 м, що обертаються як єдине ціле. КА «Галілей» у серпні 1993 р. виявив у астероїда Іда супутник поперечником 1,5 км. Знайдено й інші парні астероїди. Утворюються такі об'єкти або при зіткненнях астероїдів, або внаслідок тривалого сусідства двох незалежних тіл на подібних орбітах. **3.12.** На відстані 11 941 549 \approx 12 000 000 км. **3.13.** На відстані 4 780 882 800 \approx 4 800 000 000 км. **3.16.** Дніпро можна побачити, бо його ширина має кут $\alpha = 500^\circ = 8'$. **4.1.** Сонце випромінює електромагнітні хвилі завдовжки від 400 нм (фіолетова частина спектра) до 700 нм (червона частина спектра), суміш яких ми називаємо білим світлом. Але найбільше енергії Сонце випромінює в жовто-зеленій частині спектра на довжині хвилі близько 500 нм, тому астрономи мають право називати Сонце жовтою зорею. **4.3.** Так званий дефект маси визначають за допомогою формули Ейнштейна:

$$\Delta M = \frac{E}{c^2}, \text{ де } E = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт — світність Сонця; } c \text{ — швидкість світла. За одну секунду}$$

маса Сонця зменшується на $4,44 \cdot 10^9$ кг, а за 1 рік втрата маси внаслідок термоядерних реакцій становить $1,4 \cdot 10^{17}$ кг. **4.8.** Кутовий діаметр плями, яку ще можна побачити на Сонці, має бути не меншим від роздільної здатності ока $\alpha > 1$. Лінійний діаметр плями має бути не меншим від 50 000 км. **4.13.** 8,3 пк = 27 св. р. **4.15.** $R = 295R$ Сонця. **4.19.** Середня густина дорівнює $2,4 \cdot 10^8$ г/см³. **4.20.** Середня густина дорівнює $1,2 \cdot 10^8$ г/см³. **4.23.** Сонце буде коливатися з періодом 2 год 45 хв. **4.27.** 20 обертів. **5.2.** Міжгалактичне теплове випромінювання з $T = 2,7$ К, яке назвали реліктовим, є застиглим електромагнітним випромінюванням епохи Великого Вибуху. Густина реліктового випромінювання — приблизно 500 фотонів у 1 см³. **5.3.** З Великого Вибуху. **5.4.** 326 млн р. **5.6.** 20 000 км/с. **5.7.** 1 св. рік = $3 \cdot 10^8$ м/с \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 с = $9,5 \cdot 10^{15}$ м = $9,5 \cdot 10^{12}$ км. **5.11.** Сучасні радіотелескопи дають можливість приймати електромагнітні хвилі, що випромінюють земні радіостанції, на відстані 100 св. р. Отже, якщо на такій відстані є цивілізація з рівнем інтелекту, як у землян, то ми могли б обмінюватися з нею інформацією. Але, на жаль, тривалість таких космічних переговорів сягатиме сотні років. **5.14.** 254 доби.

ПРЕДМЕТНО-ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

- А**
Автоколивання 88, 99
Азимут світила 206
Альфа-розпад 177
Амплітуда коливань 83
Антропний принцип 330
Астероїд 247
Атомне ядро 174
- Б**
Бета-розпад 178
- В**
Вакуум 49
Вектор магнітної індукції 57
Висота світила 206
Вільні електромагнітні коливання 100
Вільні та вимушені коливання 87–88
Власна провідність 40
- Г**
364 Газовий розряд 46
Галактика 303
Гамма-розпад 178
Гармонічні коливання 83, 97
Гіпотеза Планка 166
- Д**
Дефект мас 175
Дисперсія світла 124
Дифракційна ґратка 131
Дифракція світла 129
Діаграма Герцшпрунга–Рассела 295
Діелектрична проникність 9
Дозиметрія 186
- Е**
Екзопланета 294
Електроліз 44
Електроліти 44
Електролітична дисоціація 43
Електромагнітна індукція 65
Електромагнітні хвилі 107
Електронно-дірковий перехід 41
Елементарні частинки 190
Енергетичний вихід ядерної реакції 180
Електричні сили 5
Електроємність 13
Електроліз 44
Електроліти 44
Електролітична дисоціація 43
- Електромагнітна індукція 64
Електронна провідність 39
Енергія електричного поля 15
Енергія зв'язку атомного ядра 175
ЕРС 23
Ефект Доплера 121
- З**
Закон відбивання світла 139
— Джоуля–Ленца 26
— електромагнітної індукції 65
— заломлення світла 140
— Кулона 5
— Ома 21
— Ома для повного кола 24
— радіоактивного розпаду 177
— Фарадея 44
Закони Кеплера 215, 216
Змінний струм 101
Зоряні асоціації 305
Зоряні скупчення 293
- І**
Ізотопи 174
Імпульс фотона 167
Індуктивність 69
Індукційний струм 64
Інтерференція світла 125
Інтерференція хвиль 127
- Й**
Йонізація газів 45
- К**
Календар 221
Квантові постулати Бора 157
Кварки 192
Класифікація галактик 309–313
Коефіцієнт відтворення 185
Колівальний контур 95
Колівання 82
Конденсатор 13
Коротке замикання 28
Космічне випромінювання 193
Космічні телескопи 274
Космологія 319
Критична маса 183
- Л**
Ланцюгова ядерна реакція 180
Лінії магнітної індукції 55
— напруженості електричного поля 6
Лінії поглинання 161

Лінійчастий спектр
випромінювання 161
— випускання 159
— поглинання 160, 161
— Фраунгофера 162

М

Магнітна взаємодія 54
Магнітне поле 54
Магнітний потік 57
Метод гальмівного поля 158
Методи реєстрації елементарних частинок 194
Механічні хвилі 90
Міжзоряне середовище 306
Міраж 144
Місцевий час 220
Молочний Шлях 303

Н

Надпровідність 37
Напруга 11
Напруженість електричного поля 6
Небесна сфера 204
Небесні координати 207, 208

О

Основні положення СТВ 328

П

Період змінного струму 101
— коливань 86
— — піврозпаду 178
Питома енергія зв'язку 175
Планета 258
Повне відбивання світла 140
Поляризація діелектрика 8
— світла 133
Послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів 14
— — — провідників 21–22
Потенціал 10
Потужність електричного струму 27
Правило Ленца 65
— лівої руки 54, 59
— свердлика 55
Принцип суперпозиції 6
Протонно-нейтронна модель атомного ядра 174
Пульсар 302

Р

Радіоактивність 177
Радіотелескоп 270
Резонанс 88, 89, 100

Рекомбінація 43
Рівняння Ейнштейна для фотоефекту 169
Різниця потенціалів 10
Робота електричного струму 10, 26
Розряд 46, 47

С

Самоіндукція 68
Сила Ампера 58
— Лоренца 58
— світла 135
Силкові лінії електричного поля 6
Спектр 159–161
Спектральний аналіз 162
Спектрограф 160
Спектрометр 160
Сонце 281–283
Сонячний вітер 286
Сонячні плями 284
Спектральна класифікація зір 296
Стала Планка 166
Стан збуджений 157
— основний 157
Сузір'я 203
Схилення світила 207

Т

Телескопи 267–269
Термістор 42
Термоелектронна емісія 50
Точки небесної сфери 207–209
Трансформатор 102–103

Ф

Фаза коливань 84
Фізичні змінні зорі 299
Формула Томсона 98
Фотоефект 167–169
Фотон 167
Фундаментальні взаємодії 322

Ч

Частота змінного струму 101
Число Вольфа 285
Чорні діри 302
Чумацький Шлях 303

Я

Ядерна реакція 179
Ядерний реактор 182
Ядерні сили 175

ЗМІСТ

<i>Шановні одинадцятикласниці та одинадцятикласники!</i>	3
--	---

ФІЗИКА

Розділ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

366

§ 1. Електромагнітна взаємодія. Електричне поле. Закон Кулона. Напруженість електричного поля	4
§ 2. Речовина в електричному полі. Провідники і діелектрики в електричному полі	8
§ 3. Робота за час переміщення заряду в однорідному електричному полі. Потенціал електричного поля. Різниця потенціалів	10
§ 4. Електроємність. Електроємність плоского конденсатора. З'єднання конденсаторів. Енергія електричного поля	12
Задачі та вправи	18
§ 5. Електричний струм. Електричне коло. З'єднання провідників	19
§ 6. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола. Правило Кірхгофа	22
§ 7. Робота та потужність електричного струму	25
§ 8. Заходи та засоби безпеки під час роботи з електричними пристроями	27
Задачі та вправи	31
§ 9. Електричний струм у металах. Надпровідність.	34
§ 10. Електричний струм у напівпровідниках.	38
§ 11. Електричний струм в електролітах. Електролітична дисоціація	43
§ 12. Електричний струм у газах	45
§ 13. Електричний струм у вакуумі.	49
Задачі та вправи	51
§ 14. Взаємодія струмів. Магнітне поле. Дія магнітного поля на провідник зі струмом.	53
§ 15. Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції	55
§ 16. Сила Ампера. Сила Лоренца.	58
Задачі та вправи	61
§ 17. Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції	64
§ 18. Індуктивність. Енергія магнітного поля струму. Густина енергії магнітного поля	68
Задачі та вправи	71
Перевір свою компетентність	74
Тестові завдання	77

Розділ 2. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

§ 19. Коливальний рух. Гармонічні коливання.	82
§ 20. Математичний і пружинний маятники. Період коливань маятників	86
§ 21. Вільні та вимушені коливання. Резонанс.	87
§ 22. Поширення механічних коливань у пружному середовищі	89
Задачі та вправи	93
§ 23. Коливальний контур. Виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі.	95
§ 24. Гармонічні електромагнітні коливання. Частота власних коливань контурі	96
§ 25. Вимушені електромагнітні коливання. Резонанс.	99
§ 26. Змінний струм. Трансформатор. Виробництво, передача та використання енергії електричного струму.	100
§ 27. Електромагнітне поле. Електромагнітні хвилі	106
§ 28. Властивості електромагнітних хвиль	108
§ 29. Принципи радіозв'язку, телебачення та стільникового зв'язку	110
Задачі та вправи	115

§ 30. Розвиток поглядів на природу світла. Електромагнітна теорія світла. . .	118
§ 31. Поширення світла в різних середовищах. Ефект Доплера	121
§ 32. Дисперсія світла	123
§ 33. Інтерференція світла	125
§ 34. Дифракція світла.	129
§ 35. Поляризація світла	132
§ 36. Основні фотометричні величини	134
Задачі та вправи	137
§ 37. Геометрична оптика як граничний випадок хвильової. Закони геометричної оптики	139
§ 38. Оптичні прилади та їх застосування	145
Задачі та вправи	148
Перевір свою компетентність	150
Тестові завдання	152

Розділ 3. КВАНТОВА ФІЗИКА

§ 39. Квантові властивості світла. Постулати Бора	156
§ 40. Випромінювання та поглинання світла атомами. Спектри. Спектральний аналіз та його застосування	159
Задачі та вправи	164
§ 41. Розвиток квантової фізики. Гіпотеза Планка	165
§ 42. Фотон. Енергія, маса, імпульс фотона. Фотоелектричний ефект.	167
§ 43. Застосування фото ефекту	169
Задачі та вправи	172
§ 44. Атомне ядро. Ядерні сили. Енергія зв'язку атомних ядер	173
§ 45. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	176
§ 46. Ядерні реакції. Ланцюгова реакція поділу ядер урану.	179
§ 47. Фізичні основи ядерної енергетики	181
§ 48. Дозиметрія. Дози випромінювання. Захист від йонізуючого випромінювання	186
§ 49. Елементарні частинки, їхня класифікація, реєстрація та характеристика	190
Задачі та вправи	196
Перевір свою компетентність	197
Тестові завдання	199

АСТРОНОМІЯ

Розділ 1. ОСНОВИ ПРАКТИЧНОЇ АСТРОНОМІЇ

§ 1. Небесні світила та небесна сфера. Сузір'я	202
§ 2. Небесні координати. Системи координат	206
§ 3. Видимі рухи Сонця та планет. Конфігурації та умови видимості планет	209
§ 4. Закони Кеплера та їхній зв'язок із законами Ньютона	215
§ 5. Визначення відстаней до небесних тіл.	217
§ 6. Астрономія та визначення часу. Календар	219
Задачі та вправи	225
Перевір свою компетентність	227
Тестові завдання	228

Розділ 2. ФІЗИКА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

§ 7. Земля і Місяць	229
§ 8. Планети земної групи	233
§ 9. Планети-гіганти	238
§ 10. Супутники планет	243
§ 11. Карликові планети та малі тіла Сонячної системи	246

§ 12. Космічні дослідження об'єктів Сонячної системи.	
Рух штучних супутників та автоматичних міжпланетних станцій	252
§ 13. Розвиток космонавтики	255
§ 14. Космогонія Сонячної системи	257
Задачі та вправи	261
Перевір свою компетентність	262
Тестові завдання	263

Розділ 3. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФІЗИЧНИХ І АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

§ 15. Дослідження електромагнітного випромінювання небесних тіл.	265
§ 16. Принцип дії і будова оптичного та радіотелескопа, детекторів нейтрино та гравітаційних хвиль. Сучасні наземні телескопи.	267
§ 17. Приймачі випромінювання. Дослідження тіл Сонячної системи та Всесвіту за допомогою космічних апаратів.	272
Задачі та вправи	277
Перевір свою компетентність	277
Тестові завдання	278

Розділ 4. ЗОРІ І ГАЛАКТИКИ

§ 18. Сонце, його фізичні характеристики, будова та джерела енергії.	280
§ 19. Будова сонячної атмосфери. Прояви сонячної активності та їхній вплив на Землю	283
§ 20. Основні характеристики зір	288
368 § 21. Температура та розміри зір. Зорі та їхня класифікація. Маса зір. Планетні системи інших зір	290
§ 22. Еволюція зір. Білі карлики	294
§ 23. Фізично-змінні зорі. Нейтронні зорі. Чорні діри.	299
§ 24. Наша Галактика. Молочний Шлях. Будова Галактики. Місце Сонячної системи в Галактиці	303
§ 25. Міжзоряне середовище.	306
§ 26. Зоряні системи — галактики. Світ галактик	309
Задачі та вправи	314
Перевір свою компетентність	315
Тестові завдання	316

Розділ 5. ВСЕСВІТ

§ 27. Всесвіт. Проблеми космології	318
§ 28. Фундаментальні взаємодії в природі. Роль фізичної та астрономічної наук у формуванні наукового світогляду сучасної людини. Єдина природничо-наукова картина світу.	322
§ 29. Історія розвитку уявлень про Всесвіт.	326
§ 30. Основні положення спеціальної теорії відносності.	328
§ 31. Людина у Всесвіті. Антропний принцип. Імовірність життя на інших планетах. Унікальність нашого Всесвіту. Питання існування інших всесвітів	330
Задачі та вправи	334
Перевір свою компетентність	334
Тестові завдання	335
Практикум з розв'язування задач	337
Лабораторний практикум	343
Відповіді до задач та вправ	361
Предметно-іменний покажчик	364

ВИДАТНІ УКРАЇНСЬКІ ФІЗИКИ ТА АСТРОНОМИ



Ажажа Володимир Михайлович (1931–2009).

Досліджував рафінування металів за допомогою фізичних методів, вивчав проблеми вакуумної і надвисоковакуумної металургії, фізики й матеріалознавства чистих і надчистих металів, зокрема берилію, надпровідникових і напівпровідникових металів, технологічні процеси рафінування та виробництва чистих металів і конструкційних сплавів, насамперед матеріалів реакторобудування.



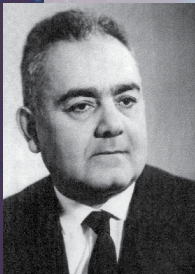
Ахієзер Олександр Ілліч (1911–2000).

Наукові праці стосуються різних ділянок атомної та ядерної фізики, квантової електродинаміки та фізики елементарних частинок, фізики плазми і теорії прискорювачів заряджених частинок, радіофізики та фізики магнітних явищ фізичної кінетики і фізики твердого тіла. У 40–50-х рр. XX ст. брав участь у розробленні ядерних реакторів, зокрема в розрахунках їхніх критичних розмірів, передбачив можливість існування холодних нейтронів, побудував теорію резонансних ядерних реакцій.



Барабашов Микола Павлович (1894–1971).

Наукові праці присвятив вивченню фотометричних властивостей поверхонь Місяця, Марса, атмосфер Венери та Юпітера. Працював у галузі астрофізики: проводив дослідження фізичних умов на Місяці та інших планетах. У 1920–1926 на 270-міліметровому рефлекторі з використанням світлофільтрів провів візуальні спостереження Марса, на підставі яких було складено карту поверхні планети. З 1930-х р. став застосовувати методи фотографічної фотометрії під час вивчення планет і Місяця.



Брауде Семен Якович (1911–2003).

Започаткував науковий напрям «декаметровая радіоастрономія». За допомогою радіотелескопа УТР-2 і радіоінтерферометрів УРАН одержано результати світового рівня: складено перший каталог космічних джерел декаметрового випромінювання (понад 4000 дискретних об'єктів), вивчено особливості незбуреного та спорадичного радіовипромінювання Сонця, виявлено інтерімпульси у випромінюванні пульсарів і ряд нових закономірностей у розподілі радіояскравості протяжних утворень.



Ганський Олексій Павлович (1870–1908).

Основні наукові дослідження належать до фізики Сонця. Отримав винаяткові за якістю фотографії сонячних плям, виявив залежність форми сонячної корони від кількості плям.

У 1905 р. встановив, що середня тривалість життя окремих гранул становить 2–5 хв, потім вони розпадаються і замінюються новими.



Герасименко Світлана Іванівна (1945).

У 1969 р., разом із Климом Чурюмовим спостерігаючи комету Комас Сола, зробила фото, на якому виявилася ще одна комета. Її назвали кометою Чурюмова–Герасименко.

У 2004 р. Світлана Герасименко і Клим Чурюмов були присутні на космодромі Куру у Французькій Гвіані під час запуску ракети-носія, що вивела в космос європейський міжпланетний зонд «Розетта». Основна мета зонду — дослідження комети Чурюмова–Герасименко, на яку він сів 12 листопада 2014 р. близько 17 години за київським часом. Іменем Світлани Герасименко названо також астероїд № 3945, який відкрив у 1982 р. Микола Черних.



Гомонай Олена Василівна (1963).

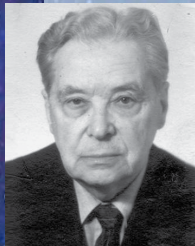
Наукова діяльність пов'язана переважно з фізикою магнітних явищ, зокрема з фізикою антиферромагнітних матеріалів, а також різного роду магнетиків і мультифероїків із сильною магнітопружною взаємодією.



Євдокимов Микола Миколайович (1868–1940).

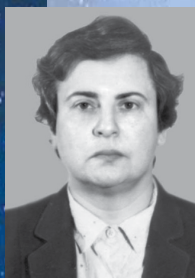
Ім'ям Євдокимова названо кратер на Місяці. Займався визначенням положення зодіакальних і північних зір — поблизу полюса, паралаксів 59 нерухомих зір. Проводив спостереження на меридіанному колі зодіакальних і слабких полярних зір.

ВИДАТНІ УКРАЇНСЬКІ ФІЗИКИ ТА АСТРОНОМИ



Іваненко Дмитро Дмитрович (1904–1994).

Зробив фундаментальний внесок у розвиток багатьох розділів ядерної фізики, теорії поля та теорії гравітації. Він запропонував нову метричну геометрію (геометрія Іваненко–Ландау–Клера). Світове визнання здобув у травні 1932 р., коли перший запропонував протон-нейтронну модель атомного ядра: на основі аналізу експериментальних даних він припустив, що ядро складається лише з протонів і нейтронів.



Каганович Елла Борисівна (1938).

Досліджує фотоелектричні явища у плівках широкозонних напівпровідників сполук АІІВІ, фотоприймальні структури оптоелектроніки та пристрої оброблення оптичної інформації, лазерні методи формування квантових точок кремнію та германію з екситонною фотолюмінесценцією, плазмонні наноматеріали на основі нанокompatитних плівок оксидів з наночастками благородних металів і багатошарових планарних наноструктур для цілей оптоелектроніки та сенсорики.



Климишин Іван Антонович (1933).

Основні наукові роботи належать до радіаційної космічної газодинаміки. Отримав наближені рішення задачі про структуру зоряних ударних хвиль, дав оцінку протяжності зони йонізаційної релаксації за фронтом і зони прогрівання перед фронтом ударної хвилі, що рухається в зоряній атмосфері. Вивів формулу для шкали висот, яка встановлюється в атмосфері зорі під дією періодичної ударної хвилі. Автор низки монографій та науково-популярних книжок, серед яких «Ударні хвилі в неоднорідних середовищах» (1972), «Астрономія наших днів» (1976), «Астрономія вчора і сьогодні» (1976), «Релятивістська астрономія» (1980), «Календар і хронологія» (1981), «Ударні хвилі в оболонках зірок» (1984), «Вчені знаходять Бога» (2010). Автор шкільних підручників з астрономії. Астероїд 3653 Климишин, який відкрив у 1979 р. Микола Черних, названо на честь ученого.



Романчук Павло Родіонович (1921–2008).

Досліджував активність Сонця, розробив метод прогнозування основних характеристик сонячної активності з різною завбачливістю: параметрів 11-річних циклів, відносних чисел сонячних плям, спалахової активності та ін. Деякі результати прогнозування різних індексів сонячної активності використовувалися для потреб фундаментальної науки та різних галузей народного господарства.



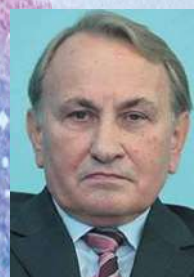
Чурюмов Клим Іванович (1937–2016).

Головні наукові праці в галузі астрономії комет та астероїдів. За ініціативою вченого Міжнародний астрономічний союз назвав національними іменами-символами малі планети: 2427 Кобзар, 2428 Каменярь, 2431 Скворода, 4868 Кнушевія – на честь Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 22616 Боголюбов на честь фізика і математика М. М. Боголюбова.



Яценко Леонід Петрович (1954).

Наукові інтереси: фізика лазерів, нелінійні та когерентні ефекти при взаємодії лазерного випромінювання з атомами та молекулами, керування рухом атомів та молекул лазерним випромінюванням (світловий тиск та охолодження), когерентний лазерний контроль, спектроскопія надвисокої роздільності, лазерні стандарти частоти.



Яцків Ярослав Степанович (1940).

Основні наукові праці присвячено вивченню особливостей обертання Землі, космічній геодинаміці та фундаментальній астрометрії. У галузі обертання Землі вчений виконав великий цикл досліджень з вивчення так званих вільного та вимушеного рухів полюсів Землі, уперше визначив новий тип вільної добової нутації Землі.