



Оріон

Тетяна Засекіна, Дмитро Засекін

ФІЗИКА і АСТРОНОМІЯ

Профільний рівень

11

Основні фізичні сталі

Швидкість світла у вакуумі	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг · с ²)
Прискорення вільного падіння	$g = 9,8$ м/с ²
Атомна одиниця маси	1 а. о. м. = $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг
Число Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Універсальна газова стала	$R = 8,314$ Дж/(К · моль)
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Фарадея	$F = 9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Елементарний заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса спокою протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Стала Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Деякі астрономічні величини	
Радіус і маса Землі	$6,37 \cdot 10^6$ м; $5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радіус і маса Сонця	$6,95 \cdot 10^8$ м; $1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радіус і маса Місяця	$1,74 \cdot 10^6$ м; $7,33 \cdot 10^{22}$ кг

Префікси для утворення десяткових одиниць

Множник	Найменування і позначення префікса	Множник	Позначення і найменування префікса
10^{18}	екса (Е)	10^{-1}	деци (д)
10^{15}	пета (П)	10^{-2}	санти (с)
10^{12}	тера (Т)	10^{-3}	мілі (м)
10^9	гіга (Г)	10^{-6}	мікро (мк)
10^6	мега (М)	10^{-9}	нано (н)
10^3	кіло (к)	10^{-12}	піко (п)
10^2	гекто (г)	10^{-15}	фемто (ф)
10^1	дека (да)	10^{-18}	атто (а)

Діелектричні проникності речовин

Вода	81,0	Парафін	2,1	Скло	7,0
Гас	2,1	Слюда	6,0	Олія	2,5

Густина речовини

Тверді тіла, 10 ³ кг/м ³							
Алюміній	2,71	Золото	19,3	Нікель	8,8	Цинк	7,1
Вольфрам	19,1	Корок	0,2	Свинець	11,3	Чавун	7,8
Граніт	2,2	Латунь	8,6	Скло	2,5	Ялина	0,6
Дуб (сухий)	0,8	Лід	0,9	Сосна	0,5		
Залізо	7,8	Мідь	8,9	Срібло	10,5		
Рідини, 10 ³ кг/м ³							
Вода морська	1,03	Гас	0,8	Ефір	0,72	Ртуть	13,6
Вода чиста	1,00	Гліцерин	1,26	Олія	0,9	Спирт етиловий	0,79
Газ (за нормальних умов), кг/м ³							
Азот	1,25	Кисень	1,47	Водяна пара (при 100 °С)	0,88	Вуглекислий газ	1,95
Водень	0,09	Повітря	1,29				
Гелій	0,18	Хлор	3,22				

Питомий опір ρ (за 20 °С) і температурний коефіцієнт опору α металів та сплавів

Речовина	$\rho, 10^{-8}$ Ом · м, або 10^{-2} Ом · мм ² /м	α, K^{-1}	Речовина	$\rho, 10^{-8}$ Ом · м, або 10^{-2} Ом · мм ² /м	α, K^{-1}
Алюміній	2,8	0,0042	Ніхром	110	0,0001
Вольфрам	5,5	0,0048	Свинець	21	0,0037
Латунь	7,1	0,001	Срібло	1,6	0,004
Мідь	1,7	0,0043	Сталь	12	0,006
Нікелін	42	0,0001			

Електрохімічні еквіваленти речовин, 10⁻⁶ кг/Кл

Алюміній (Al ³⁺)	0,093	Нікель (Ni ²⁺)	0,30
Водень (H ⁺)	0,0104	Срібло (Ag ⁺)	1,12
Кисень (O ²⁻)	0,083	Хром (Cr ³⁺)	0,18
Мідь (Cu ²⁺)	0,33	Цинк (Zn ²⁺)	0,34

Робота виходу електронів, еВ

Вольфрам	4,5	Платина	5,3	Залізо	4,74
Калій	2,2	Срібло	4,3	Золото	4,68
Літій	2,4	Цинк	4,2	Мідь	4,47
Оксид барію	1,0	Нікель	5,0	Цезій	1,97

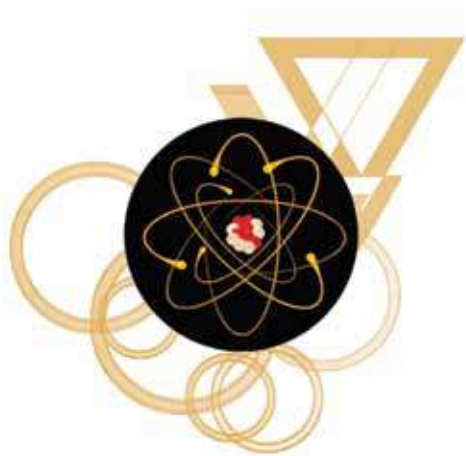
Тетяна Засєкіна, Дмитро Засєкін

ФІЗИКА І АСТРОНОМІЯ

(профільний рівень, 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
Оріон
2019

УДК 53+52]*кл11(075.3)
3-36

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

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Засекіна Т. М.

3-36 Фізика і астрономія (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.) : підруч. для 11 кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засекіна, Д. О. Засекін. — К. : УОВЦ «Оріон», 2019. — 304 с. : іл.

ISBN 978-617-7712-53-3.

УДК 53+52]*кл11(075.3)

ISBN 978-617-7712-53-3

© Т. М. Засекіна, Д. О. Засекін, 2019
© УОВЦ «Оріон», 2019

Передмова

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

А щоб вивчати ці науки було захопливо й зрозуміло, ми намагалися в тексті підручника наводити не лише наукові факти, теорії та пояснення а й проблемні запитання, описи природних явищ чи технологічних процесів. Вони спонукатимуть вас шукати відповіді, аналізувати й пояснювати. У тексті параграфів вам буде траплятися рубрика «Зверніть увагу», де зазначено умови, які слід врахувати задля вирішення конкретної ситуації, яку не завжди можна розв'язати загальноприйнятими методами. Зважаючи на те, що нам часто доведеться пригадувати раніше вивчений матеріал як з фізики, так і з інших предметів, а також те, що ви маєте навчитися самостійного пошуку інформації, що розширить ваш світогляд і допоможе зрозуміти наш складний і таємничий світ, у підручнику є рубрика «Електронний додаток», яка містить необхідний додатковий матеріал. З «Електронним додатком» можна ознайомитися за посиланням <https://bitly.su/BZMTOVKM> або за допомогою QR-кодів, які містяться в тексті підручника.

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

Та не обмежуйте цим пошук потрібної інформації. Готуючись до уроків, навчальних проєктів, ви маєте навчитися працювати з багатьма джерелами, вміти оцінювати вірогідність і надійність джерел, аналізувати, опрацьовувати, інтерпретувати. Виконуючи роботи фізичного й астрономічного практикумів, ви матимете нагоду використовувати як сучасне фізичне обладнання, так і звичайні, а інколи й підручні засоби. Головне — навчитися застосовувати набуті природничо-наукові знання й методологію дослідницької діяльності щоб пояснювати світ природи через виявлення проблеми та пошук способів її розв'язання.

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

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

Авторський колектив

ЗМІСТ

Передмова	3
Розділ 1. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	6
§ 1. Закон Кулона	6
§ 2. Електричне поле	9
§ 3. Електричне поле заряджених поверхонь	13
§ 4. Провідники та діелектрики в електричному полі	18
§ 5. Робота з переміщення заряду в електричному полі	22
§ 6. Потенціал електричного поля	26
§ 7. Електроємність. Конденсатори	30
Перевірте себе (§ 1–7)	36
§ 8. Електричний струм. Закон Ома для повного кола	38
§ 9. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа	46
§ 10. Електричний струм у металах	53
§ 11. Електричний струм у напівпровідниках	58
§ 12. Електричний струм у рідинах	62
§ 13. Електричний струм у газах	65
Перевірте себе (§ 8–13)	69
§ 14. Магнітна взаємодія. Закон Ампера	71
§ 15. Дія магнітного поля	77
§ 16. Електромагнітна індукція	85
§ 17. Самоіндукція	92
Перевірте себе (§ 14–17)	97
Розділ 2. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ	99
§ 18. Вільні та вимушені коливання	99
§ 19. Гармонічні коливання	101
§ 20. Перетворення енергії в гармонічних коливаннях	107
§ 21. Маятники	111
§ 22. Вимушені коливання. Резонанс. Автоколивання	114
§ 23. Механічні коливання	118
Перевірте себе (§ 18–23)	123
§ 24. Вільні електромагнітні коливання	124
§ 25. Змінний струм	130
§ 26. Активні та реактивні навантаження в електричному колі змінного струму	135
§ 27. Послідовне і паралельне з'єднання елементів у колі змінного струму	141
§ 28. Трансформатор	145
§ 29. Електромагнітні хвилі	150
§ 30. Властивості електромагнітних хвиль	156
Перевірте себе (§ 24–30)	162

§ 31. Світлові хвилі. Основні фотометричні величини	163
§ 32. Інтерференція світла	168
§ 33. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках	172
§ 34. Дифракція світла	178
§ 35. Дисперсія світла	182
§ 36. Поляризація світла	185
Перевірте себе (§ 31–36)	189
§ 37. Відбиття світла. Дзеркала	190
§ 38. Заломлення світла	196
§ 39. Лінзи	199
Перевірте себе (§ 37–39)	205
Розділ 3. КВАНТОВА І ЯДЕРНА ФІЗИКА	206
§ 40. Гіпотеза квантів Планка. Фотон	206
§ 41. Фотоэффект	209
§ 42. Тиск світла. Фотохімічна дія світла	214
§ 43. Хвильові властивості електронів. Електрони в атомі	218
§ 44. Випромінювання	221
§ 45. Спектральний аналіз. Спектри небесних тіл	224
§ 46. Атомне ядро	228
§ 47. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	232
§ 48. Ядерні реакції	239
§ 49. Елементарні частинки	243
Перевірте себе (§ 40–49)	248
Розділ 4. АСТРОНОМІЯ	249
§ 50. Поняття зорі. Найближча зоря — Сонце	249
§ 51. Сонячна активність і її прояви на Землі	254
§ 52. Зорі. Класифікація зір	257
§ 53. Еволюція зір	263
§ 54. Подвійні, кратні та змінні зорі	268
§ 55. Наша Галактика	271
§ 56. Галактики	276
§ 57. Елементи сучасної космології	280
§ 58. Життя у Всесвіті. Мультивсесвіт	287
Перевірте себе (§ 50–58)	291
Практикум	292
Відповіді	297
Предметний покажчик	302

Розділ 1

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

§1

Закон Кулона

Електричний заряд. У 9 класі ми вивчали електромагнітні явища. Узагальнимо відомі нам факти.

Основною характеристикою електромагнітної взаємодії є *електричний заряд*.

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

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

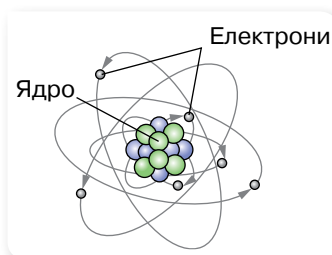
Подальші дослідження довели, що атомне ядро складається з позитивно заряджених протонів та електронейтральних нейтронів. Електричний заряд протона за величиною дорівнює заряду електрона, але протилежний за знаком. У цілому атом електронейтральний, оскільки кількість протонів у ядрі дорівнює кількості електронів в атомі. Кількість протонів у ядрі визначає хімічні властивості атома та його місце в періодичній системі хімічних елементів.

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

Одиниця електричного заряду — кулон, 1 Кл.

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

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



Мал. 1. Планетарна модель атома

Як відомо, однойменно заряджені тіла відштовхуються, різнойменно заряджені — притягаються. Наелектризувати тіло можна тертям або дотиком до електрично зарядженого тіла.

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

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

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

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

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

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

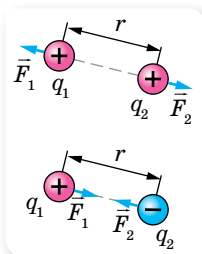
Іноколи для спрощення вживають тільки термін «заряд». Варто пам'ятати, що цим терміном можуть називати як точкове електрично заряджене тіло, так і значення електричного заряду на ньому.

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

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

Модуль цієї сили: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$, де ϵ_0 — електрич-

на стала (її величина та розмірність залежать від вибраної системи одиниць), ϵ — відносна діелектрична проникність середовища.



Мал. 2. Сили взаємодії між точковими електричними зарядами

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

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

$$\varepsilon_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 F} = \frac{1 \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Н}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

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



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як на досліді можна виявити електромагнітну взаємодію? **2.** Сформулюйте й поясніть закон збереження електричного заряду. **3.** У скільки разів зміниться сила взаємодії між двома точковими зарядами, якщо відстань між ними збільшити у два рази, а значення електричного заряду одного з них збільшити в три рази? **4.** Чим подібні й чим відрізняються закон всесвітнього тяжіння та закон Кулона?



Приклади розв'язування задач

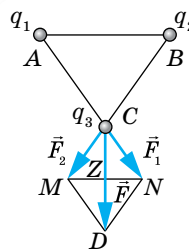
Задача. Однойменні точкові заряди, модулі яких $q_1 = q_2 = q_3 = 1 \cdot 10^{-6}$ Кл, розміщені у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 20$ см. Визначте силу, що діє в повітрі на один із цих зарядів з боку двох інших.

Дано:

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

Розв'язання:

Виконаємо схематичний малюнок до задачі (мал. 3).



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

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

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

$$F_1 = k \frac{q_1 q_3}{(AC)^2}.$$

Мал. 3

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

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

Відповідь: 0,39 Н.



Вправа 1

1. Дві однакові металеві кульки зарядили так, що заряд однієї з них у 5 разів більший від заряду іншої. Кульки доторкнули одну до одної та розсунули на ту саму відстань. Як змінилася (за модулем) сила взаємодії, якщо кульки мали однойменні заряди; різнойменні заряди?
2. У вершинах правильного шестикутника, сторона якого дорівнює a , розташували один за одним заряди $+q, +q, +q, -q, -q, -q$. Визначте силу, що діє на заряд $+q$, який міститься в центрі шестикутника.
3. Дві маленькі кульки масою m підвішені поряд на тонких шовкових нитках завдовжки $l = 2$ м. Після того як кульки зарядили однаковими за величиною й однойменними зарядами $q_1 = q_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ Кл, вони розташувались на відстані $r = 16$ см одна від одної. Визначте натяг ниток.
4. Два позитивно заряджені тіла, заряди яких 1,67 і 3,33 нКл, закріплено на відстані 20 см одне від одного. У якій точці на прямій, що сполучає ці тіла, необхідно розмістити третє тіло із зарядом $-0,67$ нКл, щоб воно було в рівновазі? Масами тіл знехтуйте.
5. Побудуйте графік залежності сили взаємодії між двома точковими зарядами від відстані між ними, $F = f(r)$, в інтервалі $2 \leq r \leq 10$ см через кожні 2 см. Заряди $q_1 = 20$ нКл і $q_2 = 30$ нКл.

§ 2

Електричне поле

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

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

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

Напруженість електричного поля. Головна властивість електричного поля — здатність діяти на внесені в нього електричні заряди з деякою

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

В іншій точці поля (або в електричному полі іншого зарядженого тіла) це відношення також виконується, але його значення може бути іншим. Отже, відношення $\frac{F}{q}$ залежить тільки від вибраної точки поля і є характеристикою силової дії поля. Силова характеристика електричного поля називається **напруженістю** поля й позначається буквою E .

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

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

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

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

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

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

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

Тоді напруженість поля точкового заряду q на відстані r від нього: $E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}$.

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

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

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

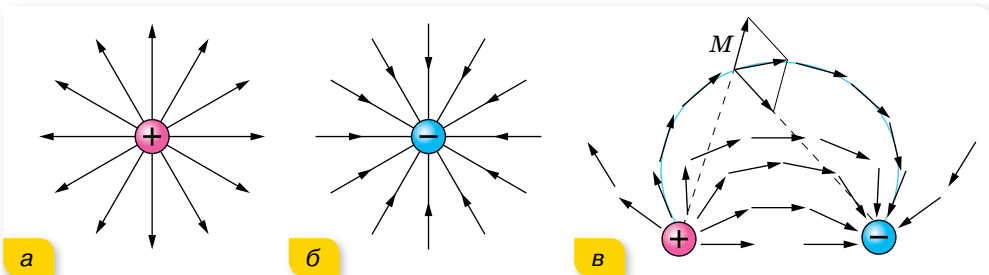
Напруженість поля, створеного системою нерухомих зарядів, дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створених кожним із цих зарядів окремо:

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

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

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

Напрямок силових ліній збігається з напрямком вектора напруженості. У випадку точкових зарядів силові лінії напрямлені від позитивного заряду й закінчуються в нескінченності (мал. 4, а) або починаються в нескінченності та йдуть до негативного заряду (мал. 4, б).

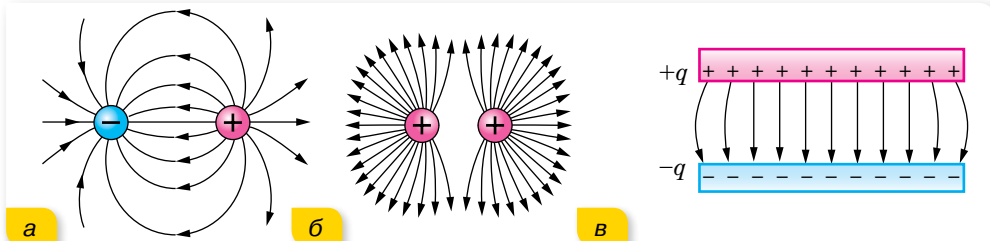


Мал. 4. Лінії напруженості точкових зарядів (а, б), диполя (в)

Складніше провести лінії напруженості, коли поле створено кількома зарядами, наприклад двома. Така система з двох зарядів називається *диполем*. Провести лінію так, щоб вектори напруженості в кожній точці збігалися з нею, здебільшого не можна. Тому лінії напруженості проводять так, щоб вектори напруженості були напрямлені по дотичній (мал. 4, в).

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

На малюнку 5 зображено ще кілька прикладів електричних полів.



Мал. 5. Графічне зображення електричних полів: а — однакових за значенням різнойменних зарядів; б — однакових за значенням однойменних зарядів; в — двох пластин, заряджених різнойменними зарядами однакової величини

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

Поле, напруженість якого в усіх точках однакова за модулем і напрямком, називають *однорідним електростатичним полем*. Прикладом такого поля є поле всередині простору між зарядженими пластинами (мал. 5, в) (біля країв пластин поле неоднорідне).



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

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



Приклади розв'язування задач

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

Дано:

m

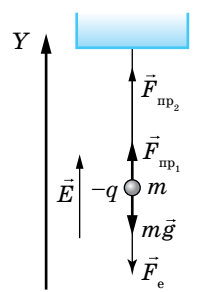
E

$-q$

F — ?

Розв'язання:

На незаряджену кульку діє сила тяжіння $m\vec{g}$ і сила пружності $\vec{F}_{\text{пр}_1}$. Якщо кульку зарядити, виникне ще й електрична сила \vec{F}_e (мал. 6), у результаті чого сила пружності зміниться — $\vec{F}_{\text{пр}_2}$.



Мал. 6

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

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

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

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



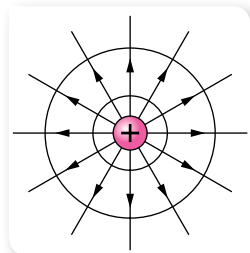
Вправа 2

1. Два заряди, один з яких за модулем у 4 рази більший за другий, розташували на відстані a один від одного. У якій точці поля напруженість дорівнює нулеві, якщо заряди однойменні; різнойменні?
2. В однорідному полі, напруженість якого $40 \frac{\text{кН}}{\text{Кл}}$, розташували заряд 27 нКл . Визначте напруженість результуючого поля на відстані 9 см від заряду в точках: а) розташованих на силовій лінії однорідного поля, яка проходить через заряд; б) розташованих на прямій, яка проходить через заряд перпендикулярно до силових ліній.
3. В основі рівностороннього трикутника зі стороною a розташовано заряди по $+q$ кожний, а у вершині — заряд $-q$. Визначте напруженість поля в центрі трикутника.
4. У двох протилежних вершинах квадрата зі стороною 30 см розташовано заряди $0,2 \text{ мКл}$ кожний. Визначте напруженість поля у двох інших вершинах квадрата.
5. На який кут відхилиться у вакуумі заряджена неметалева кулька, підвішена на шовковій нитці, якщо її помістити в горизонтальне однорідне електричне поле, напруженість якого $1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$? Заряд кульки — $4,9 \text{ нКл}$, маса — $0,4 \text{ г}$.
6. Заряджену металеву кульку, підвішену на ізолюючій нитці, внесли в однорідне горизонтально напрямлене поле, від чого нитка утворила з вертикаллю кут 45° . На скільки зменшиться кут відхилення нитки, якщо з кульки стече десята частка її заряду?
- 7*. В однорідному електричному полі, силові лінії якого горизонтальні, на тонкій нерозтяжній нитці завдовжки $l = 35 \text{ см}$ висить кулька масою $m = 15 \text{ г}$, заряд якої $q = 3 \text{ мКл}$. Визначте період коливач кульки, якщо напруженість електричного поля $E = 40 \frac{\text{кН}}{\text{Кл}}$.

§ 3

Електричне поле заряджених поверхонь

Потік напруженості електричного поля. Теорема Остроградського — Гаусса. Розглянемо поле точкового позитивного заряду. Кількість силових ліній N можна зобразити довільно, оскільки поле існує в усіх точках простору навколо заряду. Оточимо уявно заряд сферою, центр яких збігається з точковим зарядом (мал. 7). Як видно, кількість ліній напруженості, що перетинають першу і другу сфери, однакова. Яку б кількість сфер ми не побудували, кількість ліній напруженості, що їх перетинають, залишається однаковою.



Мал. 7.
Ілюстрація до введення поняття потоку напруженості електричного поля

Модуль напруженості поля, створюваного точковим зарядом q , у довільній точці сфери радіусом r становить $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}$. Перепишемо цю формулу в такому вигляді: $4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Площа сфери $S = 4\pi r^2$, отже, дана формула набуває вигляду $ES = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$.

Оскільки площа сфери збільшується, як квадрат радіуса, а напруженість поля в точках на сфері зменшується, як квадрат радіуса, добуток ES залишається однаковим для всіх сфер.

Раніше ми встановили, що однаковою для всіх сфер буде кількість ліній напруженості, що їх перетинають, N . Отже, з точністю до деякої сталої можна прирівняти: $ES = N$ або $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Як видно з останньої формули, кількість ліній напруженості, що виходять з точкового заряду, пропорційна величині цього заряду.

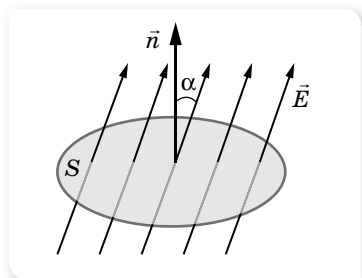
У розглянутому випадку поверхня сфери площею S , усередині якої міститься точковий заряд, є замкнутою поверхнею, перпендикулярною до ліній напруженості. Для цього випадку ми й отримали $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Такий само результат можна отримати і для довільної системи зарядів: якщо оточити довільну систему зарядів замкнутою поверхнею (не обов'язково сферою), то кількість силових ліній, що перетинають цю поверхню, визначається сумарним зарядом системи, $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Це твердження назива-

ють **теоремою Остроградського — Гаусса**.

Сукупність ліній напруженості, що перетинають площину, перпендикулярну до ліній напруженості і площа якої S , називають **поток вектора напруженості**, $N = ES$.

Якщо поверхня не перпендикулярна до напрямку вектора напруженості електричного поля, то формула записується так: $N = ES \cos \alpha$, де α — кут між напрямком вектора напруженості \vec{E} і нормалю до поверхні (мал. 8).

Теорему Остроградського — Гаусса формулюють так:



Мал. 8. Обчислення потоку вектора напруженості

Потік вектора напруженості електричного поля через довільну замкнену поверхню дорівнює $N = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \sum q_i$, де $\sum q_i$ — алгебраїчна сума зарядів, що перебувають усередині цієї поверхні.

Приклади застосування теореми Остроградського — Гауса. Теорема Остроградського — Гауса полегшує знаходження значень вектора E , коли площу поверхні, що охоплює заряд, легко обчислити за формулами геометрії. Наприклад, обчислимо напруженість поля, створюваного рівномірно зарядженою сферою. Але перед цим уведемо поняття густини електричного заряду.

Густина електричного заряду — фізична величина, що характеризує розподіл електричного заряду в просторі.

Користуються поняттями:

- ▶ *лінійної густини* τ , якщо електричний заряд q розподілений уздовж лінії завдовжки l , $\tau = \frac{q}{l}$;
- ▶ *поверхневої густини* σ , якщо заряд q розподілений по поверхні площі S , $\sigma = \frac{q}{S}$;
- ▶ *об'ємної густини* ρ , якщо електричний заряд q розподілений по всьому об'єму V , $\rho = \frac{q}{V}$.

Якщо на поверхні сфери радіусом R (мал. 9) рівномірно розподілено заряд q , то поверхнева густина заряду дорівнює: $\sigma = \frac{q}{S} = \frac{q}{4\pi R^2}$.

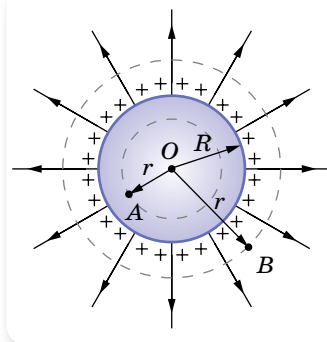
Розглянемо всередині сфери будь-яку точку A на відстані r від її центра, тобто точку, для якої $r < R$. Із центра O проведемо допоміжну поверхню, теж у вигляді сфери радіусом r , та обчислимо потік ліній напруженості N крізь цю поверхню, $N = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon}$. Оскільки всередині

допоміжної поверхні радіуса r електричних зарядів немає, $q = 0$, то і напруженість поля $E = \frac{N}{S}$ також дорівнює нулю.

Отже, *всередині зарядженої провідної сфери (чи іншого провідника будь-якої форми, на якій електричний заряд завжди розміщується тільки на поверхні) електричного поля немає.*

Обчислимо напруженість для точок, які містяться біля самої поверхні сфери, тобто для яких можна вважати, що $r = R$. Тоді $E = \frac{N}{S} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2}$.

Оскільки $q = 4\pi R^2 \sigma$, то $E = \frac{4\pi R^2 \sigma}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$, за умови, що $r = R$.

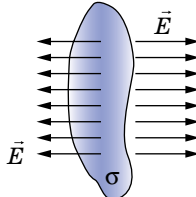
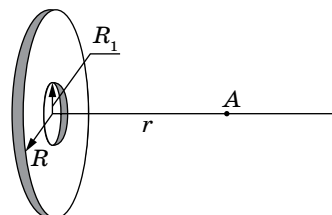
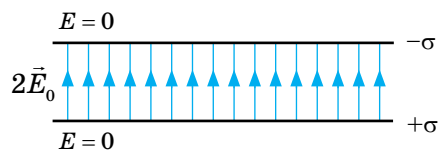
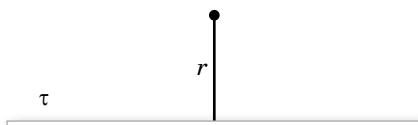
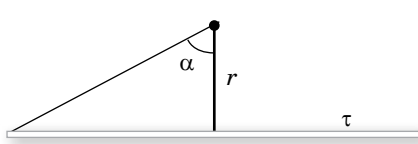


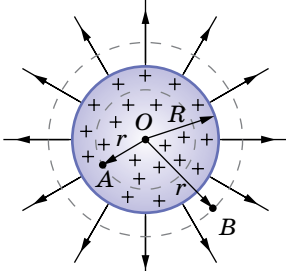
Мал. 9. Електричне поле зарядженої сфери

Для точок, що значно віддалені від поверхні зарядженої сфери (точка B на малюнку 9), маємо: $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$ або $E = \frac{R^2\sigma}{\epsilon_0\epsilon r^2}$.

За допомогою теореми Остроградського — Гаусса можна обчислити напруженість електричного поля довільних заряджених тіл. У таблиці 1 наведено формули для визначення напруженості електричного поля в деяких практично цікавих випадках.

Таблиця 1

<p>Рівномірно заряджена нескінченна площина</p>	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon},$ <p>тут σ — поверхнева густина електричного заряду</p>	
<p>Диск радіусом R</p>	<p>Напруженість поля в точці, що лежить на перпендикулярі, проведеному із центра диска, на відстані r від нього:</p> $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} \left(1 - \frac{R_1}{\sqrt{R^2 + R_1^2}} \right)$	
<p>Дві рівномірно різнойменно заряджені нескінченні пластини</p>	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}.$ <p>Електричне поле зосереджене між пластинами, у просторі між пластинами $E = 0$</p>	
<p>Нескінченно довга заряджена нитка</p>	$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r},$ <p>тут τ — лінійна густина заряду, r — відстань від нитки</p>	
<p>Заряджена нитка визначеної довжини</p>	<p>Напруженість поля в точці, що лежить на перпендикулярі, проведеному із середини нитки, на відстані r від нитки,</p> $E = \frac{\tau \sin \alpha}{2\pi\epsilon_0\epsilon r},$ <p>тут α — кут між напрямком нормалі до нитки та радіусом-вектором, проведеним з точки до кінця нитки</p>	

<p>Однорідно заряджена куля радіусом R</p>	<p>Для $r \leq R$ напруженість</p> $E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0 \epsilon}$ <p>де ρ — об'ємна густина заряду.</p> <p>Для $r \gg R$ напруженість E визначається формулою напруженості точкового заряду</p>	
--	---	--



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають потоком напруженості електричного поля? **2.** У чому суть теореми Остроградського — Гауса? **3.** За якою формулою визначається напруженість рівномірно зарядженої нескінченної площини? **4.** Чим відрізняються картини силових ліній полів між двома парами точкових зарядів q і $-q$ та $2q$ і $-q$? Намалуйте їх.



Приклади розв'язування задач

Задача. На суцільній металевій сфері радіусом $R = 20$ см рівномірно розподілений заряд з поверхневою густиною $\sigma = 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$. Визначте напруженість електричного поля в точках: на відстані $r_1 = 16$ см від центра сфери; на поверхні сфери та на відстані $r_2 = 36$ см від центра сфери. Побудуйте графіки залежності $E = E(r)$.

Дано:

$$R = 0,2 \text{ м}$$

$$\sigma = 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

$$r_1 = 0,16 \text{ м}$$

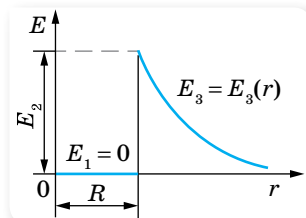
$$r_2 = 0,36 \text{ м}$$

$$E_1, E_2, E_3 \text{ — ?}$$

Розв'язання:

У середині сфери напруженість поля дорівнює нулю: $E_1 = 0$ (для $r = r_1$).

Заряджена сфера створює навколо себе поле, напруженість якого визначається за формулою точкового заряду.



Мал. 10

$$\text{Для } r = R: \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{4\pi R^2\sigma}{R^2} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad E_2 = 113 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

$$\text{Для } r = r_2: \quad E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r_2^2} = \frac{R^2\sigma}{\epsilon\epsilon_0 r_2^2}, \quad E_3 = 34,5 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Графік наведено на малюнку 10.

Відповідь: 0 В; $113 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$; $34,5 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.



Вправа 3

1. Металевій кулі, радіусом 24 см, надано заряд 6,26 нКл. Визначте напруженість електричного поля в центрі кулі, на відстані від центра, що дорівнює половині радіуса, і на відстані 24 см від поверхні кулі.
2. Побудуйте графіки залежності напруженості електричного поля від відстані $E = f(r)$ для точкового заряду і для зарядженої провідної кулі радіусом R .
3. Чому дорівнює напруженість \vec{E} поля в центрі рівномірно зарядженого дротяного кільця?
4. З якою силою електричне поле зарядженої нескінченної площини діє на одиницю довжини зарядженої нескінченно довгої нитки, що розташована в цьому полі? Лінійна густина заряду на нитці — $3 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}}$, а поверхнева густина заряду на площині — $20 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$.
5. Покажіть, що електричне поле, яке створене ниткою скінченної довжини, у граничних випадках переходить в електричне поле: а) нескінченно довгої зарядженої нитки; б) точкового заряду.
6. Визначте напруженість електричного поля в точці A , що розташована на відстані $r = 5$ см від зарядженого диска вздовж нормалі, установленій в його центрі. За якого граничного значення радіуса R диска поле в точці A не буде відрізнятися більше ніж на 2 % від поля нескінченної площини? Яка напруженість поля в точці A , якщо радіус диска дорівнює $R = 10r$? У скільки разів напруженість, обчислена в цьому випадку, відрізняється від напруженості поля нескінченної площини?
7. Мильна бульбашка, що висить на кінці тонкої трубочки, стягується під дією сил поверхневого натягу. Чи можна утримати бульбашку від повного стягування, якщо надати їй великого електричного заряду? Якщо так, то бульбашка якого діаметра залишиться? (До того ж потрібно враховувати, що в полі напруженістю $3 \frac{\text{МН}}{\text{Кл}}$ настає пробій повітря.)

§ 4

Провідники та діелектрики в електричному полі

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

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

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

Розглянемо поведінку в електричному полі тільки твердих металевих провідників. У металах носіями вільних зарядів є вільні електрони. Їх називають *електронами провідності*. Вільні електрони беруть участь

у тепловому русі й можуть переміщуватися по шматку металу в будь-якому напрямку.

Помістимо незаряджений металевий провідник в однорідне електростатичне поле.

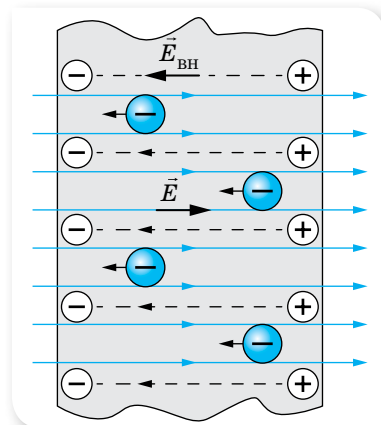
Під дією поля в ньому виникне впорядкований рух вільних електронів у напрямку, протилежному напрямку напруженості \vec{E} цього поля. Електрони накопичуватимуться на одному боці провідника й утворять там надлишковий негативний заряд, а їх недостача на іншому боці провідника спричинить утворення там надлишкового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

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

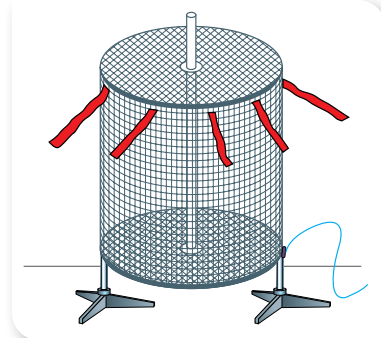
Некомпенсовані електричні заряди, що з'явилися на протилежних частинах провідника, створюють усередині провідника власне електричне поле напруженістю $\vec{E}_{\text{вн}}$. Напрямки зовнішнього і внутрішнього полів — протилежні (мал. 11).

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

Електростатичний захист. За умови рівноваги зарядів на провіднику весь некомпенсований заряд розміщується тільки на зовнішній поверхні провідника, а всередині нього електричного поля немає (мал. 12). Це явище використовують для створення *електростатичного захисту* — захисту від дії електричного поля. На відміну від гравітаційного поля, від електричного поля можна захиститися, якщо оточити провідник, наприклад, мідною сіткою. На практиці це використовують, щоб захиститися



Мал. 11. Провідник у зовнішньому електричному полі



Мал. 12. Електричне поле, сконцентроване ззовні

від потужного електричного поля радіолокаторів і радіостанцій, випромінювання яких може зашкодити здоров'ю людини; щоб запобігти дії електричного поля на чутливі прилади.

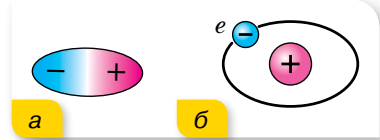
Види діелектриків. *Діелектриками*, або ізоляторами, називають такі тіла, крізь які електричні заряди не можуть переходити від зарядженого тіла до незарядженого. Ця властивість діелектриків зумовлена тим, що в них за певних умов немає вільних носіїв заряду. Якщо умови змінюються, наприклад, під час нагрівання,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

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

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

Діелектрики поділяють на два види (мал. 13):

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



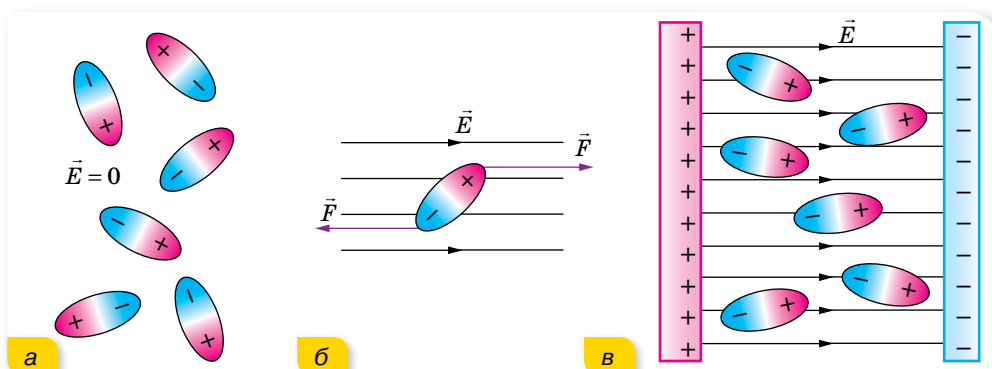
Мал. 13. Види діелектриків: а — полярні; б — неполярні

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

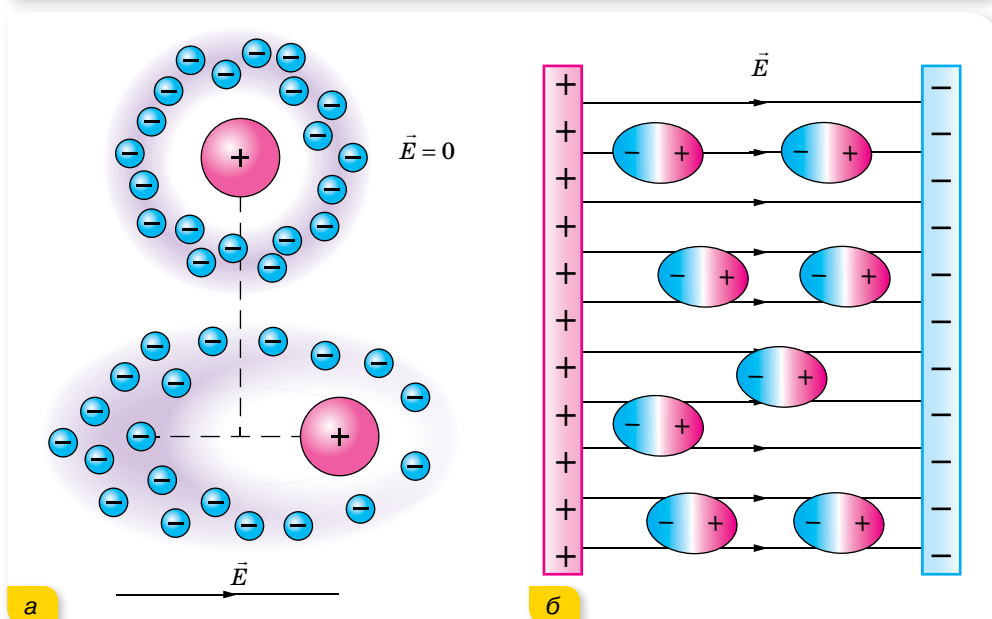
Молекули полярних діелектриків — це електричні диполі, що мають постійний дипольний момент унаслідок асиметрії центра мас позитивних і негативних зарядів (мал. 14, а).

Якщо полярний діелектрик помістити в електричне поле, то ці диполі починають повертатися своїми позитивно зарядженими кінцями до негативно зарядженої пластини, а негативно зарядженими — до позитивно зарядженої пластини (мал. 14, б). У результаті на поверхні діелектрика біля позитивної пластини виникає досить тонкий шар негативних зарядів, а біля негативно — позитивних, які й створюють зустрічне поле (мал. 14, в). (Усередині діелектрика позитивні й негативні заряди сусідніх диполів компенсують дію один одного.) Однак, на відміну від провідників, це поле вже не здатне повністю скомпенсувати зовнішнє, а лише послаблює його в ϵ разів.

Молекули неполярних діелектриків, якщо відсутнє зовнішнє електричне поле, дипольного моменту не мають (мал. 15, а). Якщо ж неполярний діелектрик помістити в електричне поле, його молекули деформуються,



Мал. 14. Поляризація полярного діелектрика



Мал. 15. Деформація та орієнтація молекул неполярного діелектрика в електричному полі

у результаті чого утворюються диполі, які поводять себе, як і диполі полярного діелектрика. У полярних діелектриках також відбувається поляризація молекул, унаслідок чого в електричному полі дипольний момент кожної молекули дещо збільшується (мал. 15, б). Але поляризація неполярних діелектриків пояснюється лише виникненням дипольного моменту в молекулі внаслідок її деформації в зовнішньому електричному полі. Залежно від хімічного зв'язку вона може бути результатом деформації електронних оболонок окремих атомів і йонів (електронна поляризація) або наслідком зміщення позитивних і негативних йонів у різні боки вздовж силових ліній зовнішнього електричного поля (йонна поляризація). Наведений дипольний момент зростає зі збільшенням напруженості електричного поля.

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

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



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

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

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



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦМЮ

1. Що відбувається в разі внесення провідника в електричне поле? **2.** Як зарядити два тіла різнойменно, не доторкуючись до них зарядженим тілом? **3.** Укажіть схожість і відмінності процесів електризації провідника та поляризації діелектрика. **4.** У якому агрегатному стані — рідкому, твердому чи газоподібному — діелектрична проникність діелектрика буде найбільшою?

§ 5

Робота з переміщення заряду в електричному полі

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

У курсі механіки ми з'ясували, що сила всесвітнього тяжіння є *консервативною силою*, оскільки її робота з переміщення тіла масою m у просторі не залежить від траєкторії руху тіла, а визначається лише його початковим і кінцевим положеннями. Робота з переміщення тіла замкненою траєкторією дорівнює нулю. Робота сили земного тяжіння (біля поверхні Землі) $A = mg(h_1 - h_2)$ (позначення див. на мал. 16); у всесвітньому масштабі робота гравітаційної сили $A = GM_3 m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$. Нагадуємо, силове поле, у якому

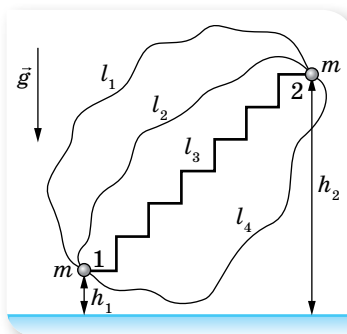
робота не залежить від форми траєкторії, називають *потенціальним*.

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

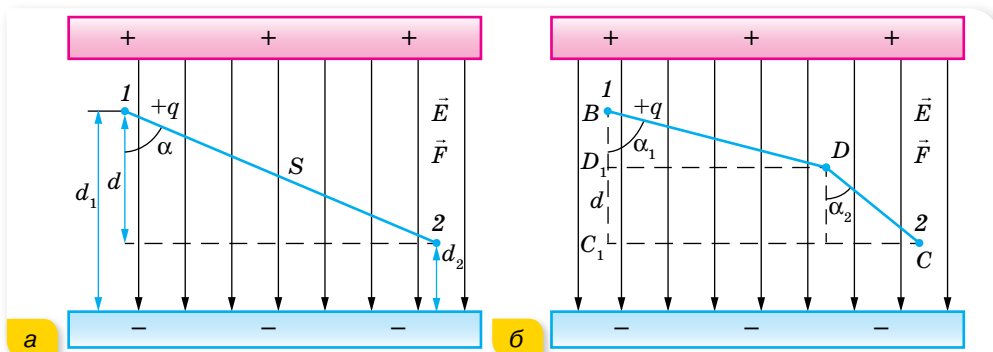
Ці висновки отримано із закону всесвітнього тяжіння Ньютона, подібні висновки мають бути отримані й для електростатичних сил, що діють в електричному полі.

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

Нехай пластини розміщені горизонтально. Обчислимо роботу, яку виконує електростатичне поле, переміщуючи позитивний заряд q з точки 1, розташованої на відстані d_1 від негативно зарядженої пластини, у точку 2, віддалену на відстань d_2 , по прямолінійній траєкторії (мал. 17, а).



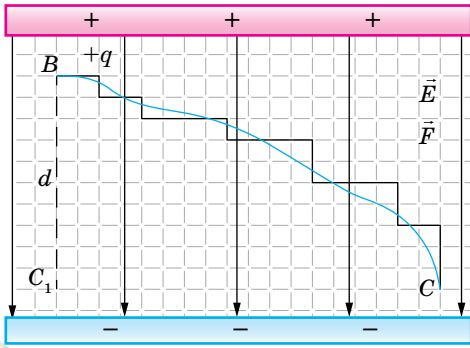
Мал. 16. До визначення роботи сили тяжіння



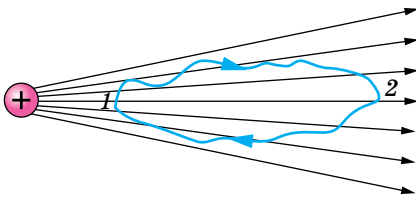
Мал. 17. Переміщення позитивного заряду в однорідному електричному полі: а — по прямолінійній траєкторії; б — по ламаній

Як відомо з курсу механіки, робота з переміщення тіла визначається формулою $A = Fscos\alpha$, де α — кут між векторами сили та переміщення.

Відповідно електричне поле на ділянці 1–2 виконує роботу $A = Fd$, де $d = s \cos \alpha$. З урахуванням того, що $F = qE$, отримуємо $A = qEd = qE(d_1 - d_2)$. Ця робота не залежить від форми траєкторії, подібно до того, як не залежить від форми траєкторії робота сили тяжіння. Доведемо це. Нехай тепер позитивний заряд q переміщується з точки 1 у точку 2 ламаною BDC (мал. 17, б). Тоді поле виконує роботу $A = qE (BD \cos \alpha_1 + DC \cos \alpha_2) = qE(BD_1 + D_1C_1) = qEd$.



Мал. 18. Криволінійну траєкторію можна замінити траєкторією у вигляді ламаної лінії, з якою завжди точно, якщо взяти достатньо малі сходинки



Мал. 19. Робота з переміщення заряду в неоднорідному полі

Такого самого висновку ми дійдемо за будь-якого вигляду траєкторії руху точкового заряду, адже будь-яку криву можна замінити переміщенням по ламаній траєкторії з достатньо малими сходинками (мал. 18).

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

Можна довести, що цей висновок справджується і для неоднорідних полів, наприклад, для поля точкового заряду (мал. 19). У цьому випадку роботу з переміщення позитивного заряду q_0 з точки 1, яка лежить на відстані r_1 від заряду q , що створює поле, у точку 2, яка лежить на відстані r_2 , визначають за формулою

$$A = q_0 \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2} \right) \text{ незалеж-}$$

но від форми траєкторії.

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

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

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

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

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



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

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



Вправа 4

- Електрон зі швидкістю $1,8 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ влітає в однорідне електричне поле напруженістю $3 \frac{\text{мН}}{\text{Кл}}$ і рухається проти ліній поля. З яким прискоренням рухається електрон і якою буде його швидкість, коли він пройде відстань $7,1 \text{ см}$? Скільки часу необхідно для набуття цієї швидкості? Рух електрона відбувається у вакуумі.
- Кулька масою 40 мг , що має позитивний заряд $q = 1 \text{ нКл}$, рухається зі швидкістю $10 \frac{\text{см}}{\text{с}}$. На яку відстань може наблизитись кулька до позитивного точкового заряду $q_0 = 1,33 \text{ нКл}$?
- Яка робота виконується в разі перенесення точкового заряду 20 нКл із нескінченності в точку, що лежить на відстані 1 см від поверхні кулі радіусом 1 см з поверхневою густиною заряду $10 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$?
- Дві кульки із зарядами $6,66 \text{ нКл}$ та $13,33 \text{ нКл}$ перебувають на відстані 40 см одна від одної. Яку роботу необхідно виконати, щоб зменшити відстань між ними до 25 см ?
- Точкові заряди $q_1 = -17 \text{ нКл}$ та $q_2 = 20 \text{ нКл}$ перебувають від точкового заряду $q_3 = 30 \text{ нКл}$ відповідно на відстанях $l_1 = 2 \text{ см}$ і $l_2 = 5 \text{ см}$. Яку мінімальну роботу проти електричних сил необхідно виконати, щоб поміняти заряди q_1 і q_2 місцями?

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

§6

Потенціал електричного поля

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

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

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

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

Із введенням потенціалу формулу для визначення роботи з переміщення заряду між точками 1 і 2 можна записати у вигляді $\frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$. Оскільки під час переміщення позитивного заряду в напрямку вектора напруженості електричне поле виконує додатну роботу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) > 0$, то потенціал φ_1 більший за потенціал φ_2 . Таким чином, напруженість електричного поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.

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

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

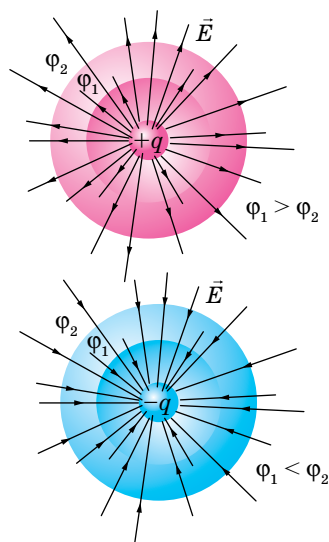
За цією формулою розраховують і потенціал поля зарядженої кулі. У такому разі r — це відстань від центра кулі до вибраної точки поля. Із цієї формули видно, що на однакових відстанях від точкового заряду, який створює поле, потенціал є однаковим. Усі ці точки лежать на поверхні сфери, описаної радіусом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

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

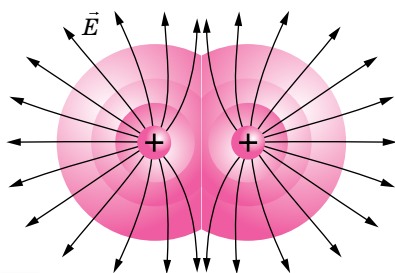
Силкові лінії завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь. Це означає, що робота сил поля з переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

У разі накладання електричних полів, створених кількома зарядами, потенціал електричного поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створених окремими зарядами, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$. Еквіпотенціальні поверхні таких систем мають складну форму. Наприклад, для системи з двох однакових за значенням однойменних зарядів еквіпотенціальні поверхні мають вигляд, зображений на малюнку 21, а. Еквіпотенціальні поверхні однорідного поля є площинами (мал. 21, б).

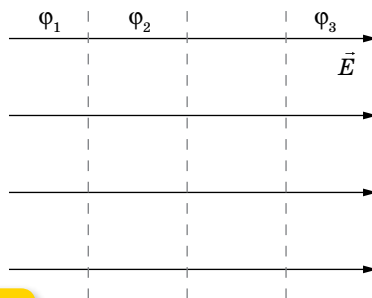
Різниця потенціалів. Практичне значення має не сам потенціал у точці, а зміна (різниця) потенціалу $\varphi_1 - \varphi_2$, яка не залежить від вибору нульового рівня відліку потенціалу. Різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ ще називають *напругою* і позначають латинською літерою U .



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



а



б

Мал. 21. Еквіпотенціальні поверхні: а — поля двох однакових зарядів; б — однорідного поля

Тоді формула для роботи з переміщення заряду набуває вигляду

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

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

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

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

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

- ▶ що менше змінюється потенціал на відстані d , то меншою є напруженість електричного поля;
- ▶ якщо потенціал не змінюється, то напруженість дорівнює нулю;
- ▶ напруженість електричного поля напрямлена в бік зменшення потенціалу.

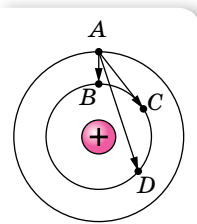
Оскільки $E = \frac{U}{d}$, то саме із цієї формули й виводиться ще одна одиниця напруженості — вольт на метр, $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають потенціалом електричного поля? Яка формула відображає зміст цього поняття? **2.** Що називають різницею потенціалів між двома точками поля? Яка формула відображає зміст цього поняття? **3.** Які поверхні називають екіпотенціальними? **4.** Яка формула задає зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів в однорідному електричному полі? **5.** Порівняйте роботи, виконані полем під час переміщення заряду з точки A в точки B , C і D (мал. 22). **6.** Проаналізуйте формули законів універсального тяжіння та Кулона, які подібні за формою, хоча й описують явища різної природи, та з'ясуйте: а) яка фізична величина в законі універсального тяжіння є аналогом заряду в законі електростатики Кулона; б) яка величина в полі тяжіння відіграє роль, подібну до напруженості електричного поля (запишіть формулу для обчислення цієї величини); в) який вигляд має формула потенціалу гравітаційного поля, якщо потенціал

електричного поля $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$.



Мал. 22



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Електричне поле створене точковим зарядом $5 \cdot 10^{-7}$ Кл, уміщеним у середовище з діелектричною проникністю $\varepsilon = 2$. Визначте різницю електричних потенціалів точок, віддалених від заряду відповідно на 5 см і 0,2 м. Яка робота виконується з переміщення електричного заряду $0,3 \cdot 10^{-7}$ Кл між цими точками?

Дано:

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

U — ?; A — ?

Розв'язання:

Використовуючи формулу $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$, визначимо різницю електричних потенціалів точок 1 і 2 електричного поля:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_1} - \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

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

Підставимо числові значення, отримаємо:

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

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

Відповідь: 34 кВ; 1 мДж.

Задача 2. Із 60 маленьких сферичних крапель ртуті, радіуси яких 0,1 мм, 20 штук мають заряди $q_1 = 1,2 \cdot 10^{-12}$ Кл, а 40 штук — $q_2 = -0,8 \cdot 10^{-12}$ Кл кожна. Визначте потенціал великої краплі, яка утворюється після злиття в одну всіх маленьких крапель.

Дано:

$$\begin{aligned} q_1 &= 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \\ q_2 &= -0,8 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \\ r &= 1 \cdot 10^{-4} \text{ м} \\ n_1 &= 20 \\ n_2 &= 40 \end{aligned}$$

φ — ?

Розв'язання:

Потенціал великої сферичної краплі $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$, де Q — її заряд, R — радіус.

У процесі зливання крапель виконується закон збереження електричного заряду: $Q = n_1 q_1 + n_2 q_2$.

Об'єм утвореної краплини становить $\frac{4}{3} \pi R^3 = (n_1 + n_2) \frac{4}{3} \pi r^3$, звідки

$$R = r \sqrt[3]{n_1 + n_2}.$$

Тоді $\varphi = \frac{n_1 q_1 + n_2 q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r \sqrt[3]{n_1 + n_2}}$. Після підстановки числових значень отриму-

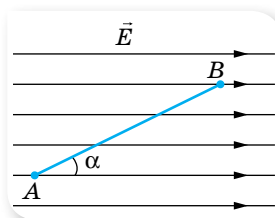
ємо: $\varphi \approx 184 \text{ В}$.

Відповідь: $\varphi \approx 184 \text{ В}$.



Вправа 5

1. На відстані 5 см від поверхні кулі потенціал електричного поля дорівнює 1,2 кВ, а на відстані 10 см він дорівнює 900 В. Визначте радіус кулі, її заряд і потенціал.
2. Сто однакових заряджених крапельок, зливаючись, утворюють одну. Яким буде потенціал утвореної краплі, якщо потенціал кожної крапельки дорівнює 3 В?
3. Точки A і B лежать на відстані 10 см одна від одної й розташовані в однорідному полі, напруженість якого $60 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Визначте різницю потенціалів між цими точками. Розгляньте випадки, коли точки A і B лежать: а) на одній лінії напруженості; б) на прямій, перпендикулярній до ліній напруженості; в) на прямій, напрямленій під кутом 45° до ліній напруженості.
4. Визначте напругу між точками A і B (мал. 23), якщо $|AB| = 8 \text{ см}$, $\alpha = 30^\circ$ і напруженість поля становить $50 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.
5. Якої швидкості набуває електрон, рухаючись між точками електричного поля, якщо різниця потенціалів між ними 200 В?

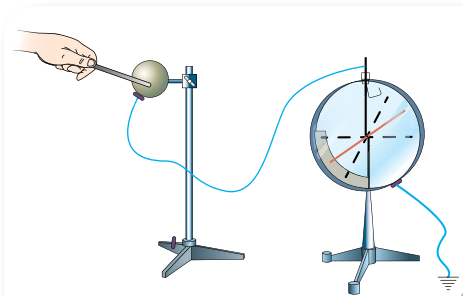


Мал. 23

§7

Електроємність. Конденсатори

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



Мал. 24. Дослідження залежності потенціалу провідника від зміни його заряду

З'ясуємо, як змінюватиметься потенціал провідника за зміни його заряду. Візьмемо провідник (наприклад, металеву кулю), ізольований від Землі та інших провідників, і, не змінюючи його положення відносно інших провідників, будемо його електризувати (збільшувати заряд) (мал. 24). За допомогою електрометра¹ вимірюватимемо відповідні значення потенціалу провідника. У скільки разів збільшується заряд кулі, у стільки ж зростає її потенціал,

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

тобто заряд провідника прямо пропорційний потенціалу, $q \sim \varphi$. Уводячи коефіцієнт пропорційності, отримуємо $q = C\varphi$, де C — коефіцієнт пропорційності, сталий для умов даного досліду. Якщо ми замінимо провідник іншим (наприклад, кулею більших розмірів) або змінимо зовнішні умови досліду, то значення коефіцієнта C буде іншим. Цей коефіцієнт пропорційності називають *ємністю* (або *електроємністю*)¹ провідника.

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

Одиниця електроємності — фарад, 1 Ф.

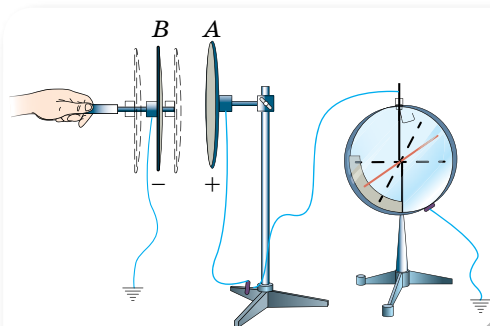
Електроємність провідника правильної форми можна розрахувати. Наприклад, обчислимо ємність окремої провідної кулі радіусом r . Потенціал зарядженої кулі $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$, підставляючи цей вираз у формулу для ємності, отримуємо: $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$.

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

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

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

Оскільки провідник електризується через вплив, електроємність провідника має залежати від розміщення поблизу нього інших провідників і від навколишнього середовища. Покажемо це на досліді. Візьмемо два металеві диски, закріплені на підставках з діелектрика (мал. 25). Диск A з'єднаємо з електрометром, корпус якого заземлений, а диск B відсунемо від диска A . Наелектризуємо диск A , надавши йому заряд, який надалі не змінюватиметься. Визначивши



Мал. 25. Дослід з визначення залежності електроємності провідників від відстані між ними

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

значення потенціалу диска A за показами електрометра, почнемо наближати до нього диск B , одночасно спостерігаючи за стрілкою приладу. Виявляється, що потенціал диска A при цьому зменшується.

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

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

Конденсатор. Електроємність плоского конденсатора. Розглянута система провідників є основою для пристроїв, які називають *конденсаторами*. Конденсатори широко використовують в радіотехніці як пристрої для накопичування й утримання електричного заряду.

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

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

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

За формою обкладок конденсатори бувають плоскі, циліндричні та сферичні. Як діелектрик у них використовують парафіновий папір,

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

слюду, повітря, пластмаси, кераміку тощо. Типовий плоский конденсатор складається з двох металевих пластин площею S , простір між якими розділено діелектриком товщиною d .

Виведемо формулу для ємності плоского конденсатора. Ураховуючи, що $C = \frac{q}{U}$, підставимо в цю формулу вираз $U = Ed$, де E — напруженість поля, створюваного двома пластинами, $E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$.

У результаті отримаємо: $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$.

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

Відповідно можна вивести формули для ємності конденсаторів інших форм. Так, ємність сферичного конденсатора обчислюється за формулою $C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon rR}{R-r}$, де r та R — радіуси внутрішньої та зовнішньої сфер (у випадку відокремленої кулі, коли $R = \infty$, маємо: $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon r$).

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

Послідовним називають таке з'єднання конденсаторів, за якого негативно заряджена обкладка попереднього конденсатора з'єднана з позитивно зарядженою обкладкою наступного. У разі послідовного з'єднання на всіх обкладках конденсаторів будуть однакові за модулем заряди, відповідно однаковими будуть і потенціали обкладок, з'єднаних між собою провідниками.

Ураховавши це, виведемо формулу для обчислення електроємності батареї послідовно з'єднаних конденсаторів. Напряга на батареї U_6 дорівнює сумі напруг на послідовно з'єднаних конденсаторах, справді $(\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = \varphi_1 - \varphi_n$ або $U_1 + U_2 + \dots + U_n = U_6$. Використавши співвідношення $q = CU$, дістанемо $\frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} = \frac{q}{C_6}$. Скоротивши на q , матимемо $\frac{1}{C_6} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$. Отже, для послідовного з'єднання електроємність батареї менша від найменшої з електроємностей окремих конденсаторів.

Паралельним називається з'єднання конденсаторів, за якого всі позитивно заряджені обкладки приєднані до одного провідника, а негативно заряджені — до іншого. У цьому разі напруги на всіх конденсаторах однакові й дорівнюють U , а заряд на батареї дорівнює сумі зарядів на окремих конденсаторах, $q_6 = q_1 + q_2 + \dots + q_n$, звідки $C_6 U = C_1 U + C_2 U + \dots + C_n U$. Після скорочення отримуємо формулу для обчислення електроємності батареї

паралельно з'єднаних конденсаторів, $C_6 = C_1 + C_2 + \dots + C_n$. Для паралельного з'єднання електроємність батареї більша, ніж найбільша з електроємностей окремих конденсаторів.

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

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

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



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

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



Приклади розв'язування задач

Задача. Три конденсатори ємностями $C_1 = 0,2$ мкФ, $C_2 = C_3 = 0,4$ мкФ з'єднані між собою, як показано на малюнку 26, і приєднані до джерела постійного струму $U_{AB} = 250$ В. Визначте загальний електричний заряд, заряд і різницю потенціалів на кожному з конденсаторів.

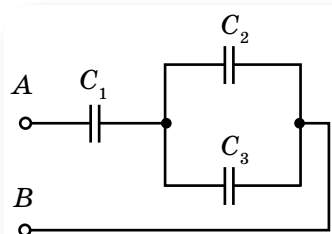
Дано:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,2 \text{ мкФ} \\ C_2 &= C_3 = 0,4 \text{ мкФ} \\ U_{AB} &= 250 \text{ В} \\ \hline q &- ?; q_1 - ? \\ q_2 &- ?; q_3 - ? \\ U_1 &- ?; U_2 - ? \\ U_3 &- ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

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

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



Мал. 26

Заряд, накопичений батареєю, $q = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2} U_{AB}$.

Підставимо числові значення:

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

Заряд першого конденсатора такий самий, як і загальний заряд, $q_1 = q$, а заряди на двох інших конденсаторах — $q_2 = q_3 = \frac{q}{2}$. Отже, заряди на

окремих конденсаторах: $q_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$, $q_2 = q_3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$.

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

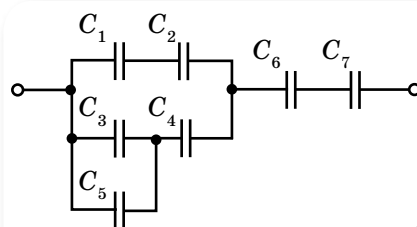
$$U_1 = \frac{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 200 \text{ В}; U_2 = U_3 = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 50 \text{ В.}$$

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



Вправа 6

- Дві кулі, електроємності яких $C_1 = 2 \text{ нФ}$ і $C_2 = 3 \text{ нФ}$ та відповідні заряди $q_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ і $q_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$, з'єднали між собою. Визначте заряди на кулях після їх з'єднання.
- Три конденсатори ємностями 1, 2 і 3 мкФ з'єднані послідовно й під'єднані до джерела струму напругою 220 В. Які заряди та напруги на кожному конденсаторі?
- Визначте ємність системи конденсаторів (мал. 27).
- Конденсатор ємністю C_1 зарядили до напруги $U_1 = 500 \text{ В}$. Коли цей конденсатор паралельно приєднали до незарядженого конденсатора ємністю $C_2 = 4 \text{ мкФ}$, вольтметр показав $U_2 = 100 \text{ В}$. Визначте ємність C_1 .
- До повітряного конденсатора, зарядженого до напруги 210 В, приєднали паралельно такий самий незаряджений конденсатор, але зі скляним діелектриком. Яку діелектричну проникність має скло, якщо на затискачах батареї встановилася напруга 30 В?
- У яких межах може змінюватись ємність системи, що складається з двох конденсаторів, якщо ємність одного з них постійна й дорівнює 3,33 нФ, а ємність другого змінюється від 22,2 до 555,5 пФ?
- Відстань між пластинами плоского конденсатора, діелектриком якого є пропарафінений папір, дорівнює 2 мм, а напруга між пластинами становить 200 В. Визначте густину енергії поля.
- В імпульсному фотоспалаху лампа живиться від конденсатора ємністю 800 мкФ, зарядженого до напруги 300 В. Визначте енергію та середню потужність спалаху, якщо тривалість розрядження становить 2,4 мс.
- Визначте роботу, яку необхідно виконати, щоб збільшити відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора на 0,4 мм. Площа кожної пластини дорівнює $2\pi \cdot 10^4 \text{ мм}^2$, заряд — 200 нКл.
- Плоский конденсатор ємністю $C = 60 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ зарядили в повітрі до потенціалу $U = 400 \text{ В}$. Після занурення конденсатора в рідкий діелектрик до половини висоти



Мал. 27

його пластин енергія конденсатора зменшилась на $\Delta W = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Дж. Визначте діелектричну проникність діелектрика.

11. Відстань між пластинами плоского повітряного конденсатора, приєднаного до джерела струму напругою 180 В, збільшують від 5 до 12 мм. Площа пластин конденсатора — 175 см^2 . Визначте роботу із розсування пластин у двох випадках: 1) конденсатор перед розсуванням пластин відімкнений від джерела; 2) конденсатор у процесі розсування пластин весь час під'єднаний до джерела.



Виконуємо навчальні проекти

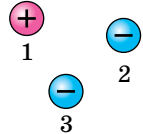
- ▶ Електростатичні явища в науці, техніці й побуті.
- ▶ Електростатичний захист.
- ▶ Блискавка.
- ▶ Підкорювачі блискавки. Скільки коштує блискавка?
- ▶ Від лейденської банки до сучасного конденсатора.



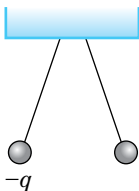
Перевірте себе (§ 1–7)



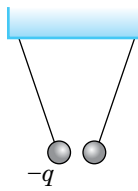
1. На малюнку зображено розташування в просторі трьох тіл з однаковими за величиною зарядами. Укажіть правильний характер взаємодії між тілами.



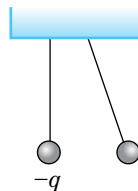
- А** тіла 2 і 3 притягуються до тіла 1
Б тіла 1 і 2 — притягуються, тіла 2 і 3 — відштовхуються, тіла 1 і 3 — притягуються
В тіла 1 і 2 — відштовхуються, тіла 2 і 3 — відштовхуються, тіла 1 і 3 — притягуються
Г тіла 1 і 2 — притягуються, тіла 2 і 3 — притягуються, тіла 1 і 3 — відштовхуються
2. Укажіть правильне продовження речення: «Електростатичне поле створюють заряди, які у вибраній системі відліку...».
- А** рухомі
Б рухаються з прискоренням
В нерухомі
Г обертаються
3. Дві однакові легенькі кульки підвішено на нитках так, як показано на малюнку. Заряд однієї кульки $-q$. Який з малюнків відповідає характеру взаємодії, якщо інша кулька має заряд $+q$?



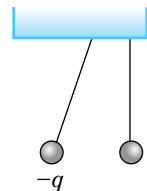
А



Б



В



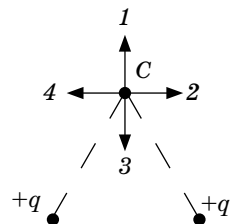
Г

4. У скільки разів зміниться ємність плоского конденсатора, якщо зменшити відстань між його пластинами у 2 рази?

А зменшиться в 4 рази
 Б зменшиться у 2 рази
 В збільшиться у 2 рази
 Г збільшиться в 4 рази

5. Який напрямок має вектор напруженості електричного поля двох однакових точкових зарядів у точці C ?

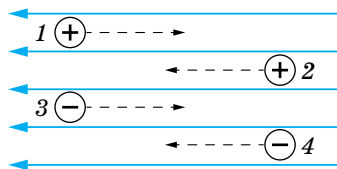
А 1
 Б 2
 В 3
 Г 4



6. Від краплини води із зарядом $+q$ відділили краплину з електричним зарядом $-q$. Яким став заряд краплини?

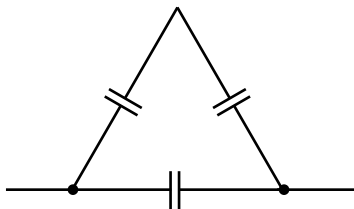
А $+2q$
 Б $+q$
 В $-q$
 Г $-2q$

7. Чотири заряджені точкові тіла рухаються в однорідному електричному полі так, як показано на малюнку. Яке твердження є правильним?



А тіла 2 і 4 переміщуються під дією сил електричного поля
 Б тіла 1 і 4 переміщуються під дією сторонніх сил
 В під час переміщення тіл 2 і 3 виконується від'ємна робота
 Г під час переміщення тіл 1 і 4 виконується додатна робота

8. Визначте електричну ємність батареї конденсаторів, з'єднаних так, як показано на малюнку. Ємність кожного конденсатора — 600 мкФ .



9. Два заряджені тіла, електричні заряди яких відповідно $6 \cdot 10^{-7} \text{ і } -2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$, розташовані в гасі на відстані $0,4 \text{ м}$ одне від одного. Визначте напруженість поля в точці, розташованій на середині прямої, що сполучає заряджені тіла.

10. Електричні потенціали двох ізолюваних провідників $+110 \text{ і } -110 \text{ В}$. Яку роботу виконує електричне поле під час переміщення заряду $5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ з одного провідника на інший? Провідники перебувають у повітрі.

§ 8

Електричний струм. Закон Ома для повного кола

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

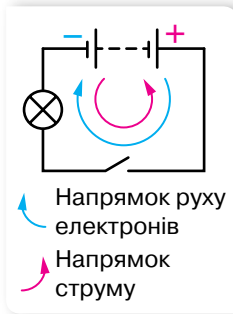
Пригадаймо з курсу фізики 8 класу деякі відомості про електричний струм.

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

Основними умовами існування електричного струму є:

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

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



Мал. 28. Схема електричного кола

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

Повне електричне коло (мал. 28) містить джерело і споживачі електричного струму, пристрій для замикання (розмикання) електричного кола. За напрямком струму в колі умовно обирають напрямок від позитивного полюса джерела струму до негативного (реальний рух носіїв струму — електронів — відбувається у зворотному напрямку).

Основними фізичними величинами, що характеризують електричний струм, є такі.

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

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

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

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

Одиниця електричного опору — ом, 1 Ом.

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

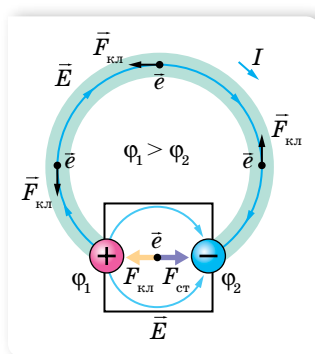
І як ми знаємо, утворення струму в провіднику зумовлює наявність різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$, яку ще називають *напругою*.

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

Одиниця напруги — вольт, 1 В.

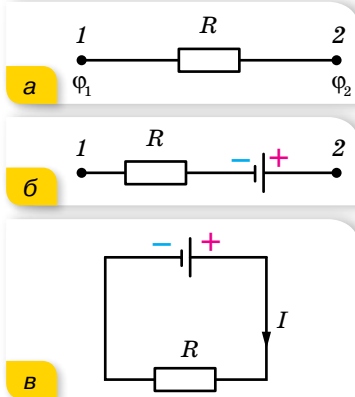
Електрорушійна сила. Якщо під'єднати до полюсів джерела провідник, то, завдяки наявності різниці потенціалів, вільні електрони провідності, не припиняючи хаотичного руху, під дією кулонівських сил почнуть рухатися напрямлено — від кінця провідника з нижчим потенціалом до кінця з вищим, тобто від негативного полюса джерела струму до позитивного (мал. 29). Але сили електричного поля не можуть перемістити електричні заряди між полюсами всередині джерела, оскільки діють на них у протилежному напрямку. Тому всередині джерела, крім електричних сил $F_{\text{кл}}$, діють ще й сторонні сили $F_{\text{ст}}$. Природа сторонніх сил може бути різною: у хімічних елементах — це дія хімічних реакцій, у фотоелементах — дія сонячного випромінювання, в електрогенераторах — зміна магнітного потоку.

Сторонні сили переміщують негативні заряди від позитивного полюса батареї до негативного та протидіють електричним силам, які прагнуть вирівняти потенціали на полюсах. Завдяки цьому заряди циркулюють по замкненому колу, створюючи струм. Ділянку кола, у якій заряди рухаються під дією кулонівських сил, називають *однорідною* (мал. 30, а), а ту, в якій носії заряду рухаються під дією як кулонівських, так і сторонніх сил, — *неоднорідною* (мал. 30, б). Якщо з'єднати кінці неоднорідної ділянки, отримаємо повне коло, в якому ту частину замкненого кола, де заряди рухаються під дією кулонівських сил (електростатичної різниці



Мал. 29. Рух носіїв заряду в повному електричному колі

потенціалів), називають *зовнішньою*, а ту, в якій носії заряду рухаються під дією сторонніх сил, — *внутрішньою*. Полюси джерела струму розділяють внутрішню та зовнішню ділянки кола (мал. 30, в).



Мал. 30. Електричне коло:
а — однорідна ділянка;
б — неоднорідна ділянка;
в — повне коло, що містить зовнішню та внутрішню частини

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

Електрорушійна сила ε — це фізична величина, що характеризує енергію сторонніх сил джерела струму й вимірюється роботою сторонніх сил (тобто сил неелектростатичного походження), виконаною для переміщення одиничного позитивного електричного заряду, $\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

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

Унаслідок розділення всередині джерела позитивних і негативних зарядів джерело набуває запасу потенціальної електричної енергії, яка витрачається на виконання роботи з переміщення зарядів по всьому колу. Робота сторонніх сил дорівнює сумі робіт, що виконуються з переміщення заряду на внутрішній і зовнішній ділянках кола.

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

Таблиця 2

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

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

Закон Ома для повного кола. Джерело струму, як і будь-який провідник, має певний опір, який називають *внутрішнім опором* джерела і позначають r , на відміну від опору зовнішнього кола R . Як відомо з курсу 8 класу, згідно із законом Ома, для однорідної ділянки кола сила струму I на ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі U й обернено пропорційна опоромі R цієї ділянки, $I = \frac{U}{R}$. Формулу закону Ома записують і в такому вигляді: $U = IR$, де добуток IR називають *спадом напруги* на даній ділянці кола. Для ділянки, що не містить джерела струму, поняття напруги та спаду напруги збігаються.

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

Співвідношення, записане у вигляді $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, називають *законом*

Ома для повного кола: сила струму в замкненому електричному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела струму й обернено пропорційна повному опорому кола.

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

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

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

Одиниця роботи електричного струму — джоуль, 1 Дж.

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

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

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

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

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

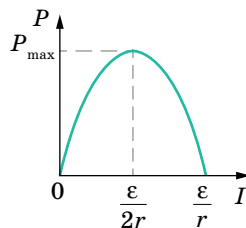
Потужність у зовнішній ділянці електричного кола можна також визначити за формулами $P = UI$, $P = I^2 R$, $P = \frac{U^2}{R}$, де U — електрична напруга, I — сила струму, R — електричний опір ділянки кола.

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

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

З'ясуємо, у якому разі в електричному колі виділяється максимальна потужність. Скористаємося графічним способом і для цього запишемо закон Ома для повного кола в такому вигляді: $\varepsilon = IR + Ir$. Помноживши обидві частини рівняння на I , отримаємо: $\varepsilon I = I^2 R + I^2 r$, де εI — повна потужність, яку розвиває джерело струму, $I^2 R$ — потужність споживачів зовнішньої ділянки кола, $I^2 r$ — потужність, яку споживає внутрішня частина кола. Отже, потужність, яка споживається зовнішньою частиною

кола, становить: $P = \varepsilon I - I^2 r$. Графіком залежності $P(I)$ є парабола (мал. 31), вершина якої має координати $\left(\frac{\varepsilon}{2r}; \frac{\varepsilon^2}{4r}\right)$. Із графіка видно, що максимальна потужність споживається в зовнішньому колі за сили струму $I = \frac{\varepsilon}{2r}$ і дорівнює нулю за умови $I = 0$ та $I = \frac{\varepsilon}{r}$.



Мал. 31. Графік залежності потужності, що споживається в зовнішній частині кола, від сили струму

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

Коротке замикання. Зі зменшенням опору зовнішнього кола, $R \rightarrow 0$, максимального значення набуває сила струму

$$I_{к.з} = \frac{\varepsilon}{r}. \text{ Цей випадок називають коротким замиканням.}$$

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



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим електричне поле провідника зі струмом відрізняється від електричного поля нерухомих зарядів? **2.** Яким вольтметром і за яких умов можна виміряти ЕРС джерела струму безпосередньо? **3.** Розкажіть про енергетичні перетворення в електричному колі. **4.** У якій із двох ламп, потужністю 100 Вт чи 75 Вт, протікає струм більшої сили? **5.** Чи може тривалий час існувати електричний струм у колі, якщо на рухливі носії заряду діють тільки кулонівські сили? **6.** У чому полягає фізична суть електрорушійної сили джерела струму? Що вона характеризує? **7.** Як визначається потужність електричного струму на різних ділянках повного кола? **8.** За яких умов робота електричного струму та кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму, мають однакове значення?



Експериментуємо

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

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначте напругу, до якої зарядяться конденсатори C_1 та C_2 , підключені до джерела, якщо його ЕРС $2,2$ В, внутрішній опір $0,4$ Ом. Параметри резисторів і конденсаторів такі: $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 5$ Ом, $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 3$ мкФ (мал. 32).

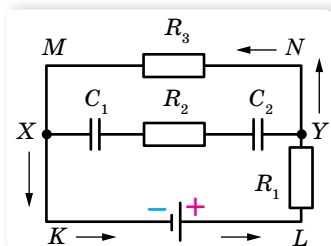
Дано:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 2,2 \text{ В} \\ r &= 0,4 \text{ Ом} \\ R_1 &= 3 \text{ Ом} \\ R_2 &= 1 \text{ Ом} \\ R_3 &= 5 \text{ Ом} \\ C_1 &= 2 \text{ мкФ} \\ C_2 &= 3 \text{ мкФ} \\ \hline U_1 &= ? \\ U_2 &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Оскільки ділянкою з конденсаторами постійний струм не проходить, то на ділянці $LNMK$ виконується умова: $\varepsilon = Ir + IR_1 + IR_3$, звідки $I = \frac{\varepsilon}{r + R_1 + R_2}$. Напруга на резисторі R_3 становить

$$U_3 = IR_3 = \frac{\varepsilon R_3}{r + R_1 + R_2}. \quad (1)$$



Мал. 32

Така ж напруга буде й між точками X та Y ділянки, що містить конденсатори. Оскільки конденсатори з'єднані послідовно, то обидва вони мають однаковий заряд q . Напруги на цих конденсаторах $U_1 = \frac{q}{C_1}$ і $U_2 = \frac{q}{C_2}$. (2)

Для напруги між точками X та Y можна записати:

$$U_3 = U_1 + U_2 = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right), \text{ звідки } q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_3. \quad (3)$$

Підставивши в рівності (2) значення q та U_3 з рівностей (1) і (3), отримуємо:

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_3}{R_1 + r + R_3} \varepsilon, \quad U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_3}{R_1 + r + R_3} \varepsilon.$$

Як видно, від величини опору R_2 значення U_1 та U_2 не залежать.

Після підстановки числових значень отримуємо $U_1 = 0,78$ В; $U_2 = 0,52$ В.

Відповідь: $U_1 = 0,78$ В; $U_2 = 0,52$ В.

Задача 2. До акумулятора підключено споживач струму опором R . ЕРС акумулятора — ε , внутрішній опір — r . Визначте: а) різницю потенціалів U на клеммах акумулятора, якщо на зовнішньому опорі виділяється потужність P (поясніть неоднозначність відповіді); б) залежність коефіцієнта корисної дії акумулятора η і корисної потужності P_{κ} від зовнішнього опору R . Накресліть графіки залежності $\eta(R)$ та $P_{\kappa}(R)$. Визначте максимальне значення P_{\max} і встановіть, за якого R воно досягається.

Дано:

$$\begin{aligned} \varepsilon; r; P; R \\ \hline U - ?; \eta(R) - ? \\ P_{\kappa}(R) - ?; P_{\max} - ? \\ R - ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

а) На зовнішньому опорі R виділяється потужність

$$P = IU, \text{ де } U = \varepsilon - Ir, \text{ а } I = \frac{\varepsilon - U}{r}. \text{ Тобто } P = \frac{\varepsilon U - U^2}{r}.$$

Розв'язавши квадратне рівняння, отримуємо: $U_{1,2} = \frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - Pr}$.

Два значення U пояснюються тим, що та само потужність P може віділятися на різних зовнішніх опорах (R_1 чи R_2) при відповідних силах струму (I_1 та I_2).

б) Коефіцієнт корисної дії (ККД) джерела струму визначається як відношення потужності, яку споживає зовнішня частина кола (корисна потужність), до повної потужності, яку розвиває джерело¹: $\eta = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{п}}}$. Оскільки корисна потужність $P_{\text{к}} = IU$, а повна $P_{\text{п}} = I\varepsilon$, отримуємо: $\eta = \frac{U}{\varepsilon}$. Ураховуючи, що $U = \varepsilon - Ir$, $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, тобто $U = \varepsilon \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, маємо: $\eta = \frac{R}{R+r}$.

Графік залежності $\eta(R)$ наведено на малюнку 33, а.

Залежність корисної потужності $P_{\text{к}}$ від зовнішнього опору R набуває вигляду $P_{\text{к}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$. Графік залежності $P_{\text{к}}(R)$ зображено на малюнку 33, б.

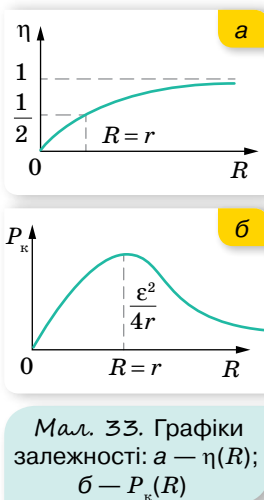
Максимальне значення $P_{\text{макс}}$ можна визначити двома способами.

I спосіб. Дослідимо на мінімум функцію $\frac{1}{P_{\text{к}}} = \frac{(R+r)^2}{\varepsilon^2 R} = \frac{1}{\varepsilon^2} \left(R + \frac{r^2}{R} + 2r \right)$.

Оскільки $\left(\sqrt{R} - \frac{r}{\sqrt{R}}\right)^2 \geq 0$, то $R + \frac{r^2}{R} \geq 2r$, а тому $\left(R + \frac{r^2}{R} + 2r\right) = 4r$, і мінімум досягається, очевидно, якщо $R = r$. Отже, $P_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$.

II спосіб. Корисна потужність $P_{\text{к}} = \frac{\varepsilon U - U^2}{r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\varepsilon^2}{4} - \left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \right]$. Із цього виразу видно, що P максимальне, коли $\left(U - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 = 0$, тобто коли $U = \frac{\varepsilon}{2}$. До того ж $P_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$, а $R_{\text{макс}} = \frac{U^2}{P_{\text{макс}}} = \frac{\varepsilon^2}{4 \left(\frac{\varepsilon^2}{4} \right)} = r$.

Відповідь: $U_{1,2} = \frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{4} - Pr}$; $\eta = \frac{R}{R+r}$; $P_{\text{к}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$; $P_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$; $R = r$.



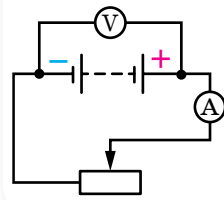
Мал. 33. Графіки залежності: а — $\eta(R)$; б — $P_{\text{к}}(R)$

¹ Ця формула справджується за будь-якого споживача струму.

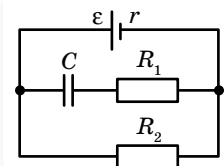


Вправа 7

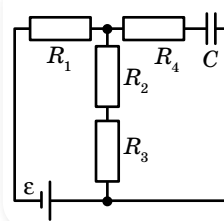
- Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали коло за схемою, зображеною на малюнку 34. За деякого положення ковзного контакту реостата амперметр показав 0,5 А, а вольтметр — 4 В. Коли контакт перемістили трохи ліворуч, амперметр показав 0,9 А, а вольтметр — 3,6 В. Обчисліть ЕРС і внутрішній опір джерела.
- Лампи, опори яких дорівнюють 3 та 12 Ом, по черзі приєднували до деякого джерела струму, і вони споживали однакову потужність. Визначте внутрішній опір джерела і ККД кола в кожному випадку.
- Визначте заряд на обкладках конденсатора (мал. 35), якщо ЕРС джерела ε , його внутрішній опір r . Опори резисторів R_1 та R_2 відомі. Ємність конденсатора C .
- Вважаючи відомими величини, вказані на схемі (мал. 36), визначте заряд на конденсаторі. Як зміниться величина заряду, якщо R_1 та R_2 вимкнути?
- До батареї, ЕРС якої 50 В і внутрішній опір 5 Ом, під'єднано зовнішнє навантаження, що дає можливість змінювати струм у колі від 0 до 10 А послідовно через 1 А. Побудуйте графіки залежності сили струму від: а) потужності струму, що виділяється джерелом на зовнішньому навантаженні; б) потужності, що споживається джерелом; в) повної потужності; г) ККД джерела.
- ЕРС джерела — 24 В, опір зовнішньої ділянки кола — 10 Ом, спад напруги на джерелі — 4 В. Визначте напругу на затискачах джерела, потужність, що споживається зовнішнім навантаженням, потужність втрат енергії у джерелі та повну потужність.



Мал. 34



Мал. 35



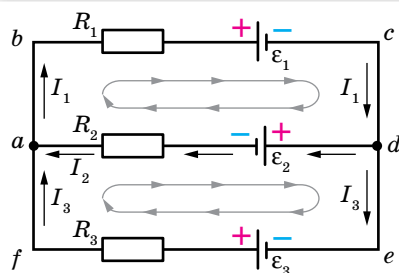
Мал. 36

§9

Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа. Розглянемо електричне коло постійного струму, в якому є точки з'єднання кількох провідників (мал. 37). Ці точки (a і d) називають вузлами, або точками розгалуження. Відповідно електричні кола такого вигляду називають *розгалуженими*.

Стосовно складних розгалужених кіл застосовують правила, сформульовані в 1847 р. Густавом Кірхгофом. Це два положення, які дають змогу обчислювати струми, напруги та ЕРС ділянок складних розгалужених кіл постійного струму.



Мал. 37. Схема розгалуженого кола

Перше правило випливає із закону збереження електричного заряду й називається *правилом вузлів*:

Алгебраїчна сума струмів I_k , що сходяться в будь-якій точці розгалуження (вузлі), дорівнює нулю, $\sum_{k=1}^n I_k = 0$, де n — кількість провідників, які сходяться в точці розгалуження.

До того ж додатними вважаються струми, що напрямлені до точки розгалуження, від'ємними — струми, що виходять з неї.

Друге правило називають *правилом контурів*. Будь-яке складне розгалужене коло можна поділити на прості (що не мають розгалужень). Наприклад, у колі на малюнку 37 є два прості кола (їх називають контурами): *cdab*, *defa*.

Друге правило Кірхгофа:

У будь-якому довільно вибраному замкненому контурі алгебраїчна сума добутків сил струмів I_k на опори R_k відповідних ділянок контура (спадів напруги) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі,

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i.$$

Щоб скласти рівняння, скориставшись другим правилом, треба, по-перше, у складному електричному колі виділити довільні замкнуті контури, по-друге, умовно вибрати певний напрям обходу контура (за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки). До того ж струм вважають додатним, якщо його напрям збігається з вибраним напрямом обходу контура; додатними вважають також ті ЕРС, що підвищують потенціал, у напрямі обходу контура, тобто коли напрям обходу збігається з переходом від від'ємного полюса джерела струму до додатного, у протилежному випадку ЕРС цього джерела буде від'ємною.

Наприклад, для кола, зображеного на малюнку 37, система рівнянь для визначення трьох невідомих струмів I_1, I_2, I_3 має такий вигляд:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

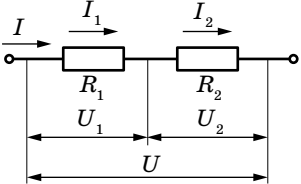
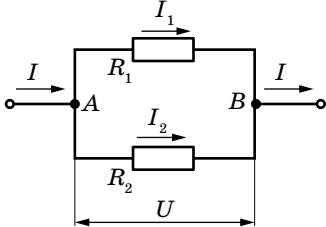
$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2;$$

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Послідовне і паралельне з'єднання провідників. З курсу фізики 8 класу нам відомі співвідношення між струмами й напругами на ділянках кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників (табл. 3). Пригадаймо їх.

Таблиця 3

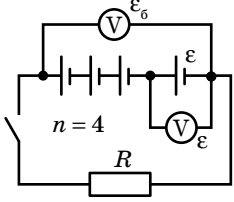
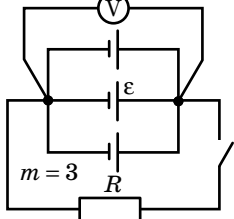
У разі послідовного з'єднання виконуються такі співвідношення:	У разі паралельного з'єднання виконуються такі співвідношення:
1) сила струму в усіх провідниках однакова, $I = I_1 = I_2$;	1) спади напруг на окремих провідниках і на всьому з'єднанні — однакові: $U = U_1 = U_2$;

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

Ці співвідношення легко отримати з правил Кірхгофа. Спробуйте самостійно їх довести.

Послідовне і паралельне з'єднання джерел струму. На практиці однакові джерела струму з'єднують у батарею (табл. 4).

Таблиця 4

<p>У разі послідовного з'єднання джерел струму в батарею позитивний полюс попереднього джерела з'єднують з негативним полюсом наступного.</p>	<p>У разі паралельного з'єднання джерел струму в батарею всі їхні позитивні полюси приєднують до однієї клеми, а негативні — до іншої.</p>
	
<p>ЕРС батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів</p>	<p>Заряди, які проходять через один елемент живлення, не потрапляють в інші, тобто ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного елемента</p>

Закон Ома для всього кола з послідовним з'єднанням однакових елементів

живлення: $I = \frac{\varepsilon n}{R + rn}$, де n — кількість елементів, ε — ЕРС одного елемента, r — внутрішній опір одного елемента

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

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

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

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



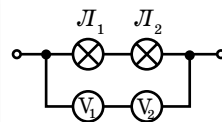
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Що називають вузлами розгалуженого електричного кола? 2. На яких законах ґрунтується перше правило Кірхгофа? 3. Що таке спад напруги на ділянці кола? 4. Які ЕРС у контурах вважають додатними, а які — від'ємними? 5. Якщо в розв'язку задачі отримано від'ємне значення сили струму, то що це означає? 6. Як визначається ЕРС батареї однакових послідовно з'єднаних джерел струму?



Експериментуємо

1. Як за допомогою двох вольтметрів, шкали яких розраховані до 150 В, виміряти напругу на ділянці кола, якщо вона перевищує 200 В?
2. До двох послідовно з'єднаних ламп під'єднано вольтметри так, як показано на малюнку 38. Показання першого вольтметра — 6 В, другого — 20 В. Опір першого вольтметра 4000 Ом. Визначте опір другого вольтметра.
3. Маємо: електричну лампу, реостат, ключ, вольтметр, джерело струму. Накресліть схему з'єднання елементів кола, щоб за допомогою реостата можна було регулювати силу струму, що проходить через лампу, а за допомогою вольтметра — вимірювати сумарну напругу на реостаті та лампі.



Мал. 38

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



Приклади розв'язування задач

Задача 1. У схемі, наведеній на малюнку 39, а, $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 9$ Ом, $R_3 = R_4 = 6$ Ом, $R_5 = 4$ Ом, $R_6 = 6$ Ом. Визначте опір цього кола.

Дано:

$$R_1 = 3 \text{ Ом}; R_2 = 9 \text{ Ом}$$

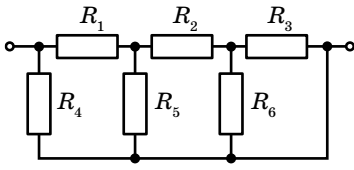
$$R_3 = R_4 = 6 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 4 \text{ Ом}; R_6 = 6 \text{ Ом}$$

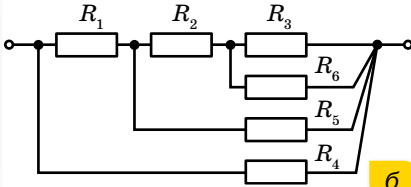
$$R = ?$$

Розв'язання:

Зобразимо схему трохи інакше (мал. 39, б). Тепер обчислення опору кола тотожне знаходженню опору паралельного та послідовного з'єднання провідників і не становить труднощів:



а



б

Мал. 39. а — до умови задачі;
б — еквівалентна схема

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

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

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

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

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

$$R_{4-1-5-2-3-6} = 3 \text{ Ом}.$$

Відповідь: 3 Ом.

Задача 2. Визначте сили струмів у резисторах R_1 , R_2 , R_3 (мал. 40, а), якщо $R_1 = 16 \text{ Ом}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $\varepsilon_1 = 5 \text{ В}$, $r_1 = 4 \text{ Ом}$, $\varepsilon_2 = 6 \text{ В}$, $r_2 = 3 \text{ Ом}$.

Дано:

$$R_1 = 16 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 12 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 10 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_1 = 5 \text{ В}$$

$$r_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_2 = 6 \text{ В}$$

$$r_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$I_1 - ?$$

$$I_2 - ?$$

$$I_3 - ?$$

Розв'язання:

Скориставшись *методом суперпозиції*, вважатимемо, що ЕРС другої батареї дорівнює нулю, і визначимо розподіл струмів, зумовлений першою батареєю (мал. 40, б).

Замінімо опори R_2 , R_3 та r_2 еквівалентним опором:

$$R' = \frac{(R_2 + r_2)R_3}{R_2 + r_2 + R_3}, R' = 6 \text{ Ом}.$$

$$\text{Тоді } I_1' = \frac{\varepsilon_1}{R' + R_1 + r_1}, I_1' \approx 0,192 \text{ А}.$$

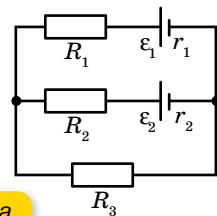
Напряга між точками c і d дорівнює $U_{cd} = \varepsilon_1 - I_1'(r_1 + R_1)$, $U_{cd} = 1,15 \text{ В}$. Тоді:

$$I_2' = \frac{U_{cd}}{R_2 + r_2}, I_2' \approx 0,077 \text{ А}$$

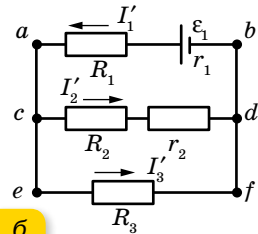
$$\text{і } I_3' = I_1' - I_2', I_3' = 0,115 \text{ А}.$$

Тепер вважатимемо, що ЕРС першої батареї дорівнює нулю, й аналогічно визначимо розподіл струмів, зумовлений другою батареєю (мал. 40, в).

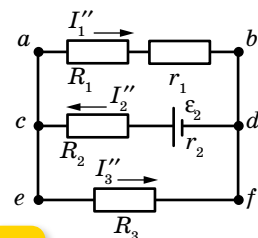
$$I_1'' = 0,092 \text{ А}, I_2'' = 0,277 \text{ А}, I_3'' = 0,185 \text{ А}.$$



а



б



в

Мал. 40

Результуючий розподіл струмів у колі:

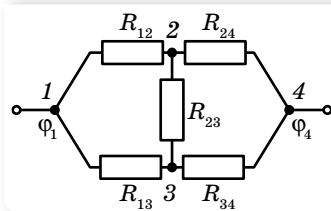
$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 0,1 \text{ А}, \quad I_2 = I'_2 - I''_2 = 0,2 \text{ А},$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 0,3 \text{ А}.$$

Відповідь: $I_1 = 0,1 \text{ А}, I_2 = 0,2 \text{ А}, I_3 = 0,3 \text{ А}.$

Задача 3. В електричному колі (мал. 41)

$R_{12} = 4 \text{ Ом}, R_{24} = 1 \text{ Ом}, R_{13} = 2 \text{ Ом}, R_{34} = 3 \text{ Ом},$
 $R_{23} = 2 \text{ Ом}$ і $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$. Обчисліть силу струму, що проходить по кожній вітці.



Мал. 41

Дано:

$$R_{12} = 4 \text{ Ом}; R_{24} = 1 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = 2 \text{ Ом}; R_{34} = 3 \text{ Ом}$$

$$R_{23} = 2 \text{ Ом}$$

$$\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$$

$$I_{12} \text{ — ?}; I_{24} \text{ — ?}; I_{13} \text{ — ?}$$

$$I_{34} \text{ — ?}; I_{23} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Скористаємось *методом вузлових потенціалів*.

Позначимо потенціали вузлів цього кола через $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ та φ_4 . Потенціал однієї з точок кола завжди можна вважати таким, що дорівнює нулю. Тоді, оскільки $\varphi_1 - \varphi_4 = 15 \text{ В}$, то можна вважати, що $\varphi_1 = 15 \text{ В}$, а $\varphi_4 = 0$. Потенціали φ_2 та φ_3 невідомі.

Виразимо всі сили струмів у колі через вузлові потенціали:

$$I_{12} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}} = \frac{15 - \varphi_2}{4}, \quad I_{24} = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_{24}} = \frac{\varphi_2}{1},$$

$$I_{13} = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_{13}} = \frac{15 - \varphi_3}{2}, \quad I_{34} = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R_{34}} = \frac{\varphi_3}{3},$$

$$I_{23} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_{23}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}.$$

За законом Кірхгофа для сил струмів, можна записати:

$$I_{12} = I_{24} + I_{23},$$

$$I_{34} = I_{13} + I_{23}.$$

Взявши до уваги ці співвідношення, отримуємо:

$$\frac{15 - \varphi_2}{4} = \frac{\varphi_2}{1} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2},$$

$$\frac{\varphi_3}{3} = \frac{15 - \varphi_3}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}.$$

Розв'язавши цю систему з двох рівнянь, дістанемо значення невідомих потенціалів: $\varphi_2 = 4,2 \text{ В}$ та $\varphi_3 = 7,2 \text{ В}$.

Підставивши ці значення в рівності, які виражають сили струмів через вузлові потенціали, отримаємо: $I_{12} = 2,7 \text{ А}, I_{24} = 4,2 \text{ А}, I_{13} = 3,9 \text{ А}, I_{34} = 2,4 \text{ А}$ та $I_{23} = -1,5 \text{ А}$.

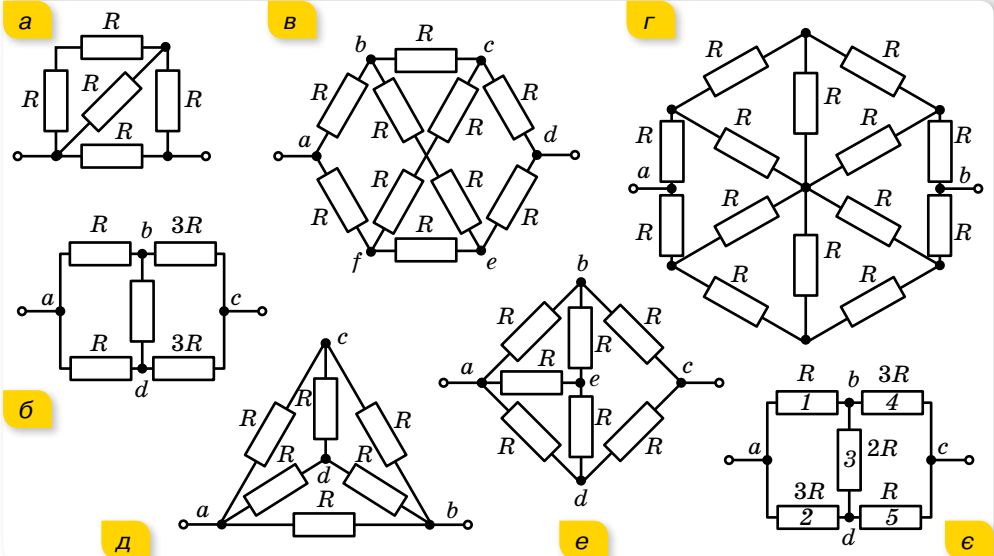
Сила струму I_{23} від'ємна, це означає, що вона напрямлена не від вузла 2 до вузла 3, як ми припустили, склавши рівняння, а в протилежному напрямку.

Відповідь: $I_{12} = 2,7 \text{ А}; I_{24} = 4,2 \text{ А}; I_{13} = 3,9 \text{ А}; I_{34} = 2,4 \text{ А}; I_{23} = -1,5 \text{ А}.$



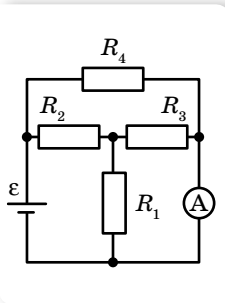
Вправа 8

1. Визначте загальний опір ділянки кола в кожному з випадків, зображених на малюнку 42. Опір кожного провідника — 1 Ом.

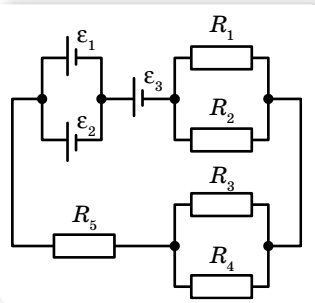


Мал. 42

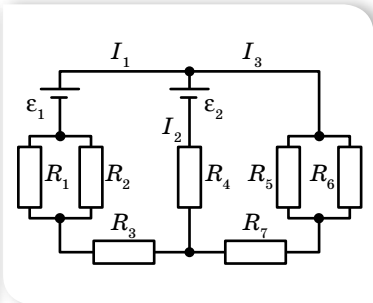
2. Що покаже амперметр у схемі (мал. 43), якщо $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 15$ Ом, $\varepsilon = 30$ В? Опором амперметра знехтуйте.
3. Визначте силу струму I в колі (мал. 44), якщо в кожного елемента $EPC = 2,2$ В, а внутрішній опір — 20 мОм. $R_1 = R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 4$ Ом та $R_5 = 0,9$ Ом.
4. Визначте струми в ділянках кола (мал. 45) I_1, I_2, I_3 , якщо $\varepsilon_1 = 27$ В, $\varepsilon_2 = 30$ В, $r_1 = 30$ мОм, $r_2 = 50$ мОм, $R_1 = R_2 = R_5 = 8$ Ом, $R_3 = 1,97$ Ом, $R_4 = 2,95$ Ом, $R_6 = 12$ Ом, $R_7 = 1,2$ Ом.



Мал. 43



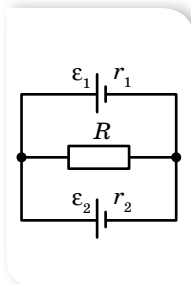
Мал. 44



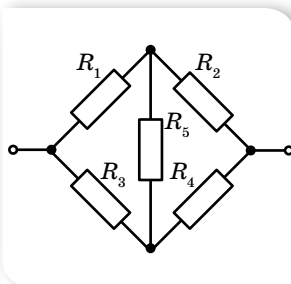
Мал. 45

5. У колі, зображеному на малюнку 46, $\varepsilon_1 = 2$ В, $\varepsilon_2 = 1$ В, $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 0,5$ Ом, $R = 0,5$ Ом. Визначте розподіл струмів.
6. У колі, зображеному на малюнку 47, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $R_4 = 20$ Ом. До кола прикладено напругу $U = 60$ В. Через ділянку з опором R_2 проходить струм 4 А. Визначте опір R_5 .

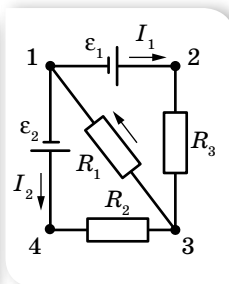
7. У схемі, зображеній на малюнку 48, $\varepsilon_1 = 2$ В, $\varepsilon_2 = 2,4$ В, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 15$ Ом. Визначте силу струму для кожної ділянки кола. Внутрішнім опором джерел струму знехтуйте.
8. У схемі (мал. 49) визначте всі сили струмів, якщо $\varepsilon = 1,5$ В, $r = 0,1$ Ом, $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 1,6$ Ом, $R_3 = R_5 = 2$ Ом, $R_4 = 1,2$ Ом.



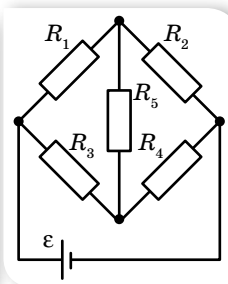
Мал. 46



Мал. 47



Мал. 48



Мал. 49



Виконцемо навчальні проекти

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

§10

Електричний струм у металах

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

- 1) усі метали мають кристалічну будову;
- 2) простір між вузлами кристалічних ґраток заповнений електронним газом (так називають сукупність вільних електронів (електронів провідності), що втратили зв'язки з атомами, яким вони належали);
- 3) у середньому кожний атом металу втрачає один електрон (іншими словами, концентрація електронів провідності в металах дорівнює кількості атомів в одиниці об'єму металу, $n_e = n_a$);

- 4) до електронного газу в металах застосовні всі закони молекулярно-кінетичної теорії, тобто електронний газ розглядається як ідеальний газ;
- 5) рух вільних електронів у металі підпорядковується класичним законам механіки;
- 6) у разі зіткнення електронів з йонами електрони повністю передають їм свою кінетичну енергію.

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

Більш точний опис (зокрема й тих процесів, які не могла пояснити класична теорія) дає *квантова теорія провідності твердих тіл*. Оскільки з поняттями квантової фізики ми детальніше ознайомимось в кінці нашого курсу, то обмежимося лише деякими положеннями квантової теорії провідності металів. У квантовій теорії, на відмінну від класичної, вважають:

- 1) енергія електронів змінюється певними порціями, тобто електрони можуть мати лише певні «дозволені» значення енергій;
- 2) середня кінетична енергія електронного газу з наближенням до абсолютного нуля не залежить від температури;
- 3) рух електронів у твердому тілі не є рухом частинок у звичайному, класичному розумінні, а є поширенням електронних хвиль.

Квантова теорія провідності більш точно описує явища електропровідності твердих тіл, проте й вона є наближеною.

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

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

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

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

$$N = nV.$$

Підставивши значення об'єму V , отримаємо:

$$N = n\bar{v}\Delta tS.$$

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

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

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

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

Підставляючи значення вказаних величин, отримуємо:

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

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

Класична теорія провідності пояснює механізм проходження електричного струму в металевих провідниках. За відсутності електричного поля у провіднику електрони беруть участь у тепловому (хаотичному) русі. У разі створення на кінцях провідника різниці потенціалів на електрони діє електрична сила $\vec{F} = e\vec{E}$, що надає їм прискорення, яке вони швидко втрачають через зіткнення з йонами кристалічних ґраток. У результаті встановлюється деяка середня швидкість упорядкованого руху електронів — її називають *середньою швидкістю дрейфу*. Як відомо, тепловий рух електронів не припиняється ніколи, тому електрони з величезними швидкостями рухаються в усіх напрямках, і на тлі цього хаотичного руху відбувається повільний «дрейф» у напрямку, протилежному напрямку напруженості електричного поля. Швидкість поширення електричного поля в провіднику (як і швидкість поширення будь-якого електромагнітного випромінювання) становить близько $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Отже, кожний вільний електрон металу починає «дрейф», відчувши дію електричного поля, практично в мить замикання поля.

Класична теорія провідності пояснює також механізм виникнення електричного опору металевих провідників. Опір металів зумовлений взаємодією електронів, що рухаються в провіднику, з йонами кристалічних ґраток. У процесі взаємодії електрони втрачають частину енергії, яку вони отримують в електричному полі. Ця енергія перетворюється на внутрішню енергію. Отже, під час проходження по металевому

провіднику електричного струму він нагрівається. З підвищенням температури амплітуда коливань йонів зростає і частішими стають співударі електронів з йонами. Тому можна стверджувати, що опір металів має залежати від температури.

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

У процесі нагрівання провідника збільшення його довжини та площі перерізу взаємно компенсуються, тому здебільшого змінюється питомий опір: $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$. Зміна питомого опору речовини характеризується сталою для цієї речовини величиною — температурним коефіцієнтом опору α . Він дорівнює відносній зміні питомого опору провідника за його нагрівання на 1К, $\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0\Delta T}$, тут ρ_0 — питомий опір за температури $T = 273 \text{ К}$ (0°C), а ρ — питомий опір за температури T .

Для чистих металів температурні коефіцієнти опору відрізняються мало і приблизно дорівнюють $0,004 \text{ K}^{-1}$. Температурні коефіцієнти опору сплавів значно менші, ніж у чистих металів. Існують спеціальні сплави, опір яких майже не змінюється зі зміною температури. Такими сплавами є константан, 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. Для вимірювання температури використовують термометри опору.

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

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

Речовини в надпровідному стані мають надзвичайно цікаві властивості. Про одну з них ми вже сказали — у кільцевому провіднику в над-

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

провідному стані сила струму може не змінюватись як завгодно довго без джерела живлення. Другою важливою особливістю надпровідників є неможливість створити всередині речовини в надпровідному стані магнітне поле. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників. І третя особливість надпровідників — надпровідний стан руйнується в достатньо сильному магнітному полі.

Дослідження надпровідності триває й досі.

Термоелектричні явища. Ще в 1797 р. італійський фізик Алессандро Вольта довів, що в місці контакту (дотику) двох різних металів виникає різниця потенціалів, яку тепер називають контактною. Досліджуючи різні метали, А. Вольта розмістив їх у ряд, в якому кожний наступний метал у контакті з будь-яким попереднім електризується негативно (набуває негативного потенціалу):

+ *Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd* –

Наприклад, залізо в контакті зі свинцем, оловом або цинком завжди набуває негативного потенціалу.

У замкненому колі, що складається з довільної кількості твердих провідників з електронним механізмом провідності, усі контакти яких перебувають за однакової температури, результуюча контактна різниця потенціалів дорівнює нулю. Якщо ж температури контактів будуть різні, то в колі виникає електрорушійна сила (термоелектрорушійна сила).

Термоелектричні явища — явища, зумовлені взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами у твердих провідниках, знаходять своє застосування в медицині, радіоелектроніці.

Піонером і лідером досліджень у галузі термоелектрики в Україні є академік НАН України Лук'ян Іванович Анатичук.

Більше про термоелектричні явища читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

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



Експериментуємо

1. Є моток тонкого мідного дроту (без ізоляції). Визначте довжину дроту й площу поперечного перерізу. Обладнання: терези, омметр.

- В одній непрозорій коробці міститься електрична лампа, клеми якої виведено назовні коробки, в іншій — резистор. Визначте, у якій з коробок міститься резистор. Обладнання: джерело струму, міліамперметр, два мілівольтметри, з'єднувальні провідники, вимикач.
- Побудуйте графік залежності опору нитки розжарення електричної лампи від сили струму в ній. Обладнання: електрична лампа на 3,5 В, джерело струму (батарейка) на 3,5 В, амперметр, реостат, з'єднувальні провідники, вимикач.



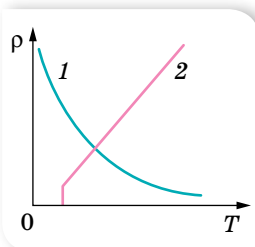
Вправа 9

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

§ 11

Електричний струм у напівпровідниках

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

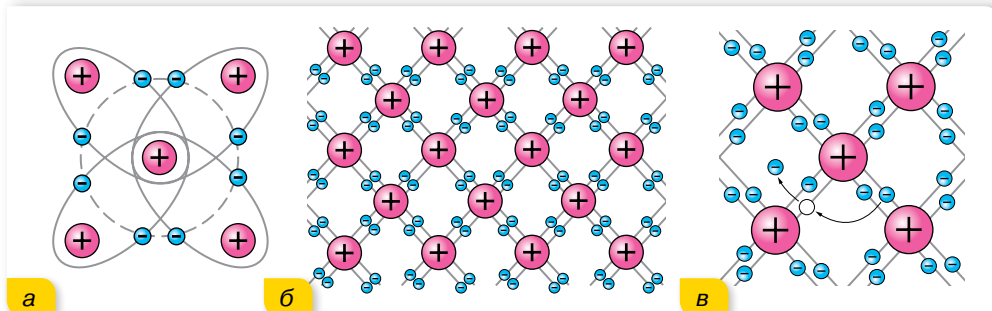


Мал. 50.
Залежності
питомого опору
від температури для
напівпровідника (1)
та провідника (2)

Питомий опір напівпровідників з підвищенням температури не зростає, як у металів, а навпаки, різко зменшується. На малюнку 50 наведено залежності питомого опору від температури для напівпровідника (1) та для металу (2).

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

Пояснимо властивості напівпровідників, розглянувши їхню будову на прикладі чотиривалентного елемента Германію (мал. 51, а). Взаємодія пари сусідніх атомів у кристалі германію здійснюється завдяки ковалентному (парноелектронному) зв'язку (мал. 51, б).



Мал. 51. Схеми: а — будови атома Германію; б — парноелектронного зв'язку в кристалі германію; в — утворення пари електрон – дірка

У темряві та за низьких температур усі електрони задіяні в ковалентних зв'язках. Вільних носіїв у кристалі напівпровідника немає, тому кристал не проводить струм і його опір великий. За цих умов кристал є ізолятором. За підвищення температури кристала (або під дією опромінення світлом, рентгенівськими променями, або за впливу сильних електричних чи магнітних полів) деякі ковалентні зв'язки руйнуються. На місці кожного розірваного зв'язку утворюється вакантне місце з нестачею електрона (мал. 51, в). Така конфігурація називається *діркою*. Електрони й дірки рухаються хаотично. Електрони займають місця дірок (рекомбінують) або вивільняються, розриваючи парноелектронні зв'язки (генеруються вільні електрони й дірки). Процеси генерації та рекомбінації відбуваються безперервно.

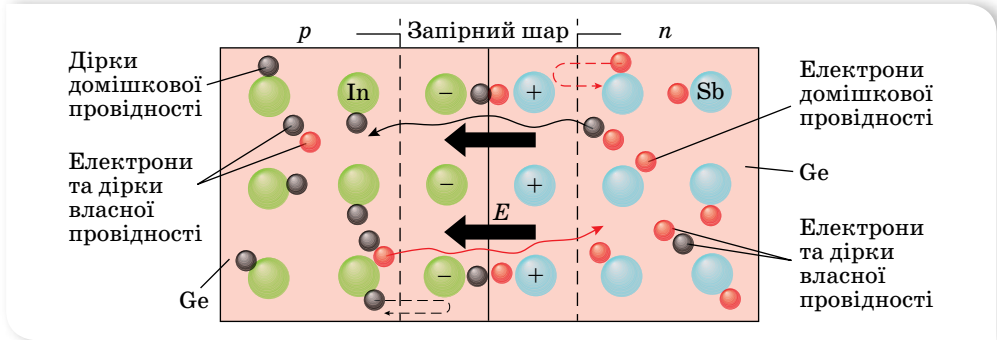
Якщо такий кристал підключити до джерела струму, то вільні електрони будуть рухатись до позитивного полюса джерела. Поки діє електричне поле, розриваються міжатомні зв'язки — з них вивільняються валентні електрони, залишаючи дірки, а розірвані раніше міжатомні зв'язки (дірки) заповнюються електронами,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

Провідність чистих напівпровідників, що не мають ніяких домішок, називають *власною провідністю напівпровідників*. Власна провідність напівпровідників невелика, оскільки малою є кількість вільних носіїв струму — електронів і дірок. Дуже важлива особливість напівпровідників полягає в тому, що за наявності домішок у них поряд із власною провідністю виникає додаткова — *домішкова провідність*. Домішки, що легко віддають електрони, а отже, збільшують кількість вільних електронів, називають *донорними домішками*. Напівпровідники, в яких електрони є *основними* носіями заряду, називають *напівпровідниками n-типу*. Домішки, що приймають електрони, називають *акцепторними*. Напів-

провідники з переважанням діркової провідності над електронною називають *напівпровідниками p -типу*. Змінюючи концентрацію домішок, можна істотно змінити кількість носіїв заряду того чи того знака, а отже, створити напівпровідники з переважною концентрацією або позитивно, або негативно заряджених носіїв.

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

З'єднаємо два напівпровідники: один з донорною, а другий з акцепторною домішкою (мал. 52).



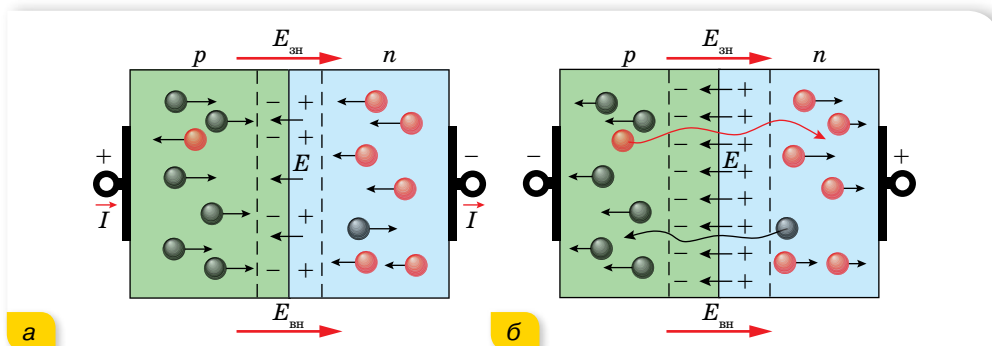
Мал. 52. Рух носіїв заряду в місці контакту напівпровідників n - і p -типів

Відразу ж почнеться рух через контакт: електрони переходитимуть з напівпровідника n -типу (де їх багато) у напівпровідник p -типу, а дірки — навпаки (на мал. 52 це відображено суцільними хвилястими стрілочками). Ця дифузія електронів і дірок відбувалася би до повного вирівнювання їх концентрацій в обох контактуючих напівпровідниках, якби ці частинки не переносили зарядів. Дійсно, внаслідок такого переміщення n -область заряджається позитивно, а p -область — негативно. Виникає контактна різниця потенціалів. Електричне поле перешкоджає дальшій дифузії основних носіїв через межу, відкидаючи основні носії назад у свої області (пунктирні стрілочки на мал. 52). Крім того, оскільки частина електронів, що перейшли в p -область, рекомбінувала з дірками, і відповідна рекомбінація відбулася в n -області, то утворився шар, збіднений носіями заряду, опір якого досить великий, — запірний шар.

Ділянку контакту напівпровідників n - і p -типів провідності називають p - n -переходом, основною властивістю якого є однобічна провідність. Якщо подати напругу на напівпровідники так, щоб до напівпровідника p -типу під'єднався позитивний полюс батареї, а до напівпровідника n -типу — негативний, то поле в переході буде ослаблене, запірний шар звужиться або зникне і дифузійні потоки основних носіїв (дірок з p -області й електронів з n -області) прямуватимуть через перехід. Такий перехід називають *прямим* (мал. 53, а). Сила струму за збільшення напруги зростає дуже швидко, і закон Ома не виконується.

Під'єднаємо полюси батареї навпаки (мал. 53, б). У цьому разі зовнішня напруга збігається за знаком з контактною різницею потенціалів. Зовнішнє поле підсилює поле p - n -переходу, і дифузійні потоки основних носіїв струму через перехід значно зменшуються.

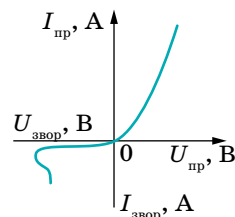
Струм I в колі стане незначним за тієї ж напруги U , оскільки струм через p - n -перехід забезпечується неосновними носіями заряду, провідність зразка стає незначною, а опір великим. Цей перехід називають *зворотним*.



Мал. 53. Механізм дії прямого (а) та зворотного (б) переходу

На вольт-амперній характеристиці залежність сили прямого струму від напруги зображено лінією, що зростає в додатному напрямку осі напруг U (мал. 54). Після перемикавання полюсів батареї, коли потенціал напівпровідника p -типу стає від'ємним, а потенціал напівпровідника n -типу — додатним, опір переходу зростає, а струм стає незначним. Сила зворотного струму майже не змінюється в разі зміни напруги. Різке збільшення зворотного струму на краю кривої пов'язане з пробоем напівпровідника.

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



Мал. 54.
Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

Детальніше про напівпровідникові прилади читайте в електронному додатку.





ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

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



Експериментуємо

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

§12

Електричний струм у рідинах

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

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

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

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

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

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

1-й закон Фарадея

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

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

2-й закон Фарадея

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

Фізичний зміст законів Фарадея легко пояснити, використавши електронно-йонну теорію. Маса речовини, що виділяється на електродах під час електролізу, визначається масою N йонів, що осідають на електроді.

Кількість йонів дорівнює $N = \frac{m}{M} N_A$, де m — маса речовини, M — її молярна маса, N_A — число Авогадро.

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

Заряд будь-якого йона дорівнює заряду одновалентного йона, тобто, заряду електрона e , помноженому на валентність n йона, $q_0 = en$. Отже,

$$m = \frac{M|q|}{|e|nN_A}$$

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

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

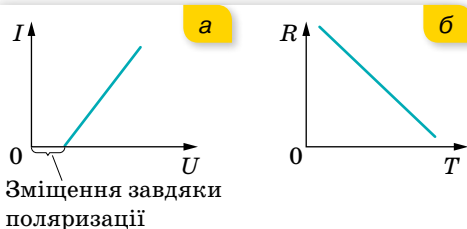
Добуток $N_A e = F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ — стала Фарадея — фізична константа.

Для одновалентної речовини стала Фарадея дорівнює електричному заряду 1 моля речовини.

Закони Фарадея можна записати в об'єднаному вигляді так:

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

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



Зміщення завдяки поляризації

Мал. 55. Графіки залежності:
а — сили струму від напруги $I(U)$;
б — опору від температури $R(T)$
для електролітів

Явище електролізу має широке застосування. Детальніше — в електронному додатку.



Залежність опору електроліту від температури (мал. 55, б) — лінійна. Це пояснюється тим, що за зростання температури тепловий рух молекул стає інтенсивнішим, і тому кількість йонів у розчині та їх концентрація зростають, а отже, змінюється питомий опір електроліту ρ . Його зміну можна розрахувати за рівнянням, яке використовували в аналогічних розрахунках для металів $\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$, де ρ_0 — питомий опір електроліту за температури 273 К (0 °C); α — термічний коефіцієнт опору. Для електролітів термічний

коефіцієнт опору завжди є від'ємним, а отже, за нагрівання провідність електроліту зростає, а його опір зменшується.

ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Дистильована вода не проводить електричний струм. Чому вона стає провідником унаслідок розчинення в ній солей, кислот, лугів? 2. Чому вольт-амперна характеристика електроліту не починається з початку координат? 3. Що називають електрохімічним еквівалентом речовини? Який фізичний зміст сталої Фарадея? 4. Чому опір розчинів електролітів залежить від температури?



Експериментуємо

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



Приклади розв'язування задач

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

Дано:

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

$$T = 300 \text{ К}$$

$$P_0 = 101,3 \text{ кПа}$$

$$\rho_0 = 1,43 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

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

$$q = ?$$
Розв'язання:

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

Масу вивільненого кисню визначимо через його густину, $m = \rho_0 V_0$, а V_0 — із закону Гей-Люссака, $V_0 = \frac{VT_0}{T}$.

$$\text{Таким чином, } q = \frac{VT_0 \rho_0}{Tk}$$

Підставимо числові значення, отримуємо:

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

Відповідь: 78,5 кКл.



Вправа 10

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

§13

Електричний струм у газах

Механізм електропровідності газів. З курсу фізики 8 класу нам відомо, що в природі гази є діелектриками, бо за цих умов у газах майже немає вільних носіїв заряду, рух яких міг би створити електричний струм. Проте під зовнішнім впливом, наприклад, високої температури, у газі з'являються заряджені частинки. Вони виникають унаслідок відщеплення від атомів газу одного або кількох електронів, як результат — замість нейтрального атома виникають позитивний йон і електрони. Частина

електронів, що утворилися, може бути при цьому захоплена іншими нейтральними атомами, і тоді з'являться ще й негативні йони. Розпад молекул газу на електрони та йони називають **йонізацією газів**.

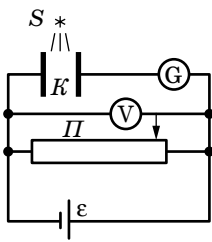
Нагрівання газу до високої температури — не єдиний спосіб йонізації молекул або атомів газу. Йонізація газу може відбуватися під впливом інших зовнішніх чинників: рентгенівських променів; променів, що виникають під час радіоактивного розпаду; космічних променів (фотойонізація).

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

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

Несамостійний і самостійний газові розряди.

Розглянемо схему, зображену на малюнку 56.

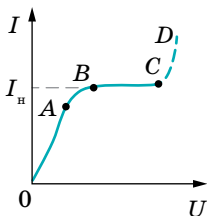


Мал. 56. Схема для дослідження розряду в газі

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

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

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



Мал. 57. Вольт-амперна характеристика газового розряду

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

На малюнку 57 зображено **вольт-амперну характеристику газового розряду**. З малюнка видно, що за невеликих напруг сила струму лінійно залежить від напруги (ділянка OA), отже, тут справджується закон Ома. На ділянці AB струм зростає повільніше від напруги — тут залежність нелінійна, і закон Ома не виконується. Ділянка BC характеризується струмом насичення I_n — максимальною силою струму,

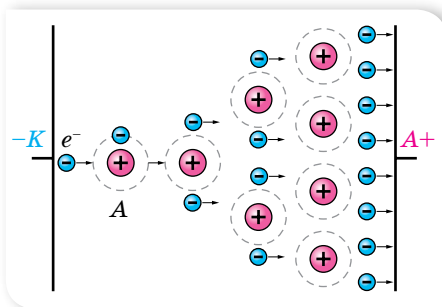
можливою за даних інтенсивності йонізації, тиску газу та напруженості електричного поля, коли всі утворені йони й електрони, не встигаючи рекомбінувати, досягають електродів. Якщо й надалі підвищувати напругу, відбудеться пробій газового проміжку (ділянка CD) й несамостійний розряд перетвориться на *самостійний*, тобто такий газовий розряд, який відбувається й після припинення дії зовнішнього йонізатора.

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

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

Що більша різниця потенціалів між електродами, то більшою буде напруженість електричного поля. Кінетична енергія електрона перед черговим зіткненням пропорційна напруженості поля та довжині вільного пробігу електрона. Якщо кінетична енергія електрона перевищує енергію йонізації, то, зіткнувшись з атомом (або молекулою), він їх йонізує. У результаті замість одного електрона матимемо два (другий — вибитий з атома). Уже два електрони прискорюються полем та йонізують зустрічні атоми й т. д. Унаслідок цього кількість заряджених частинок швидко наростає, виникає *електронна лавина* (мал. 58). Що стосується йонів, то вони, рухаючись в електричному полі, також збільшують свою енергію. Але повністю віддати її нейтральному атому (молекулі), тим самим йонізуючи його, йон не може, оскільки має масу, майже однакову з масою атома. Під час зіткнення відбувається лише передавання частини кінетичної енергії (як між більярдними кулями). Легенький же електрон налітає на атом, як на стіну, повністю віддаючи йому свою набуту енергію.

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



Мал. 58. Схема процесу йонізації електронним ударом

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

Таблиця 5

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



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

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



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

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

Плазма характеризується ступенем йонізації: відношенням об'ємної концентрації заряджених частинок до загальної об'ємної концентрації

частинок. Залежно від ступеня йонізації плазма поділяється на слабо йонізовану (становить частки відсотків), частково йонізовану (порядку кількох відсотків) і повністю йонізовану (близька до 100 %). Слабо йонізованою плазмою в природних умовах є верхні шари атмосфери — йоносфера. Сонце, гарячі зорі й міжзоряна речовина — це повністю йонізована плазма, яка утворюється за високих температур. Зважаючи на масштаби Всесвіту, можемо стверджувати, що основним станом речовини є стан плазми.

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

Як ми знаємо, щоб існував електричний струм, необхідні вільні носії електричного заряду. Що ж є носієм заряду у вакуумі? Хотите дізнатися — читайте електронний додаток.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

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



Перевірте себе (§ 8–13)



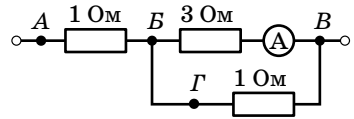
- Укажіть назву величини, що характеризує швидкість перенесення електричного заряду через поперечний переріз провідника.
 - робота струму
 - електрорушійна сила
 - сила струму
 - потужність струму
- У якому середовищі здійснюється перенесення речовини під час проходження струму?
 - у металах
 - в електролітах
 - у напівпровідниках
 - у будь-якому середовищі

3. Укажіть рядок, у якому наведено лише діелектрики.

- А вода, ртуть, олія
- Б залізо, алюміній, магній
- В повітря, скло, водний розчин соляної кислоти
- Г слюда, парафін, спирт

4. У колі, зображеному на малюнку, амперметр показує 1 А. До яких точок кола потрібно під'єднати вольтметр, щоб його покази були 4 В?

- А до точок А і В
- Б до точок В і В
- В до точок В і Г
- Г до точок А і В



5. Укажіть джерело світла, в якому використовується розряд у газі.

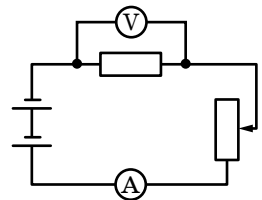
- А люмінесцентна лампа
- Б лампа розжарення
- В світлодіод
- Г прожектор

6. Як зміниться маса речовини, що виділяється на електроді, якщо силу струму, який проходить через електроліт, збільшити в 3 рази, а час електролізу зменшити в 6 разів?

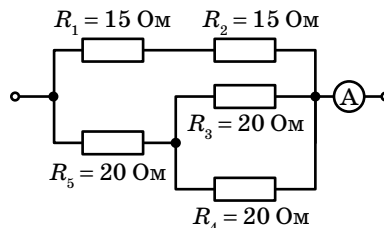
- А зменшиться у 18 разів
- Б зменшиться у 2 рази
- В зменшиться в 6 разів
- Г зменшиться у 3 рази

7. У колі, зображеному на малюнку, повзунок реостата пересунули вниз. Укажіть правильний характер змін.

- А сила струму зменшилась, напруга збільшилась
- Б сила струму і напруга збільшилися
- В сила струму збільшилась, напруга зменшилась
- Г сила струму і напруга зменшилися



8. За даними малюнка визначте кількість теплоти, яка виділяється в колі протягом 20 хв.



9. Через розчин сірчаної кислоти пропустили заряд $2 \cdot 10^5$ Кл. Визначте масу та об'єм утвореного водню за нормальних умов ($p_{\text{атм}} = 10^5$ Па, $T = 273$ К), густина водню

$$0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

10. Три гальванічні елементи, ЕРС яких 2,2 В; 1,1 В; 0,9 В, а внутрішні опори відповідно 0,2 Ом; 0,4 Ом; 0,5 Ом, увімкнені в коло послідовно та створюють струм 1 А. Визначте зовнішній опір кола.

§14

Магнітна взаємодія. Закон Ампера

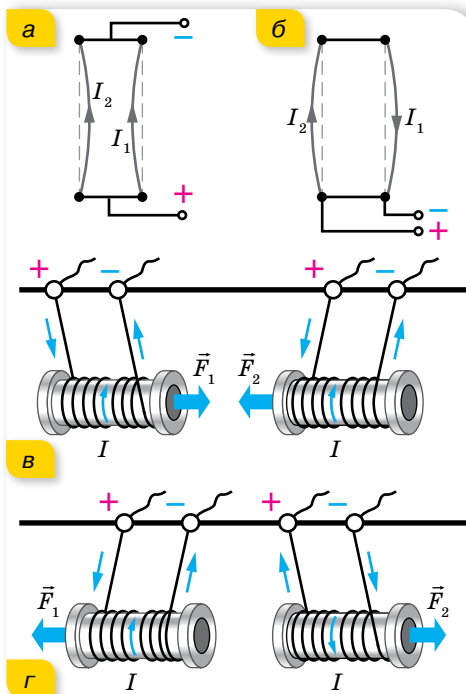
Електрична та магнітна взаємодії.

Як ми знаємо, нерухомі електричні заряди взаємодіють між собою через електричне поле. Рухомі — через електричне й магнітне. Якщо по двох паралельних гнучких провідниках проходять струми в одному напрямку (мал. 59, а), то провідники притягуються один до одного. Якщо струми протилежних напрямків — провідники відштовхуються (мал. 59, б). Взаємодіють між собою, притягуючись або відштовхуючись, не лише прямолінійні провідники зі струмом, а й провідники довільної форми, по яких протікає струм, наприклад, провідники у вигляді прямокутних рамок, витків. Така сама взаємодія відбувається й між котушками зі струмом (мал. 59, в, г).

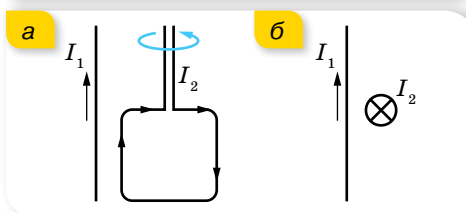
Взаємодія провідників зі струмом не завжди обмежується притяганням або відштовхуванням. Якщо, наприклад, маленьку прямокутну рамку, по якій тече електричний струм, розташувати поблизу прямолінійного провідника зі струмом, то рамка повернеться та розташується так, щоб її площина перебувала у площині провідника (мал. 60, а). Ще один приклад. Два прямолінійні провідники зі струмом, розташовані так, як показано на малюнку 60, б (у провіднику 2 струм напрямлений від нас), взагалі не взаємодіють.

Описані взаємодії між електричними струмами¹ (тобто рухомими електричними зарядами) не можна пояснити на підставі законів електростатики. Таку взаємодію називають *магнітною*. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного, називають *магнітними силами*.

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



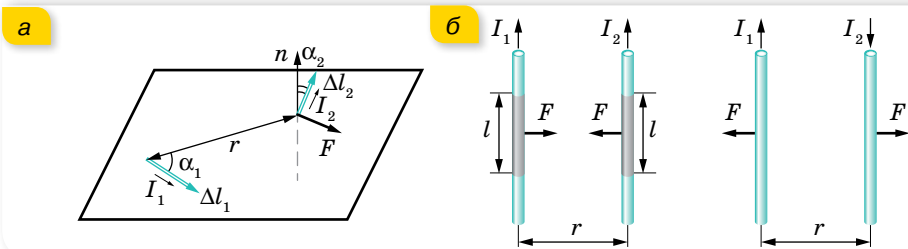
Мал. 59. Взаємодія провідників зі струмом: а, в — притягання; б, г — відштовхування



Мал. 60. Обертання рамки зі струмом — а; відсутність взаємодії двох взаємно перпендикулярних провідників, по яких проходять струми — б

Магнітні сили. Закон Ампера. Взаємодію електричних струмів уперше виявив і дослідив у 1820 р. французький фізик Андре Ампер (1775–1836). Тому закон, що описує взаємодію провідників зі струмом, називають *законом Ампера*. Щоб кількісно дослідити магнітну взаємодію провідників зі струмом, використовують метод моделювання. Розглядають не весь провідник, а лише коротку його ділянку довжиною Δl . Увесь провідник складається з подібних ділянок так, як і будь-яке заряджене тіло з точкових зарядів. Добуток сили струму I , що проходить по малій ділянці провідника, на її довжину Δl , називають *елементом струму*.

Закон Ампера. Два нескінченно малі елементи провідників зі струмом взаємодіють між собою із силою ΔF , яка прямо пропорційна довжинам цих елементів Δl_1 та Δl_2 , силам струму в них I_1 та I_2 , обернено пропорційна квадрату відстані між ними r^2 і залежить від взаємної орієнтації цих елементів (мал. 61, а): $\Delta F = \mu\mu_0 \frac{I_1\Delta l_1 \cdot I_2\Delta l_2}{r^2} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2$, де α_1 — кут між елементом струму $I_1\Delta l_1$ та відстанню r ; α_2 — кут між елементом струму $I_2\Delta l_2$ і нормаллю n до площини, у якій лежать елемент $I_1\Delta l_1$ та r ; μ_0 — магнітна стала; μ — відносна магнітна проникність середовища — скалярна фізична величина, що характеризує вплив однорідного середовища на магнітне поле.



Мал. 61. До закону Ампера: а — взаємодія елементів струму; б — взаємодія прямолінійних паралельних провідників зі струмом

Закон Ампера відіграє таку саму роль у магнітостатиці, як і закон Кулона в електростатиці. За допомогою закону Ампера можна обчислити силу взаємодії провідників зі струмом довільної довжини та форми. Так, сила взаємодії (сила Ампера) між двома прямими паралельними провідниками (мал. 61, б) визначається за формулою: $F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$, де l — довжина активної частини провідника; r — відстань між провідниками, I_1 і I_2 сили струмів, що проходять провідниками. Якщо струми паралельні, то ці сили взаємодії намагаються наблизити провідники, якщо ж вони антипаралельні, то навпаки, віддалити їх один від одного (мал. 61, б).

У СІ дану формулу було використано для означення одиниці сили струму — *ампера*.

1 А — одиниця сили струму, яка дорівнює силі незмінного струму, що, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини й дуже малої площі поперечного перерізу, які розміщені у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинює на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

З визначення ампера можна обчислити значення магнітної сталої: $2 \cdot 10^{-7}$ Н = $\mu_0 \mu \frac{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{2\pi \cdot 1 \text{ м}}$. Ураховуючи, що для вакууму $\mu = 1$, отримуємо: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$.

Цікавий результат отримаємо, коли обчислимо добуток двох сталих: електричної та магнітної. Для зручності значення електричної сталої запишемо у вигляді $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

$$\text{Отримуємо } \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\text{Кл}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{м}^2}.$$

$$\text{Оскільки } 1 \text{ А} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}, \text{ то } \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{1}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}.$$

$3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ — це швидкість світла, яку прийнято позначати c . Отже, $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$.

Отримане співвідношення вказує на єдину природу електричних, магнітних і світлових явищ.

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

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

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

Дослідження, присвячені взаємодії струмів, доводять, що магнітні поля різних струмів відрізняються силою своєї дії. До того ж поле одного й того самого струму на різних відстанях від нього різне. Це спонукає до необхідності введення фізичної величини, яка б кількісно описувала магнітне поле. Пригадаймо, вивчаючи електростатичне поле, ми ввели силу

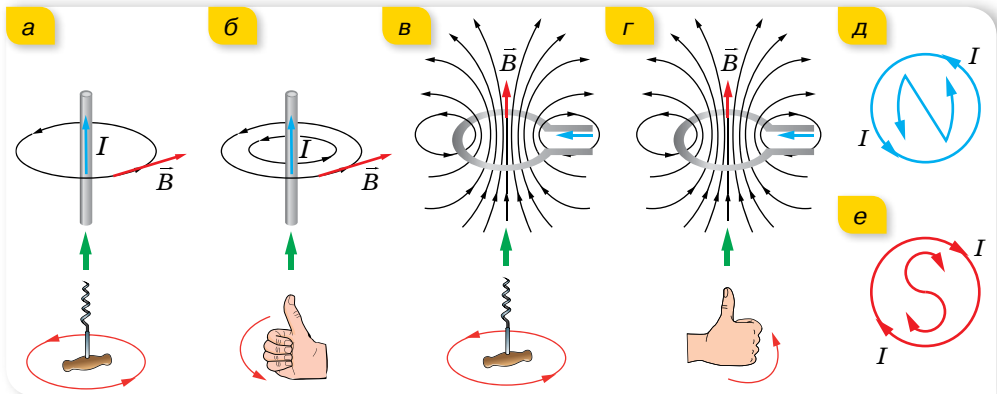
характеристику — *напруженість* \vec{E} цього поля, яка визначається відношенням сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд у певній точці поля, до значення цього заряду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Провівши аналогічні дослідження магнітного поля, було введено силову характеристику, яка називається *індукцією магнітного поля*. Позначають вектор магнітної індукції літерою \vec{B} .

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

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

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

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

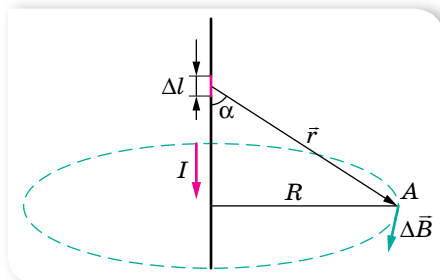


Мал. 62. Визначення напрямку вектора індукції магнітного поля за правилом: а, в — свердлика; б, г — правої руки; д, е — букв

Індукція магнітного поля, так само як і напруженість електричного поля, — векторна величина. На відміну від вектора напруженості електричного поля, який напрямлений так само, як і сила, що діє на позитивний заряд, розміщений у цьому полі, напрямком вектора індукції магнітного поля не збігається з напрямком вектора сили, що діє на елемент

струму в магнітному полі. Для визначення напрямку вектора \vec{B} існують певні правила (сформулюйте їх, розглядаючи малюнок 62).

Закон Біо — Савара — Лапласа. Ми з'ясували, як напрямлений вектор індукції магнітного поля. А від чого залежить його модуль? Значення індукції магнітного поля, створюваного елементом струму, у певній точці визначають за законом Біо — Савара — Лапласа. Французькі вчені Жан Біо (1774–1862) та Фелікс Савар (1791–1841) у 1820 р. провели ряд експериментальних досліджень, щоб з'ясувати, від чого залежить значення індукції магнітного поля. Загальну математичну обробку експериментальних результатів виконав видатний французький математик П'єр Лаплас (1749–1827).



Мал. 63. До закону Біо — Савара — Лапласа

Закон Біо — Савара — Лапласа: Магнітна індукція $\Delta\vec{B}$ в точці A , що створюється струмом I , який протікає крізь елемент провідника довжиною Δl (мал. 63), визначається за формулою $\Delta B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^2} I \Delta l \sin \alpha$, де r — радіус-вектор, що сполучає елемент Δl з точкою A ; α — кут між напрямком струму в елементі та радіусом-вектором.

Із закону Біо — Савара — Лапласа можна вивести формули для визначення індукції магнітного поля, створюваного нескінченним прямолінійним провідником, коловим струмом, котушкою зі струмом. Виведення формул потребує знання інтегрального числення, тому ми будемо користуватись уже готовими результатами (табл. 6).

Таблиця 6

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

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

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



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як взаємодіють між собою паралельні струми? Що спричинює їх взаємодію? Що встановлює закон Ампера? 2. Дайте визначення одиниці сили струму в системі одиниць СІ. 3. Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження потрібно розуміти? 4. Для вивчення електричного поля користуються пробним електричним зарядом. Чим, за аналогією, користуються, вивчаючи магнітне поле? 5. Яка з величин, що характеризують магнітне поле, є аналогом напруженості електричного поля? У чому основна відмінність цих величин?



Експериментуємо

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



Приклади розв'язування задач

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

Дано:

$$I_1 = 20 \text{ А}$$

$$I_2 = 24 \text{ А}$$

$$a = 0,5 \text{ м}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ м}$$

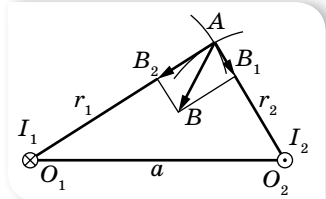
$$\mu = 1$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

$$B — ?$$

Розв'язання:

Зробимо малюнок до задачі (мал. 64). Проведемо з точки O_1 , де розміщено перший провідник, дугу кола радіусом r_1 . Аналогічно проведемо дугу кола радіусом r_2 з точки O_2 . Оскільки вектор індукції напрямлений по дотичній до магнітної силової лінії, то $\vec{B}_1 \perp O_1A$, $\vec{B}_2 \perp O_2A$.



Мал. 64

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

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

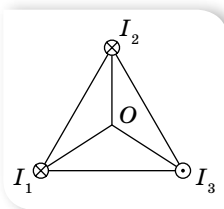
$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{20^2 \text{ А}^2}{0,16 \text{ м}^2} + \frac{24^2 \text{ А}^2}{0,09 \text{ м}^2}} = 188 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$$

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



Вправа 11

1. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямку течуть струми I_1 і I_2 . Визначте індукцію магнітного поля в точці A , що лежить на продовженні прямої, яка сполучає провідники, на відстані s від другого провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
2. Два паралельні провідники, з однакою силою струму в них, розташовані на відстані 8,7 см один від одного й притягуються із силою $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$. Визначте силу струму в провідниках, якщо довжина кожного з них 320 см, струми напрямлені в один бік. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
3. По двох довгих прямих провідниках, що розміщені на відстані 5 см один від одного, протікають струми по 10 А в одному напрямку. Визначте індукцію магнітного поля в точці, що лежить на відстані 3 см від кожного провідника. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.
4. Три паралельні прямолінійні провідники великої довжини розміщені в повітрі на відстані 15 см один від одного. Сила струму в усіх провідниках дорівнює 12 А, а напрямок струми мають такий, як показано на малюнку 65. Визначте індукцію магнітного поля в точці O , яка лежить на однаковій відстані від усіх трьох провідників.
5. Три паралельні довгі провідники розміщені в одній площині на відстані 0,5 м один від одного. Сила струму в кожному провіднику дорівнює 100 А. Струм у першому й середньому провідниках має однаковий напрямок. Визначте силу, яка діє на одиницю довжини першого, другого (середнього) і третього провідників. Вважайте, що провідники розташовані у вакуумі.

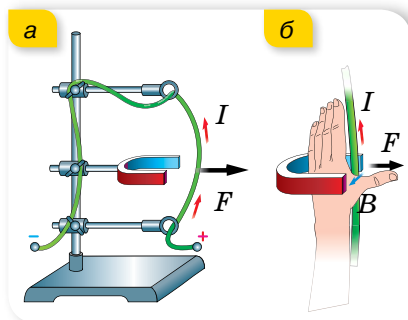


Мал. 65

§15

Дія магнітного поля

Сила Ампера. Якщо прямий провідник розмістити між полюсами постійного магніту та пропустити по провіднику струм, то він почне відхилятися від початкового положення (мал. 66, а). Рух провідника пояснюється взаємодією двох полів: магнітного поля, що створюється струмом, і поля постійного магніту. У 9 класі ми вже дослідили, від чого залежить сила, яка діє на провідник зі струмом, що міститься в однорідному магнітному полі (її називають силою Ампера). Пригадаймо.



Мал. 66. До визначення сили Ампера: а — схема установки для дослідження дії магнітного поля на провідник зі струмом; б — ілюстрація правила лівої руки

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

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

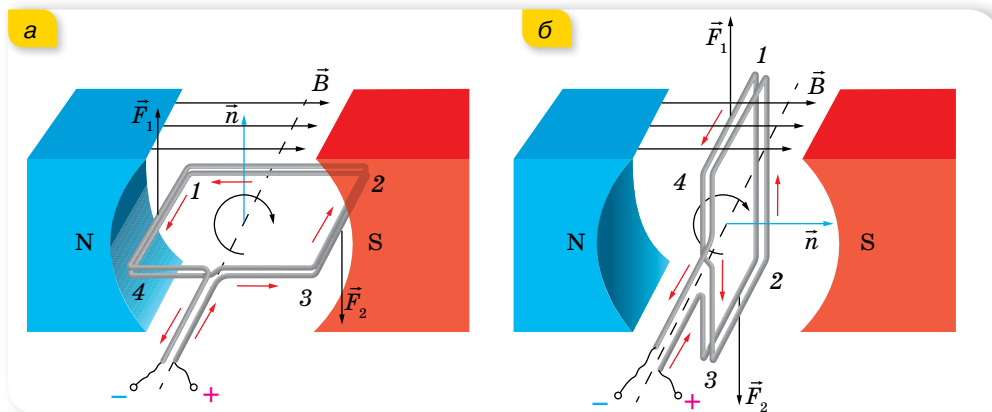
Напрямок сили Ампера визначають за правилом *лівої руки* (мал. 66, б; с. 77): якщо розмістити ліву руку вздовж провідника так, щоб чотири пальці вказували напрямок струму в ньому, а лінії магнітної індукції входили в долоню, то відігнутий великий палець покаже напрямок сили, яка діє на провідник зі струмом.

Момент сил, що діє на прямокутну рамку зі струмом у магнітному полі.

Розглянемо прямокутний контур (рамку), що може обертатися навколо горизонтальної осі (мал. 67, а). У початковий момент площина рамки паралельна лініям індукції однорідного магнітного поля постійного магніту. У більшості випадків розглядають орієнтацію рамки, вказуючи, як розташована нормаль \vec{n} до рамки щодо ліній індукції магнітного поля.

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

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

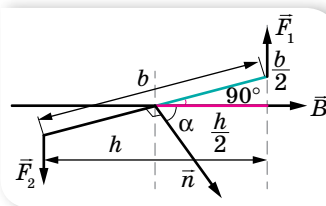


Мал. 67. Дія сил Ампера: а — повертають рамку за ходом годинникової стрілки; б — розтягують рамку

Обчислимо момент пари сил щодо осі обертання рамки. Для цього розглянемо лише одну сторону рамки (мал. 68), наприклад, 1–2, довжина якої b .

Сила Ампера, що діє на сторону рамки 1–4 (мал. 67, а) довжиною a , дорівнює $F_1 = BIa$, оскільки $\vec{B} \perp a$. Така ж сила діє на сторону 2–3. Пригадаймо: обертальний момент M дорівнює добутку сили на плече — найкоротшу відстань від осі обертання до лінії дії сили.

З малюнка видно: $M_1 = F_1 \cdot \frac{h}{2} = F_1 \cdot \frac{b \cos(90^\circ - \alpha)}{2} = F_1 \cdot \frac{b}{2} \sin \alpha$. Загальний момент сили дорівнює сумі моментів M_1 і M_2 : $M = F_1 \cdot b \sin \alpha$. Підставляючи вираз сили, отримуємо: $M = BIab \sin \alpha = BIS \sin \alpha$.



Мал. 68. До виведення формули обертального моменту

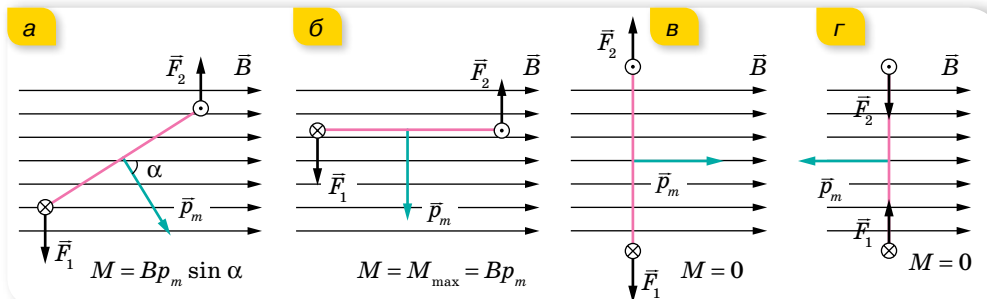
Обертальний момент M , який діє на контур зі струмом I в однорідному полі, прямо пропорційний площі S , яку обтікає струм, силі струму I та індукції магнітного поля B : $M = BIS \sin \alpha$.

Оскільки обертальний момент M залежить від положення контура відносно поля, то вводять поняття *магнітного моменту струму*, який вважають векторною величиною.

Магнітний момент струму p_m — це векторна фізична величина, що описує магнітні властивості контура зі струмом і визначає його поведінку в зовнішньому магнітному полі. Величина p_m дорівнює добутку сили струму I в контурі на площу S цього контура, $p_m = IS$. (Якщо контур має N витків, то магнітний момент струму: $p_m = ISN$.)

Напрямок вектора магнітного моменту струму визначається за правилом свердлика (правого гвинта): якщо гвинт обертати за напрямком струму в контурі, то поступальний рух гвинта покаже напрямок вектора p_m . Як ми зазначали раніше, нормаль до рамки й вектор p_m можуть збігатися.

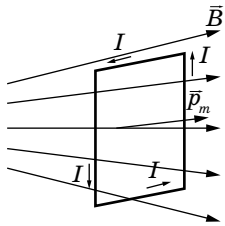
Тепер вираз для обертального моменту можна записати так: $\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$ або $M = Bp_m \sin \alpha$, де α — кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} (мал. 69, а).



Мал. 69. Значення обертального моменту

З малюнка 69 (с. 79) видно, що рівновага контура в магнітному полі можлива тоді, коли вектори \vec{p}_m та \vec{B} напрямлені по одній прямій. Зрозуміло, що стійкою вона буде в разі, коли напрямки векторів збігаються. Якщо змінити

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



Мал. 70. Рамка в неоднорідному магнітному полі

напрямок струму на протилежний, то повний обертальний момент, як і раніше, буде дорівнювати нулю, і рамка залишиться нерухомою: сили, що на неї діють, уже будуть лише стискати її з усіх сторін. Однак, такий стан рамки зі струмом у магнітному полі є нестійким, тому що за найменшого повороту рамки виникнуть сили, які прагнуть повернути її на 180° .

Таким чином, поведінка рамки в магнітному полі стає зрозумілою: якщо відхилити рамку від положення стійкої рівноваги та відпустити, то рамка буде здійснювати коливання. Але якщо спроможтисся змінювати напрямок струму в потрібні моменти, то замість коливань отримаємо безперервне обертання. Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в електричних двигунах.

В однорідному магнітному полі замкнений контур зі струмом магнітні сили можуть лише повернути. Якщо поле неоднорідне (мал. 70), то контур зі струмом може рухатися ще й поступально під дією незрівноважених сил поля в бік, де індукція поля більша за модулем.

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

Сила Лоренца F_L — сила, що діє з боку магнітного поля на рухома заряджену частинку.

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

Тоді $F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BI}{N} \sin \alpha = \frac{BvneSl}{N} \sin \alpha = \frac{BvneV}{N} \sin \alpha$. Ураховуючи, що

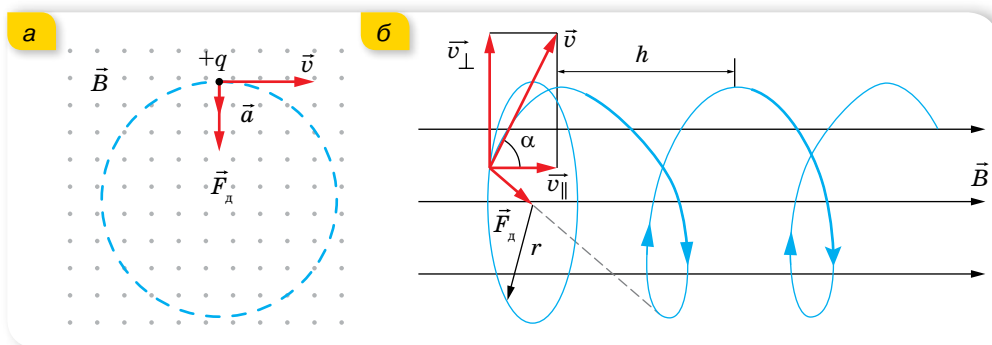
$nV = N$, отримуємо вираз для обчислення сили Лоренца $F_{\text{л}} = eBv \sin \alpha$, тут α — кут між векторами швидкості \vec{v} та індукції \vec{B} .

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

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом *лівої руки* (мал. 71). Застосовуючи його, слід пам'ятати, що коли в магнітному полі рухається *позитивно заряджена частинка*, то чотири пальці треба спрямувати в бік її руху, якщо ж рухається *негативно заряджена частинка*, то витягнуті чотири пальці треба спрямувати проти вектора швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{v} та \vec{B} , а отже, напрямку переміщення частинки, вона не виконує роботи й не може змінювати кінетичну енергію частинки. Сила Лоренца лише викривляє траєкторію руху частинки, тобто є доцентровою силою. Припустимо, що заряджена частинка, заряд якої q і маса m , влітає зі швидкістю \vec{v} в однорідне магнітне поле з індукцією \vec{B} ($\vec{v} \perp \vec{B}$) (мал. 72, а). (Крапки на малюнку вказують на те, що лінії магнітної індукції перпендикулярні до площини сторінки й напрямлені до читача.)

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



Мал. 72. Траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі: а — за умови $\vec{v} \perp \vec{B}$; б — за умови, що напрямок швидкості утворює кут α відносно ліній індукції

Якщо швидкість частинки напрямлена під кутом α до ліній індукції, то заряд рухатиметься по гвинтовій траєкторії навколо ліній індукції поля (мал. 72, б). Дійсно, вектор \vec{v} можна розкласти на складові v_{\parallel} (уздовж ліній індукції) та v_{\perp} (перпендикулярно до ліній індукції). v_{\perp} визначає радіус

Про використання сили Лоренца в техніці читайте в електронному додатку.



Про магнітні властивості речовини й приклади їх використання читайте в електронному додатку.



витка r , а v_{\parallel} із часом не змінюється (у цьому напрямку не діє сила). Якщо заряджена частинка зробить один виток протягом часу T , то вздовж лінії індукції за цей час вона зміститься на відстань $h = v_{\parallel}T$ ($v_{\parallel} = v \cos \alpha$, $v_{\perp} = v \sin \alpha$, а h є кроком гвинтової лінії).

Під час руху зарядженої частинки в *неоднорідному* магнітному полі змінюється не тільки напрямок, а й величина сили Лоренца, тому траєкторія руху частинки може бути дуже складною.

Після того як довели, що магнітна взаємодія тісно пов'язана з електричним струмом, французький учений Андре Ампер висунув гіпотезу, що магнітні властивості речовини можна пояснити існуванням електричних струмів (руху заряджених частинок) усередині кожного атома речовини.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

- Від чого залежить модуль сили Ампера? Як визначити її напрямок?
- Виведіть формулу для визначення моменту сил, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил: дорівнює нулю; є максимальним?
- Прискорена заряджена частинка влітає першого разу в поперечне електричне поле, другого разу — у поперечне магнітне поле. Поля протяжні й частинка не влітає за їх межі. Якими будуть траєкторії частинки в кожному випадку?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Електрон влітає в однорідне магнітне поле зі швидкістю \vec{v} під кутом α до вектора індукції \vec{B} . Визначте радіус і крок гвинтової лінії, якою буде рухатись електрон.

Дано:

v

α

B

R — ?

h — ?

Розв'язання:

Рух електрона з такою швидкістю в однорідному магнітному полі відбувається по гвинтовій лінії (мал. 72, б; с. 81). Швидкість розкладається на складові: паралельну вектору індукції $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ та перпендикулярну до індукції $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

Сила Лоренца F_{\perp} діє на електрон у площині, перпендикулярній до вектора \vec{B} , надаючи йому доцентрового прискорення: $F_{\perp} = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$,

$$evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R}. \text{ Звідси } R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Уздовж поля електрон рухається за інерцією з постійною швидкістю, оскільки у цьому напрямку не діють ніякі сили. У результаті додавання двох рухів — руху по колу та прямолінійного рівномірного руху за інерцією — траєкторія результуючого руху електрона є гвинтовою лінією. Кроком гвинтової лінії є відстань h , на яку зміщується частинка вздовж поля за один оберт, $h = v_{\parallel}T = vT \cos \alpha$. Ураховуючи, що $Tv_{\perp} = 2\pi R$, отримуємо

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}. \text{ Тоді } h = \frac{2\pi Rv \cos \alpha}{v \sin \alpha} \text{ або } h = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{eB}.$$

Відповідь: $R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}$; $h = \frac{2\pi Rv \cos \alpha}{v \sin \alpha}$ або $h = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{eB}$.

Задача 2. Йони двох ізотопів Калію масами 39 і 41 а.о.м., одержавши кінетичну енергію в електричному полі, влітають в однорідне магнітне поле з індукцією 0,16 Тл перпендикулярно до ліній індукції. Визначте, на скільки будуть відрізнятися радіуси траєкторій йонів ізотопів у магнітному полі, якщо їх рух відбувається у вакуумі, заряд кожного йона дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а в електричному полі всі йони проходять різницю потенціалів 500 В.

Дано:

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

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

$$U = 500 \text{ В}$$

$$B = 0,16 \text{ Тл}$$

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\Delta r = ?$$

Розв'язання:

Оскільки сила Лоренца, що діє на йон ізотопу калію в магнітному полі, надає йому доцентрового прискорення, то радіус траєкторії цього йона можна визначити із співвідношення

$$Bvq = \frac{mv^2}{r}.$$

Швидкість руху йона можна визначити з формули для кінетичної енергії, урахувавши, що ця енергія одержана завдяки роботі сил електричного поля,

тобто $\frac{mv^2}{2} = qU$. Звідси визначимо швидкість руху йона $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$.

Визначимо r з виразу для відцентрової сили:

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

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

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

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

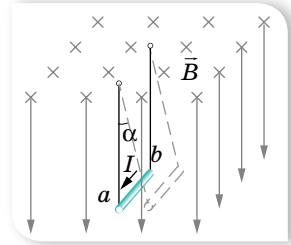
$$\Delta r = r_2 - r_1 = 0,129 \text{ м} - 0,1257 \text{ м} = 0,0033 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,0033 м.



Вправа 12

- По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А. Визначте індукцію (модуль і напрямок) магнітного поля, у якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.
- Провідник ab , що має довжину l і масу m , підвісили на тонких дротинках. По провіднику пропустили струм I , і він відхилився в однорідному магнітному полі (мал. 73) так, що дротинки утворили кут α з вертикаллю. Визначте індукцію магнітного поля. Якщо є можливість, визначте в такий спосіб середню індукцію магнітного поля підковоподібного магніту.
- Максимальний обертальний момент, який діє на рамку площею 1 см^2 , розміщену в магнітному полі, дорівнює $2 \text{ мкН} \cdot \text{м}$. Сила струму в рамці дорівнює $0,5 \text{ А}$. Визначте індукцію магнітного поля.
- Плоска прямокутна котушка зі сторонами 10 і 5 см , що має 200 витків, перебуває в однорідному магнітному полі з індукцією $0,05 \text{ Тл}$. Який максимальний обертальний момент може діяти на котушку в цьому полі, якщо сила струму в котушці 2 А ?
- Визначте магнітний момент електрона атома Гідрогену, що рухається по коловій орбіті радіусом $0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ навколо ядра.
- В однорідне магнітне поле з індукцією $0,085 \text{ Тл}$ влітає електрон зі швидкістю $4,6 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, напрямленою перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначте силу, яка діє на електрон в магнітному полі, і радіус дуги кола, по якій він рухається. Рух відбувається у вакуумі.
- Протон та електрон влітають в однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярною до ліній індукції. У скільки разів радіус кривизни траєкторії протона більший за радіус кривизни траєкторії електрона?
- Електрон, влітаючи в однорідне магнітне поле під кутом 60° до ліній магнітної індукції, рухається по спіралі діаметром 10 см з періодом обертання $6 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля і крок спіралі.
- Електрон рухається в магнітному полі, індукція якого 2 мТл , по гвинтовій лінії радіусом 2 см , крок якої 5 см . Визначте швидкість руху електрона.
- Однорідні електричне і магнітне поля розташовані взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля становить $1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, а індукція магнітного поля — 1 мТл . Якими мають бути напрямок і значення швидкості електрона, щоб траєкторія цього руху була прямолінійною?



Мал. 73



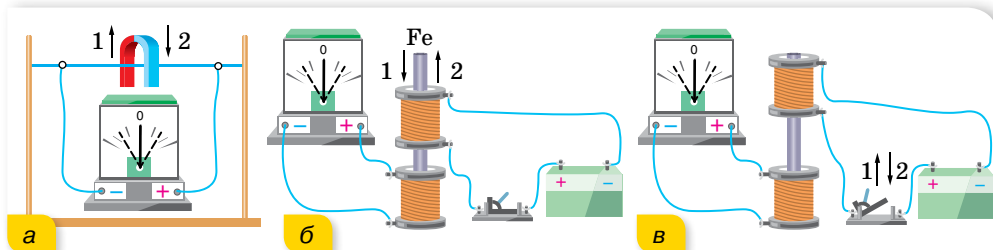
Виконуємо навчальні проекти

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

§16

Електромагнітна індукція

Потік магнітної індукції. Після відкриття Ганса Ерстеда, який довів, що навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, природно було би поставити питання про можливість утворити електричний струм у провідниках за допомогою магнітного поля. Як ви знаєте з курсу фізики 8 класу, над розв'язанням цієї проблеми працював англійський фізик Майкл Фарадей. Відкрите ним явище називається електромагнітною індукцією, суть якого в тому, що в замкнутому провіднику (контурі) виникає електричний струм (індукційний струм) за умови зміни магнітного поля, що проходить крізь контур (мал. 74). Для реалізації цього явища не важливо, рухається провідник або джерело магнітного поля чи ні.



Мал. 74. Досліди з виявлення явища електромагнітної індукції

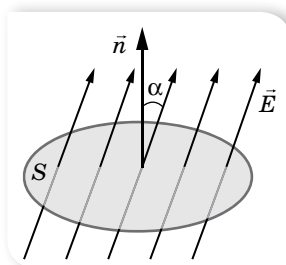
Щоб дати точне кількісне пояснення розглянутого явища, треба ввести величину — *потік магнітної індукції* (або, як кажуть, *магнітний потік*).

Потік магнітної індукції Φ — це фізична величина, яка характеризує магнітне поле, що пронизує певну поверхню площею S . Якщо індукція B в усіх точках поверхні однакова, то $\Phi = BS \cos \alpha$, де α — кут між вектором магнітної індукції та нормаллю до поверхні (мал. 75).

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

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

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



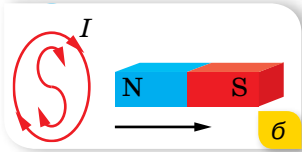
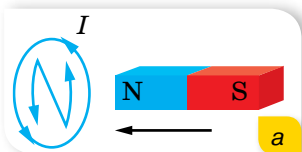
Мал. 75.
До визначення магнітного потоку

поступального руху замкненого провідника в однорідному полі вздовж силових ліній.

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

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

Поеднуючи правило Ленца з правилом свердлика (букв), за допомогою якого визначають напрямок вектора індукції магнітного поля в центрі колового струму, легко визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику. Припустимо, що до замкненого витка (чи котушки) наближається зі швидкістю v постійний магніт північним полюсом N (мал. 76, а).



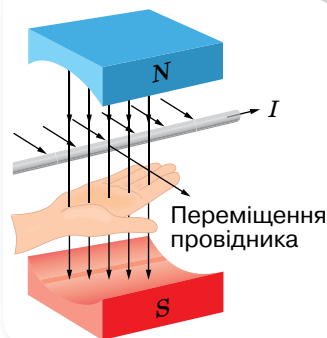
Мал. 76. Визначення напрямку індукційного струму

При цьому магнітний потік через контур витка зростає ($\Delta\Phi > 0$). Отже, за правилом Ленца у витку повинен виникнути індукційний струм такого напрямку, щоб власним магнітним полем протидіяти зростанню зовнішнього магнітного потоку. Для цього потрібно «не пустити» магніт у виток, тобто відштовхнути його. Це означає, що внутрішнє магнітне поле індукційного струму буде напрямлене проти зовнішнього поля постійного магніту. Отже, робимо висновок, що з того боку витка (чи котушки), який повернуто до магніту, з'являється однойменний полюс N (якби до витка наближався магніт південним полюсом S , то з цього боку виникав би південний полюс магнітного поля індукційного струму). Далі міркуємо так. Для того щоб назустріч постійному магніту утворився полюс N індукційного струму, потрібно, аби поступальне переміщення свердлика відбувалося зліва-направо, тобто його ручку треба обертати проти стрілки годинника (дивимось на виток з боку магніту). Напрямок цього обертання і вказує напрямок індукційного струму. (Замість правила свердлика можна також скористатися правилом букв, уписаних у виток (мал. 76).)

З віддаленням постійного магніту від витка (мал. 76, б) магнітний потік через його контур зменшується ($\Delta\Phi < 0$). Щоб протидіяти цьому, потрібно «не відпускати» магніт, тобто притягувати його. Це означає, що магнітне поле індукційного струму буде однакового напрямку із зовнішнім, тобто з боку магніту матиме південний полюс S . За правилом свердлика (чи букв) з'ясуємо, що індукційний струм у витку має проходити за стрілкою годинника.

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

праву руку треба розмістити в магнітному полі так, щоб силові лінії входили в долоню, а відставлений під прямим кутом великий палець збігався з напрямком переміщення провідника. Тоді чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок індукційного струму в цьому провіднику (мал. 77).



Мал. 77. Визначення напрямку індукційного струму за правилом правої руки

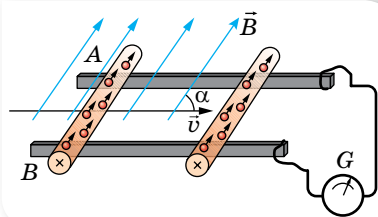
Закон електромагнітної індукції. Перейдемо до кількісного формулювання закону електромагнітної індукції. Індукційний струм I_i у замкненому провіднику опором R виникає під дією електрорушійної сили індукції ϵ_i , яку можна виразити за законом Ома: $\epsilon_i = I_i R$. Оскільки та сама ЕРС у провідниках з різними опорами створює неоднакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватися величиною ЕРС індукції ϵ_i , а не силою індукційного струму I_i .

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

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

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

Нехай в однорідному магнітному полі індукцією B розміщено прямолінійний металевий провідник довжиною l , який може ковзати по паралельних стержнях (мал. 78). При цьому швидкість руху провідника \vec{v} напрямлена під кутом α до вектора \vec{B} . Під час руху провідника зі



Мал. 78. До пояснення механізму виникнення ЕРС у рухомому провіднику

швидкістю v будуть рухатись і його власні електрони та йони. А оскільки вони рухаються в магнітному полі, то на кожний йон та електрон діє сила Лоренца. Якщо йони під впливом сили Лоренца не покидають положень стійкої рівноваги у вузлах кристалічних ґраток, то вільні електрони провідника зміщуються до одного його кінця A , залишаючи на другому кінці B надлишок позитивних зарядів. Це розділення зарядів триватиме доти, поки вони не створять усередині провідника таке електростатичне поле (напрявлене від B до A), у якому на електричні заряди провідника діятиме сила, рівна за значенням і протилежна за напрямком силі Лоренца. Отже, зміщення електронів до кінця A припиниться за умови: $F_e = F_{\text{Л}}$. Оскільки $F_e = eE = e \frac{U}{l}$, а $F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha$, маємо $e \frac{U}{l} = evB \sin \alpha$, звідки $U = Blv \sin \alpha$.

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

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

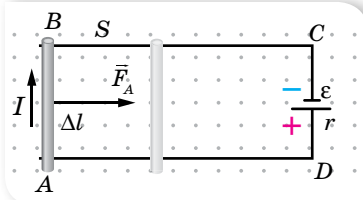
ЕРС індукції такої природи виникає в будь-якому провіднику, коли він рухається в магнітному полі так, що його швидкість перпендикулярна до його власної довжини й утворює з вектором індукції магнітного поля кут α (іншими словами, коли він перетинає лінії індукції магнітного поля). Провідник стає джерелом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

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

Таке припущення вперше висловив Джеймс Максвелл. Розвиваючи цю ідею, він створив теорію *електромагнітного поля*, яка була підтверджена численними дослідженнями. За теорією Максвелла, у просторі, де існує змінне магнітне поле, обов'язково виникає так зване *індукційне електричне поле*. Водночас виникнення індукційного електричного поля ніяк не пов'язане з наявністю в даній частині простору провідника. Наявність провідника лише дає змогу виявити це поле за збудженим індукційним електричним струмом.

Тепер явище електромагнітної індукції постає перед нами в новому світлі. Головне в ньому — це процес утворення змінним магнітним полем індукційного електричного поля. Суть явища електромагнітної індукції в нерухомому провіднику полягає не стільки у виникненні індукційного струму, скільки у виникненні електричного поля, яке приводить у рух електричні заряди.

Видатний німецький дослідник Герман Гельмгольц (1821–1894) вивів формулу для обчислення ЕРС індукції теоретично із закону збереження енергії. Спробуємо й ми. Умістимо в однорідне магнітне поле індукцією B провідник довжиною Δl та опором R , який є ділянкою замкненого кола $ABCD$ (мал. 79). Опором з'єднувальних провідників BC , CD і AD знехтуємо.



Мал. 79. Рух провідника в магнітному полі

Джерело постійного струму, що має ЕРС ε та внутрішній опір r , створює в замкненому колі струм $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, який у провіднику проходить перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля.

Водночас на провідник довжиною Δl діє сила Ампера $F_A = BI\Delta l$, у результаті чого провідник переміщується прискорено, і за час Δt пройде шлях s . Під час проходження струму I в замкненому колі $ABCD$ протягом часу Δt виділяється ланц-джоулеве тепло $Q = I^2(R + r)\Delta t$ та виконується механічна робота з переміщення провідника на шляху s : $A = F_A s = BI\Delta l s = BI\Delta S = I\Delta\Phi$. За законом збереження енергії, ці витрати повинні дорівнювати повній роботі джерела струму $A' = \varepsilon I\Delta t$, тобто $\varepsilon I\Delta t = I^2(R + r)\Delta t + I\Delta\Phi$. Після спрощень отримуємо вираз

$$I = \frac{\varepsilon - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R + r}$$
. Ця формула виражає закон Ома для замкненого кола, вміщеного в магнітне поле. Роль діючої електрорушійної сили в такому колі відіграє

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

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

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

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

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

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

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

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

Ці формули можна використовувати для розв'язування багатьох задач.



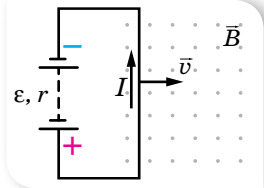
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Щоб одержати індукційний струм у кільці за допомогою магніту, кільце і магніт рухали з відносною швидкістю, що дорівнювала нулю. Чи виникав за таких умов індукційний струм у кільці? **2.** Чи завжди утворюється індукційний струм у металевому кільці зі зміною в його площині: а) магнітного потоку; б) індукції магнітного поля? **3.** Магніт у вакуумі вільно падає південним полюсом у центр дротяного кільця. Яким буде напрямок індукційного струму в разі наближення магніту до кільця? **4.** Крізь провідне кільце, розташоване горизонтально, падають з однакової висоти алюмінієвий брусок і магніт. Що впаде першим?



Приклади розв'язування задач

Задача. Прямолінійний провідник завдовжки 1,2 м за допомогою гнучких дротів приєднали до джерела електричного струму з ЕРС 24 В і внутрішнім опором 0,5 Ом. Провідник розміщують в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 0,8 Тл, напрямленою на читача (мал. 80). Опір усього зовнішнього кола дорівнює 2,5 Ом. Визначте силу струму в провіднику, коли він рухається перпендикулярно до ліній індукції поля зі швидкістю $12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. У скільки разів зміниться сила струму, якщо провідник зупиниться?



Мал. 80

Дано:

$$\begin{aligned} l &= 1,2 \text{ м} \\ \varepsilon &= 24 \text{ В} \\ r &= 0,5 \text{ Ом} \\ B &= 0,8 \text{ Тл} \\ v &= 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\ R &= 2,5 \text{ Ом} \end{aligned}$$

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

Розв'язання:

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

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

У разі зупинки провідника ε_1 зникає, тому ε_0 буде дорівнювати ε .

$$\text{Обчислимо: } \varepsilon_1 = -0,8 \text{ Тл} \cdot 12,5 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 1,2 \text{ м} = -12 \text{ В.}$$

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

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

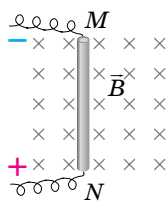
$$\text{Визначимо відношення струмів } \frac{I_2}{I_1} = \frac{8 \text{ А}}{4 \text{ А}} = 2.$$

Відповідь: 4 А, 2 рази.

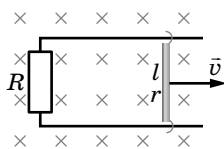


Вправа 13

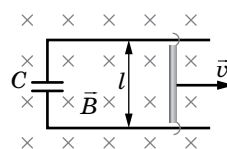
- Провідник MN (мал. 81), довжина активної частини якого 1 м, а опір 2 Ом, міститься в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. Провідник приєднали до джерела, ЕРС якого дорівнює 1 В (внутрішнім опором джерела та опором підвідних проводів знехтуйте). Визначте силу струму в провіднику, якщо він: а) перебуває в стані спокою; б) рухається праворуч зі швидкістю $4 \frac{\text{М}}{\text{с}}$; в) рухається ліворуч з тією самою швидкістю. У якому напрямку і з якою швидкістю треба переміщувати провідник, щоб у ньому не проходив струм?
- В однорідному вертикальному магнітному полі з індукцією $B = 0,4 \text{ Тл}$ по двох горизонтальних паралельних стержнях, розміщених на відстані $l = 0,5 \text{ м}$ один від одного і замкнутих на резистор опором $R = 1,5 \text{ Ом}$, рухається без тертя провідник опором $r = 0,5 \text{ Ом}$ зі швидкістю $v = 1 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, перпендикулярною до лінії індукції поля (мал. 82). Визначте: а) силу струму в колі; б) силу, напрямлену в сторону руху, яку необхідно прикласти до провідника, щоб він рівномірно рухався з даною швидкістю; в) теплову потужність, яка виділяється в колі. Опором стержнів знехтуйте.
- По двох паралельних рейках, що розміщені на відстані $l = 0,2 \text{ м}$ одна від одної, перпендикулярно до однорідного магнітного поля з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$, рухається провідник зі швидкістю $v = 0,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ (мал. 83). Визначте заряд та енергію електричного поля конденсатора ємністю $C = 20 \text{ мкФ}$, який включено в коло.



Мал. 81



Мал. 82



Мал. 83

§17

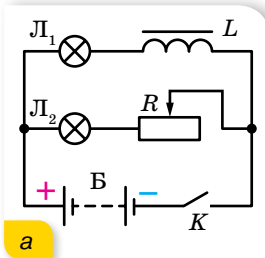
Самоіндукція

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

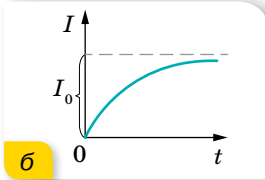
Розглянемо котушку, що має N витків, у якій тече струм силою I від зовнішнього джерела. Цей струм створює в котушці магнітне поле, і тому її витки пронизує власний магнітний потік Φ . Якщо якимось способом змінювати силу струму в котушці (наприклад, за допомогою реостата або замиканням і розмиканням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

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

Самоіндукція — це окремий випадок явища електромагнітної індукції. Електрорушійну силу в цьому випадку називають ЕРС самоіндукції ε_{ci} . Оскільки власний магнітний потік котушки пропорційний струму I в ній, то ε_{ci} зручніше пов'язати зі швидкістю зміни струму в котушці.



а



б

Мал. 84. а — схема для спостереження струмів замикання; б — графік залежності сили струму замикання від часу

Очевидно, $\varepsilon_{ci} \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$ або $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де L — коефіцієнт, що характеризує індивідуальні властивості котушки. Його називають *коефіцієнтом самоіндукції*, або *індуктивністю провідника*.

Визначимо одиницю індуктивності провідника в СІ: $L = -\frac{\varepsilon_{ci} \Delta t}{\Delta I}$; $[L] = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн}$. Одиницю

індуктивності назвали на честь американського фізика Джозефа Генрі (1799 – 1878).

Явище самоіндукції найяскравіше виявляється у виникненні так званих струмів замикання і струмів розмикання в колах, що містять котушки великої індуктивності. Струми замикання можна спостерігати в колі, складеному за схемою, що зображена на малюнку 84, а. Дві однакові лампи L_1 і L_2 від кишенькового ліхтарика ввімкнено у дві паралельні вітки, одна з яких містить котушку з індуктивністю L , а друга — повзунковий реостат R , за допомогою якого активні опори обох віток роблять однаковими. Замкнувши коло вимикачем K ,

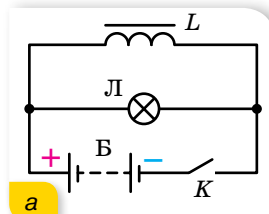
ми побачимо, що лампа L_1 починає світитися дещо пізніше. Справді, в початковий момент часу сила струму зростає від нуля до деякого значення I_0 (мал. 84, б). Але зі зростанням струму у вітці, що містить котушку індуктивності, зростатиме і власний магнітний потік котушки. До того ж унаслідок явища самоіндукції у вітці з котушкою виникатиме індукційний струм, який, за правилом Ленца, буде напрямлений проти струму, створюваного зовнішнім джерелом ЕРС. Отже, результуючий струм у вітці, що містить котушку з індуктивністю L та опором R , у початковий момент часу буде меншим, ніж у вітці з таким самим за величиною опором R , але без індуктивності. Тому максимальне світіння лампи L_1 у першій вітці настане дещо пізніше, ніж у другій вітці.

Струми розмикання виникають у момент розриву електричного кола, і якщо коло містить котушку великої індуктивності, ці струми можуть бути значними. Струм розмикання наочніше можна спостерігати за допомогою схеми, зображеної на малюнку 85, а. Замкнувши ключ K , почекаємо рівномірного світіння лампи L і розімкнемо коло. Якщо котушка L має достатньо велику індуктивність, ми побачимо, що лампа згасла лише через деякий час після розмикання кола. І в цьому разі зміна (спадання) струму в момент вимикання спричинює виникнення змінного магнітного потоку в котушці, а отже, виникнення струму самоіндукції.

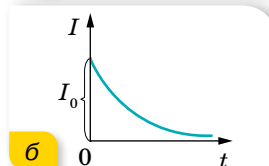
До того ж, за правилом Ленца, струм розмикання має такий самий напрямок, як і основний струм від зовнішнього джерела. Наявність великої індуктивності в електричному колі або дуже швидка зміна сили струму можуть призвести до того, що, нехай і короткочасно, але загальна сила струму значно перевищить робочу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

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

Індуктивність. Щоб розкрити фізичний зміст індуктивності, вважатимемо, що струм у котушці змінюється зі швидкістю $1 \frac{\text{А}}{\text{с}}$. Тоді $|\varepsilon_{\text{си}}| = L$ — індуктивність котушки дорівнює тій електрорушійній силі самоіндукції, яка виникає в ній унаслідок зміни струму зі швидкістю $1 \frac{\text{А}}{\text{с}}$.



а



б

Мал. 85. а — схема для отримання струмів розмикання; б — графік залежності сили струму розмикання від часу

Ураховуючи те, що для нормального соленоїда $\Phi = BS$, а магнітна індукція всередині соленоїда з кількістю витків N і довжиною l дорівнює $B = \mu_0 \frac{IN}{l}$, формулу закону електромагнітної індукції у випадку само-

індукції можна записати так: $\varepsilon_{ci} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \frac{I}{\Delta t}$. Порівнюючи цей вираз із формулою $\varepsilon_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, дістаємо формулу для обчислення

індуктивності нормального соленоїда: $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$. Цю формулу можна виразити через об'єм соленоїда. Оскільки $S = \frac{V}{l}$, то $L = \frac{\mu_0 N^2 V}{l^2} = \mu_0 n^2 V$, де n — кількість витків на одиницю довжини $n = \frac{N}{l}$.

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

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

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

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

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

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

Пригадаймо, що електрична енергія виражається такими формулами:

$W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$, $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ і $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$ — та зосереджена між обкладками за-

рядженого конденсатора, тобто локалізована в об'ємі електричного поля. Як і у випадку з конденсатором, магнітна енергія міститься безпосередньо в об'ємі магнітного поля.

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

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

ставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$ вираз для індуктивності $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$ та

сили струму $I = \frac{Bl}{\mu_0 N}$, отримаємо: $W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu_0}$. Оскільки $Sl = V$, то густини

енергії $w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$.

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



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Що називають явищем самоіндукції? Запишіть формулу, за якою визначають ЕРС самоіндукції. **2.** Який фізичний зміст індуктивності? Як зміниться індуктивність котушки, якщо збільшити її довжину, розтягнувши вздовж осі? **3.** Послідовно з котушкою індуктивності L_1 увімкнули другу — індуктивністю L_2 . У якому випадку індуктивність цієї ділянки буде сумою $L_1 + L_2$? **4.** Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?



Експериментуємо

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



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Котушку з дуже малим опором та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму з дуже малим внутрішнім опором, ЕРС якого дорівнює 15 В . Через який інтервал часу струм у котушці досягне значення 50 А ?

Про взаємозв'язок електричного й магнітного полів як вияв єдиного електромагнітного поля читайте в електронному додатку.



Дано:

$L = 3 \text{ Гн}$

$\varepsilon_1 = 15 \text{ В}$

$I = 50 \text{ А}$

 $t = ?$ **Розв'язання:**

За законом Ома для повного кола $\varepsilon = I(R + r)$, де ε — повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі ε_1 (ЕРС джерела) і ε_2 (ЕРС самоіндукції), яка виникає після під'єднання котушки до джерела, $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

ЕРС самоіндукції можна визначити за формулою $\varepsilon_2 = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

$$\text{Тоді } \varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r).$$

За умовою задачі, опори R і r дуже малі, тому $\varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$, або $\varepsilon_1 = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Звідки можна визначити швидкість зміни сили струму $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1}{L}$. Тепер можна визначити час, потрібний для наростання струму до значення $I = 50 \text{ А}$.

$$t = \frac{I}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{I}{\frac{\varepsilon_1}{L}} = \frac{IL}{\varepsilon_1}; t = \frac{50 \text{ А} \cdot 3 \text{ Гн}}{15 \text{ В}} = 10 \text{ с}.$$

Відповідь: $t = 10 \text{ с}$.

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

Дано:

$I_1 = 2,5 \text{ А}$

$I_2 = 14,5 \text{ А}$

$I = 5 \text{ А}$

$N = 800$

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

$\Delta t = 0,15 \text{ с}$

$\varepsilon_{\text{ci}} = ?; W_{\text{маг}} = ?$

Розв'язання:

Середню ЕРС самоіндукції можна визначити з формули $\varepsilon_{\text{ci}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, де $\Delta I = I_2 - I_1$. Індуктивність соленоїда визначимо зі співвідношення $\Phi_1 N = LI_1$ і $\Phi_2 N = LI_2$, звідки $\Delta\Phi N = L\Delta I$.

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

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

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

Відповідь: $-13 \text{ В}; 2 \text{ Дж}$.



Вправа 14

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



Виконуємо навчальні проекти

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



Перевірте себе (§ 13–17)



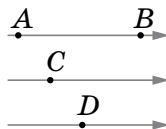
- У якій точці на малюнку магнітного поля модуль вектора магнітної індукції має найбільше значення?

А у точці А

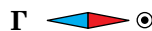
Б у точці В

В у точках С або D

Г у всіх точках однаковий



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



- Укажіть явище, аналогічне явищу самоіндукції в електродинаміці.

А явище нагрівання речовини в молекулярній фізиці

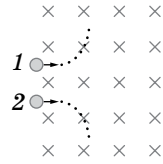
Б явище інерції в механіці

В явище протікання електричного струму в електродинаміці

Г явище розпаду ядер атомів у квантовій фізиці

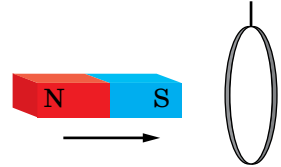
4. За фрагментами траєкторій заряджених частинок 1 і 2, що влетіли в магнітне поле з однаковою швидкістю, з'ясуйте знак заряду кожної частинки.

- А частинка 1 заряджена негативно, частинка 2 заряджена позитивно
 Б частинка 1 заряджена позитивно, частинка 2 заряджена негативно
 В обидві частинки заряджені негативно
 Г обидві частинки заряджені позитивно



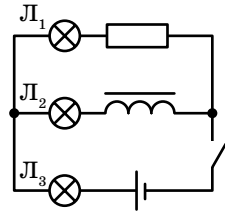
5. До середини підвешеного на нитці легкого алюмінієвого кільця підносять штабовий магніт. Укажіть, що відбудеться з кільцем.

- А нічого не відбудеться
 Б почне обертатися навколо вертикальної осі
 В почне обертатися навколо горизонтальної осі
 Г відштовхнеться від магніту



6. Усі лампи у схемі на малюнку однакові. Укажіть лампу, яка засвітиться пізніше за інших після замикання ключа, і правильне пояснення цього явища.

- А L_1 ; вона розміщена далі від джерела струму, ніж інші лампи
 Б L_1 ; послідовно з нею увімкнений резистор, опір якого може бути великим
 В L_2 ; через явище самоіндукції в котушці
 Г L_3 ; ця лампа увімкнена послідовно до джерела, а дві інші — паралельно



7. На рамку площею 200 см^2 зі струмом 2 А , розміщену в однорідному магнітному полі, діє максимальний обертальний момент $4 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Визначте модуль вектора магнітної індукції.

- А 1 мТл
 Б 2 мТл
 В 3 мТл
 Г 4 мТл

8. Магнітне поле створене накладанням двох однорідних полів з магнітною індукцією $0,4 \text{ Тл}$ і $0,3 \text{ Тл}$, силові лінії яких взаємно перпендикулярні. Обчисліть магнітну індукцію результуючого поля.

9. На горизонтальних рейках, відстань між якими $0,2 \text{ м}$, перпендикулярно до них лежить провідник масою $0,5 \text{ кг}$. Провідник зрушує з місця після пропускання по ньому струму 50 А . Коефіцієнт тертя провідника об рейки $0,2$. Вважайте $g = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$

і визначте індукцію магнітного поля.

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

Розділ 2

КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

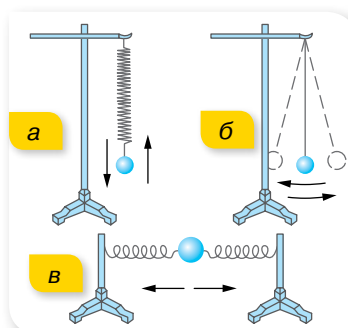
§18

Вільні та вимушені коливання

Коливальні системи, умови виникнення вільних коливань. Одним із видів механічного руху є коливання. У природі й техніці існує безліч видів коливань. Вивчити їх усі майже неможливо. Ми обмежимося вивченням найпростіших випадків коливань. На малюнку 86 наведено приклади механічних пристроїв, які здатні здійснювати коливання. Ці пристрої є *коливальними системами*.

Для коливальних систем характерні такі спільні ознаки.

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



Мал. 86.

Коливальні системи:
 а — вертикальний пружинний маятник;
 б — нитяний маятник;
 в — горизонтальний пружинний маятник

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

У всіх коливальних системах, зображених на малюнку 86, с. 99, вільні коливання виникають, якщо: 1) коливальне тіло вивести з положення рівноваги, тобто надати коливальній системі енергії; 2) рівнодійна всіх сил, що діють на тіло, виведене з положення рівноваги, напрямлена до цього положення; 3) сили тертя в системі достатньо малі.

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

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

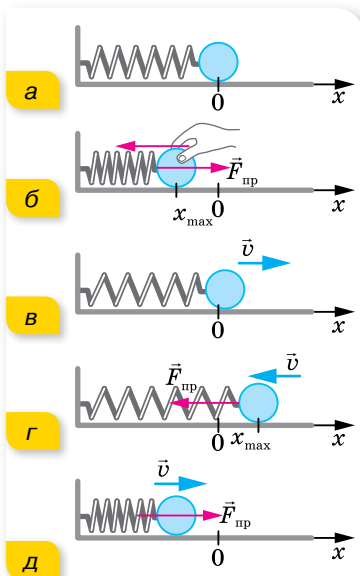
Амплітуда коливань x_{\max} — це максимальне зміщення тіла від положення рівноваги.

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

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

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

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



Мал. 87. Коливання горизонтального пружинного маятника

Вільні та вимушені коливання. Розглянемо вільні коливання горизонтального пружинного маятника (мал. 87, а).

Без тертя, рух кульки не припиниться б ніколи. Однак тертя (зокрема, опір повітря) впливає на рух коливного тіла. Оскільки сила опору повітря напрямлена проти швидкості руху, то амплітуда коливань поступово зменшується, доки рух не припиниться, тобто коливання будуть *загасаючими*. Якщо опір незначний, то загасання стає помітним лише після того, як коливне тіло здійснить багато коливань. Сили тертя (опору) можуть бути й настільки великі, що в коливальній системі коливання не виникнуть. Наприклад, якщо пружинний маятник опустити у в'язку рідину, то після відхилення тіла від положення рівноваги воно плавно повернеться в це положення і зупиниться.

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

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

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



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

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

§19

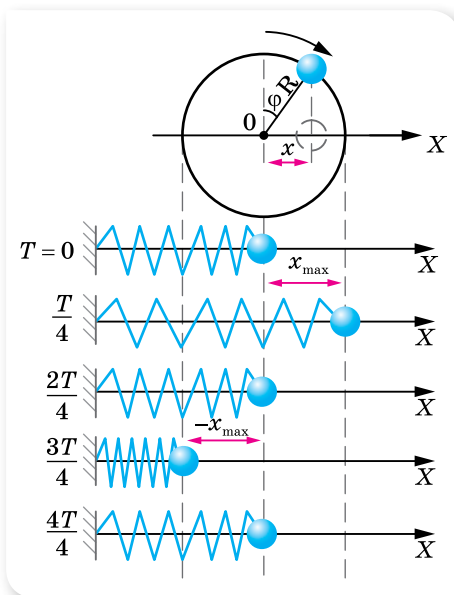
Гармонічні коливання

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

Сили, пропорційні відхиленню системи від положення рівноваги, — це не обов'язково пружні сили. Вони можуть мати різну фізичну природу, але схожі між собою тим, що спричиняють гармонічні коливання. Тому сили, пропорційні зміщенню від положення рівноваги, незалежно від їхньої природи, називають квазіпружними («ніби пружними»; квазі — від лат. *quasi* — ніби, майже, немовби). Так, роль квазіпружної сили може

відігравати рівнодійна сили тяжіння та сили пружності (для нитяного маятника), рівнодійна кількох сил різної природи.

Як і для будь-якого руху, для коливань необхідно отримати формулу, що дасть змогу розв'язувати основну задачу механіки — визначати координату тіла в будь-який момент часу. Крім того, оскільки коливання — це періодичні рухи, потрібно вміти визначати період коливань. Щоб виявити залежність координати (швидкості та прискорення) коливного тіла від часу, необхідно розв'язати рівняння другого закону Ньютона. Оскільки сила, що діє на коливне тіло, змінюється, то розв'язання цього рівняння потребує глибших знань з математики (знань диференціального числення). Тому скористаємося подібністю між коливаннями маятника та рівномірним рухом по колу.



Мал. 88. Аналогія між коливальним і обертовим рухом

Нехай по колу рівномірно рухається кулька (мал. 88). Розташуємо горизонтальний пружинний маятник паралельно осі X так, щоб положення рівноваги кульки маятника розмістилося на одній вертикалі з центром кола. Виведемо маятник з положення рівноваги, розтягнувши пружину на величину $x_{\max} = R$. Легко помітити, що під час руху кульки по колу проекція її радіуса-вектора здійснює коливання вздовж діаметра, тобто вздовж осі X , аналогічні коливанням кульки маятника. Центр кола відіграє роль положення рівноваги, радіус кола R — роль амплітуди коливань x_{\max} , період обертання кульки — відповідає періоду коливань T , проекція радіуса-вектора в довільний момент часу відповідає зміщенню $x = x_{\max} \cos \varphi$, де φ — кут повороту радіуса-вектора.

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

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

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

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

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

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

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

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

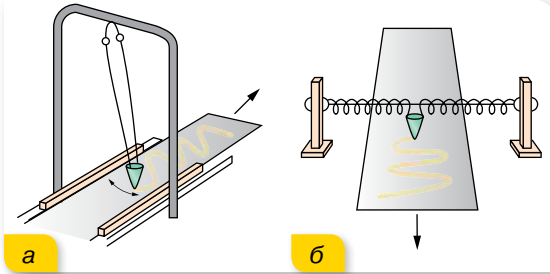
Фаза коливань — це фізична величина, що визначає миттєві значення змінних параметрів коливальної системи в певний момент часу, тобто визначає ступінь відхилення системи від положення рівноваги в цей момент, $\varphi = 2\pi \frac{t}{T} = \omega t$.

Одиниця фази коливань — радіан, 1 рад.

У наведених нами прикладах коливальний рух починався з моменту часу, коли коливне тіло перебувало в крайньому положенні. Оскільки, спостерігаючи за коливаннями, час можна відлічувати від будь-якого моменту, то початкове положення коливного тіла визначатиметься початковою фазою φ_0 , і рівняння коливального руху набуде вигляду $x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$.

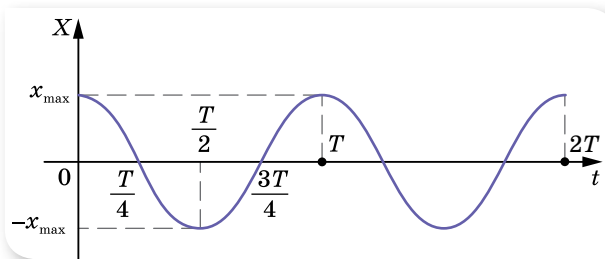
Загалом, фаза коливань визначається формулою $\varphi = \omega t + \varphi_0$. Для гармонічних коливань фаза є аргументом синуса або косинуса.

Графіки гармонічних коливань. Графіком гармонічних коливань є крива, яку в математиці називають синусоїдою або косинусоїдою. Графік гармонічного коливання можна дістати безпосередньо з досліду, якщо за коливне тіло взяти пісочницю, з якої висипається пісок. Пісочницю підвішують на довгій нитці (мал. 89, а) або закріплюють на пружинах (мал. 89, б) і змушують здійснювати коливання. Якщо під пісочницею протягувати папір, то на ньому залишається слід, що нагадує синусоїду.



Мал. 89.
Наочний спосіб
спостереження
коливань

Форма запису закону гармонічного коливання може бути вибрана довільно (через синус або косинус). Припустимо, що маятник відвели в крайнє положення та відпустили (без поштовху), розпочавши відлік часу. Рівняння руху в цьому разі записують у вигляді $x = x_{\max} \cos \omega t$, але можна записати й так: $x = x_{\max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Обидві форми запису еквівалентні, тобто описують одне й те саме коливання, графік якого є косинусоїдою (мал. 90).



Мал. 90. Графік коливань

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

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

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

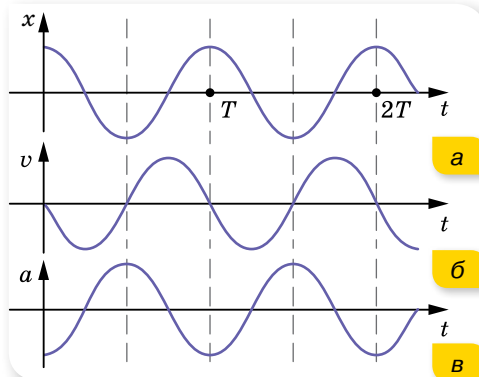
З рівняння $x = x_{\max} \cos \omega t$ отримуємо: $v = (x_{\max} \cos \omega t)' = -x_{\max} \omega \sin \omega t$, де $v_{\max} = x_{\max} \omega$ — максимальна швидкість. Для прискорення маємо $a = (-x_{\max} \omega \sin \omega t)' = -x_{\max} \omega^2 \cos \omega t$, де $a_{\max} = x_{\max} \omega^2$ — максимальне прискорення.

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

Графіки часових залежностей зміщення, швидкості та прискорення гармонічних коливань зображено на малюнку 91. Згідно з формулами зведення тригонометричних функцій, залежність швидкості від часу $v = -v_{\max} \sin \omega t$ набуває вигляду $v = v_{\max} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Зіставивши це

рівняння з рівнянням $x = x_{\max} \cos \omega t$, бачимо, що коливання швидкості випереджають за фазою коливання зміщення на $\frac{\pi}{2}$ (мал. 91, б). Коли-

вання прискорення, що описуються рівнянням $a = -a_{\max} \cos \omega t$, можна записати у вигляді $a = a_{\max} \cos (\omega t + \pi)$, тобто коливання прискорення випереджають за фазою коливання координати на π рад (перебувають у протифазі) (мал. 91, в).



Мал. 91. Графіки залежностей:
а — $x(t)$; б — $v(t)$; в — $a(t)$



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

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



Приклади розв'язування задач

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

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

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

Дано:

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

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

$$x = 0,025 \text{ м}$$

а) x_{\max} — ?

v — ?; T — ?

$v_x = v_x(t)$ — ?

$a_x = a_x(t)$ — ?

б) x — ?; t — ?

Розв'язання:

а) З рівняння коливань визначаємо $x_{\max} = 0,05$ м, $\omega = 10\pi$. Оскільки $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, то $\nu = 5$ Гц, $T = 0,2$ с.

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

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

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

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

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

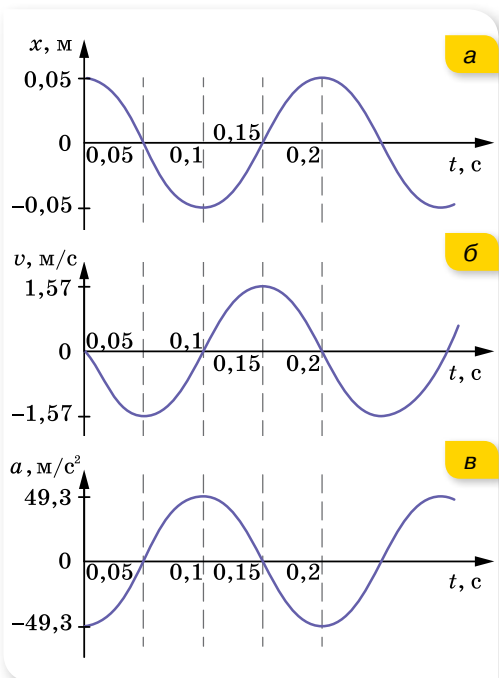
Відповідні графіки коливань наведено на малюнку 92.

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

$$x = 0,05 \cos \frac{\pi}{4} = 0,05 \cdot 0,71 \approx 0,036 \text{ м}.$$

Щоб визначити момент часу, в який зміщення дорівнює 0,025 м, підставимо це значення в рівняння для x — $0,025 = 0,05 \cos 10\pi t$, звідси $\cos 10\pi t = 0,5$. Оскільки косинус набуває значення 0,5 при $\frac{\pi}{3}$, то $10\pi t = \frac{\pi}{3}$, звідси $t \approx 0,03$ с.

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



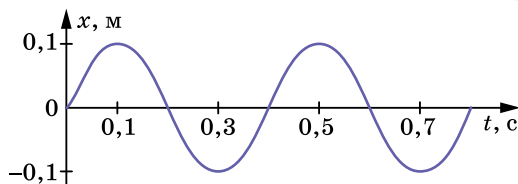
Мал. 92



Вправа 15

- Рівняння руху гармонічного коливання має вигляд $x = 0,02 \cos 100\pi t$. Побудуйте графік залежності $x(t)$. Обчисліть зміщення через 0,25 с; через 1,25 с. Відповіді поясніть за допомогою графіка.

2. За графіком гармонічних коливань, зображеним на малюнку 93, запишіть рівняння цього коливання.



Мал. 93

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

§ 20

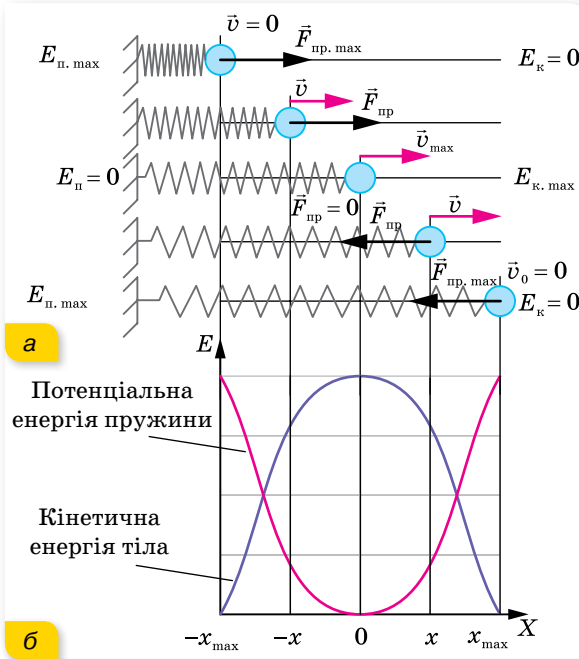
Перетворення енергії в гармонічних коливаннях

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

За допомогою малюнка 94 на с. 108 можна простежити, як змінюється енергія під час гармонічних коливань. У початковий момент (коли пружина стиснена) коливальна система має максимальну потенціальну енергію $E_{\text{п. max}} = \frac{kx_{\max}^2}{2}$, де k — жорсткість пружини. Як далі буде встановлено, маса тягарця — m , що коливається на пружині жорсткістю k , і циклічна

частота коливань пов'язані співвідношенням $\omega^2 = \frac{k}{m}$, тоді вираз для максимальної потенціальної енергії можна записати у вигляді

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



Мал. 94.
Перетворення енергії
коливальної системи

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

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

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

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

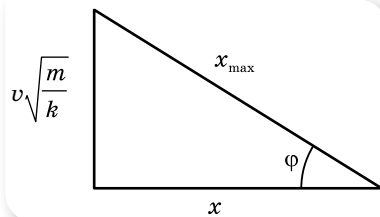
$$E = E_{п} + E_{к} = \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2} \cos^2 \omega t + \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2} \sin^2 \omega t = \frac{m\omega^2 x_{\max}^2}{2}.$$

На малюнку 94, б зображено графік зміни потенціальної та кінетичної енергій коливальної системи за один період коливань.

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

Повна енергія під час гармонічного коливання дорівнює $\frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{kx_{\max}^2}{2}$, або $kx^2 + mv^2 = kx_{\max}^2$. Поділивши на k , отримуємо: $x^2 + \frac{mv^2}{k} = x_{\max}^2$ або $x^2 + \left(v\sqrt{\frac{m}{k}}\right)^2 = x_{\max}^2$.

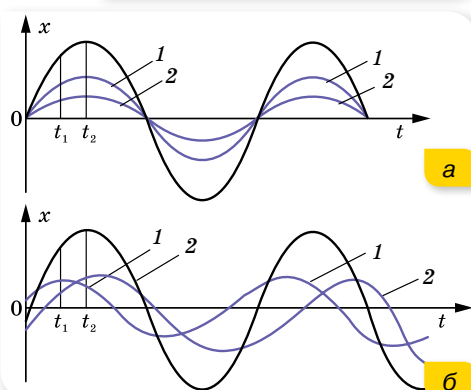
Побудувавши прямокутний трикутник з катетами x і $v\sqrt{\frac{m}{k}}$ та гіпотенузою x_{\max} (мал. 95), отримуємо: $x = x_{\max} \cos \varphi$.



Мал. 95. Графічний спосіб виведення рівняння гармонічних коливань

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

Приклади додавання коливань з однаковим періодом наведено на малюнку 96.



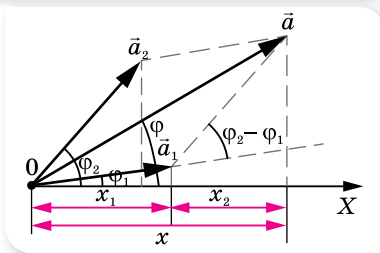
Мал. 96. Додавання гармонічних коливань

Векторні діаграми. Набагато зручніше додавати гармонічні коливання за допомогою векторних діаграм.

Нехай коливання задано рівняннями $x_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ та $x_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$, де a_1, a_2 — амплітуди коливань, φ_1, φ_2 — їхні початкові фази.

Зобразимо обидва коливання в момент часу $t = 0$ за допомогою векторів \vec{a}_1 та \vec{a}_2 (мал. 97).

Побудуємо за правилами додавання векторів результуючий вектор \vec{a} . Проекція цього вектора на вісь X дорівнює сумі проєкцій векторів, які додаються, $x = x_1 + x_2$. Результуюче коливання буде гармонічним коливанням із частотою ω , амплітудою a і початковою фазою φ , яку визначають за формулою $\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2}$.



Мал. 97. Векторні діаграми

Метод векторних діаграм широко застосовують, розв'язуючи практичні завдання, зокрема в електротехніці для розрахунку параметрів електричних кіл змінного струму.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

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

Приклади розв'язування задач

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

Дано:

$$m = 2 \text{ кг}$$

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

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

$$F_{\text{max}} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{п. max}} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{к. max}} \text{ — ?}; F \text{ — ?}$$

$$E_{\text{п}} \text{ — ?}; E_{\text{к}} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Максимальне значення сили визначаємо з формули

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

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

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

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

Щоб визначити силу в момент, коли фаза коливань дорівнює $\frac{\pi}{4}$, у вираз для сили $F = -m\omega^2 x_{\text{max}} \cos \omega t$ підставляємо значення фази, знаходимо: $F = -71 \text{ Н.}$

Аналогічно для фази коливань $\frac{\pi}{4}$ обчислюємо потенціальну енергію за формулою: $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \cos^2 \omega t = 1,25 \text{ Дж.}$ Кінетичну енергію можна визначити за однією з формул:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_{\text{max}}^2}{2} \sin^2 \omega t \text{ або } E_{\text{к}} = E_{\text{повна}} - E_{\text{п}}.$$

$$E_{\text{к}} = 2,5 \text{ Дж} - 1,25 \text{ Дж} = 1,25 \text{ Дж.}$$

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



Вправа 16

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

§ 21 Маятники

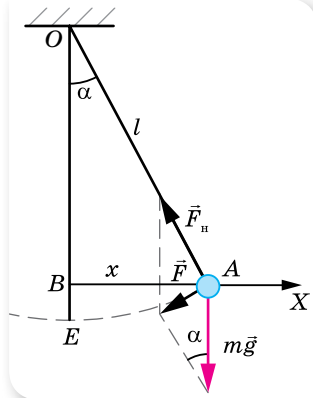
Період коливань пружинного маятника. З попередніх рівнянь, отриманих для коливань горизонтального пружинного маятника, видно, що прискорення в довільний момент часу пропорційне зміщенню: $a = -\omega^2 x$. Водночас, у будь-якій точці траєкторії сила пружності напрямлена до положення рівноваги і прямо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

рівнюючи обидва вирази для прискорення, отримуємо: $\omega^2 = \frac{k}{m}$ або

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Оскільки $T = \frac{2\pi}{\omega}$, то *період вільних коливань пружинного*

маятника: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Період коливань математичного (нитяного) маятника. *Математичний маятник* — це модель ідеальної коливальної системи. Реальний нитяний маятник (мал. 98, с. 112), що складається з невеликого тіла й довгої тонкої



Мал. 98. Нитяний маятник

Крім того, для малих кутів виконується співвідношення $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$. З трикутника OBA $\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{l}$, де l — довжина нитки.

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

Однакові причини виникнення коливань ведуть до однакових результатів. Виведемо формулу періоду коливань нитяного маятника так само, як ми це робили для пружинного маятника. Оскільки коливання математичного маятника є гармонічними, то прискорення в довільний момент часу пропорційне зміщенню, $a = -\omega^2 x$. Водночас у будь-якій точці траєкторії рівнодійна F напрямлена до положення рівноваги й прямо пропорційна зміщенню, $F = -\frac{mg}{l}x$. За другим законом Ньютона: $a = \frac{F}{m} = -\frac{g}{l}x$. Прирівнюючи обидва вирази для прискорення, отримуємо: $\omega^2 = \frac{g}{l}$ або $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$. Оскільки

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

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

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

нерозтяжної нитки (наприклад, сталевого дроту), можна вважати математичним маятником.

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

Відведемо коливне тіло в крайнє праве положення. У цьому разі рівнодійна сили тяжіння та сили натягу нитки напрямлена проти зміщення — до положення рівноваги (мал. 98). З малюнка видно, що за модулем ця рівнодійна дорівнює $F = mg \sin \alpha$.

Оскільки кут відхилення малий, то дуга $\curvearrowright EA$, по якій рухається кулька, мало відрізняється від півхорди BA , тому зміщення $x = BA$.

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

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

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

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

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

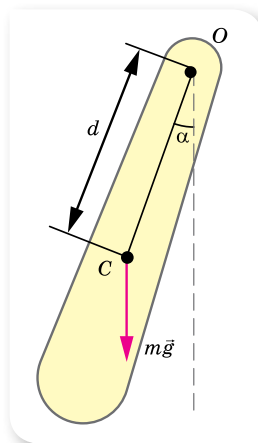
Період коливань фізичного маятника. Фізичний маятник — це абсолютно тверде тіло, що закріплене на осі, яка не проходить через центр мас тіла C і коливається під дією сили тяжіння відносно вертикальної осі (мал. 99).

За малих кутів відхилення ($\alpha < 5^\circ$) коливання маятника є гармонічними.

Період власних коливань фізичного маятника

визначають за формулою $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}}$, де J — момент інерції тіла відносно осі, m — маса тіла, g — прискорення вільного падіння, d — відстань від осі коливання до центра мас тіла.

За періодом коливань фізичного маятника просто визначити момент інерції різноманітних деталей (твердих тіл), що використовуються в техніці.



Мал. 99.
Фізичний маятник



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

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



Приклади розв'язування задач

Задача. Нитяний маятник завдовжки 1 м коливається з амплітудою 1 см. За який час він пройде шлях 1 см, якщо в початковий момент

маятник проходить положення рівноваги? За який час маятник пройде:
а) першу половину амплітуди; б) другу половину амплітуди?

Дано:

$$l = 1 \text{ м}$$

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

$$s = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$t - ?; t_1 - ?$$

$$t_2 - ?$$

Розв'язання:

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

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

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

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

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

Відповідь: 0,5 с; 0,167 с; 0,33 с.



Вправа 17

1. Маятник зробив 50 коливань за 1 хв 40 с. Визначте період, частоту та циклічну частоту коливань.
2. Як відносяться довжини нитяних маятників, якщо за однаковий час перший робить 10, а другий — 30 коливань?
3. За один і той самий час перший нитяний маятник робить 50 коливань, другий — 30. Визначте довжини цих маятників, якщо один з них на 32 см коротший від іншого.
4. Як зміниться хід годинника з маятником на металевому стержні: а) з підвищенням температури; б) під час підняття на гору; в) при переміщенні від полюса до екватора?
5. У скільки разів зміниться період коливань маятника в ракеті, яка стартує з поверхні Землі вертикально вгору з прискоренням $30 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$?
6. Нитяний маятник на Землі має період малих коливань 1 с. Яким буде період його коливань на Місяці?
7. Визначте прискорення вільного падіння в тому місці земної поверхні, де довжина секундного маятника буде 0,995 м.

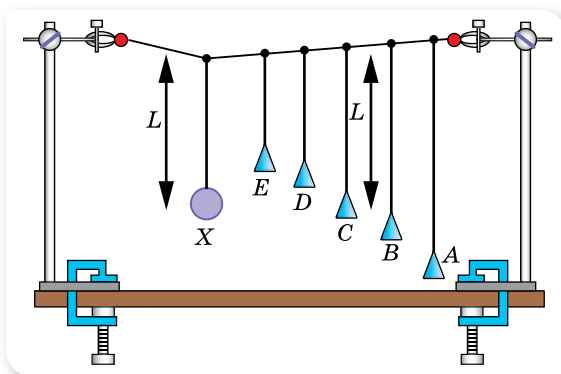
§ 22

Вимушені коливання. Резонанс. Автоколивання

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

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

Резонанс і його практичне використання. Дослідимо деякі особливості вимушених коливань. Для цього проведемо такий дослід. Закріпимо між двох штативів трос і підвісимо до троса маятники різної довжини (мал. 100).



Мал. 100. Демонстрація резонансу

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

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

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

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

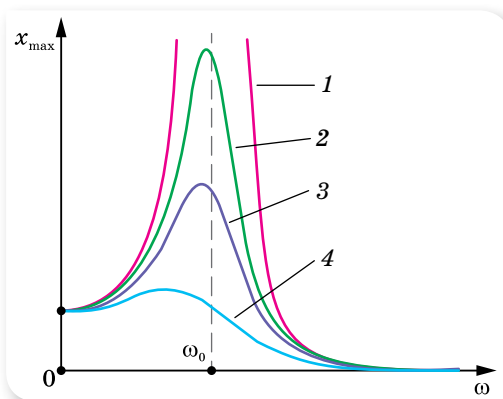
Скоротимо рівняння на $\cos \omega t$ і запишемо з нього вираз для амплітуди вимушених коливань, $x_{\max} = \left| \frac{F_{\max}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right|$.

Проаналізуємо отриману залежність і побудуємо її графік. Зі зміною частоти ω зовнішньої сили змінюється амплітуда вимушених коливань. Якщо ця частота наближається до частоти вільних коливань системи ω_0 , то знаменник дроби наближується до нуля. У цьому разі амплітуда різко збільшується, прямуючи до нескінченності (мал. 101; крива 1), за умови $\omega = \omega_0$.

Сили опору перешкоджають збільшенню амплітуди коливань. Зі збільшенням сил опору значення резонансної амплітуди зменшуватиметься (кривій 4 на мал. 101 відповідає максимальне значення сил опору).

Резонанс відіграє важливу роль у природі й техніці, як позитивну, так і негативну. Позитивними виявами є резонатори — підсилювачі звуку, настроювання коливальних контурів у радіозв'язку; негативними — руйнування фундаментів і конструкцій унаслідок коливань. Відомі випадки, коли руйнувалися мости під час переходу по них колони військових, які крокували «в ногу» і до того ж частота кроків збігалася із власною частотою коливань моста. У 1850 р. зруйнувався Анжерський підвісний міст над Луарою, по якому крокували французькі піхотинці. Тоді загинуло 226 осіб. У 1906 р. зруйнувався ланцюговий Єгипетський міст через річку Фонтанку в Петербурзі. У 1940 р., через кілька місяців після введення в дію, зруйнувався Такомський підвісний міст (США, штат Вашингтон), у якому виникли резонансні коливання під дією вітру (мал. 102).

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



Мал. 101. Резонансні криві



Мал. 102. Руйнування Такомського моста

Автоколивальні системи. Отже, незагасаючі вимушені коливання можна отримати, діючи на тіло, здатне коливатись, періодичною зовнішньою силою. Проте можна зробити так, щоб коливальна система сама

керувала зовнішнім впливом, забезпечуючи узгодженість дії сили зі своїм рухом. Така система називається автоколивальною, а її незагасаючі коливання — автоколиваннями.

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

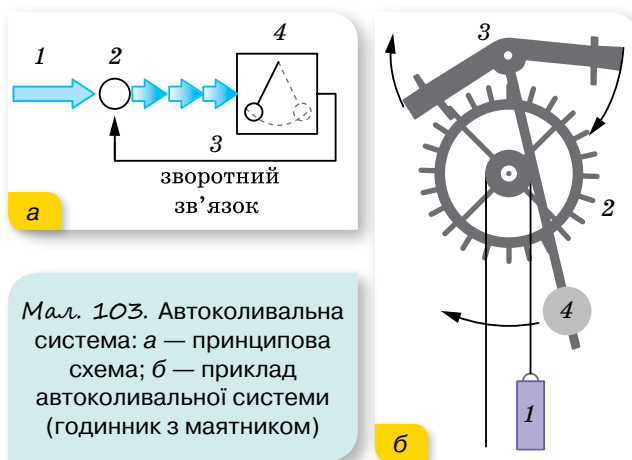
На відміну від вимушених коливань, частота й амплітуда автоколивань визначаються властивостями самої коливальної системи. Від вільних коливань автоколивання відрізняються тим, що вони з часом не загасають, а також тим, що їхня амплітуда не залежить від початкового короткочасного впливу, який збуджує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

У будь-якій автоколивальній системі виокремлюють три основні елементи (мал. 103, а): 1 — джерело енергії, 2 — передавальний пристрій зі зворотним зв'язком 3, який регулює надходження енергії із джерела в коливальну систему 4.

Прикладом автоколивальної системи є годинник з маятником (мал. 103, б). Джерелом енергії такої системи є гирия 1, передавальним пристроєм — храпове колесо 2 та анкер 3, коливальною системою — маятник 4.

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

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



Мал. 103. Автоколивальна система: а — принципова схема; б — приклад автоколивальної системи (годинник з маятником)

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



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

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

§ 23

Механічні коливання

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

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

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

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

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

Поздовжня хвиля утворюється, якщо коливання частинок середовища відбуваються в напрямку поширення хвилі.

Поздовжні хвилі виникають у середовищах, де можливі пружні деформації стиску та розтягу. Прикладом поздовжньої механічної хвилі є звук.

У газах і рідинах виникають лише поздовжні хвилі, які є чергуванням розріджень і згущень середовища. У твердих тілах можливі як поздовжні, так і поперечні пружні хвилі.

Для опису хвильових процесів вводять такі величини.

Фронт хвилі — геометричне місце точок, до яких на певний момент часу дійшли коливання.

Швидкістю поширення хвилі v називають швидкість поширення її фронту.

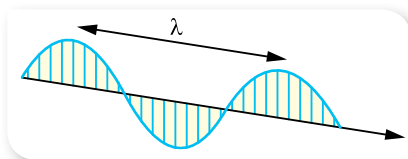
Швидкість пружної хвилі залежить від пружних властивостей і густини середовища $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, де E — модуль Юнга (характеризує пружні властивості середовища), ρ — густина середовища. В однорідному середовищі від точки, яка коливається, коливання поширюються в усіх напрямках зі сталою швидкістю.

Довжина хвилі λ — це відстань, на яку поширюється хвиля протягом одного періоду коливань (мал. 104), $\lambda = vT$, де v — швидкість поширення хвилі, T — період коливань джерела хвилі.

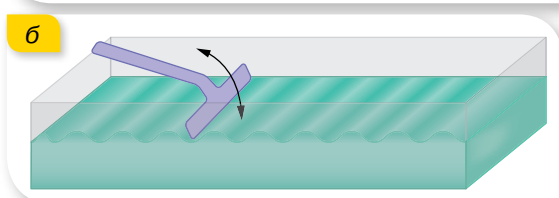
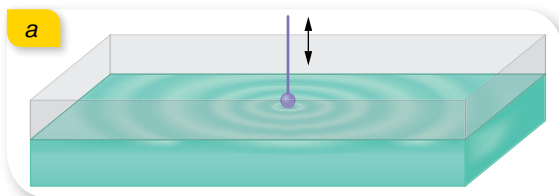
Точки середовища, віддалені одна від одної на відстань, що дорівнює довжині хвилі, коливаються в однакових фазах. Можна сказати, що довжина хвилі — це найменша відстань між двома точками, які коливаються в однаковій фазі.

Досить наочними і знайомими є хвилі на поверхні води. Для демонстрації та дослідження таких хвиль використовують неглибоку ванночку, заповнену водою (мал. 105). Якщо до поверхні води дотикається точкове джерело, що періодично коливається, то утворюються сферичні хвилі (мал. 105, а). Фронт хвилі від точкового джерела в однорідному середовищі — сфера.

Якщо джерелом є пластина, що періодично коливається, то утворюються плоскі хвилі (мал. 105, б). Плоска хвиля — це хвиля, фронт якої — площина.



Мал. 104. Графічне зображення довжини хвилі



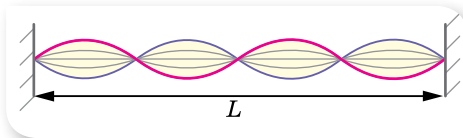
Мал. 105. Ванночки з водою для демонстрації: а — сферичної хвилі; б — плоскої хвилі

Рівняння плоскої гармонічної хвилі. Якщо коливання середовища спричинює періодична зовнішня сила, яка змінюється з часом за гармонічним законом, то породжені нею хвилі називають *гармонічними*. У цьому разі кожна частинка середовища, захоплена хвилею, здійснює гармонічні коливання із частотою зовнішнього впливу. Гармонічні хвилі є найпростішим і важливим видом хвильового руху. Ми обмежимося у подальшому розглядом саме цих хвиль.

Рівняння хвилі визначає положення коливної точки, яка лежить на відстані l від джерела в будь-який момент часу t . Якщо джерело коливань здійснює гармонічні коливання $x = x_{\max} \sin \omega t$, то відхилення цієї точки від положення рівноваги: $x = x_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{vT} \right)$ або $x = x_{\max} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right)$.

Відбивання механічних хвиль. Поширюючись у просторі, механічна хвиля може дійти до межі, де починається інше середовище. У такому разі механічні хвилі можуть відбиватися. На межі відбиття в момент відбивання може відбутись *відбивання із втратою півхвилі*, тобто після відбивання фаза коливань фронту хвилі змінюється на протилежну (наприклад, хвиля поширюється по шнуру опуклістю вперед, а після відбивання від поверхні — біжить уперед западиною), або *відбивання без втрати півхвилі* (хвиля, що до відбивання поширювалась опуклістю вперед, і після відбивання поширюватиметься опуклістю вперед).

Стояча хвиля — це хвиля, що утворюється як результат накладання основної та відбитої хвиль, які поширюються назустріч одна одній, мають однакові періоди й амплітуди (мал. 106).



Мал. 106. Стояча хвиля

Стояча хвиля має точки, у яких амплітуда коливань найбільша (*пучності*) і в яких вона дорівнює нулю (*вузли*).

Оскільки пряма й відбита хвилі переносять енергію у взаємно протилежних напрямках, то стояча хвиля енергії не переносить, хоча між окремими точками обмін енергією відбувається.

Стоячі хвилі утворюються за умови, що лінійні розміри тіла L , у якому поширюється хвиля, кратні одній четвертій довжини хвилі $\left(\frac{\lambda}{4} \right)$, тобто на відстані від джерела хвиль до межі, від якої хвилі відбиваються, розміщується ціле число чвертей хвилі.

Стоячі хвилі використовують для визначення довжини пружних хвиль, швидкості поширення хвиль, вивчення пружних властивостей тіл тощо. Механізм їх утворення покладено в основу конструювання струнних і духових музичних інструментів, органа.

Інтерференція та дифракція хвиль. Вам доводилося бачити, як на поверхні води поширюються хвилі, що йдуть із двох різних точок (мал. 107).

Ці хвилі зустрічаються, накладаються і продовжують поширення так, ніби їх рухові ніщо не заважало. Описану властивість хвиль називають *суперпозицією*.

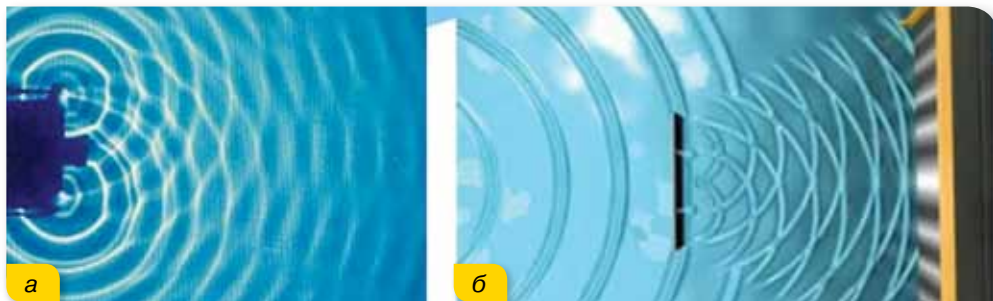
Якщо два джерела хвиль будуть коливатися з однаковою частотою і зберігатимуть сталою різницю фаз (такі джерела називають когерентними), то утворені від таких джерел хвилі будуть накладатися по-особливому (мал. 108, а). Під час накладання когерентних хвиль утворюється стійка картина коливань точок середовища, на якій видно, що в одних точках відбувається взаємне посилення хвиль та послаблення в інших, залежно від співвідношення між фазами цих хвиль. Описане явище називають *інтерференцією*.



Мал. 107. Накладання хвиль

Інтерференція — явище взаємного підсилення й послаблення коливань у різних точках середовища внаслідок накладання когерентних хвиль.

Відзначимо, що за інтерференції не відбувається простого додавання енергій хвиль. В інтерференційних максимумах інтенсивність результуючої хвилі більша за суму інтенсивностей хвиль, що накладаються, а в інтерференційних мінімумах — менша від їх суми. Тобто інтерференція хвиль приводить до перерозподілу енергії коливань між сусідніми областями середовища. Проте в середньому для великої області простору енергія результуючої хвилі дорівнює сумі енергій хвиль, які інтерферують, як і має бути згідно із законом збереження та перетворення енергії.

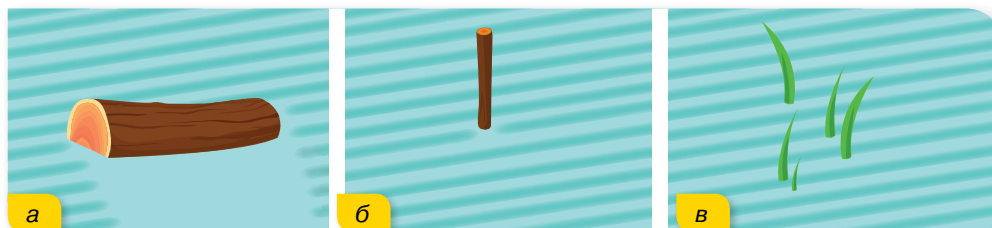


Мал. 108. Утворення інтерференційної картини: а — від двох когерентних джерел; б — від двох щілин (після проходження щілин також утворюються когерентні хвилі)

Розглянуті вище умови утворення стоячої хвилі є окремим випадком інтерференції.

Хвилям притаманне також явище огинання перешкод (мал. 115), яке називають *дифракцією*.

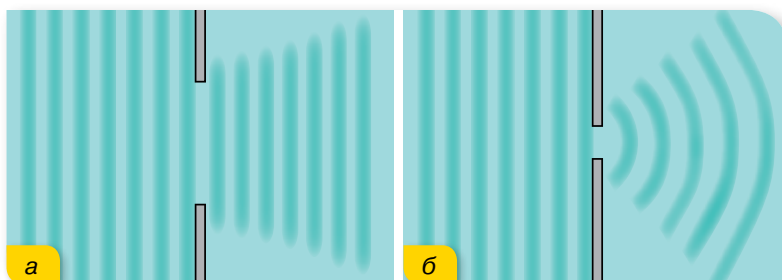
Перешкоди порушують прямолінійність поширення фронту хвилі. Якщо перешкода велика (порівнюючи з довжиною хвилі), то за нею хвиль немає (мал. 109, а). Якщо розмір перешкоди приблизно дорівнює довжині хвилі, то хвилі заходять за її краї (мал. 109, б), малу перешкоду хвилі огинають так, що за нею фронт хвилі не змінюється (мал. 109, в).



Мал. 109. Огинання перешкод

Вигинання фронту хвилі можна спостерігати і в разі її проходження крізь отвір (мал. 110).

Якщо отвір великий (порівнюючи з довжиною хвилі), то хвилі майже не заходять за його краї (мал. 110, а). Якщо отвір малий — хвилі помітно заходять за краї отвору (мал. 110, б). У цьому разі отвір є ніби самостійним джерелом хвиль, які поширюються за перешкодою в усі боки. У результаті проходження хвилі через отвір його краї стануть джерелами вторинних когерентних хвиль, які, поширюючись, утворюють *інтерференційну картину*.



Мал. 110. Вигинання хвиль по краю отвору

Дифракція — явище відхилення хвилі від прямолінійного поширення в разі проходження повз край перешкоди.

Наведений опис явищ інтерференції та дифракції є вельми спрощеним. Вивчаючи електромагнітні хвилі, зокрема світлові, ми ще раз будемо розглядати ці явища і встановимо кількісні співвідношення для них. Головне — описані властивості хвильового процесу, притаманні хвилям будь-якої природи, чи то механічним, чи електромагнітним.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть механізм утворення пружних механічних хвиль. **2.** У чому відмінність між поздовжньою та поперечною хвилями? У яких середовищах можуть поширюватися поздовжні хвилі, а в яких — поперечні? **3.** Від чого залежить швидкість поширення хвилі в пружному середовищі? **4.** Які властивості притаманні хвильовому рухові?



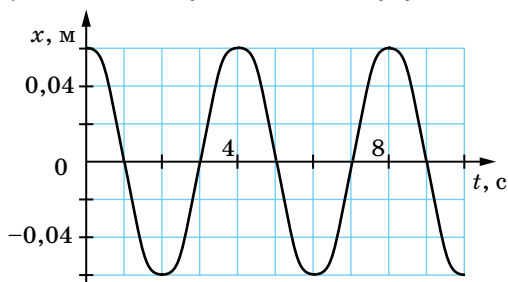
Перевірте себе (§ 18–23)



- Укажіть назву коливань, що відбуваються під впливом зовнішніх сил.

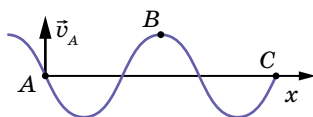
A гармонічні	B вільні
B автоколивання	Г вимушені
- Дівчинка, що гойдається на гойдалці, проходить положення рівноваги 30 разів за хвилину. Укажіть частоту коливань.

A 30 Гц	B 0,5 Гц
B 2 Гц	Г 0,25 Гц
- Матеріальна точка здійснює гармонічні коливання. На малюнку зображено графічну залежність її координати від часу. Укажіть амплітуду коливань.



- | | | | |
|---------------|---------------|---------------|----------------|
| A 4 см | B 6 см | B 8 см | Г 12 см |
|---------------|---------------|---------------|----------------|
- Тягарець, підвішений на пружині, здійснює вертикальні коливання. Укажіть правильне твердження.

A що більшою є маса тягарця, то більша частота коливань
B потенціальна енергія пружини максимальна, коли тягарець проходить положення рівноваги
B що більшою є жорсткість пружини, то меншим — період коливань
Г швидкість тягарця максимальна, коли тягарець перебуває в нижній точці
 - На малюнку зображено поперечну хвилю в певний момент часу. Як напрямлена швидкість у точці С?



- | | |
|----------------|-------------------|
| A угору | B ліворуч |
| B вниз | Г праворуч |

6. Амплітуда коливань матеріальної точки — 2 см, період коливань — 0,2 с. Укажіть на рівняння коливань, якщо вони почалися з амплітудного відхилення від положення рівноваги.
- А $x = 2 \sin 5\pi t$
 Б $x = 0,02 \cos 10\pi t$
 В $x = 0,02 \sin 0,1\pi t$
 Г $x = 0,02 \sin 10\pi t$
7. Звукова хвиля переходить із води у металевий борт судна. Укажіть, як змінюються характеристики хвилі.
- А частота хвилі збільшується, швидкість поширення не змінюється
 Б частота хвилі не змінюється, швидкість поширення збільшується
 В частота хвилі зменшується, довжина хвилі збільшується
 Г частота хвилі не змінюється, довжина хвилі зменшується
8. У нерухомому ліфті висить маятник, період коливань якого 1 с. З яким прискоренням рухається ліфт, якщо період коливань цього маятника став дорівнювати 1,1 с? Відповідь запишіть у метрах за секунду в квадраті.
9. Матеріальна точка масою 5 г здійснює гармонічне коливання із частотою 0,5 Гц. Амплітуда коливань — 3 см. Визначте: 1) швидкість точки в момент часу, коли зміщення становить 1,5 см; 2) максимальну силу, що діє на точку; 3) повну енергію точки, яка коливається.
10. На озері з човна в безвітряну погоду скинули якір. Дослідник, який стояв на березі, полічив, що хвиля досягла берега за 1 хв, а за 10 с відбувся 21 сплеск, почавши відлік з першого. Відстань між сусідніми гребенями хвиль становила 0,7 м. Визначте відстань від човна до берега.

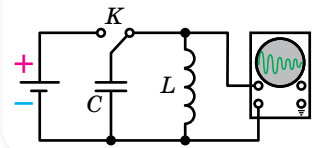
§ 24

Вільні електромагнітні коливання

Коливальний контур. Електромагнітні коливання були відкриті дещо випадково. Це сталося після того, як винайшли лейденську банку (перший конденсатор) і навчилися надавати їй великого заряду за допомогою електростатичної машини. Спостерігаючи електричний розряд банки, обкладки лейденської банки замикали на дротяну котушку. Виявилось, що сталіні спиці всередині котушки намагнічуються. У цьому нічого дивного не було: електричний струм і має намагнічувати сталіне осердя котушки. Здивувало інше: не можна було передбачити, який кінець осердя котушки буде північним полюсом, а який — південним. Повторювавши дослід приблизно в однакових умовах, діставали то один результат, то інший, і не відразу зрозуміли, що під час розряджання конденсатора через котушку виникають коливання.

Ми не можемо безпосередньо сприймати нашими органами чуття електромагнітні коливання так, як ми бачимо коливання маятника або чуємо коливання струни. Але можемо використати електронний осцилограф — пристрій, на екрані якого можна спостерігати за електромагнітними коливаннями.

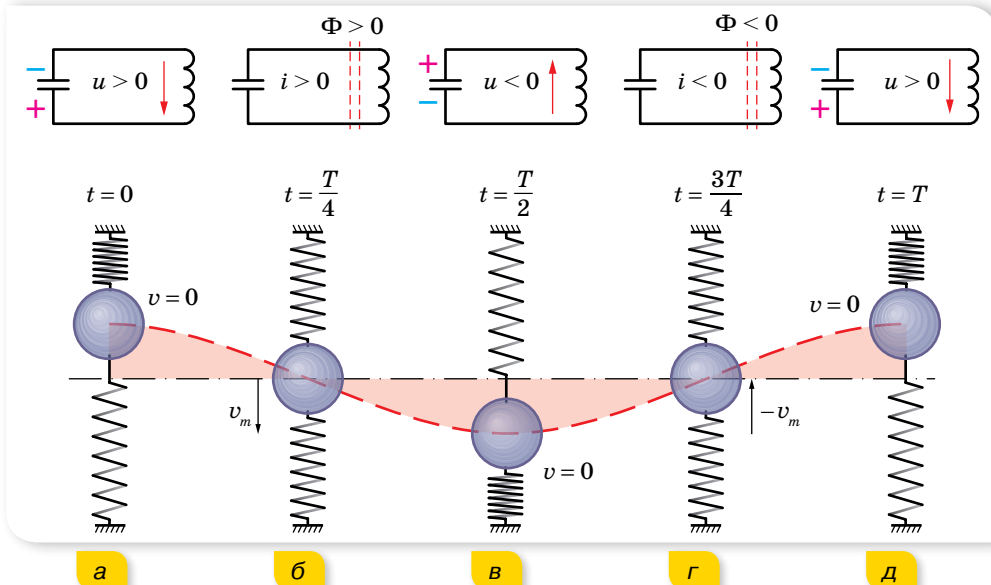
Проведемо дослід (мал. 111). Зарядивши конденсатор від джерела постійного струму, замкнемо його котушкою, до якої паралельно підключено осцилограф. На екрані осцилографа ми будемо спостерігати осцилограму, яка свідчить про наявність електромагнітних коливань. Отже, найпростішою установкою, в якій можна спостерігати електромагнітні коливання, є електричне коло — *коливальний контур*, до складу якого входить котушка індуктивністю L та конденсатор ємністю C . Такий коливальний контур називають закритим, оскільки він майже не випромінює енергії в простір.



Мал. 111.
Спостереження
електромагнітних
коливань

Коливання, які виникають у коливальному контурі після початкового виведення системи з положення стійкої рівноваги, здійснюються завдяки внутрішнім силам системи, не зазнаючи впливу з боку змінних зовнішніх сил, тобто є *вільними*.

Перетворення енергії в коливальному контурі. Розглянемо детальніше, як відбуваються електромагнітні коливання (мал. 112). (Для порівняння і наочності на малюнку з кожним станом коливального контура зіставлене певне положення тягарця, підвішеного на пружині, що здійснює механічні коливання.)



Мал. 112. Аналогія електромагнітних і механічних коливань

Перед початком конденсатор заряджають. У початковий момент ($t = 0$) після замикання обкладок зарядженого конденсатора через котушку в колі виникає струм, який збільшується поступово, оскільки його збільшенню протидіє вихрове електричне поле, що виникає внаслідок

збільшення магнітного потоку котушки. Упродовж часу $t = \frac{T}{4}$ струм зростає, поки вся енергія електричного поля конденсатора $W_e = \frac{CU^2}{2}$ не перетвориться на енергію магнітного поля котушки $W_m = \frac{LI^2}{2}$. (Цей процес аналогічний перетворенню енергії деформованої пружини на кінетичну енергію руху тягарця.)

З моменту $t = \frac{T}{4}$ струм у колі продовжує протікати внаслідок процесу самоіндукції, водночас конденсатор перезаряджається, між його пластинами зростає електричне поле, яке заважає протіканню струму. Струм зменшується поступово, оскільки його підтримує вихрове електричне поле, що виникає внаслідок зменшення магнітного поля котушки. Струм припиниться, коли вся енергія магнітного поля котушки перейде в енергію електричного поля конденсатора $\left(t = \frac{T}{2}\right)$. (Подібно до того, як тягарець у положенні рівноваги з максимальною швидкістю за інерцією продовжує рухатися вниз, стискаючи пружину. Кінетична енергія руху тягарця перетворюється на потенціальну енергію пружини.)

Потім процес повторюється у зворотному напрямку. З моменту $t = \frac{T}{2}$ конденсатор знову розряджається, і в контурі виникає струм зворотного напрямку. Енергія електричного поля зарядженого конденсатора зменшується, а магнітного поля — зростає. Момент часу $t = \frac{3}{4}T$, коли конденсатор повністю розрядиться, а сила струму досягне максимального значення і максимальною буде енергія магнітного поля, відповідає проходженню тягарцем положення рівноваги.

Після цього струм самоіндукції заряджатиме конденсатор, і коливальна система повернеться у вихідне положення ($t = T$).

В ідеальному випадку, якщо б у коливальному контурі не було втрат енергії, цей процес тривав би як завгодно довго. Коливання були б незатухаючими. Через інтервали часу, що дорівнюють періоду коливань, стан системи точно повторювався б. Повна енергія при цьому зберігалася б і в будь-який момент часу дорівнювала максимальній енергії електричного поля конденсатора або максимальній енергії магнітного поля котушки зі струмом, $W = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \text{const}$.

Коливання, які відбуваються в ідеальній системі без тертя, тобто без втрат механічної енергії, ще називають *власними*. **Власні коливання** — це теоретично можливі вільні незатухаючі коливання.

Насправді втрати енергії неминучі. Зокрема, котушка та з'єднувальні провідники мають опір R , і це веде до поступового перетворення енергії електромагнітного поля на внутрішню енергію провідника.

Рівняння гармонічних електромагнітних коливань. Вираз для зміни заряду й сили струму в *ідеальному коливальному контурі* (при $R \rightarrow 0$)

можна отримати із закону збереження енергії: $\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, де u та

i — миттєві значення напруги й сили струму. Оскільки $u = \frac{q}{C}$, $U_m = \frac{q_m}{C}$,

то $\frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$. Помноживши останній вираз почленно на $2C$, отри-

маємо: $q^2 + i^2LC = q_m^2$, або $q^2 + (i\sqrt{LC})^2 = q_m^2$.

Цей вираз геометрично можна зобразити у вигляді прямокутного трикутника, гіпотенуза якого q_m , а катети — q та $i\sqrt{LC}$ (мал. 113). З ма-

люнка видно, що $q = q_m \cos \varphi$, $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$.

Отримані вирази свідчать, що заряд конденсатора й сила струму в котушці змінюються за гармонічним законом. Водночас між коливаннями заряду на обкладках конденсатора й сили струму в колі існує різниця фаз $\frac{\pi}{2}$. З малюнка

також видно, що $\cos \varphi = \frac{q}{q_m}$. Оскільки миттєве

значення заряду q конденсатора — величина змінна, а амплітудне значення q_m — стала, то φ — також постійно змінюється. Швидкість

зміни фази коливань $\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\right)$ є циклічною частотою ω . Тепер формулу для зміни заряду можна

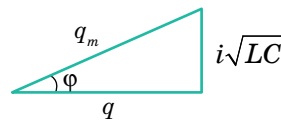
записати у вигляді $q = q_m \cos \omega t$. Ураховуючи, що $i = q'$, формулу зміни сили струму отримаємо,

обчисливши похідну, $i = q' = -q_m \omega \sin \omega t$, де $q_m \omega = I_m$ — максимальне значення сили струму. Зрештою маємо: $i = -I_m \sin \omega t$.

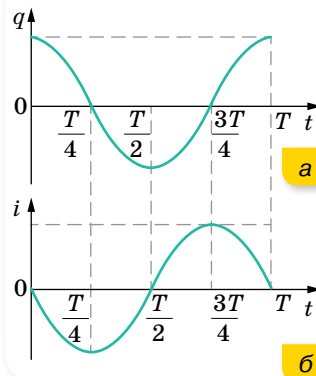
Оскільки напруга на конденсаторі в будь-який момент часу визначається співвідношенням $U = \frac{q}{C}$, то рівняння зміни напруги в коливальному контурі має вигляд $u = \frac{q_m}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t$, де $U_m = \frac{q_m}{C}$ — амплітуда напруги.

Графіки коливань заряду та сили струму наведено на малюнку 114.

Формула періоду власних електромагнітних коливань. Знайдемо формулу для визначення періоду власних коливань, використавши те, що всі закономірності гармонічних коливань у механіці зберігають свою суть і для електромагнітних коливань. Як відомо, період коливань зв'язаний із циклічною частотою співвідношенням $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Зіставивши дві форми



Мал. 113. До виведення рівняння електромагнітних коливань



Мал. 114. Графіки коливань заряду (а) та сили струму (б)

рівняння $i = \frac{q_m}{\sqrt{LC}} \sin \varphi$ та $i = -q_m \omega \sin \omega t$, бачимо, що $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Тоді

$T = 2\pi\sqrt{LC}$. Цю формулу для періоду вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі теоретично вивів у 1853 р. англійський фізик Вільям Томсон, тому її називають *формулою Томсона*. З формули видно, що період власних коливань зростає зі збільшенням ємності та індуктивності контура. Пояснюють це тим, що зі збільшенням індуктивності контура сила струму повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А що більшою є ємність контура, то більше часу потрібно для перезаряджання конденсатора.

Застосовуючи формулу зв'язку між періодом коливань T і частотою ν , визначимо *власну частоту коливань* у контурі: $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Із цієї формули видно, що для одержання в контурі коливань високої частоти ємність й індуктивність контура мають бути якомога меншими.

Отримання незатухаючих коливань. У реальному контурі заряджений конденсатор спричинює виникнення лише затухаючих коливань. У кінці кожного періоду коливань заряд на пластинах конденсатора зменшується порівняно з початком періоду. Зрозуміло, заряд зберігається, але зменшується на однакову за модулем величину позитивного заряду на одній пластині й негативного на іншій. Унаслідок чого енергія коливань зменшується, оскільки вона пропорційна квадрату заряду, $W_e = \frac{q_m^2}{2C}$. Щоб коливання не затухали, потрібно компенсувати втрати енергії за кожний період.

Поповнювати енергію в контурі можна, підзаряджаючи конденсатор. Для цього потрібно періодично вмикати контур у коло джерела постійної напруги. При цьому конденсатор має вмикатися в коло джерела лише в ті проміжки часу, коли приєднана до позитивного полюса джерела пластина заряджена позитивно, а та, що приєднана до негативного полюса, — негативно. Тільки за такої умови джерело підзаряджатиме конденсатор, поповнюючи його енергію. Тобто джерело постійної напруги, яке весь час під'єднане до конденсатора контура, не може підтримувати в ньому незатухаючих коливань. Адже половину періоду енергія надходитиме в контур, а в наступну половину періоду — повертатиметься до джерела. Незатухаючі коливання встановляться в контурі лише за умови, що джерело вмикатиметься в контур у ті інтервали часу, коли це потрібно. Система, яка сама регулює надходження енергії в коливальний контур для компенсації її втрат, називається *автоколивальною*.

Про принцип дії генератора на транзисторі читайте в електронному додатку.





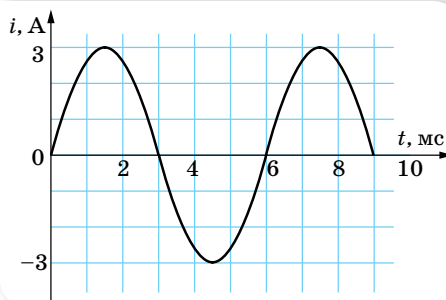
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. У початковий момент часу конденсатор заряджений. Якою буде локалізація енергії в моменти $\frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}$ від початку коливань? 2. Заряд q на пластинах конденсатора коливального контура змінюється із часом t за законом $q = 10^{-6} \cos 10^4 \pi t$ (усі величини в СІ). Запишіть закон залежності сили струму від часу, $i(t)$. Визначте період і частоту коливань у контурі, амплітуду коливань заряду й амплітуду коливань сили струму.



Приклади розв'язування задач

Задача¹. На малюнку 115 наведено графік залежності сили струму від часу для вільних електромагнітних коливань у контурі. Визначте ємність конденсатора, якщо індуктивність котушки дорівнює $0,1$ Гн. Запишіть рівняння залежності сили струму в контурі й напруги від часу. Побудуйте графік залежності $u(t)$.



Мал. 115

Дано:

Графік $i(t)$
 $L = 0,1$ Гн
 $C = ?$

$u(t) = ?$
 $i(t) = ?$

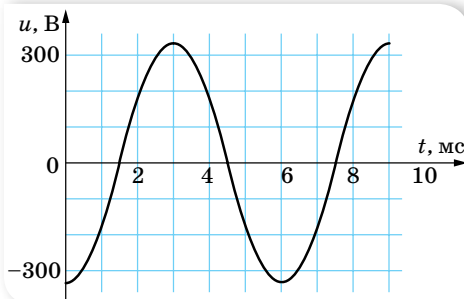
Розв'язання:

З графіка видно, що $T = 6$ мс $= 6 \cdot 10^{-3}$ с. За формулою Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$ знаходимо $C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}$, $C = 9,1$ мкФ.

З графіка видно, що $I_m = 3$ А. Тоді з рівності максимальних енергій у коливальному контурі, $\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2}$, обчислюємо $U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$, $U_m = 314$ В.

Оскільки $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{\pi}{3} \cdot 10^3$ с⁻¹ і коливання сили струму, як видно з графіка, здійснюються за законом синуса з початковою фазою, яка дорівнює нулю, а саме $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$, то рівняння зміни напруги матиме вигляд $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.

Графік залежності $u(t)$ зображено на малюнку 116.



Мал. 116. Графік коливань напруги

Відповідь: $C = 9,1$ мкФ; $i = 3 \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$; $u = -314 \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot 10^3 t\right)$.

¹ Якщо в умові задачі немає ніяких застережень, то вважається, що коливальний процес відбувається в ідеальному коливальному контурі.



Вправа 18

1. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 1 мкФ і котушки індуктивністю 4 Гн. Амплітуда коливань заряду на конденсаторі становить 100 мкКл. Напишіть залежності $q(t)$, $i(t)$, $u(t)$. Визначте амплітуди коливань сили струму та напруги.
2. Коливальний контур складається з котушки, індуктивність якої 0,2 мГн, та двох однакових конденсаторів ємністю 4 мкФ кожний, з'єднаних послідовно. Визначте період вільних коливань у контурі, максимальний заряд конденсатора та максимальну напругу на кожному конденсаторі. Максимальна сила струму в контурі — 0,1 А.
3. У коливальному контурі індуктивністю L і ємністю C конденсатор заряджений до максимальної напруги U_m . Якою буде сила струму в момент, коли напруга на конденсаторі зменшиться у 2 рази? Коливання вважайте незатухаючими.
4. Заряджений конденсатор ємністю 10 мкФ підключили до котушки індуктивністю 0,1 Гн. Через 5 періодів амплітуда коливань напруги в контурі становила 95 % від початкової напруги на конденсаторі. Визначте активний опір контура.
5. Конденсатор, який має ємність 10 мкФ, зарядили до напруги $U_m = 400$ В і приєднали до котушки. Після цього в контурі виникли затухаючі коливання. Яка кількість теплоти виділиться в контурі за час, протягом якого амплітуда коливань зменшиться у 2 рази?
6. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначте енергію електричного поля конденсатора й магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму буде у 2 рази меншим, ніж амплітудне значення.

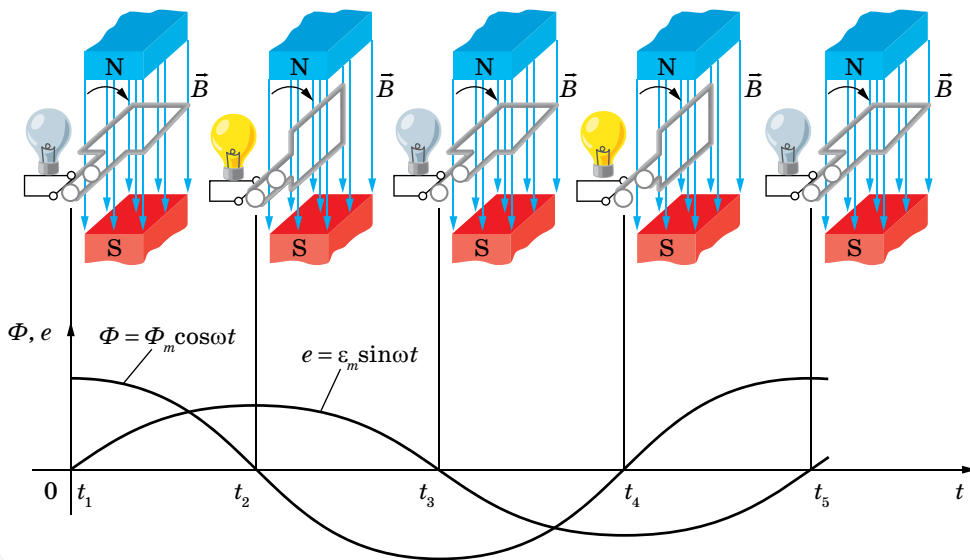
§ 25

Змінний струм

Обертання прямокутної рамки в однорідному магнітному полі.
Досліджуючи явище електромагнітної індукції, з'ясували, що у випадку обертання рамки в магнітному полі в ній виникає індукційний струм. Дослідимо це явище детальніше.

Нехай у початковий момент часу рамка розташована так, що напрямком нормалі \vec{n} до неї збігається з напрямком індукції магнітного поля \vec{B} , у якому рамка обертається (мал. 117). Магнітний потік, який при цьому пронизує рамку, $\Phi_m = BS$, має максимальне значення. Рамка обертається рівномірно з кутовою швидкістю ω за годинниковою стрілкою, отже, в будь-який момент часу t кут повороту φ рамки $\varphi = \omega t$. Відповідно значення магнітного потоку, який пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = BS \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$. Ця формула визначає зміну магнітного потоку через контур рамки площею S , яка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі індукцією B з кутовою швидкістю ω .

Згідно із законом електромагнітної індукції, в разі зміни магнітного потоку, що пронизує контур, виникає електрорушійна сила індукції $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Для швидкозмінних процесів $\Delta t \rightarrow 0$, тоді, за означенням похідної, $\varepsilon_i = -\Phi'$. Формула для обчислення ЕРС індукції, що виникає в рамці, у будь-який момент часу t набуває вигляду $\varepsilon_i = -\Phi' = BS \omega \sin \omega t$.



Мал. 117. Обертання рамки в магнітному полі

Отже, за умови рівномірного обертання рамки в однорідному магнітному полі в ній виникає ЕРС індукції, яка з часом змінюється за синусоїдальним законом. Якщо рамка має N витків, то ЕРС індукції на її клемі буде в N разів більшою: $\varepsilon_i = BS\omega \sin \omega t$. Зрозуміло, що максимальних значень ε_i досягає в ті моменти, коли $\sin \omega t = \pm 1$. Тоді максимальне значення ЕРС індукції $\varepsilon_m = BS\omega$. За один оберт рамки електрорушійна сила змінює своє значення і знак двічі, тобто здійснює одне повне коливання.

Вимушені електромагнітні коливання — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, спричинені електрорушійною силою, що періодично змінюється.

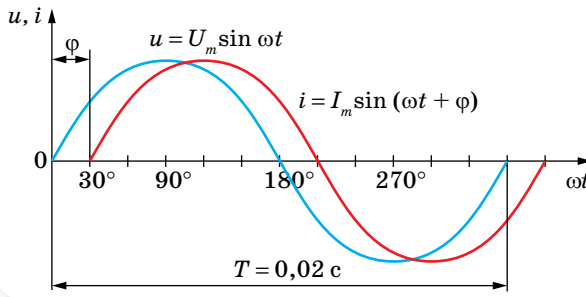
Закон зміни ЕРС можна записати так: $e = \varepsilon_m \sin \omega t$, де колова (циклічна) частота ω збігається з кутовою швидкістю обертання рамки в магнітному полі. Для кутової частоти справджуються формули: $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, де ν — частота коливань, T — період коливань.

Змінний струм. Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний струм.

Змінними вважають струми, які змінюються як за значенням, так і за напрямком.

Якщо до генератора змінного струму, напруга на полюсах якого змінюється за законом $u = U_m \sin \omega t$, під'єднати будь-яке навантаження (наприклад, електричний двигун, батарею конденсаторів, нагрівальний

прилад і т. ін.), по колу проходитьиме змінний струм $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, де φ — зсув фаз між коливаннями сили струму та напруги (мал. 118). Причиною виникнення зсуву фаз між струмом і напругою в загальному випадку є різний опір кола змінного струму (про це детальніше — в наступних параграфах).



Мал. 118. Графіки зміни напруги та сили змінного струму

Діючі значення сили струму та напруги. У колі змінного струму напруга й сила струму повсякчас змінюються. Постає запитання: якими значеннями сили струму чи напруги характеризувати цей струм? Середні значення сили струму й напруги за період дорівнюють нулю і не можуть бути їхніми характеристиками. Проте середнє значення квадрата сили струму за період відмінне від нуля. Пригадаймо, що кількість виділеного в провіднику тепла при проходженні по ньому постійного струму змінюється пропорційно квадрату сили струму, $Q \sim I^2$. Якщо сконструювати вимірювальний прилад (тепловий амперметр), у якого відхилення стрілки буде пропорційним квадрату сили струму, і включити його в коло змінного струму, то він покаже певне значення. Який фізичний зміст цього показу?

Оскільки шкала приладу відградуєвана для постійного струму, то можна зробити висновок, що змінний струм за своїм тепловим ефектом еквівалентний постійному струму, силу якого показує на шкалі приладу стрілка. Це дає змогу ввести характеристику змінного струму — *ефективне (або діюче) значення сили змінного струму*.

Ефективним (або діючим) значенням сили змінного струму називають силу такого постійного струму, який за один період змінного струму виділяє стільки ж тепла, скільки останній виділяє за той самий час.

Усі амперметри, призначені для змінного струму, показують ефективне значення сили струму.

Оскільки середнє за період значення квадрата сили струму становить $\frac{I_m^2}{2}$, то корінь квадратний із цього виразу й буде визначати діюче значення

Найпростішим способом одержання низькочастотних змінних струмів є обертання рамки з провідників в однорідному магнітному полі (або навпаки — обертання магнітного поля, яке перетинає нерухомі провідники). Цей принцип закладено в роботу генераторів змінного струму (індукційних генераторів).
Читайте про них в електронному додатку.



сили струму $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Так само визначають і діюче значення напруги

та ЕРС змінного струму: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$.

У США й Канаді, наприклад, стандартна напруга мережі змінного струму дорівнює 120 В, що відповідає 170 В амплітудного значення. У Європі ефективна напруга 240 В, амплітудна відповідно — 340 В. У нашій країні ефективна напруга 220 В, амплітудна — 310 В. Усі вольтметри, призначені для змінного струму, показують ефективні значення ЕРС і напруги.

Потужність у колі змінного струму. У випадку постійного струму потужність визначається за формулою $P = UI$. Для кола змінного струму ця формула не застосовна, оскільки сила струму й напруга змінюються. Але сила струму й напруга мають постійні амплітудні значення і змінюються за однаковими законами, отже, і середні значення потужності за будь-який період і за будь-яку кількість періодів буде однаковим. Унаслідок цього й середня потужність у колі змінного струму буде постійною. Отже, щоб знайти потужність змінного струму, достатньо визначити середню потужність за один період: $P = \frac{A}{T}$, де A — середня робота струму за період T .

Щоб визначити роботу змінного струму за період, скористаємось таким способом. Розіб'ємо період на велику кількість дуже маленьких інтервалів часу Δt . Тоді на кожному такому інтервалі силу струму та напругу можна вважати постійними, а середні значення потужності струму буде визначатися миттєвими значеннями сили струму та напруги, $P = iu$.

Робота струму ΔA за малий інтервал часу Δt дорівнює $\Delta A = iu\Delta t = I_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot U_m \sin \omega t \cdot \Delta t$.

Скориставшись формулою добутку синусів:

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) \cos(\alpha + \beta)],$$

можна записати: $\Delta A = \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \Delta t$. Робота струму за весь період дорівнює сумі робіт ΔA .

$$\begin{aligned} A &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \left[\cos \varphi - \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \Delta t = \\ &= \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos \varphi - \sum \frac{1}{2} I_m U_m \Delta t \cos 2 \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right). \end{aligned}$$

У цьому виразі $\frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$ — стала, і її можна винести за знак суми; сума косинусів подвійного кута за період дорівнює нулю, і $\sum \Delta t = T$.

Отже, робота струму за період становить $A = \frac{1}{2} I_m U_m T \cos \varphi$. Тоді середня потужність струму за період: $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Як можна отримати ЕРС, яка б змінювалася за законом синуса? 2. Який струм називають змінним? Що таке діючі значення сили струму та напруги?



Приклади розв'язування задач

Задача. В однорідному магнітному полі з індукцією $0,1$ Тл розміщено виток із провідника, площа контура якого $0,1$ м², а опір 2 Ом, таким чином, що його площина перпендикулярна до ліній індукції. Виток замкнено на гальванометр. Повний заряд, що пройшов через гальванометр під час повороту витка, дорівнює $7,5 \cdot 10^{-3}$ Кл. На який кут повернули виток?

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$S = 0,1 \text{ м}^2$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$\Delta q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$$

α — ?

Розв'язання:

Заряд $\Delta q = I \Delta t$. За законом Ома сила струму $I = \frac{\varepsilon_i}{R}$.

ЕРС індукції ε_i визначаємо за законом Фарадея:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t},$$

де $\Phi_1 = BS$ — потік магнітної індукції через площу контура, що охоплює виток на початку повороту; $\Phi_2 = BS \cos \alpha$ — кінцевий потік. Для індукційного заряду маємо вираз:

$$\Delta q = \frac{(BS - BS \cos \alpha) \Delta t}{R \Delta t} = \frac{BS(1 - \cos \alpha)}{R}; \quad \cos \alpha = 1 - \frac{R \Delta q}{BS};$$

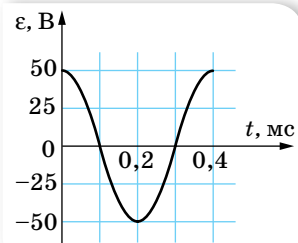
$$\cos \alpha = 1 - \frac{2 \text{ Ом} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м}^2} = -0,5; \quad \alpha = 120^\circ.$$

Відповідь: $\alpha = 120^\circ$.



Вправа 19

- Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі потік магнітної індукції, який пронизує її, змінюється залежно від часу за законом $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$ (усі величини задано в одиницях СІ). Обчисліть похідну (Φ') і напишіть формулу залежності ЕРС від часу $e = e(t)$. У якому положенні була рамка на початку відліку часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення магнітного потоку та ЕРС?
- Рамка, що має площу 200 см², обертається з кутовою швидкістю $50 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ в однорідному магнітному полі, індукція якого $0,4$ Тл. Напишіть формули залежності магнітного потоку та ЕРС від часу, якщо за $t = 0$ нормаль до площини рамки перпендикулярна до ліній індукції поля.
- За графіком (мал. 119) визначте амплітудне значення змінної ЕРС, її період і частоту. Запишіть формулу зміни ЕРС із часом.



Мал. 119

4. Зміну сили струму залежно від часу задано рівнянням $i = 5 \cos 200\pi t$. Визначте частоту та період коливаль, амплітуду сили струму, а також значення сили струму при фазі $\frac{\pi}{3}$ рад.
5. Яке значення напруги буде через 10, 15 і 30 мс, якщо амплітуда напруги становить 200 В, а період — 60 мс? Вважайте, що коливання напруги здійснюються за синусоїдальним законом, з початковою фазою, яка дорівнює нулю.
6. Неонова лампа починає світити, коли напруга на її електродах досягне точно визначеного значення. Яку частину періоду світитиме лампа, якщо її ввімкнути в мережу, діюче значення напруги в якій дорівнює цій напрузі?

§ 26

Активні та реактивні навантаження в електричному колі змінного струму

Активні та реактивні навантаження. У колах змінного струму існують два принципово різних види навантажень — активні й реактивні. Навантаження, в якому вся підведена електрична енергія перетворюється на інший вид енергії, називають *активним*, опір цього навантаження також називають *активним опором*.

Величина струму в колі змінного струму залежить не тільки від його активного опору. У будь-якому колі змінного струму діє електрорушійна сила індукції, яка, за правилом Ленца, перешкоджає будь-якій зміні електричного струму в колі, затримує наростання струму і зменшує його діюче значення, тобто діє як опір. Цей опір називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

Крім того, в колі змінного струму після його розмикання по провідниках (особливо в кабелях) ще протягом деякого часу протікає струм, наявність якого можна виявити чутливим амперметром. Це пояснюється тим, що провідники, якими приєднані споживачі, подібні до конденсатора, що підтримує в колі зарядний і розрядний струми. Ці струми при замиканні кола збільшують діюче значення струму в споживачі. Вплив ємності кола на величину діючого значення змінного струму враховується його *ємнісним опором* X_C .

Отже, коло змінного струму має три опори: активний, індуктивний та ємнісний. Індуктивний і ємнісний опори називають *реактивними опорами*.

Природа реактивних опорів польова, тобто їхнє походження пов'язане зі змінами електричного поля (наприклад, конденсатора) або магнітного (наприклад, котушки зі струмом). Реактивні опори не спричиняють необоротних перетворень енергії. У колах лише з реактивними опорами відбуваються тільки оборотні процеси: протягом першої чверті періоду енергія струму перетворюється на енергію електричного поля конденсатора (або магнітного поля котушки), а протягом другої чверті періоду енергія поля знову перетворюється на енергію струму. Тому в таких

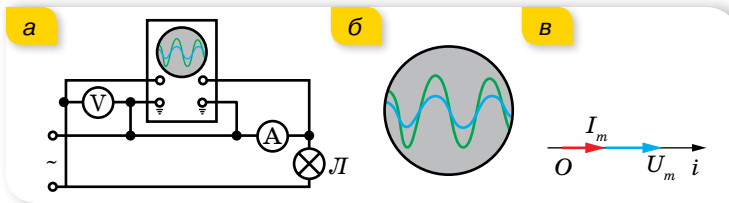
колах середня потужність за період дорівнює нулю, незважаючи на струм у колі. Це легко продемонструвати, увімкнувши в коло з конденсатором ватметр. Стрілка цього приладу не відхиляється, хоча в колі є напруга й тече струм, які реєструють відповідно вольтметр і амперметр.

Розглянемо спочатку найпростіші ідеальні кола змінного струму, які мають лише один із трьох опорів, а потім — складніші.

Активний опір у колі змінного струму. Електричні кола, що складаються з електричних ламп, нагрівальних приладів, реостатів і з'єднувальних проводів, практично можна вважати колами тільки з активним опором. У цих колах електрична енергія майже цілком перетворюється на теплову.

Проведемо такий дослід. Підключимо до генератора змінного струму дуже низької частоти активне навантаження, наприклад, лампу розжарювання. Генератор створює в колі змінне електричне поле, напруга якого змінюється синусоїдально. Підключимо паралельно лампі вольтметр, а послідовно з лампою — амперметр. Замкнувши коло, побачимо, що стрілки приладів одночасно проходять через нульові й максимальні значення.

Якщо, крім вольтметра й амперметра, додати двоканальний осцилограф, підключений так, як показано на малюнку 120, а, то на його екрані спостерігатимемо збіг осцилограм сили струму та напруги за фазою (мал. 120, б).



Мал. 120. а — осцилограф у колі змінного струму з активним навантаженням; б — осцилограма; в — векторна діаграма

У колах змінного струму з активним навантаженням коливання сили струму збігаються за фазою з коливаннями напруги, отже, якщо $u = U_{\max} \sin \omega t$, то й $i = I_{\max} \sin \omega t$.

Фазові співвідношення між струмом і напругою в колах змінного струму стають особливо наочними у векторному зображенні. Для цього візьмемо довільну вісь Oi , що називається віссю струму, і від точки O відкладемо вектор сили струму довжиною I_m . Оскільки в колі з активним опором коливання сили струму й напруги збігаються за фазою, вектор напруги буде напрямлений так само, як і вектор сили струму (мал. 120, в)

Значення активного опору R у колі змінного струму можна визначити як відношення миттєвих значень напруги та струму або як відношення амплітуд напруги та струму, а також їх амплітудних або діючих значень:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin \omega t} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}.$$

Як ми з'ясували, середня потужність змінного струму за період визначається через максимальні значення напруги та сили струму і зсув фаз між ними, $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$, або через діючі значення, $P = IU \cos \varphi$.

В електричному колі, яке містить лише активні опори, струм і напруга збігаються за фазами ($\cos \varphi = 1$), тому середня потужність, що споживається активним опором за період, дорівнює добуткові діючих значень струму й напруги. Уся ця потужність витрачається на нагрівання: $P = UI = I^2 R$.

Обчислена в такий спосіб потужність вимірюється у ватах і називається *активною потужністю*.

Конденсатор у колах постійного та змінного струму. Підключимо до джерела постійного струму конденсатор великої ємності та амперметр. У момент замикання кола стрілка амперметра відхиляється на кілька поділок, а потім повертається в нульове положення. Це відбувається тому, що при замиканні кола проходить короткочасний струм зарядки конденсатора до напруги джерела. Після того як конденсатор зарядиться, струм у колі припиниться. Якщо ж подібне коло (але з амперметром змінного струму) під'єднати до джерела змінного струму, можна спостерігати, що струм у колі не припиняється.

На перший погляд, це здається дивним: у колі, розімкнутому діелектриком конденсатора, проходить струм! Пояснюється це тим, що змінний струм — це вимушені коливання, зумовлені дією змінного поля генератора. Конденсатор протягом першої чверті періоду заряджається: на його пластинах з'являються електричні заряди. Протягом другої чверті періоду конденсатор розряджається. Відповідно протягом третьої чверті конденсатор знову заряджається, а протягом четвертої чверті — розряджається. У колі тече струм перезарядки конденсатора.

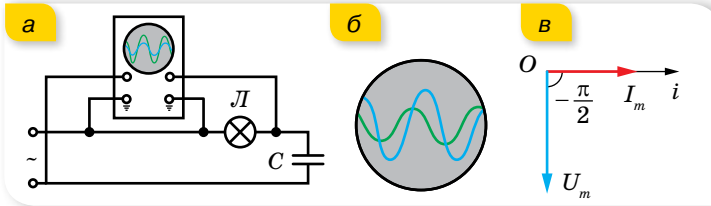
Якщо до генератора змінного струму приєднати лампу розжарювання, вона світитиме яскраво. Якщо в це коло послідовно з лампою включити конденсатор, яскравість лампи зменшиться. Це свідчить про зменшення сили струму, зумовлене збільшенням опору.

Отже, конденсатор чинить змінному струму опір, який називають *ємнісним опором*, позначають його X_C . Причиною цього опору є електричне поле зарядів на пластинах конденсатора, це поле протидіє полю джерела струму.

Формулу для визначення ємнісного опору можна вивести за допомогою математичних перетворень. Напруга на конденсаторі $u = \frac{q}{C}$ дорівнюватиме напрузі на кінцях кола: $u = U_m \sin \omega t$. Звідки $q = U_m C \sin \omega t$. Ураховуючи, що $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q' = U_m C \omega \cos \omega t$, де $U_m C \omega = I_m$, останній вираз можна записати у вигляді $\frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}$, де $\frac{1}{\omega C}$ є виразом для визначення ємнісного опору — опору, який чинить конденсатор змінному струмові. Остаточно $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Ємнісний опір можна визначати й через відповідні діючі значення сили струму та напруги: $X_C = \frac{U}{I}$.

Закон Ома для ділянки кола з ємнісним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_C}$.



Мал. 121. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з конденсатором (а, б); в — векторна діаграма

Якщо на один вхід двоканального осцилографа (мал. 121, а) подати напругу з конденсатора, а на інший — напругу, миттєве значення якої пропорційне силі струму в колі (цю напругу знімають з електролампи), то на екрані можна побачити одночасно осцилограми обох коливань — напруги та сили струму. Уважний аналіз осцилограм показує, що коливання сили струму та коливання напруги в колі з конденсатором зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання сили струму випереджають за фазою коливання напруги (мал. 121, б). На перший погляд, це здається дивним. Проте результати дослідів мають простий фізичний зміст: напруга на конденсаторі в довільний момент часу визначається наявним на пластинах електричним зарядом, який утворюється в результаті проходження струму, необхідного для зарядки конденсатора. Тому коливання напруги відстають від коливань сили струму.

У колах змінного струму, що містять ємнісне навантаження, коливання напруги $u = U_m \sin \omega t$ відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, $i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Фазові співвідношення між силою струму й напругою на ділянці кола з конденсатором зображено за допомогою векторних діаграм на малюнку 121, в. Оскільки коливання напруги відстають за фазою на чверть періоду від коливань сили струму, то вектор напруги повернуто щодо вектора сили струму на $-\frac{\pi}{2}$.

Відомо, що потужність у колі змінного струму визначається формулою $P = IU \cos \varphi$. Оскільки зсув фаз між коливаннями струму й напруги в колі з ємнісним навантаженням становить $\frac{\pi}{2}$, а $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ і $P = 0$. Такий

результат покаже й ватметр, включений в електричне коло змінного струму з ємнісним опором.

Котушка в колах постійного та змінного струму. Якщо підключити до джерела постійного струму котушку, яка має велику кількість витків з мідного дроту великого перерізу, і виміряти значення сили струму й напруги в колі, то можна побачити, що сила струму в колі доволі значна за невеликої напруги. Тобто опір котушки постійному струмові незначний.

Якщо ж цю котушку під'єднати до джерела змінного струму з такою самою напругою й замінити амперметр і вольтметр на прилади для вимірювання змінного струму, то помітимо, що сила струму значно зменшиться. Тобто змінному струмові котушка¹ чинить більший опір, ніж постійному.

Опір, який чинить котушка індуктивності змінному струмові, називають *індуктивним опором* і позначають X_L .

За проходження змінного струму через котушку індуктивності внаслідок явища самоіндукції виникає індукційне електричне поле, яке протидіє полю, що створюється генератором. Індукційне електричне поле і є причиною індуктивного опору.

Формулу для визначення індуктивного опору отримаємо математичним шляхом. Якщо сила струму в колі змінюється за гармонічним законом $i = I_m \sin \omega t$, то ЕРС самоіндукції: $e_c = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t$; урахувавши, що $u = -e_c$, напруга на кінцях котушки становитиме:

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$
 Звідси $U_m = L\omega I_m$,

тоді $\frac{U_m}{I_m} = \omega L$ або $\frac{U_m}{I_m} = X_L$. Ємнісний опір можна визначати й через від-

повідні діючі значення сили струму й напруги: $X_L = \frac{U}{I}$.

Формула для визначення ємнісного опору: $X_L = \omega L$.

Закон Ома для кола з індуктивним опором має вигляд $I = \frac{U}{X_L}$.

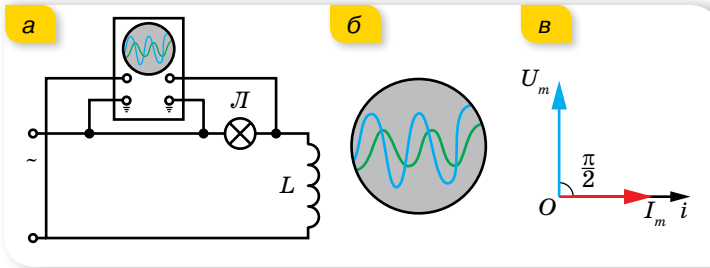
Котушка індуктивності має також і *власний активний опір* R .

Зберемо коло, що містить електролампу та котушку індуктивності, так, як показано на малюнку 122, с. 140. Підключимо двоканальний осцилограф до клем генератора і паралельно активному навантаженню (електролампі). Бачимо, що осцилограми сили струму й напруги в колі з котушкою індуктивності не збігаються за фазою.

Вивчення осцилограм (мал. 122, б; с. 140) показує, що в колі з котушкою сила струму й напруга зсунуті за фазою на $\frac{\pi}{2}$. При цьому коливання напруги випереджають коливання сили струму. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то

$$i = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

¹ Котушку в колі змінного струму інколи називають котушкою індуктивності, або індуктивною котушкою.



Мал. 122. Спостереження за фазовими співвідношеннями в колі змінного струму з котушкою індуктивності (а, б); в — векторна діаграма

У колах змінного струму, що містять індуктивне навантаження, коливання напруги $u = U_m \sin \omega t$ випереджають за фазою на чверть періоду коливання сили струму $i = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$.

Фазові співвідношення між струмом і напругою в колі з котушкою зображено за допомогою векторних діаграм на малюнку 122, в. Оскільки на котушці індуктивності коливання напруги випереджають коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$, то вектор напруги повернуто на $\frac{\pi}{2}$ відносно вектора сили струму.

Як ми зазначили, котушка, крім індуктивного, має і власний активний опір. Зазвичай у багатьох задачах активним опором котушки нехтують. Якщо ж активний опір урахувують, то повний опір котушки Z буде визначатися формулою $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$.

Як і у випадку з конденсатором, коло, що містить тільки котушку індуктивності, не перетворює енергію, що надходить від джерела, на інші види енергії.

Цю властивість індуктивного опору широко використовують у техніці, наприклад, для плавного регулювання сили струму в колі.



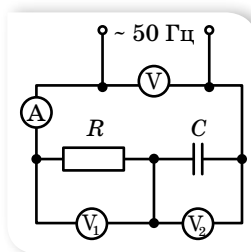
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які види опору розрізняють у колі змінного струму? Який опір називають активним, а який — реактивним? **2.** Напишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги й струму на активному опорі та побудуйте їх графіки. **3.** Запишіть рівняння зміни миттєвого значення напруги й струму на конденсаторі та побудуйте їх графіки. **4.** Що називають індуктивним опором? Яка формула виражає зміст цього поняття? **5.** Маємо електричне коло з послідовно з'єднаними лампою та котушкою індуктивності. Як зміниться яскравість лампи, якщо в котушку ввести осердя; приєднати ще одну котушку послідовно; паралельно?



Вправа 20

- У колі, наведеному на малюнку 123, прилади показують $I = 1$ А, $U_1 = 50$ В, $U_2 = 120$ В. Визначте ємність C конденсатора та напругу U в мережі.
- Два конденсатори, ємності яких $0,2$ мкФ і $0,1$ мкФ, включені послідовно в коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Визначте струм у колі та спади напруг у першому та другому конденсаторах.
- Конденсатор ємністю 20 мкФ та резистор, опір якого 150 Ом, включені послідовно в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину напруги, прикладеної до кола, становить напруга на конденсаторі, а яку — на резисторі?
- Конденсатор та електролампа з'єднані послідовно і включені в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку ємність повинен мати конденсатор для того, щоб через лампочку проходив струм $0,5$ А, а спад напруги дорівнював 110 В?
- Сила струму в колі змінюється за законом $i = 0,2 \sin 314\pi t$. На яку напругу має бути розрахований конденсатор ємністю 2 мкФ, включений у дане коло, щоб не відбулось його пробую?
- Напруга на конденсаторі змінюється за законом $u = 220 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right)$. Запишіть рівняння для миттєвого значення струму через конденсатор, якщо ємність конденсатора 20 мкФ. Визначте зсув фаз між струмом і напругою на конденсаторі. За яким законом змінюється заряд конденсатора?
- Якщо подати на котушку постійну напругу 30 В, сила струму в котушці дорівнюватиме 1 А. Якщо на цю саму котушку подати змінну напругу 30 В із частотою 50 Гц, сила струму становитиме лише $0,6$ А. Яка індуктивність котушки? Яка потужність виділяється в котушці під час проходження постійного струму; змінного?
- Котушка довжиною 50 см і площею поперечного перерізу 10 см² включена в коло змінного струму частотою 50 Гц. Кількість витків котушки — 3000 . Визначте активний опір котушки, якщо зсув фаз між напругою та струмом — 60° .
- Обмотка котушки має 500 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого 1 мм², довжина котушки 50 см, її діаметр 5 см. На якій частоті змінного струму повний опір котушки вдвічі більший за її активний опір?
- Котушка довжиною 25 см і радіусом 2 см має обмотку з 1000 витків мідного дроту, площа поперечного перерізу якого — 1 мм². Котушку включено в коло змінного струму частотою 50 Гц. Яку частину повного опору становить її активний опір, а яку — індуктивний?

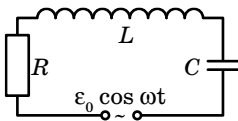


Мал. 123

§ 27

Послідовне і паралельне з'єднання елементів у колі змінного струму

Послідовне коло змінного струму з активним, ємнісним та індуктивним опорами. Будь-яке реальне електричне коло змінного струму містить активний опір (опір провідників, нагрівальних приладів і т. ін.), ємнісний опір (ємність провідників, конденсаторів) та індуктивний опір (обмотки електродвигунів, котушки електромагнітних приладів).



Мал. 124. Схема електричного кола змінного струму з послідовним з'єднанням активного та реактивного навантажень

Розглянемо електричне коло з активним, ємнісним та індуктивним навантаженнями, які з'єднані послідовно (мал. 124) (таке коло ще називають послідовним колом змінного струму).

Якщо до такого кола під'єднати двохпроменевий осцилограф, то ми будемо спостерігати осцилограми коливань сили струму й напруги, які не збігаються за фазою. Змінюючи індуктивність котушки (вносячи залізне осердя) або ємність батареї конденсаторів, будемо спостерігати, що змінюється й різниця фаз. Отже, різниця фаз φ між коливаннями сили струму й напруги залежить від співвідношення між

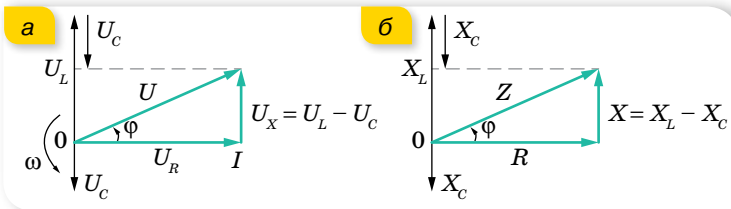
ємнісним та індуктивним опорами. Якщо $u = U_m \sin \omega t$, то $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Урахувавши зсув фаз між струмом і напругою в колі з мішаним опором, можна аналітично вивести формулу повного опору. Нехай до кола підведено змінну напругу $u = U_m \cos \omega t$. В електричному колі проходить струм $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$, де $I_m = \frac{U_m}{Z}$ або $U_m = I_m Z$, де Z — повний опір кола.

Миттєві значення напруг на кожному з навантажень: $u_R = I_m R \cos \omega t$; $u_L = I_m X_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$; $u_C = I_m X_C \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$. Оскільки у випадку послідовного з'єднання елементів миттєве значення прикладеної напруги дорівнює сумі миттєвих значень її на окремих ділянках, то $u = u_R + u_L + u_C$ або $I_m Z \cos(\omega t + \varphi) = I_m R \cos \omega t + I_m X_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + I_m X_C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Після простих перетворень дістанемо: $Z \cos \omega t \cos \varphi - Z \sin \omega t \sin \varphi = R \cos \omega t - (X_C - X_L) \sin \omega t$. Прирівнявши коефіцієнти при $\sin \omega t$ і $\cos \omega t$, матимемо, $Z \cos \varphi = R$, $Z \sin \varphi = X_C - X_L$.

Піднісши до квадрата й додавши ці вирази, дістанемо вираз для обчислення повного опору в колі змінного струму з активним та реактивним навантаженнями: $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$.



Мал. 125. Векторні діаграми: а — напруг; б — опорів (для послідовного кола)

Формулу для опору повного кола можна вивести й за допомогою векторних діаграм (мал. 125). За діаграмою опорів (мал. 125, б) легко визначити зсув фаз між напругою джерела струму і струмом у колі:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \text{ або } \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U}.$$

Паралельне коло змінного струму з активним, ємнісним та індуктивним опорами.

За паралельного з'єднання резистора, котушки та конденсатора (мал. 126) повний опір визначається формулою $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}$,

$$\text{тобто } Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

$$\text{Сила струму в колі } I = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = \frac{U}{Z},$$

де I_R та I_X — струми, що проходять через активний і реактивні елементи відповідно.

На малюнку 127 показано векторну діаграму струмів у колі з паралельним з'єднанням активного та реактивних навантажень.

$$\text{Зсув фаз } \operatorname{tg} \varphi = R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \text{ або } \cos \varphi = \frac{I_R}{I_X}.$$

Закон Ома для ділянки кола змінного струму як для послідовного, так і для паралельного з'єднання має вигляд $I = \frac{U}{Z}$.

Резонанс напруг. З аналізу формули закону Ома для кола змінного струму з послідовним з'єднанням активних і реактивних елементів,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}},$$

видно, що максимального значення сила струму в колі набуває за умови однакових індуктивного та ємнісного опорів.

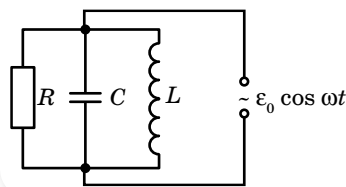
Якщо $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то в цьому разі немає зсуву фаз між коливаннями напруги та сили струму, а коефіцієнт потужності максимальний, $\cos \varphi = 1$. У такому випадку в колі настає електричний резонанс.

В умовах резонансу сила струму в колі визначається тільки активним опором кола. Отже, за резонансу енергія витрачається лише на теплову дію в активному навантаженні, а між конденсатором і котушкою постійно відбувається лише її обмін — коли енергія електричного поля конденсатора зменшується, то енергія магнітного поля котушки зростає і навпаки.

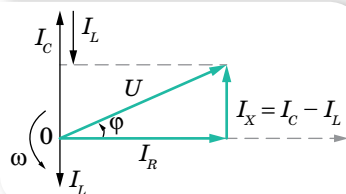
З умови $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ можна визначити резонансну циклічну частоту

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ кількість коливань за секунду } \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ і період цих коливань } T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

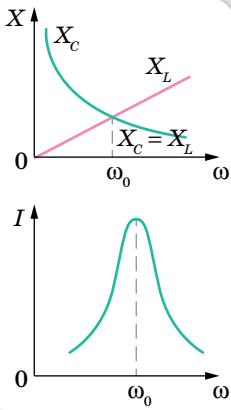
Якщо ділянку кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного навантажень під'єднати до генератора змінного струму,



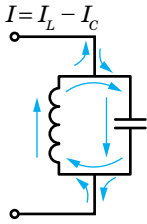
Мал. 126. Схема електричного кола змінного струму з паралельним з'єднанням активного та реактивного навантажень



Мал. 127. Векторна діаграма сил струмів для випадку паралельного з'єднання активного та реактивного навантажень



Мал. 128.
Резонансні криві



Мал. 129.
Резонанс струмів

який виробляє струм змінної частоти, можна досягти **резонанс напруг**. З формули $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ видно, що зі зміною частоти змінюються значення індуктивного та ємнісного опорів. Зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується, а індуктивний — збільшується, відповідно зменшується повний опір (мал. 128, а). Для деякого значення частоти ємнісний опір дорівнює індуктивному, при цьому повний опір визначається лише активним опором, і сила струму набуває максимального значення. З подальшим збільшенням частоти індуктивний опір стає більшим за ємнісний — сила струму в колі зменшується (мал. 128, б). Отже, в умовах резонансу повне падіння напруги в колі дорівнює напрузі на активному опорі, а $U_L = -U_C$.

Резонанс струмів. У колі змінного струму з паралельним з'єднанням котушки та конденсатора настає **резонанс струмів**. Відомо, що в колі з конденсатором коливання сили струму випереджають коливання напруги на чверть періоду, а в колі з котушкою індуктивності коливання сили струму відстають від коливань напруги на чверть періоду, внаслідок чого в нерозгалуженій частині кола ці струми напрямлені в протилежних напрямках (мал. 129).

Якщо частота така, що індуктивний опір дорівнює ємнісному, то $I_L = I_C$, але оскільки котушка, крім індуктивного опору, має ще й активний, то повної рівності струмів не настає і в нерозгалуженій ділянці проходить слабкий струм. Таким чином слабкий змінний струм, що підходить до контура, підтримує в ньому значні вимушені коливання.

Практичне використання резонансу. Явище резонансу має величезне значення в техніці. По суті, на резонансі ґрунтується техніка радіозв'язку. Проте в деяких випадках електричний, як і механічний, резонанс виявляється шкідливим. Якщо електричне коло не розраховане на роботу в умовах резонансу, то виникнення резонансу спричинить аварію, надмірно великі струми розплавлять проводи, ізоляція може бути пробита внаслідок виникнення високих резонансних напруг тощо.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦМЮ

1. За яких умов ділянка кола змінного струму зі з'єднаними послідовно резистором, котушкою та конденсатором споживатиме найбільшу потужність? Чому вона дорівнює? 2. У чому суть електричного резонансу? Побудуйте графік, який ілюструє явище резонансу в двох контурах з різним активним опором. У якому випадку резонансна крива буде крутішою?



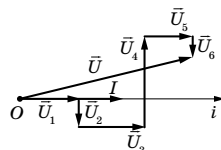
Експериментуємо

1. Визначте ємність конденсатора. Обладнання: конденсатор; резистор, опір якого відомий; джерело змінного струму; вольтметр; з'єднувальні провідники; вимикач.
2. Визначте індуктивність котушки. Обладнання: котушка з розбірного трансформатора з обмоткою на 127 В; міліамперметр; вольтметр; омметр; джерело змінного струму до 36 В; з'єднувальні провідники; вимикач.

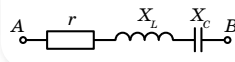


Вправа 21

1. У коло змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц під'єднано послідовно конденсатор ємністю 35,4 мкФ, котушку, індуктивність якої 0,7 Гн, та резистор, активний опір якого 100 Ом. Визначте струм у колі та спад напруг на кожному елементі.
2. У коло змінного струму напругою 220 В включено послідовно конденсатор, котушку та активний опір. Визначте спад напруг на активному навантаженні, якщо спад напруг на конденсаторі у 2 рази більший, а на котушці — в 3 рази більший, ніж на активному навантаженні.
3. На малюнку 130 наведено векторну діаграму напруг у колі змінного струму. Напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють $U_1 = 70$ В, $U_2 = 15$ В, $U_3 = 30$ В, $U_4 = 75$ В, $U_5 = 20$ В, $U_6 = 10$ В. Активний опір на п'ятій ділянці $R_5 = 4$ Ом. Накресліть схему електричного кола, визначте повну напругу в колі, повний опір кола.
4. У котушці в колі постійного струму під напругою 12 В амперметр показує струм 4 А. У тій самій котушці в колі змінного струму промислової частоти під напругою 12 В тече струм 2,4 А (за показами амперметра). Визначте індуктивність котушки.
5. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 131) $r = 3$ Ом, $X_L = 6$ Ом, $X_C = 2$ Ом. Побудуйте векторну діаграму. Визначте повний опір.
6. У нерозгалуженій ділянці кола змінного струму (мал. 131) напруги на ділянках кола відповідно дорівнюють: $U_r = 40$ В, $U_L = 80$ В, $U_C = 50$ В. Визначте повну напругу в колі. Побудуйте векторну діаграму.



Мал. 130



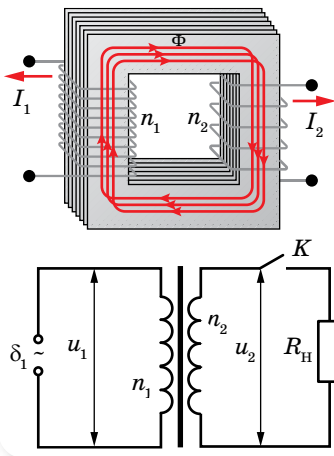
Мал. 131

§ 28

Трансформатор

Будова та принцип дії трансформатора. Перевага змінного струму у порівнянні з постійним полягає в тому, що для змінного струму напругу й силу струму можна перетворювати (трансформувати) в дуже широких межах майже без втрат енергії. Для цього електричну енергію треба передавати під високою напругою.

Пристрої, які дають змогу підвищувати напругу (в разі подачі енергії від генераторів до лінії електропередачі) і знижувати її (в разі подачі від лінії електропередачі до споживачів), називають **трансформаторами**.



Мал. 132. Схема та умовне позначення трансформатора

На малюнку 132 зображено схему трансформатора та його умовне позначення. Він складається з двох індуктивно зв'язаних котушок (обмоток) з різною кількістю витків з мідного дроту. Одну з обмоток, яку називають *первинною*, під'єднують до джерела змінної напруги. Прилади, які споживають електроенергію, під'єднують до *вторинної* обмотки. Для того щоб магнітне поле не розсіювалось у довкілля, котушки розміщують на замкнутому осерді, виготовленому з листів спеціальної трансформаторної сталі, ізолюваних один від одного тонким шаром лаку. Це роблять, щоб зменшити втрати на нагрівання. Окрім того, у суцільних провідниках виникають значні вихрові струми (струми Фуко), які зумовлюють нагрівання провідника.

З'ясуємо принцип дії трансформатора. Трансформатор перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Якщо первинну обмотку під'єднати до джерела змінної напруги, а вторинна буде розімкнута (цей режим роботи називають *холостим ходом трансформатора*), то в первинній обмотці з'явиться слабкий струм, який створює в осерді змінний магнітний потік. Цей потік наводить у кожному витку обмоток однакову ЕРС, тому ЕРС індукції в кожній обмотці буде прямо пропорційною кількості витків у цій обмотці, тобто $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2}$.

Якщо вторинну обмотку буде розімкнута, то напруга на її затискачах U_2 дорівнюватиме ЕРС ε_2 , яка в ній наводиться. У первинній обмотці ЕРС ε_1 за числовим значенням мало відрізняється від напруги U_1 , яка підводиться до цієї обмотки. Практично їх можна вважати однаковими, тому $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{n_1}{n_2} = k$, де k — *коефіцієнт трансформації*. Якщо вторинних обмоток декілька, то коефіцієнт трансформації для кожної з них визначають аналогічно.

Якщо у вторинне коло трансформатора увімкнути навантаження, то у вторинній обмотці з'явиться струм. Цей струм створює магнітний потік, який, за правилом Ленца, має зменшити зміну магнітного потоку в осерді, що, своєю чергою, приведе до зменшення ЕРС індукції в первинній обмотці. Але ця ЕРС дорівнює напрузі, прикладеній до первинної обмотки, тому струм у первинній обмотці повинен зрости, відновлюючи початкову зміну магнітного потоку. Водночас збільшується потужність, яку споживає трансформатор від мережі.

Оскільки в роботі трансформатора відбуваються втрати енергії, то потужність, яку споживає первинна обмотка, більша за потужність

у вторинній обмотці. ККД трансформатора η визначається відношенням потужності P_2 вторинної обмотки до потужності P_1 первинної обмотки: $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, або $\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}$.

ККД сучасних трансформаторів часто перевищує 90 % і сягає 99 %. Невеликі втрати електричної енергії під час її передавання з первинної обмотки у вторинну зумовлені виділенням джоулевої теплоти в дротах обмоток і перемагнічуванням осердя. Для навантаженого трансформатора на первинній обмотці $\varepsilon_1 \approx U_1$, напруга на затискачах вторинної обмотки становить $U_2 = \varepsilon_2 - I_2 R_2$, де $I_2 R_2$ — спад напруги на вторинній обмотці, тоді коефіцієнт трансформації $k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2 + U_n}$, де U_n — спад напруги на навантаженні.

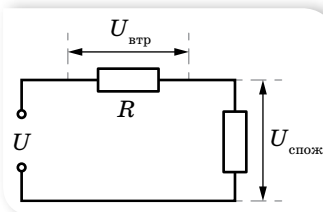
Передавання електроенергії. Споживачі електроенергії є всюди. А виробляється вона лише на електростанціях, які розташовані в певних місцях. Консервувати електроенергію у великих масштабах немає змоги. Її треба використовувати відразу після вироблення. Тому виникає потреба передавати електроенергію на великі відстані. Але таке передавання пов'язане зі значними втратами. Адже електричний струм нагріває провідники лінії електропередачі. Згідно із законом Джоуля — Ленца енергія, яка витрачається на нагрівання проводів лінії, визначається формулою $Q = I^2 R t$, де R — опір лінії. За великої довжини лінії передавання енергії взагалі може бути економічно не вигідним. Істотно зменшити опір лінії практично дуже важко. Тому доводиться зменшувати силу струму.

Оскільки потужність струму пропорційна добутку сили струму на напругу, то, щоб зберегти передавану потужність, треба підвищувати напругу в лінії передачі. Причому, що довшою є лінія передачі, то вигідніше використовувати вищу напругу. Так, у деяких високовольтних лініях передачі використовують напругу 500 кВ. Але генератори змінного струму будують на напруги, що не перевищують 16–20 кВ, бо використання вищої напруги вимагало б складніших спеціальних заходів для ізоляції обмоток та інших частин генераторів. Тому на великих електростанціях ставлять підвищувальні трансформатори. Трансформатор підвищує напругу в лінії у стільки разів, у скільки зменшує силу струму.

Перед безпосереднім використанням електроенергії споживачами її напругу знижують за допомогою знижувальних трансформаторів.

Повністю уникнути втрат під час передавання електроенергії не вдається. За дуже високої напруги між проводами починається коронний розряд, що призводить до втрат енергії.

На малюнку 133 показано електричну схему лінії електропередачі, на якій U — напруга на генераторі, $U_{\text{втр}}$ — напруга на проводах лінії електропередачі, $U_{\text{спож}}$ — напруга на споживачі. Якщо частина втрат потужності у відносних



Мал. 133. Електрична схема лінії електропередач

одиницях становить k , тоді потужність втрат на лінії пов'язана з потужністю, переданою споживачу, формулою $P_{\text{втр}} = kP_{\text{спож}}$.

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача й потужності втрат: $P_{\text{ген}} = P_{\text{спож}} + P_{\text{втр}} = (k + 1)P_{\text{спож}}$, де $P_{\text{втр}} = I^2 R$.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦІМЮ

1. Чому гуде трансформатор, увімкнений у коло змінного струму? Яка частота цього звуку? **2.** Вторинна обмотка трансформатора замкнена на: а) малий опір r ; б) великий опір R . Порівняйте в обох випадках напругу на вторинній обмотці та потужність, яку споживає трансформатор. **3.** За яким законом треба збільшувати робочу напругу лінії, щоб за збільшення її довжини коефіцієнт корисної дії лінії залишався сталим?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 5 включено в коло з напругою 220 В. Який опір вторинної обмотки, якщо напруга на виході трансформатора 40 В, а опір корисного навантаження — 4 Ом? Яка потужність витрачається на нагрівання вторинної обмотки? Яку потужність споживає трансформатор з мережі? Який ККД трансформатора?

Дано:

$$k = 5$$

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 40 \text{ В}$$

$$R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{об}} - ?; P_{\text{втр}} - ? \\ P - ?; \eta - ? \end{array} \right\}$$

Розв'язання:

$$\text{Коефіцієнт трансформації } k = \frac{U_1}{U_2}, \text{ звідки } U_2 = \frac{U_1}{k},$$

де $U_2 = U_{\text{об}} + U_{\text{н}} = IR_{\text{об}} + U_{\text{н}}$. Сила струму у вторинній

$$\text{обмотці } I = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}, \text{ отже } R_{\text{об}} = \frac{\left(\frac{U_1}{k} - U_{\text{н}}\right) R_{\text{н}}}{U_{\text{н}}},$$

$$R_{\text{об}} = \frac{\left(\frac{220 \text{ В}}{5} - 40 \text{ В}\right) \cdot 4 \text{ Ом}}{40 \text{ Ом}} = 0,4 \text{ Ом}.$$

$$\text{Потужність вторинної обмотки } P_{\text{втр}} = I^2 R_{\text{об}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R_{\text{н}}^2} R_{\text{об}}, P_{\text{втр}} = 40 \text{ Вт}.$$

$$\text{Потужність трансформатора } P = \frac{U_2^2}{R_{\text{об}} + R_{\text{н}}}, P = \frac{44^2 \text{ В}^2}{4,4 \text{ Ом}} = 440 \text{ Вт}.$$

$$\text{ККД трансформатора } \eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{P - P_{\text{втр}}}{P},$$

$$\eta = \frac{440 \text{ Вт} - 44 \text{ Вт}}{440 \text{ Вт}} = 0,9 = 90 \text{ \%}.$$

Відповідь: 0,4 Ом, 40 Вт, 440 Вт, 90 %.

Задача 2. Лінія електропередач має опір 100 Ом. Яку напругу повинен мати генератор електростанції, щоб, передаючи по цій лінії до споживача повну потужність 250 кВт, втрати на лінії не перевищували 4 % переданої до споживача повної потужності?

Дано:

$$R = 100 \text{ Ом}$$

$$P = 250 \text{ кВт}$$

$$k = 0,04$$

$$U \text{ — ?}$$

Розв'язання:

$$\text{Напруга генератора } U = \frac{P_{\text{ген}}}{I}$$

Потужність генератора дорівнює сумі потужностей споживача P і потужності втрат $P_{\text{втр}}$.

Потужність втрат можна виразити як $P_{\text{втр}} = kP$, тоді

$$P_{\text{ген}} = P + kP = (k + 1)P. \text{ З іншого боку, } P_{\text{втр}} = I^2 R, \text{ тоді } I = \sqrt{\frac{P_{\text{втр}}}{R}} = \sqrt{\frac{kP}{R}}.$$

$$\text{Отже, } U = (k + 1)\sqrt{\frac{RP}{k}}; U = (0,04 + 1)\sqrt{\frac{100 \text{ Ом} \cdot 250 \text{ кВт}}{0,04}} = 26 \text{ кВт}.$$

Відповідь: $U = 26 \text{ кВ}$.



Вправа 22

- Сила струму в первинній обмотці трансформатора 0,5 А, напруга на її кінцях 220 В. Сила струму у вторинній обмотці 11 А, напруга на її кінцях 9,5 В. Визначте ККД трансформатора.
- Для визначення кількості витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора по верх вторинної обмотки намотали $n_3 = 80$ витків дроту й після підключення первинної обмотки до мережі з напругою 220 В за допомогою вольтметра визначили напругу на кінцях додаткової обмотки $U_3 = 20$ В і на кінцях вторинної обмотки $U_2 = 36$ В. Визначте кількість витків у первинній і вторинній обмотках та коефіцієнт трансформації.
- Електричний двигун працює від джерела електричного струму, напруга на клеммах якого дорівнює 120 В, а сила струму — 7,5 А. Визначте втрати потужності в обмотці двигуна та його ККД, якщо опір обмотки дорівнює 2,2 Ом.
- Генератор струму з напругою на клеммах 220 В передає в зовнішнє коло потужність 11 кВт. Якого мінімального перерізу мають бути мідні дроти лінії передачі, щоб втрати напруги в них не перевищували 2 % від зазначеної напруги? Довжина лінії передачі становить 50 м.
- У мережу з напругою 220 В одночасно включені електродвигун потужністю 0,3 кВт і ККД 90 %, електрична піч потужністю 1 кВт і десять ламп потужністю 150 Вт кожна. Визначте силу струму у двигуні, печі та лампах, загальну силу струму та спожиту потужність.
- Під якою напругою треба передавати електроенергію на відстань $l = 10$ км, щоб за густини струму $j = 0,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ у сталевому проводі двопровідної лінії електропередачі втрати енергії становили 1 %? Питомий опір сталі $\rho = 0,12 \text{ мОм} \cdot \text{м}$.
- Вторинну обмотку трансформатора, що має 100 витків, пронизує магнітний потік, який змінюється з часом за законом $\Phi = 0,01 \cos 314t$. Напишіть формулу, що виражає залежність ЕРС вторинної обмотки від часу, і визначте діюче значення ЕРС.



Виконємо навчальні проекти

- ▶ Як вирішуються питання енергозабезпечення у вашому регіоні, країні, в інших країнах?
- ▶ Енергозабезпечення сьогодні та в майбутньому.
- ▶ Як вирішуються проблеми передавання електричної енергії на великі відстані?

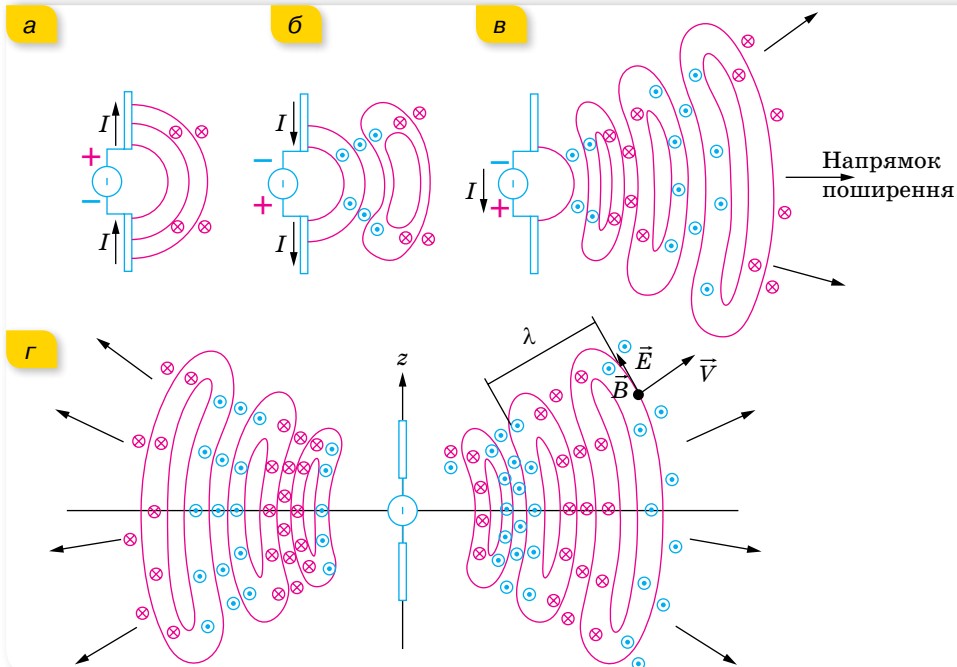
§ 29

Електромагнітні хвилі

Утворення та поширення електромагнітних хвиль. Як ви знаєте, можливість існування електромагнітних хвиль теоретично довів Джеймс Максвелл, практично отримав їх Генріх Герц у 1888 р. Щоб здобути електромагнітні хвилі, Герц запропонував використовувати так званий *диполь*, який ще називають *відкритим коливальним контуром*. Розглянутий коливальний контур, у якому відбуваються електромагнітні коливання, не випромінює електромагнітних хвиль. У ньому відбуваються перетворення енергії електричного поля конденсатора на магнітне поле котушки, і витрат енергії на утворення хвиль майже немає.

Розглянемо диполь, що складається з двох провідних стержнів (мал. 134) і підключений до джерела змінного струму. Малюнок 134, *a* відповідає моменту, коли диполь щойно підключили до джерела. Електричний струм створює магнітне поле, силові лінії індукції магнітного

Про електромагнітні хвилі ми вже дещо знаємо з курсу фізики 9 класу. Пригадати основні відомості можна в електронному додатку.



Мал. 134. Процес утворення електромагнітної хвилі

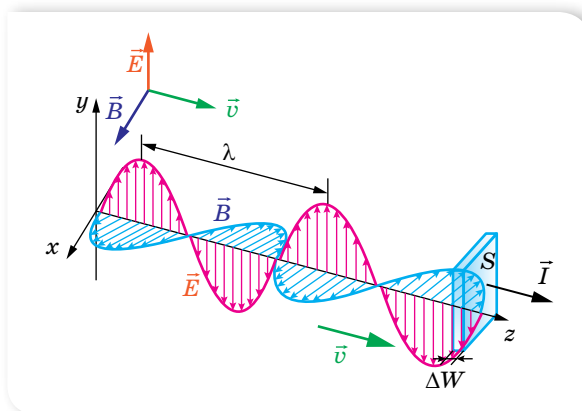
поля замкнені й охоплюють стержні: праворуч від стержнів вектор індукції напрямлений від нас \otimes , а ліворуч від стержнів — на нас \odot (на малюнку не показано). ЕРС генератора проходить через максимум і починає зменшуватися; струм змінює напрямок, і його магнітне поле також змінює напрямок. Оскільки напрямок нових полів протилежний попередньому, то силові лінії полів замикаються, утворюючи замкнені контури (мал. 134, б). Утворене раніше поле не зникає — воно поширюється в просторі. І згодом картина силових ліній матиме вигляд, зображений на малюнку 134, в. Оскільки диполь не є точковим джерелом, то поля поширюються у просторі, віддаляючись у напрямку, перпендикулярному до його осі в обидва боки, а вздовж осі випромінювання немає (мал. 134, г).

Вивчаючи механічні хвилі, ми ознайомились із деякими характеристиками хвильового руху: фронт хвилі, промінь, довжина хвилі. Усі ці поняття застосовні і для електромагнітних хвиль.

Електромагнітні хвилі — це явище поширення в просторі електромагнітних коливань, тобто взаємопов'язаних коливань електричного й магнітного полів, які являють собою єдине електромагнітне поле. У довільній точці вектори \vec{E} і \vec{B} взаємно перпендикулярні та перпендикулярні до напрямку поширення (мал. 135).

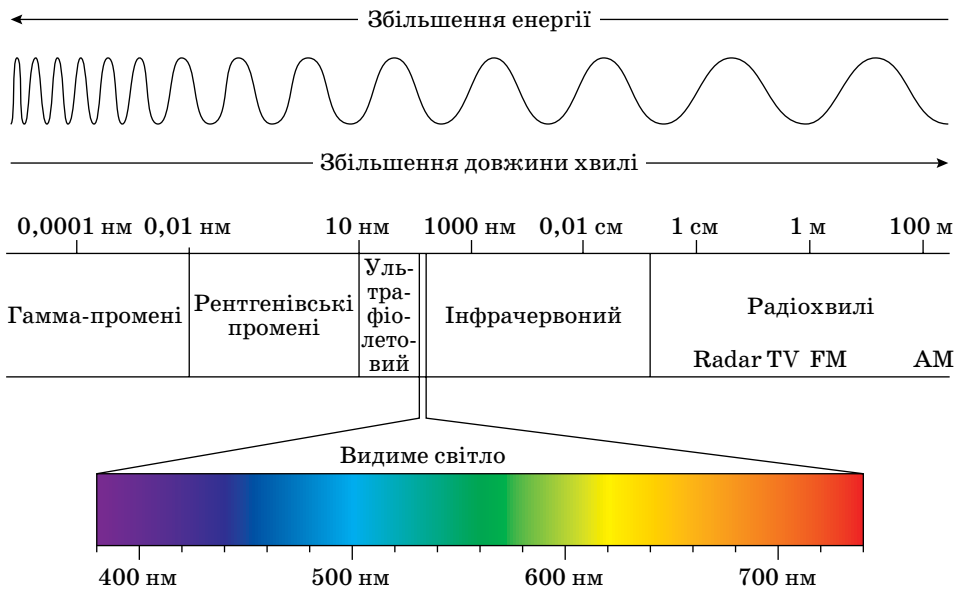
Оскільки електромагнітні хвилі генерує електричний струм, тобто заряджені частинки, що рухаються з прискоренням, то правильним буде й загальне твердження: *електричний заряд під час прискореного руху є джерелом електромагнітних хвиль*.

Електромагнітні хвилі є *поперечними хвилями*, але на відміну від механічних хвиль у них відбуваються коливання полів, а не речовини.



Мал. 135. Схематичне зображення плоскополяризованої електромагнітної хвилі

За довжиною хвилі λ або частотою коливань (ν) межі діапазону електромагнітних хвиль — від 10^{11} м ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) до 10^{-11} м ($3 \cdot 10^{19}$ Гц). Цей діапазон уміщує радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та γ (гамма)-випромінювання (мал. 136, с. 152).



Мал. 136. Шкала електромагнітних хвиль

Швидкість електромагнітних хвиль. За часів Максвелла ще не знали, як виявити і створити електромагнітні хвилі. Проте у своїх теоретичних розрахунках Максвелл показав, що якби електромагнітна хвиля існувала, то вона мала б поширюватись у середовищі зі швидкістю, яка визначається формулою $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}}$, де ϵ і μ — діелектрична та магнітна проникності речовини, ϵ_0 і μ_0 — електрична і магнітна сталі.

Для вакууму $\epsilon = \mu = 1$, тому швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. На той час знали, що з такою швидкістю поширюється світло. Це підтверджує, що світло — це один з діапазонів електромагнітних хвиль.

Чи можете ви назвати найбільше число, що характеризує довжину або проміжок часу? Максимальне значення енергії або потужності? Для опису конкретних об'єктів ви можете вказати орієнтовні максимальні значення цих величин, але стверджувати, що вони є граничними — не можете. Єдина фізична величина, яка має фіксоване граничне значення, — це швидкість світла у вакуумі. Окрім того, що це фізична величина, це ще й фізична константа. Швидкість, із якою світлові хвилі поширюються у вакуумі, не залежить ні від руху джерела хвиль, ні від системи відліку спостерігача. Постулат про інваріантність швидкості світла вперше в 1905 р. запропонував Альберт Ейнштейн у своїй спеціальній теорії відносності. Відтоді інваріантність швидкості світла незмінно підтверджується безліччю експериментів.

З порівняння формул $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}}$ та $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ отримаємо $\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}$.

Величину, яка показує, у скільки разів швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі більша, ніж у певному середовищі, називають **абсолютним показником заломлення** цього середовища,

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}.$$

Зазначимо, що діелектрична проникність середовища ϵ в цій формулі не збігається з діелектричною проникністю того самого середовища для випадку електростатичної взаємодії, оскільки ϵ залежить від частоти коливань. Однак ϵ завжди більша за одиницю, а μ для діелектриків, у яких можуть поширюватись електромагнітні хвилі, практично можна вважати таким, що дорівнює одиниці. Тому в будь-якому середовищі швидкість поширення електромагнітних хвиль менша, ніж у вакуумі, тобто n завжди більший за одиницю.

Звертаємо увагу, що *під час переходу з одного середовища в інше частота коливань не змінюється. Змінюється швидкість поширення та довжина хвилі.*

Рівняння хвилі. Вивчаючи механічні хвилі, ми отримали рівняння плоскої гармонічної хвилі. Виведемо *рівняння для електромагнітної хвилі*. Нехай у деякій точці O напруженість електричного поля змінюється за гармонічним законом: $E = E_m \sin \omega t$. Оскільки електромагнітна хвиля поширюється зі скінченною швидкістю, то в другій точці, віддаленій від першої на відстань x , також виникнуть гармонічні коливання, проте із запізненням $\Delta t = \frac{x}{v}$. Закон зміни напруженості електромагнітного поля у другій точці матиме вигляд $E = E_m \sin \omega (t - \Delta t) = E_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$. Це і є рівняння плоскої синусоїдальної електромагнітної хвилі.

Рівняння хвилі записують і так: $E = E_m \sin \left(\omega t - \omega \frac{x}{v} \right)$. Або, враховуючи, що $\omega = 2\pi\nu$ і $\lambda = \frac{v}{\nu}$, так: $E = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$.

Оскільки максимуми напруженості електричного поля під час поширення електромагнітної хвилі збігаються з максимумами індукції магнітного поля, тому рівняння коливань індукції магнітного поля мають аналогічний вигляд: $B = B_m \sin \omega t$, а на відстані x від цієї точки $B = B_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$.

У випадку, коли хвиля поширюється у вакуумі, $E = E_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$ і $B = B_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$.

Енергія електромагнітної хвилі. Випромінені електромагнітні хвилі несуть із собою енергію. Ця енергія складається з енергії електричного W_e і магнітного W_m полів. Оскільки в електромагнітній хвилі відбуваються взаємні перетворення електричного та магнітного полів, то згідно із законом збереження і перетворення енергії: $W_e = W_m$.

Виразимо енергію електричного поля $W_e = \frac{CU^2}{2}$ через параметри плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$. Оскільки різниця потенціалів між обкладками $U = Ed$, маємо $W_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon SE^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$, де V — об'єм конденсатора.

Поділивши останню формулу на об'єм V , зайнятий електричним полем, дістанемо енергію, яка припадає на одиницю об'єму, тобто густину енергії електричного поля $\omega_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2$. Ця формула справджується і для випадку змінних електричних полів.

Аналогічно перетворимо формулу для енергії магнітного поля. Підставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$ вираз для індуктивності соленоїда

$L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$ і виразивши силу струму через індукцію магнітного поля $I = \frac{Bl}{\mu \mu_0 N}$, отримаємо $W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu \mu_0}$. Оскільки $Sl = V$ — об'єм соленоїда,

то густина енергії: $\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu \mu_0}$. Цей вираз справедливий не тільки для однорідного поля, а й для довільних змінних магнітних полів.

Густина енергії електромагнітної хвилі складається з густини енергії електричного та магнітного полів і в певній точці простору дорівнює $\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$.

У вакуумі об'ємні густини електричної та магнітної енергій рівні між собою: $\omega = \omega_e + \omega_m = 2\omega_e = 2\omega_m$, або $\frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}$. Із цієї формули випливає, що в електромагнітній хвилі напруженість і магнітна індукція пов'язані простим співвідношенням $\frac{E}{B} = c$, де c — швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Порівняємо сили, з якими діють на електричний заряд q , що рухається зі швидкістю v , електрична $F_e = qE$ та магнітна $F_m = qvB$ складові хвилі: $\frac{F_e}{F_m} = \frac{qE}{qvB} = \frac{E}{B}$. Ураховуючи, що $\frac{E}{B} = c$, отримуємо $\frac{F_e}{F_m} = \frac{c}{v}$. Оскільки швидкість c набагато більша за швидкість руху заряду ($c \gg v$), то і $F_e \gg F_m$.

Тобто дія на електричні заряди електричної складової поля хвилі значно сильніша за дію її магнітної складової.

Оскільки, як ми з'ясували, електромагнітні хвилі переносять енергію, то під час поширення хвилі виникає *потік електромагнітної енергії*. Розрахуємо *густину потоку електромагнітного випромінювання*. Для цього виділимо поверхню площею S , перпендикулярну до напрямку поширення хвилі. За час Δt через неї пройде енергія ΔW .

Відношення електромагнітної енергії ΔW , що проходить за час Δt через перпендикулярну до променів поверхню площею S , до добутку площі S на час Δt називають **густиною потоку електромагнітного випромінювання** I , $I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}$.

Фактично це — *потужність* електромагнітного випромінювання (енергія за одиницю часу), що проходить через одиницю площі поверхні.

Одиниця густини потоку випромінювання в СІ — ват на метр у квадраті, $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Іноді цю величину називають *інтенсивністю* хвилі. Спробуйте самостійно довести, що густина потоку випромінювання дорівнює добутку густини електромагнітної енергії на швидкість її поширення, $I = \omega c$.

Ще одна важлива властивість електромагнітних хвиль. Оскільки електромагнітні хвилі випромінюються внаслідок прискореного руху частинок, то напруженість електричного поля і магнітна індукція пропорційні прискоренню випромінюючих частинок. Як відомо, для гармонічних коливань прискорення пропорційне квадрату частоти. Тому напруженість електричного поля і магнітна індукція також пропорційні квадрату частоти, $E \sim v^2$ та $B \sim v^2$. Своєю чергою, густина енергії електромагнітного поля пропорційна квадрату напруженості $\omega \sim E^2$ (або квадрату індукції магнітного поля $\omega \sim B^2$). Відповідно інтенсивність електромагнітної хвилі (густина потоку випромінювання) пропорційна частоті в четвертому степені, $I \sim v^4$. Із цього випливає таке. Якщо ми хочемо отримати поширення електромагнітних хвиль на велику відстань, ця хвиля повинна мати велику енергію (адже енергія хвилі поширюється в усі боки розсіючись). Серед усіх параметрів, від яких залежить енергія хвилі, найефективніше збільшувати її частоту. (Збільшивши частоту у 2 рази, збільшимо густину потоку випромінювання в 16 разів.) Тому в антенах радіостанцій збуджуються коливання високих частот — від десятків тисяч до десятків мільйонів герц. Зрозуміло, що змінні струми промислової частоти 50 Гц практично не випромінюють.



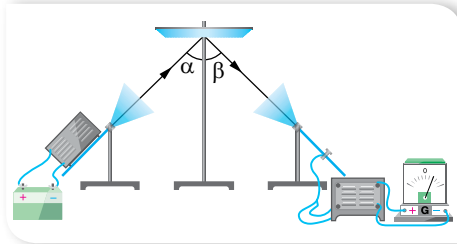
ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Дайте визначення електромагнітної хвилі. **2.** Якими фізичними величинами описують електромагнітні хвилі? **3.** Від яких величин залежить густина енергії електромагнітної хвилі; густина потоку випромінювання?

§ 30

Властивості електромагнітних хвиль

Досліди з електромагнітними хвилями. Ще Генріх Герц провів низку дослідів з вивчення властивостей електромагнітних хвиль. Для проведення подібних досліджень використовують генератор і приймач електромагнітних хвиль, що мають спеціальні рупорні антени для забезпечення напрямленого випромінювання та прийому хвиль. Індикатором прийому хвиль слугує вольтметр.

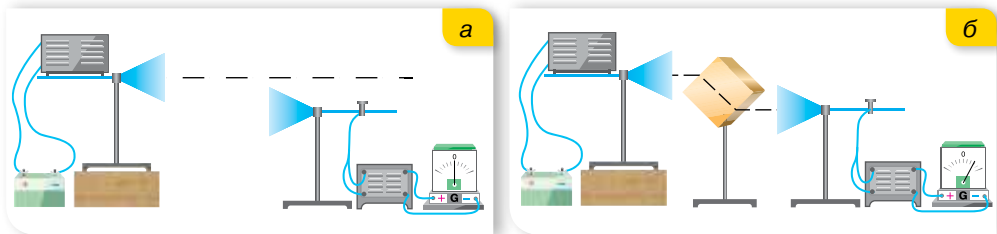


Мал. 137. Установка для дослідження відбиття електромагнітних хвиль

Унаслідок проведених дослідів було з'ясовано, що електромагнітні хвилі **відбиваються** провідником (мал. 137). Кут відбиття електромагнітних хвиль, як і хвиль будь-якої іншої природи, дорівнює куту падіння.

Під час падіння електромагнітної хвилі на деяку поверхню, що розмежує середовища, частина енергії хвилі відбивається від поверхні іншого середовища, частина проникає всередину його, причому певна кількість енергії може пройти крізь середовище, якщо воно прозоре для електромагнітної хвилі, решта енергії поглинається середовищем, спричинюючи його нагрівання або інші процеси.

Отже, на межі двох середовищ електромагнітна хвиля поділяється на відбиту хвилю та хвилю, яка проходить у середовище, при цьому напрямок поширення хвилі в середовищі відрізняється від початкового — хвиля зазнає **заломлення**.

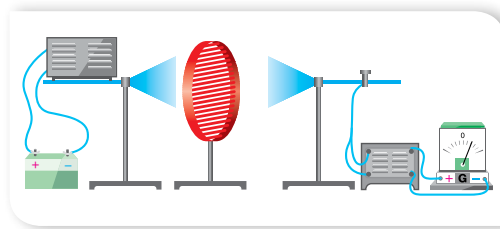


Мал. 138. Заломлення електромагнітних хвиль

Спостерігати заломлення електромагнітних хвиль можна на такому досліді. Розташуємо рупори антен так, щоб сигнал не потрапляв у приймальну антену (мал. 138, а). Якщо ж розташувати між рупорами антен прямокутну призму з діелектрика (наприклад, парафіну), то прийом сиг-

налу відбувається (мал. 138, б). Дослід доводить, що електромагнітні хвилі заломлюються на межі двох середовищ. Зрозуміло, що закон заломлення електромагнітних хвиль такий самий, як у випадку світлових хвиль.

На досліді можна також спостерігати *поляризацію* хвиль і переконатись у тому, що електромагнітні хвилі — *поперечні*. Для цього між генератором і приймачем розміщують решітку з паралельних металевих стержнів (мал. 139). Повертаючи решітку, спостерігають підсилення прийнятого сигналу і його послаблення



Мал. 139. Дослід з поляризації електромагнітних хвиль

аж до повної відсутності. Приймання відсутнє тоді, коли вектор напруженості електричного поля \vec{E} падаючої електромагнітної хвилі паралельний стержням. За цих умов у стержнях збуджуються струми, і решітка відбиває падаючі хвилі подібно до суцільної металеві пластины. Якщо вектор \vec{E} перпендикулярний до стержнів, значні струми не збуджуються, і електромагнітна хвиля проходить крізь решітку. Отже, електромагнітна хвиля поляризована — вектор напруженості має фіксовану площину коливань. (Поясніть самостійно, чому в даному досліді розглядається положення саме вектора \vec{E} , а не \vec{B} .)

Тут описано не всі основні властивості електромагнітних хвиль. Повніші відомості отримаємо під час вивчення світлових хвиль.

Використання електромагнітних хвиль. Людство сьогодні живе у «хвильовому просторі». З часів існування життя на Землі всі організми перебувають під впливом природного електромагнітного випромінювання, джерелами якого є космічні об'єкти: зорі, пульсари, туманності. З розвитком техніки й технологій, крім природних джерел, з'являється дуже багато штучних, які випромінюють електромагнітні хвилі різних діапазонів.

Життя сучасного суспільства неможливе без постійного обміну інформацією. Радіо, телебачення та стільниковий зв'язок відіграють у цьому неабияку роль. Створення й модернізація сучасних інформаційних засобів стали можливими завдяки тому, що можна задавати відповідні параметри електричного сигналу, кодувати його, посилювати, передавати.

Низькочастотні електромагнітні хвилі, що утворюються під час роботи різних електротехнічних пристроїв, які живляться змінним струмом низької частоти, мають низьку енергію і не придатні для передачі інформації в атмосфері на великі відстані. Саме тому невдача спіткала багатьох відомих дослідників і винахідників, які намагалися передавати інформацію за допомогою електромагнітних хвиль низької частоти. Придатними для цього є радіохвилі з довжиною в діапазоні від 0,1 мм до 10 км і частотою $3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Увесь радіодіапазон електромагнітних хвиль поділяється на: довгі, середні, короткі, ультракороткі.

Проте сама електромагнітна хвиля зі сталими параметрами, поширюючись у просторі, може нести інформацію лише про свою наявність. Для передавання різноманітної інформації за допомогою електромагнітних хвиль застосовують різні способи кодування сигналу. Варто зазначити, що зі збільшеннями частоти кількість інформації, що може нести хвиля, збільшується, тому збільшення несучої частоти в сучасному світі є закономірною. Але поширення довгих і коротких хвиль залежить від погодних умов. Що є дійсно їхньою перевагою — вони можуть поширюватися поза прямою видимістю. Ультракороткі хвилі набули широкого використання для роботи радіостанцій, мобільних телефонів, Wi-Fi, Wi-Max, 3G і т. п. Але такі хвилі обмежені прямою видимістю, і максимальна відстань передачі залежить від відстані до горизонту та висоти антени.

Дослідження Ніколи Тесли, Гульєльмо Марконі, Олександра Степановича Попова підвели до винайдення радіозв'язку. Основний принцип радіозв'язку побудований на використанні передавача і приймачів кодованого сигналу. Залежно від способу кодування розрізняють аналоговий і цифровий зв'язок.

Детальніше про властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів, принцип радіотелефонного й стільникового зв'язку читайте в електронному додатку.



Аналоговий полягає в тому, що сигнал у передавачі модулюється — накладаються низькочастотні (звукові сигнали) на несучу радіохвилю, а в приймачі — демодулюється — «виокремлюються» звукові хвилі з радіохвилі. Нині повсюди використовується цифровий зв'язок, зокрема й для передачі аналогових сигналів, які спочатку оцифровуються. Сучасні системи цифрового зв'язку використовують кабельні (з-поміж них волоконно-оптичні), супутникові, радіорелейні й інші засоби та способи передачі сигналу.

Радіо-, рентгенівські та гамма-телескопи. Джерелами електромагнітного випромінювання є космічні об'єкти. В астрономії працюють з усіма довжинами хвиль, з яких складається електромагнітний спектр. Оскільки атмосфера Землі пропускає не всі види випромінювань, науковці шукають шляхи вирішення цієї проблеми. Багато століть поспіль люди спостерігали зоряне небо лише через вузьке «оптичне вікно» атмосфери. З XIX ст. Всесвіт почали вивчати в інфрачервоних променях. На початку 30-х років XX ст. з розвитком радіотехніки стало можливим дослідження небесних об'єктів у радіодіапазоні. Із середини XX ст., коли з'явилася можливість відправити за межі атмосфери Землі наукові прилади, астрономи отримали змогу виконувати спостереження небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

Принципова схема будови *радіотелескопа* не відрізняється від будови телескопа-рефлектора: космічне радіовипромінювання збирає металеве дзеркало параболічної форми — іноді суцільне, іноді ґратчасте, а приймач радіохвиль — не людське око, фотопластинка чи цифрова матриця, а високочутливий радіоприймач. Дзеркало фокусує радіохвилі на антену,

внаслідок чого в ній виникає швидкозмінний електричний струм, який спеціальні провідники — хвилеводи — передають до радіоприймача, з'єданого з комп'ютером.



а



б

Мал. 140. Найбільші радіотелескопи: а — з одним «дзеркалом», провінція Гуйчжоу, Китай, 2016 р.; б — декаметрових хвиль, Харківська область, Україна, 1970 р.

На малюнку 140, а зображено найбільший у світі радіотелескоп. Його антени нерухомі й завжди спрямовані в zenit, але завдяки добовому обертанню Землі та можливості зміщувати опромінювач їм доступна значна частина небесної сфери.

В Україні поблизу Харкова працює найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону — УТР-2 (мал. 140, б). Упродовж багатьох років на УТР-2 було отримано величезний обсяг астрофізичної інформації. Доступними для досліджень виявилися практично всі об'єкти Всесвіту — від найближчого оточення Землі й Сонячної системи до нашої Галактики та найвіддаленіших об'єктів — радіогалактик і квазарів.

Для суттєвого підвищення роздільної здатності радіотелескопів астрономи використовують радіоінтерферометри — пристрої, що працюють у радіодіапазоні з використанням інтерференції.

Телескопи, які реєструють випромінювання небесних тіл у діапазоні високих енергій (рентгенівські та гамма), ще називають детекторами.

Принцип дії гамма-детектора коротко можна описати так (мал. 141). Гамма-випромінювання, що надходить з космосу, потрапляє у приймач, наприклад, у пластину зі свинцю. Взаємодіючи з матеріалом пластини, гамма-кванти породжують електрони й позитрони, які далі на великій швидкості потрапляють у лічильник, де змушують речовину світитися. Це світіння дуже слабке, тому його посилюють і, зрештою, реєструють. Сучасні гамма-телескопи дають змогу



Мал. 141. Гамма-детектор

реєструвати гамма-випромінювання Молочного Шляху, а також окремих дискретних джерел (наприклад, залишків спалахів наднових зір) чи активних ділянок на Сонці під час сонячних спалахів тощо.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Назвіть відомі вам властивості електромагнітних хвиль. 2. Чому для передавання радіосигналів потрібно використовувати високочастотні електромагнітні хвилі?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Радіолокатор працює на довжині хвилі 20 см і дає 5000 імпульсів за секунду, причому тривалість кожного імпульсу — 0,02 мкс. Скільки коливань міститься в одному імпульсі та яка найбільша глибина розвідки локатора?

Дано:

$$\lambda = 0,2 \text{ м}$$

$$n = 5000$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\tau = 0,02 \text{ мкс}$$

$$N - ?; l - ?$$

Розв'язання:

Кількість коливань в одному імпульсі $N = \nu t$, де $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

$$N = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{0,2 \text{ м}} = 30.$$

Глибина розвідки $l = c \frac{t_0}{2}$, де $t_0 = \frac{t}{n}$ — проміжок часу між двома

попередніми імпульсами, тоді $l = \frac{ct}{2n}$, $l = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с}}{2 \cdot 5 \cdot 10^3} = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Відповідь: $N = 30$; $l = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Задача 2. Визначте довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку налаштований коливальний контур, якщо максимальний заряд конденсатора дорівнює $2 \cdot 10^{-8}$ Кл, а максимальна сила струму в контурі — 1 А. Чому дорівнює ємність конденсатора, якщо індуктивність контура $2 \cdot 10^{-7}$ Гн? Чому дорівнює енергія електричного поля конденсатора в момент, коли енергія магнітного поля становить $\frac{3}{4}$ від її максимального значення? Визначте напругу на конденсаторі в цей момент. Активним опором контура знехтуйте.

Дано:

$$q_{\text{макс}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$I_{\text{макс}} = 1 \text{ А}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

$$R = 0$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda - ?; C - ?$$

$$W_e - ?; U - ?$$

Розв'язання:

Довжину хвилі визначимо з формули $\lambda = cT$, де $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Для визначення періоду коливань використаємо закон збереження і перетворення енергії. Для незатухаючих коливань максимальна енергія магнітного поля дорівнює максимальній енергії електричного поля й дорівнює повній енергії електромагнітних коливань у контурі, тобто

$$W_{\text{ел. макс}} = W_{\text{маг. макс}} = W, \text{ звідси } \frac{q_{\text{макс}}^2}{2C} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}, LC = \frac{q_{\text{макс}}^2}{I_{\text{макс}}^2}.$$

Тоді $T = 2\pi \frac{q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}$. Визначаємо довжину електромагнітної хвилі:

$$\lambda = c \cdot 2\pi \frac{q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}; \quad \lambda = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2\pi \frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{1 \text{ А}} \approx 38 \text{ м}.$$

Знаючи індуктивність контура, знайдемо ємність конденсатора:

$$C = \frac{q_{\text{макс}}^2}{LI_{\text{макс}}^2}; \quad C = \frac{(2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл})^2}{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Повна енергія електромагнітних коливань у контурі дорівнює сумі миттєвих значень енергії електричного й магнітного полів і, за відсутності затухання коливань, є сталою величиною:

$$W = W_{\text{маг. макс}} = W_{\text{ел}} = W_{\text{маг}}, \text{ де } W_{\text{маг}} = \left(\frac{3}{4}\right) W_{\text{маг. макс}}.$$

Отже, $W_{\text{маг. макс}} = \left(\frac{3}{4}\right) W_{\text{маг. макс}} + W_{\text{ел}}$; звідси $W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} W_{\text{маг. макс}} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}$.

Підставивши числові значення, матимемо:

$$W_{\text{ел}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А}^2}{2} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}.$$

Енергію електричного поля знайдемо з формули $W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$. Маємо $\frac{CU^2}{2} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}$, звідси знайдемо миттєве значення напруги U на конденсаторі:

$$U = \frac{I_{\text{макс}}}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1 \text{ А}}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}}{2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}}} = 5 \text{ В}.$$

Відповідь: $\lambda = 38 \text{ м}$, $C = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$, $W_{\text{ел}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$, $U = 5 \text{ В}$.



Вправа 23

1. Коливальний контур радіоприймача настроєно на частоту 6 МГц. У скільки разів треба змінити ємність конденсатора контура, щоб налаштуватися на довжину хвилі 150 м?
2. Антена корабельного радіолокатора розташована на висоті 25 м над рівнем моря. На якій максимальній відстані радіолокатор може виявити рятувальний пліт? З якою частотою можуть при цьому випускатися імпульси?
3. Радіолокатор працює на хвилі 5 см і випускає імпульси тривалістю 1,5 мкс. Скільки коливань міститься в кожному імпульсі? Яка мінімальна дальність виявлення цілі?



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Як пов'язані електромагнітні хвилі й технологічна революція? Що таке індустрія 4.0; суспільство 5.0?
- ▶ Можливості бездротового зв'язку.
- ▶ Як далеко можна «бачити» за допомогою електромагнітних хвиль?

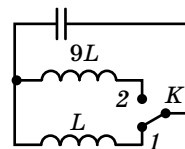


Перевірте себе (§ 24–30)



1. Як зміниться період власних електромагнітних коливань у контурі, зображеному на малюнку, якщо ключ K перевести з положення 1 у положення 2?

А збільшиться в 3 рази
 Б зменшиться в 3 рази
 В збільшиться в 9 разів
 Г зменшиться в 9 разів



2. Зміна заряду конденсатора в коливальному контурі здійснюється за законом $q = 10^{-5} \cos(50,24 \cdot 10^6)t$. Визначте максимальний заряд конденсатора та частоту електромагнітних коливань у контурі.

А 10 мкКл, 8 МГц
 Б 8 мкКл, 10 МГц
 В 10 нКл, 8 мГц
 Г 10 мкКл, 50 МГц

3. Яке з названих нижче явищ, характерних для електромагнітних хвиль, не є загальною властивістю хвиль будь-якої природи?

А поляризація
 Б заломлення
 В дифракція
 Г інтерференція

4. Укажіть параметри електромагнітної хвилі, які змінюються під час переходу хвилі з повітря у скло.

А швидкість і довжина хвилі
 Б частота і швидкість
 В довжина хвилі та частота
 Г амплітуда й частота

5. Визначте швидкість зміни сили струму в обмотці електромагніту індуктивністю 4 Гн, якщо в ній збуджується ЕРС самоіндукції 100 В.

А $25 \frac{A}{c}$
 Б $400 \frac{A}{c}$
 В $2,5 \frac{A}{c}$
 Г $40 \frac{A}{c}$

6. У коло змінного струму ввімкнуто котушку індуктивністю 20 мГн і конденсатор ємністю 50 мкФ. За якої частоти змінного струму виникне явище резонансу?

А 159 кГц
 Б 159 Гц
 В 0,159 Гц
 Г 1,59 кГц

7. У коливальному контурі, що складається з котушки індуктивністю 2 Гн та конденсатора ємністю 1,5 мкФ, максимальне значення заряду на пластинах — 2 мкКл. Визначте значення сили струму в контурі в той момент, коли заряд на пластинах конденсатора досягне значення 1 мкКл.

8. Рамка рівномірно обертається в однорідному магнітному полі. Водночас магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом $\Phi = 3 \cdot 10^{-2} \cos 157t$. Запишіть рівняння зміни ЕРС індукції, що виникає в рамці. Визначте максимальне та діюче значення ЕРС, період і частоту струму.

9. При підключенні конденсатора до мережі змінного струму з напругою 220 В і частотою 50 Гц у ділянці кола протікає струм 0,14 А. Визначте ємність конденсатора. Вважайте активний опір утвореної ділянки мізерно малим.

10. Трансформатор, ККД якого 75 %, споживає потужність 90 Вт. Визначте силу струму у вторинній обмотці, якщо напруга на її затискачах — 12 В.



Світлові хвилі. Основні фотометричні величини

Розвиток уявлень про природу світла. Століттями тривали між ученими суперечки про природу світла. У 1675 р. Ісаак Ньютон висунув корпускулярну теорію природи світла, згідно з якою світло складається з малих частинок різних форми та розмірів, які випромінюються будь-якими тілами й називаються корпускулами. Але ця теорія не могла пояснити всі оптичні явища, тому 1690 р. голландський фізик Християн Гюйгенс запропонував хвильову теорію природи світла, згідно з якою світло — це механічні поздовжні хвилі, які мають поширюватися в пружному середовищі, названому світловим ефіром. Але обидві ці теорії не відповідали дійсності. Після створення Джеймсом Максвеллом електромагнітної теорії (60–70-ті роки XIX ст.) він зробив припущення, що світло — це електромагнітні хвилі, оскільки швидкість світла і швидкість електромагнітних хвиль — однакові. Електромагнітна теорія також не могла пояснити деякі оптичні явища (наприклад, фотоефект). У 1900 р. німецький фізик Макс Планк висуває квантову теорію природи світла, яка доповнює й розширює електромагнітну теорію. Отже, світло в певних явищах виявляє як корпускулярні, так і хвильові властивості. У фізиці такий прояв дістав назву *корпускулярно-хвильовий дуалізм*. Ми далі з'ясуємо, що такі властивості притаманні й іншим об'єктам, наприклад електронам.

У цьому й наступних параграфах детальніше дослідимо хвильові властивості світла. Оперуючи поняттям «світло», ми розглядатимемо електромагнітні хвилі в діапазоні частот коливань від $4 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. У цьому інтервалі кожній частоті відповідає довжина хвилі та свій колір випромінювання: від 400 нм (фіолетовий колір) до 760 нм (червоний). Зазначимо, що до оптичного діапазону (світла) належить також інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання.

Фотометричні величини. Оскільки видиме світло сприймається оком людини, то, окрім суто енергетичних величин, що характеризують будь-яке випромінювання, існують фотометричні величини, які враховують зорові відчуття людини. Вимірюють фотометричні характеристики за допомогою напівпровідникових приймачів, чутливість яких до світла є близькою до чутливості ока.

У таблиці 7 зіставлено енергетичні величини та відповідні фотометричні величини.

Таблиця 7

Енергетична величина	Одиниця величини	Фотометрична величина	Позначення	Одиниця величини
Енергія випромінювання	Дж	Світлова енергія	W	лм · с (люмен за секунду)

Енергетична величина	Одиниця величини	Фотометрична величина	Позначення	Одиниця величини
Потік випромінювання (потужність випромінювання)	Вт	Світловий потік	Φ	лм (люмен)
Поверхнева густина потоку випромінювання	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	Освітленість	E	лк (люкс)
Сила випромінювання	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$	Сила світла	I	кд (кандела)
Енергетична яскравість	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$	Яскравість	L	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$

Для характеристики джерел світла щодо освітлення, яке вони створюють, користуються поняттям *світлового потоку*.

Світловий потік Φ — світлова фотоелектрична величина, що характеризує потужність випромінювання джерела світла, тобто енергію світлового випромінювання за одиницю часу, $\Phi = \frac{W}{t}$.

Одиниця світлового потоку — люмен, 1 лм.

Якщо розміри джерела світла настільки малі, що його форму не можна розрізнити з відстані, на якій досліджується випромінюваний світловий потік, і цей потік розподілений рівномірно в усіх напрямках, то таке джерело світла називають *точковим*.

Характерним для точкового джерела світла є те, що випромінювані світлові хвилі — сферичні.

Головною характеристикою джерела світла є *сила світла*.

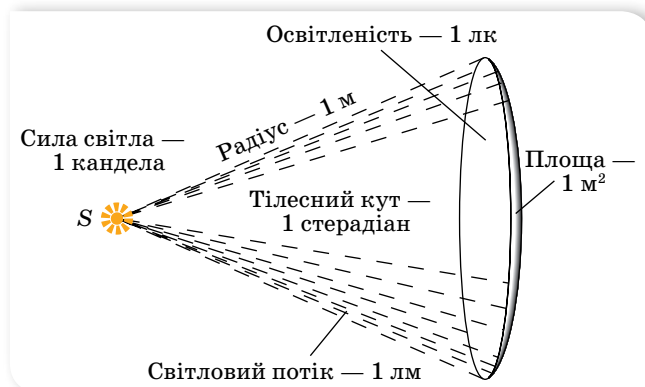
Сила світла I — світлова фотометрична величина, що характеризує просторовий розподіл потужності випромінювання в заданому напрямку. Сила світла дорівнює відношенню світлового потоку $\Delta\Phi$, який випромінює дане джерело світла в заданому напрямку всередині малого тілесного кута $\Delta\omega$, до величини цього кута, $I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega}$.

Одиницею сили світла в СІ є кандела, 1 кд, що є однією із семи основних одиниць СІ (мал. 142).

У разі рівномірного випромінювання світла в усі боки повний світловий потік точкового джерела світла дорівнює $\Phi = 4\pi I$. Із цієї формули випливає зв'язок між фотометричними одиницями: 1 лм = 1 кд · 1 ср.

Світловий потік Φ для кожного джерела є фіксованою величиною і не може бути збільшений за допомогою оптичних приладів. Проте оптичні прилади (дзеркала, лінзи) дають можливість перерозподілити світловий потік у тілесному куті та отримати в деяких напрямках більший потік на одиницю тілесного кута, тобто більшу силу світла. Так, наприклад,

застосовуючи параболічне дзеркало в прожекторах, вдається збільшити силу світла в одному напрямку в тисячі разів через значне її зменшення в усіх інших напрямках.



Мал. 142. До пояснення
 одиниці сили світла

Світловий потік, як і потік енергії, можна вимірювати у ватах, оскільки він фактично визначає потужність випромінювання, яке падає на певну поверхню. Проте, оскільки наше око найчутливіше до випромінювання, довжина хвилі якого 555 нм (зелений колір), то встановлено, що потік оранжевих променів ($\lambda = 610$ нм) потужністю 1 Вт створює зорове відчуття такої само інтенсивності, як потік зелених променів потужністю 0,5 Вт.

Визначити універсальну залежність між ватом і люменом не вдається. Експериментально встановлено, що світловому потоку хвиль зеленого кольору в 1 лм відповідає потужність 0,0016 Вт. Для світла інших довжин хвиль співвідношення між люменом і ватом буде іншим.

У темряві ми не бачимо тіл, які нас оточують. За наявності джерела світла світловий потік, який поширюється від нього, падає на тіла, відбивається і, потрапляючи в око людини, дає змогу їх бачити. Що більший світовий потік впаде на тіло, то більшим буде і відбитий потік, тому людина чіткіше зможе бачити це тіло. Величину, яка характеризує різну видимість окремих тіл, називають освітленістю.

Освітленість E — фотометрична величина, що визначається відношенням світлового потоку $\Delta\Phi$, який падає на малу ділянку поверхні, до площі ΔS цієї поверхні, $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$.

Одиниця освітленості — люкс, 1 лк.

Якщо освітленість різних ділянок поверхні не однакова, треба взяти таку малу площу ΔS , щоб розподіл потоку Φ у її межах можна було вважати рівномірним. У разі нерівномірного розподілу потоку Φ на площі ΔS визначають середню освітленість цієї поверхні.

У випадку точкового джерела світла $E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$, де I — сила світла, r — відстань від джерела світла до освітленої поверхні, α — кут між нормаллю до поверхні й напрямком поширення світлового променя.

Закони освітленості

1. З віддаленням джерела освітленість зменшується обернено пропорційно квадрату відстані.
2. Освітлюваність, яку створюють кілька джерел світла в деякій точці поверхні, дорівнює сумі освітленостей, створюваних кожним джерелом окремо.

Для кожного приміщення (простору) існують вироблені на практиці норми необхідної освітленості залежно від його призначення. Наприклад, для читання потрібна освітленість 50 лк. Для порівняння: Сонце в середині дня (у середніх широтах) створює освітленість порядку 10^5 лк, повний Місяць (у зеніті) — 0,2 лк, лампа розжарювання потужністю 100 Вт, яка висить на висоті 1 м над столом, створює на поверхні стола (під лампою) освітленість 100 лк.

Читаючи книжку, ми чітко бачимо букви на білому фоні аркуша, хоча його освітленість можна вважати скрізь однаковою. Пояснюється це тим, що білий аркуш і букви по-різному відбивають світловий потік, який падає на них.

Отже, різні ділянки поверхонь джерел світла — первинних і вторинних (аркуш паперу, що відбиває світло, можна вважати вторинним джерелом світла), які ми розглядаємо в певному напрямку, можуть значно відрізнитися своєю *яскравістю*.

Яскравість L — фотометрична величина, що характеризує поверхневу густину світлового потоку $\Delta\Phi$, який випромінюється світною поверхнею ΔS у заданому напрямку в тілесному куті $\Delta\omega$, $L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \Delta\omega \cos \varphi}$, де

φ — кут між нормаллю до світної поверхні й напрямком поширення світлової хвилі.

Одиниця яскравості — кандела на квадратний метр, $1 \frac{\text{КД}}{\text{м}^2}$.

Яскравість пов'язана з іншими фотометричними величинами: силою світла I , $L = \frac{I}{\Delta S \cos \varphi}$, та освітленістю E , $L = \frac{E}{\Delta\omega \cos \varphi}$.

Наведемо для прикладу яскравість деяких джерел світла в $\frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$: нічне небо — $10^{-7} \frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$, Місяць — до $1 \frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$, Сонце поблизу горизонту — $600 \frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$, Сонце опівдні — до $150\,000 \frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$, полум'я свічки — до $1 \frac{\text{КД}}{\text{см}^2}$.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Як змінювались уявлення про природу світла? Чому? **2.** Що означає корпускулярно-хвильовий дуалізм світла? **3.** Назвіть основні фотометричні величини та їхні одиниці. **4.** Накресліть графік залежності освітленості поверхні книжки від кута між напрямком на джерело світла й нормаллю до сторінки. **5.** На яку висоту треба підняти над центром стола радіусом R точкове джерело, сила світла якого I , щоб освітленість краю поверхні стола була найбільшою з можливих?



Виконуємо навчальні проекти

- ▶ Дослідження чинників, які впливають на освітленість робочих місць у приміщенні.
- ▶ Дослідження порівняльних характеристик електричних джерел світла.
- ▶ Економічне обґрунтування міського освітлення.



Приклади розв'язування задач

Задача. На висоті 3 м від землі висить лампа, сила світла якої 250 кд, а на висоті 4 м — лампа із силою світла 150 кд. Відстань між лампами — 2,5 м (мал. 143). У скільки разів освітленість під першою лампою більша, ніж під другою?

Дано:

$$I_1 = 250 \text{ кд}$$

$$I_2 = 150 \text{ кд}$$

$$h_1 = 3 \text{ м}$$

$$h_2 = 4 \text{ м}$$

$$l = 2,5 \text{ м}$$

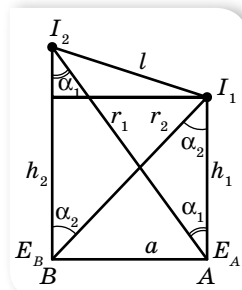
$$\frac{E_A}{E_B} \text{ — ?}$$

Розв'язання:

Освітленість під кожною лампою дорівнює сумі освітленості, яку створюють обидві лампи. Отже, на основі законів освітленості, маємо (мал. 150):

$$E_A = \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2}{r_1^2} \cos \alpha_1 = \frac{I_1}{h_1^2} + \frac{I_2 h_2}{r_1^3};$$

$$E_B = \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1}{r_2^2} \cos \alpha_2 = \frac{I_2}{h_2^2} + \frac{I_1 h_1}{r_2^3}.$$



Мал. 143

Необхідні величини r_1 і r_2 обчислимо за теоремою Піфагора, попередньо визначивши відстань a між точками A і B із співвідношення $a = \sqrt{l^2 - (h_2 - h_1)^2}$.

Дістанемо:

$$r_1 = \sqrt{h_2^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_1 = \sqrt{16 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{21,25 \text{ м}^2} \approx 4,6 \text{ м};$$

$$r_2 = \sqrt{h_1^2 + l^2 - (h_2 - h_1)^2}; \quad r_2 = \sqrt{9 \text{ м}^2 + 6,25 \text{ м}^2 - 1 \text{ м}^2} = \sqrt{14,25 \text{ м}^2} \approx 3,8 \text{ м}.$$

Визначимо E_A і E_B :

$$E_A \approx \frac{250 \text{ кд}}{9 \text{ м}^2} + \frac{150 \text{ кд} \cdot 4 \text{ м}}{(4,6)^3 \text{ м}^3} \approx 27,8 \text{ лк} + 6,2 \text{ лк} \approx 34 \text{ лк};$$

$$E_B \approx \frac{150 \text{ кд}}{16 \text{ м}^2} + \frac{250 \text{ кд} \cdot 3 \text{ м}}{(3,8)^3 \text{ м}^3} \approx 9,4 \text{ лк} + 13,7 \text{ лк} \approx 23 \text{ лк}.$$

Визначимо відношення освітленостей: $\frac{E_A}{E_B} \approx \frac{34 \text{ лк}}{23 \text{ лк}} \approx 1,48$.

Відповідь: 1,48.



Вправа 24

1. Дві електролампи, що розміщені поряд, освітлюють екран. Відстань від ламп до екрана — 1 м. Одну лампу вимкнули. На яку відстань слід наблизити екран, щоб його освітленість не змінилась?
2. Визначте освітленість поверхні Землі, що створюється перпендикулярними сонячними променями. Яскравість Сонця $1,2 \cdot 10^9 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$, відстань від Землі до Сонця $1,5 \cdot 10^8$ км, радіус Сонця $7 \cdot 10^5$ км.
3. Зіпсовану лампу на 75 кд замінили лампою на 25 кд і наблизили її до освітлюваної поверхні, зменшивши відстань утричі. Чи було досягнуто попередньої освітленості поверхні?
4. На який кут треба відхилити площину, щоб її освітленість зменшилась удвічі порівняно з освітленістю площини під час перпендикулярного падіння променів?
5. Ліхтар для освітлення вулиці, сила світла якого 500 кд, висить на стовпі на висоті 3 м від поверхні землі. Визначте освітленість поверхні землі на відстані 4 м від основи стовпа.
6. Визначте силу світла точкового джерела, якщо воно міститься в центрі сфери радіусом 85 см і на поверхню цієї сфери площею $1,5 \text{ м}^2$ випромінює світловий потік 360 лм. Визначте повний світловий потік, який випромінює це джерело.
7. Який світловий потік потрапляє на поверхню стола, якщо її середня освітленість дорівнює 9500 лк, а площа — $1,6 \text{ м}^2$?
8. Стіл діаметром 1,2 м освітлюється лампою, яка висить на висоті 1,2 м від його середини. Чому дорівнює освітленість краю стола, якщо повний світловий потік лампи — 750 лм?
9. Дві лампи розташовані на відстані 2,4 м одна від одної. Де потрібно розмістити між ними непрозорий екран, щоб він був однаково освітлений з обох сторін? Сила світла ламп дорівнює 100 і 50 кд.
10. Лампа, сила світла якої 400 кд, розташована на відстані 1 м від екрана. На якій відстані потрібно поставити позаду лампи плоске дзеркало, паралельне екрану, щоб освітленість у центрі екрана збільшилась на 100 лк?

§ 32

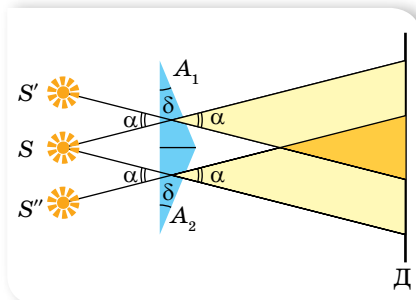
Інтерференція світла

Когерентність світлових хвиль. Як ми знаємо, хвилям будь-якої природи притаманні однакові властивості. Так, явище інтерференції, яке ми розглядали на прикладі механічних хвиль, властиве й електромагнітним, зокрема світловим. Пригадаймо: *інтерференцією* називається додавання в просторі двох і більше хвиль, за якого відбувається постійний у часі розподіл амплітуд результуючих коливань. Для її отримання необхідне виконання деяких умов. З'ясуємо їх.

Щоб інтерференційна картина була стійкою, потрібні узгоджені хвилі, тобто такі, що мають однакові довжини й стали різницю фаз у будь-якій

точці простору. Хвилі, які відповідають цим умовам, називають *когерентними*, відповідно когерентними називають і джерела, які їх випромінюють.

Для одержання когерентних джерел світла вдаються до штучного прийому: пучок світла від одного джерела розділяють на два або кілька пучків, які йдуть різними шляхами, і в подальшому зводяться й накладаються один на один. Якщо ці пучки пройдуть різну відстань, то між ними виникне різниця фаз. У разі накладання таких пучків і виникає стійка інтерференційна картина. Уперше такий метод використав французький фізик Огюстен Френель (1788–1827). На малюнку 144 наведено схему досліду Френеля для одержання когерентних джерел світла за допомогою так званої біпризми Френеля.



Мал. 144. Схема дії біпризми Френеля

Існують інші способи отримання когерентних джерел світла.

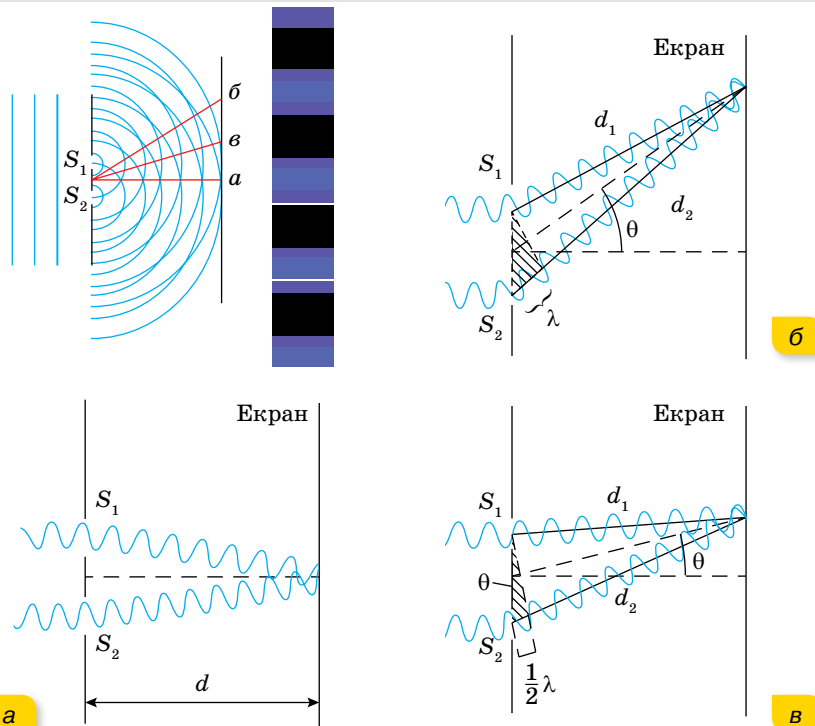
Умови мінімумів і максимумів інтерференційної картини. Уперше явище інтерференції дослідив Томас Юнг (1773–1820) (йому належить і термін «інтерференція»). Юнг також першим виміряв довжину світлової хвилі. У своїх дослідях Юнг використав сонячне світло, спрямовуючи його крізь дві щілини S_1 та S_2 . До речі, метою проведення досліду була перевірка припущення про корпускулярну природу світла. Якщо світло є потоком частинок, то на екрані повинні спостерігатися дві яскраві лінії. Проте Юнг побачив цілу серію яскравих і темних ліній.

Щоб зрозуміти, яким чином виникає інтерференційна картина на екрані, скористаємося серією малюнків 145, с. 170.

На малюнках зображено монохроматичні хвилі довжиною λ , які проходять крізь дві щілини S_1 та S_2 . За щілинами хвилі поширюються в усіх напрямках. Ми ж розглядатимемо тільки три напрямки — a , b та v . На малюнку 145, a зображено хвилі, які потрапляють у центр екрана, на малюнках 145, b і 145, v — падають на екран під різними кутами.

Кожна з хвиль проходить певну відстань. Розрізняють звичайну довжину пройденого шляху l та оптичну d . Для вакууму ці довжини однакові. Для довільного середовища *оптична довжина шляху* d — це величина, що визначається добутком фактичної довжини шляху світлової хвилі в даному середовищі (геометричної довжини) та абсолютного показника заломлення цього середовища, $d = nl$. Від того, якою буде оптична різниця ходу між двома хвилями $\Delta d = d_1 - d_2$, залежить амплітуда результуючої хвилі.

У першому випадку a від кожної з двох щілин хвилі проходять однакові відстані $d_1 = d_2$ та досягають екрана в одній фазі. У цьому разі амплітуда результуючої хвилі подвоюється і спостерігається підсилення світла (світла лінія). Таке саме підсилення спостерігається й у випадку, коли різниця ходу двох хвиль $d_1 - d_2$ буде кратною довжині хвилі.



Мал. 145. Інтерференція від двох щілин

Якщо ж одна із хвиль проходить додаткову відстань, яка дорівнює половині хвилі, півтори хвилі й т. д., тобто різниця ходу $d_1 - d_2$ становить непарне число півхвиль, то обидві хвилі потраплять на екран у протифазі й «погасять» одна одну, оскільки результуюча амплітуда дорівнюватиме нулю.

Можливий і ще один випадок (на малюнку 145 не показано), коли різниця ходу дорівнює не цілому числу півхвиль. У цьому разі хвилі придуть з різними фазами й будуть або підсилювати, або послаблювати одна одну. Амплітуда результуючої хвилі буде мати проміжне значення між нулем і подвійною амплітудою.

Узагальнення розглянутих випадків має назву умов максимуму та мінімуму інтерференції. Так, щоб отримати *максимум інтерференційної картини* (підсилення), необхідно, аби оптична різниця ходу Δd , дорівнювала нулю (мал. 145, а) або парному числу півхвиль (мал. 145, б), $\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Мінімум інтерференційної картини (послаблення) спостерігається в точках, для яких хвильова різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль (мал. 145, в), $\Delta d = d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

По суті, інтерференційна картина — це незмінний у часі розподіл амплітуд інтерферуючих хвиль. Розглядаючи інтерференційну картину,

ми вказали, що на щілини падають монохроматичні хвилі довжиною λ . Вигляд інтерференційної картини залежить від довжини хвиль. Так, якщо на установку спрямувати світло іншого кольору (іншої довжини хвиль), то спостерігатиметься аналогічна картина, але відстані між світлими й темними смугами будуть іншими. Наприклад, для червоного світла відстані між смугами виявляться більшими, ніж за освітлення зеленим або синім.

А що ж ми спостерігатимемо на екрані, освітлюючи його білим світлом? У цьому разі в центрі буде видно білу світлу смугу, а по обидва боки від неї — кольорові смуги, забарвлені всіма кольорами райдуги: від фіолетового (який розташований ближче до центра екрана) до червоного. (Спробуйте самостійно пояснити, чому у випадку білого світла спостерігаються різнокольорові смуги й чому на деякій відстані від центра екрана смуги зникають, а екран стає рівномірно освітленим.)

З'ясуймо ще одне питання. Як відомо, електромагнітні хвилі (зокрема й світлові) несуть енергію. Що ж відбувається із цією енергією, коли хвилі гасять одна одну? Можливо, ця енергія перетворюється на інші види й у мінімумах інтерференційної картини виділяється теплота? Ні. Мінімум у даній точці інтерференційної картини означає, що енергія сюди зовсім не надходить. Унаслідок інтерференції енергія перерозподіляється в просторі. Вона концентрується в максимумах, не потрапляючи в мінімуми.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які хвилі називаються когерентними? 2. Назвіть способи спостереження інтерференції. 3. Сформулюйте умови максимумів і мінімумів інтерференційної картини. 4. На якому шляху у вакуумі вкладеться стільки ж довжин хвиль монохроматичного світла, скільки їх вкладається на шляху 3 мм у воді?



Приклади розв'язування задач

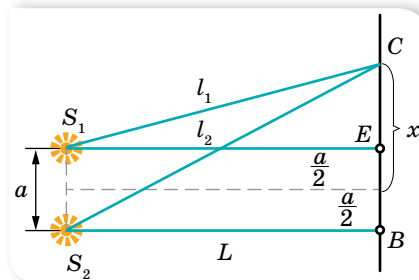
Задача. У досліді Юнга (мал. 146) відстань між щілинами $a = 0,07$ мм, а відстань від подвійної щілини до екрана $L = 2$ м. Коли прилад освітили зеленим світлом, то відстань до першого максимуму становила $x = 16$ мм. Визначте за цими даними довжину хвилі.

Дано:

$$\begin{aligned} a &= 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} \\ L &= 2 \text{ м} \\ x &= 16 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \lambda &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

У певній точці C екрана буде максимум освітленості за умови $\Delta d = l_2 - l_1 = k\lambda$.



Мал. 146

Визначимо оптичну різницю ходу Δd , для цього застосуємо до трикутників S_1CE і S_2CB теорему Піфагора:

$$l_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2, \quad l_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2.$$

Віднімаючи від першого рівняння друге, дістаємо $l_2^2 - l_1^2 = 2xa$,
 $(l_2 - l_1)(l_2 + l_1) = 2xa$.

Оскільки $a \ll L$, то $l_1 + l_2 \approx 2L$. Отже, $l_2 - l_1 = \frac{xa}{L}$.

Ураховуючи, що $l_2 - l_1 = k\lambda$, можемо записати: $k\lambda = \frac{xa}{L}$.

Звідси $\lambda = \frac{a \cdot x}{L}$, оскільки за умовою $k = 1$.

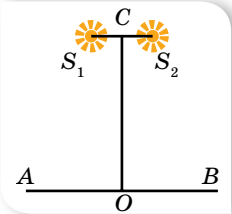
Після підстановки даних $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Відповідь: $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-7}$ м.



Вправа 25

1. Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 освітлюють екран AB , площина якого паралельна напрямку S_1S_2 (мал. 147). Доведіть, що на екрані в точці O , яка лежить на перпендикулярі, опущеному із середини відрізка S_1S_2 , буде максимум освітленості.
2. Два когерентні джерела світла S_1 і S_2 (мал. 147) випускають монохроматичне світло з довжиною хвилі 600 нм. Визначте, на якій відстані від точки O буде перший максимум освітленості, якщо $|OC| = 4$ м і $|S_1S_2| = 1$ мм.
3. Відстань на екрані (мал. 147) між двома сусідніми максимумами освітленості дорівнює 1,2 мм. Визначте довжину хвилі світла, що його випускають когерентні джерела S_1 і S_2 , якщо $|OC| = 2$ м і $|S_1S_2| = 1$ мм.
4. Як зміниться інтерференційна картина на екрані AB (мал. 147), якщо:
 - а) не змінюючи відстані між джерелами світла, віддалити їх від екрана;
 - б) не змінюючи відстані до екрана, зблизити джерела світла;
 - в) джерела випускатимуть світло з меншою довжиною хвилі?



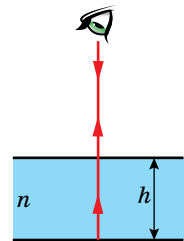
Мал. 147

§ 33

Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках

Інтерференція в тонких плоскопаралельних пластинках. У природних умовах інтерференцію світла можна спостерігати на тонких мильних бульбашках, на плівках бензину, розлитому на мокрому асфальті.

Спочатку з'ясуємо, як утворюється інтерференційна картина за освітлення тонкої плоскопаралельної пластинки. Розглянемо випадок, коли інтерференція спостерігається у відбитому світлі, тобто спостерігач дивиться на пластинку згори, і вважатимемо, що хвилі падають на пластинку перпендикулярно (мал. 148).



Мал. 148.
Інтерференція в тонкій пластинці

Оптична різниця ходу інтерферуючих променів дорівнюватиме $2dn$, де d — товщина пластинки, n — абсолютний показник заломлення речовини пластинки. Така різниця ходу зумовлена тим, що відбитий від нижньої поверхні пластинки промінь світла проходить зайвий шлях, що дорівнює подвійній товщині пластинки.

Далі слід урахувувати той факт, що в оптиці, як і у випадку механічних хвиль, під час відбиття променів від оптично більш густого середовища втрачається півхвилі, а в разі відбиття від середовища оптично менш густого втрати півхвилі не буде. У розглядуваному випадку півхвиля втрачається під час відбиття від верхньої поверхні. Отже, оптична різниця ходу становить $2dn + \frac{\lambda}{2}$.

Максимальне підсилення у відбитому світлі буде тоді, коли оптична різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль. Отже, умова максимального підсилення інтерферуючих хвиль для пластинки, коли інтерференцію спостерігають у відбитому світлі, визначається співвідношенням $2dn + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}$, де $m = 1, 2, \dots$.

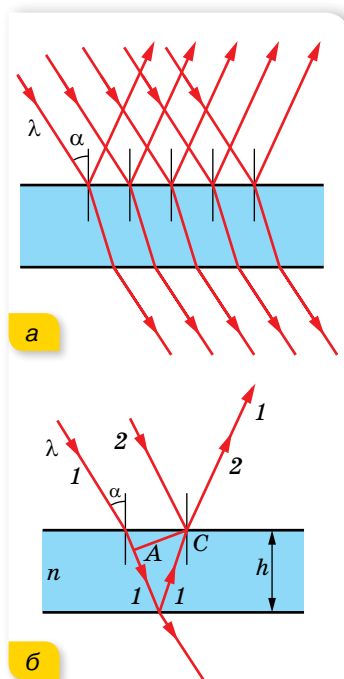
Отже, умова максимального ослаблення світла визначається співвідношенням $2dn + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$, де $m = 1, 2, \dots$.

Якщо дивитись на пластинку в *прохідному світлі*, тобто знизу, то ці умови міняються місцями.

Якщо монохроматичні промені падають на поверхню пластинки під кутом α (мал. 149, а), то різниця ходу між інтерферуючими променями змінюється.

Для променів 1 і 2 вона дорівнює $(AB + BC)n + \frac{\lambda}{2}$ (мал. 149, б). Тут треба зважати, що згідно з принципом Гюйгенса AC є положенням фронту хвилі в момент відбивання променя 2 в точці C (тобто $AC \perp AB$). Можна довести, що зі збільшенням кута падіння оптична різниця ходу зменшується. Це означає, що під час повороту пластинки відносно променів вона по чергово здаватиметься то темною, то світлою.

Якщо пластинку освітлювати білим світлом, то внаслідок інтерференції для одних променів з однаковими довжинами хвиль отримуватиметься підсилення, а для інших хвиль з іншими довжинами — послаблення. Тому пластинка здаватиметься спостерігачеві забарвленою в той колір, який близький до кольору променів, що максимально підсилюють один одного.

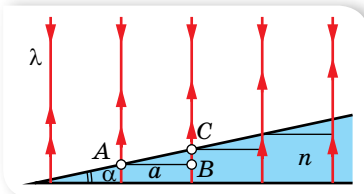


Мал. 149. Хід променів крізь тонку пластинку

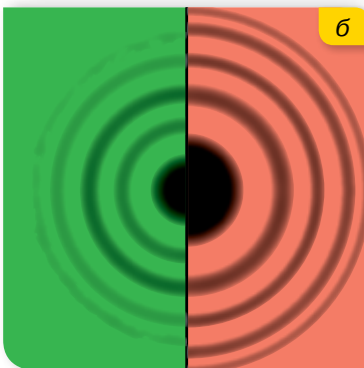
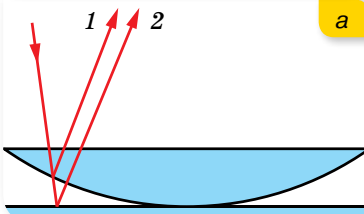
Зрозуміло, що, повертаючи пластинку відносно променів, спостерігатимемо зміну її забарвлення. Підкреслимо ще раз, що все викладене стосується випадку, коли на пластинку падають паралельні промені.

Інтерференція в клиноподібних плівках. Кільця Ньютона. З'ясуємо особливості інтерференції світла в клиноподібній плівці з дуже малим кутом α і показником заломлення речовини n . Будемо освітлювати плівку паралельними монохроматичними хвилями, які перпендикулярні до однієї з граней клина. На поверхні грані чергуються темні та світлі смуги, паралельні гострому ребру клина. Пояснимо їх утворення.

На малюнку 150 зображено хід інтерферуючих променів у клині (оскільки кут α малий, то промені, відбиті від двох граней клина, практично паралельні). З віддаленням від ребра клина їх різниці ходу збільшуються.



Мал. 150. Інтерференція на клиноподібній плівці



Мал. 151. Кільця Ньютона: а — установка для отримання «кілець Ньютона»; б — вигляд кілець Ньютона для зелених і червоних хвиль у відбитому світлі

Нехай у точці A буде максимальне підсилення світла. Тоді на деякій відстані a від точки A буде наступна точка B , у якій, унаслідок збільшення товщини клина, знову буде максимальне підсилення світла, відповідно при цьому різниця ходу повинна зростати на λ . Тобто оптична різниця ходу $2BC \cdot n$ має дорівнювати λ . З малюнка 150 видно, що $BC = a \operatorname{tg} \alpha$, тому $2na \operatorname{tg} \alpha = \lambda$.

Для малих кутів тангенс кута можна вважати таким, що дорівнює самому куту, вираженому в радіанах, тому дістанемо $2\alpha a n = \lambda$, звідки $a = \frac{\lambda}{2n\alpha}$.

Неважко зрозуміти, що наступна світла смуга буде на відстані a від точки C і т. д. Це означає, що інтерференційні смуги в описаному випадку розміщуються на однакових відстанях одна від одної. Зі збільшенням кута α відстань між світлими (або темними) смугами зменшується. Якщо кут α у плівки поступово зменшувати, то інтерференційні смуги розсуватимуться, і коли грані плівки стануть паралельними, смуги зовсім зникнуть. Зі збільшенням кута α смуги зближуються і для кута близько 1° накладаються одна на одну.

Клиноподібний повітряний простір можна отримати, якщо на плоскопаралельну пластинку покласти плоскоопуклу лінзу (мал. 151, а). Якщо освітити таку систему паралельними монохроматичними променями так, щоб вони падали перпендикулярно

до плоскої поверхні лінзи, то у відбитому світлі буде добре видно чергування світлих і темних кілець, які називають «кільцями Ньютона». У цьому разі інтерферують промені, що відбиваються від кривої поверхні лінзи й від поверхні пластини. Для нормального падіння променів на плоску поверхню лінзи оптична різниця ходу приблизно дорівнює подвійній товщині повітряного шару між лінзою та пластиною, $2hn$.

Зверніть увагу на те, що перша хвиля відбивається від межі скло—повітря, а друга — від межі повітря—скло. Тому в другому випадку відбувається зміна фази коливань відбитої хвилі на 180° , що відповідає збільшенню різниці ходу на $\frac{\lambda}{2}$.

На малюнку 151, б зображено вигляд кілець Ньютона у відбитому світлі (у прохідному світлі в центрі розташовується світла пляма) для хвиль зеленого та червоного кольорів. Як видно, з віддаленням від центра кільця зближуються. Це пояснюється тим, що в цьому напрямку зростає кут повітряного клина (мал. 151, а). До того ж радіус кілець залежить від довжини падаючої хвилі. Як саме — висновок зробіть самостійно (мал. 151, б).

Про практичне використання інтерференції світла читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. В останній момент перед тим, як розірватись і утворити отвір, мильна бульбашка втрачає прозорість. Як це пояснити, адже в цей момент товщина плівки найменша?
2. Як зміниться вигляд багатокольорної мильної бульбашки, якщо освітити її монохроматичним світлом?
3. Кольорові яскраві смуги утворюються від краплі бензину лише тоді, коли вона падає на вологу, а не на суху поверхню асфальту. Поясніть чому.
4. Як зміниться кількість кілець Ньютона та відстань між ними, якщо проміжок між лінзою і склом заповнити водою?



Експериментуємо

Визначте радіус кривизни плоско-опуклої лінзи в установці для спостереження кілець Ньютона. Обладнання: прилад для спостереження кілець Ньютона, штангенциркуль. Вважайте довжину хвиль зеленого світла відомою: $\lambda = 0,55$ мкм.



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Мильна бульбашка в точці, найближчій до спостерігача, здається зеленою ($\lambda = 540$ нм). Визначте мінімальну товщину плівки. Показник заломлення мильного розчину $n = 1,35$.

Дано:

$\lambda = 540 \text{ нм}$

$n = 1,35$

$d_{\min} - ?$

Розв'язання:

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати.

Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу задовольняє умову

$$2d_{\min}n = \frac{\lambda}{2}. \text{ Звідки } d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}.$$

Від найближчої до спостерігача точки сферичної поверхні світло відбивається перпендикулярно. Відбиваючись від верхньої поверхні бульбашки, світло втрачає півхвилі, а від внутрішньої поверхні — відбивається без втрати. Таким чином, мінімальна оптична різниця ходу задовольняє умову

$$2d_{\min}n = \frac{\lambda}{2}. \text{ Звідки } d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}.$$

$$d_{\min} = \frac{540 \text{ нм}}{4 \cdot 1,35} = 100 \text{ нм}.$$

Відповідь: $d_{\min} = 100 \text{ нм}$.

Задача 2. Визначте радіус кривизни лінзи, що застосовується в установці для спостереження кілець Ньютона, якщо відстань між другим і третім світлими кільцями — 0,5 мм. Установка освітлюється світлом, довжина хвилі якого 550 нм. Спостереження ведеться у відбитому світлі.

Дано:

$\Delta r = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

$R - ?$

Розв'язання:

З $\triangle ABC$ (мал. 152) маємо:

$$|BA|^2 = |BC|^2 + |AC|^2$$

$$\text{або } R^2 = r_m^2 + (R - h)^2.$$

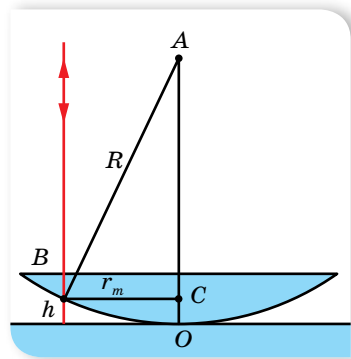
Звідки $r_m^2 - 2Rh + h^2 = 0$. Нехтуючи малою величиною h^2 порівняно з іншими доданками, отримуємо $r_m^2 = 2hn$, звідки $h = \frac{r_m^2}{2R}$.

Для m -го світлого кільця у відбитому світлі різниця ходу дорівнює $2hn + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}$. Підставляючи в цю формулу вираз для h , визначимо

$$\text{радіус кільця } r_m^2 = (2m - 1) \frac{\lambda R}{2n}.$$

$$\text{Для } m = 2: r_2 = \sqrt{(2 \cdot 2 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}}.$$

$$\text{Для } m = 3: r_3 = \sqrt{(2 \cdot 3 - 1) \frac{\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}}.$$



Мал. 152

$$\text{Тоді } \Delta r = r_3 - r_2 = \sqrt{\frac{5\lambda R}{2n}} - \sqrt{\frac{3\lambda R}{2n}} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2n}}(\sqrt{5} - \sqrt{3}) \approx 0,5\sqrt{\frac{\lambda R}{2n}}.$$

Оскільки між лінзою і пластинкою — повітряний простір, то $n = 1$.

$$\text{Отже, } R = \frac{\Delta r^2}{0,125\lambda}; R = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2}{0,125 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,6 \text{ м}.$$

Відповідь: 3,6 м.

Зверніть увагу! Проаналізувавши розв'язання задачі, можна зробити узагальнювальний висновок: у відбитому світлі радіус світлого кільця

визначають за формулою $r = \sqrt{\frac{2m-1}{2}} \lambda R$, радіус темного кільця —

$r = \sqrt{m\lambda R}$, де $m = 1, 2, 3$ — порядковий номер кільця. При $m = 0$ у центрі спостерігається темна пляма. Якщо розглядати інтерференційну картину в прохідному світлі, то темні та світлі кільця міняються місцями (у центрі спостерігається світла пляма).



Вправа 26

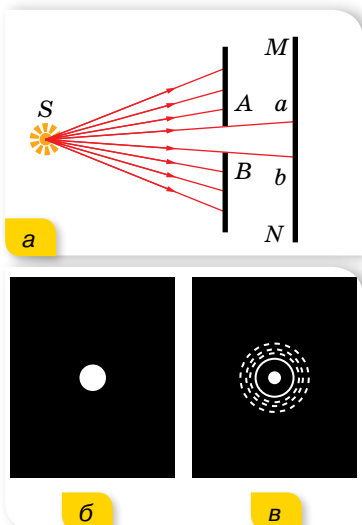
- Спочатку мильну плівку спостерігають у відбитому світлі через червоний світлофільтр ($\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м). При цьому відстань між сусідніми червоними смугами становить 3 мм. Потім цю плівку спостерігають через синій світлофільтр ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м). Визначте відстань між сусідніми синіми смугами. Вважайте, що форма плівки за час спостереження не змінюється.
- Біле світло, що нормально падає на мильну плівку й відбите від неї, дає у видимому спектрі інтерференційний максимум для хвилі довжиною 630 нм та ближчий до нього мінімум для хвилі 450 нм. Визначте товщину плівки.
- Тонка плівка товщиною 0,5 мкм освітлюється світлом довжиною хвилі 590 нм. Визначте колір плівки у прохідному світлі, якщо показник заломлення речовини плівки — 1,48, а промені напрямлені перпендикулярно до її поверхні. Що буде відбуватися з кольором плівки, якщо її нахилити відносно променів?
- На мильний клин ($n = 1,33$) нормально до його грані падає монохроматичне світло довжиною хвилі 546 нм. Відстань між п'ятьма смугами — 2 см. Визначте заломний кут клина.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні пластинки. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець — $r_k = 4$ мм і $r_{k+1} = 4,38$ мм. Радіус кривизни лінзи — 6,4 м. Визначте порядкові номери кілець та довжину хвилі падаючого світла.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом ($\lambda = 600$ нм), що падає нормально до поверхні установки. Визначте товщину повітряного простору між лінзою і пластинкою в тому місці, де спостерігається п'яте темне кільце у відбитому світлі.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні установки. Радіус кривизни лінзи — 15 м. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Відстань між п'ятим і двадцять п'ятим світлим кільцями — 9 мм. Визначте довжину хвилі монохроматичного світла.
- Установка для отримання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні установки. Після того як простір між лінзою і скляною пластинкою заповнили рідиною, радіуси темних кілець у відбитому світлі зменшились в 1,25 разу. Визначте показник заломлення рідини.

§ 34 Дифракція світла

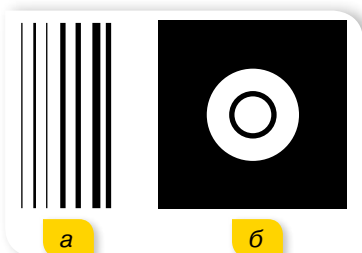
Явище дифракції. Ознайомимося ще з одним хвильовим явищем — дифракцією. *Дифракція* — явище огинання хвилями перешкод.

Спостерігати дифракцію світла не так легко. Річ у тім, що хвилі відхиляються від прямолінійного поширення на помітні кути лише на перешкодах, розміри яких порівняні з довжиною світлової хвилі. Тому для перешкод великих, порівняно з довжиною хвилі, дифракцію можна спостерігати на значній відстані від перешкоди.

Якщо від джерела S пропустити пучок світла крізь отвір AB (мал. 153), то на екрані дістанемо світлу пляму.



Мал. 153. Дослід з виявлення залежності вигляду світної плями від розмірів отвору



Мал. 154. Дифракційні картини від тонкої дротини (а) та круглого диска (б)

Діаметр цієї плями відповідає ширині світлового пучка, що падає на екран (мал. 153, б). Зменшуючи отвір AB , ми спостерігатимемо, що зменшується і пляма, тобто звужується пучок світла. Проте, починаючи з деякого розміру отвору, подальше його зменшення спричинює збільшення плями! Водночас пляма втрачає чіткість, вона розширена й нерівномірно освітлена (мал. 153, в). На екрані з'являються світлі й темні кільця, що чергуються та займають ділянку, значно більшу, ніж це виходить з геометричних побудов, які ґрунтуються на законі прямолінійного поширення світла.

Змінюючи діаметр отвору, можна отримати в центрі дифракційної картини або темну, або світлу пляму.

На малюнку 154 показано дифракційні картини від тонкої дротини та круглого диска.

Повернімося знову до досліді Юнга (мал. 145, § 32). Саме внаслідок дифракції з двох щілин виходили світлові конуси, які частково перекривались і утворювали інтерференційну картину.

Досліджував явище дифракції Огюстен Френель. Він побудував кількісну теорію дифракції, яка дає можливість у принципі розрахувати дифракційну картину, що виникає внаслідок огинання світлом будь-яких перешкод. Цих успіхів Френель досяг, об'єднавши принцип Гюйгенса (див. § 33) із припущенням про інтерференцію вторинних

хвиль. Згідно з ідеями Френеля, *хвильова поверхня в будь-який момент часу є не просто обвідною вторинних хвиль (як за принципом Гюйгенса), а результатом їх інтерференції* (мал. 155).

Дифракція на щілинах. Щоб дифракційна картина була більш вираженою, світло пропускають не крізь одну чи дві щілини, а крізь кілька паралельних щілин. У цьому разі, крім явища дифракції, відбувається і явище інтерференції, оскільки промені, які йдуть від усіх щілин, будуть когерентними. Відповідний пристрій називають дифракційною ґраткою (мал. 156). Це тонка пластинка, на яку нанесено паралельні штрихи з проміжками (щілинами) між ними.

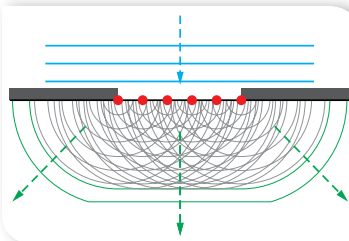
Ширина щілини зі штрихом позначається d і називається *сталюю ґратки*, або *періодом ґратки* (мал. 157).

Паралельний монохроматичний пучок хвиль, перпендикулярних до площини ґратки, пройшовши крізь щілини, завдяки дифракції буде розбіжним пучком променів, що поширюватимуться в усіх напрямках. При цьому підсилення цих хвиль унаслідок інтерференції можливе тільки в певних напрямках. З'ясуємо, в яких саме.

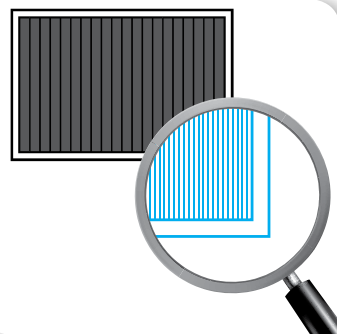
Нехай на ґратку падає плоска монохроматична хвиля довжиною λ . Оптична різниця ходу між хвилями від країв сусідніх щілин дорівнює довжині відрізка AC (мал. 157), який можна визначити з трикутника ABC : $AC = dn \sin \varphi$. Як відомо, якщо на цьому відрізку вміщується парне число півхвиль (або ціле число довжин хвиль), то хвилі від усіх щілин, додаючись, підсилюють одна одну, і в точці M спостерігатиметься максимум інтерференції. Отже, умовою максимуму є рівність $dn \sin \varphi = k\lambda$.

Оскільки для повітря $n = 1$, то отримане співвідношення записують так: $d \sin \varphi = k\lambda$.

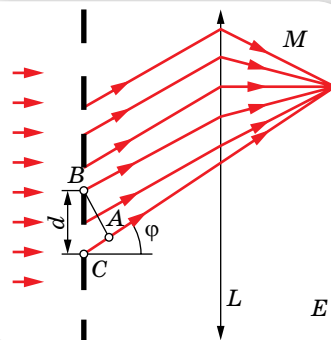
Зазначимо, що на малюнку 157 показано інтерферуючі промені, які йдуть від краю кожної щілини. Зрозуміло, що промені, які йдуть від будь-якої іншої точки щілини (наприклад, із центра) інтерферують з аналогічними променями від інших щілин. Що більше щілин має ґратка і ближче



Мал. 155. Пояснення дифракції світла за принципом Гюйгенса — Френеля



Мал. 156. Дифракційна ґратка



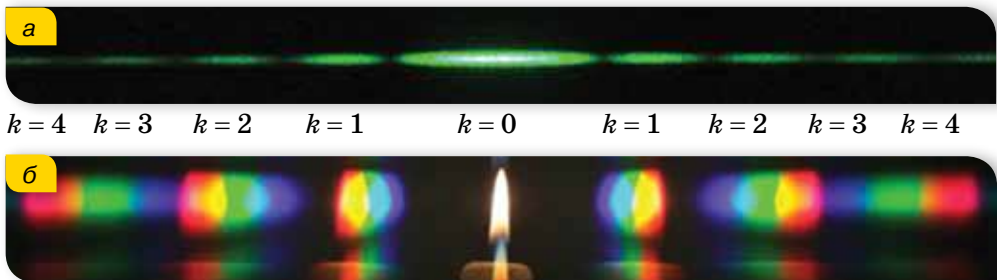
Мал. 157. Проходження хвиль крізь дифракційну ґратку

вони розміщені одна до одної, то яскравіші максимуми й ширшими мінімумами вони розділені.

Дифракційний спектр. Утворену на екрані картину називають *дифракційним спектром* (мал. 158). Кожному значенню коефіцієнта k відповідає своя лінія (максимум освітленості), тому його ще називають *порядком*. Між максимумами розміщуються мінімуми освітленості.

Якщо $k = 0$, то по центру ґратки в напрямку $\varphi = 0$ спостерігається світла смуга — максимум нульового порядку — для будь-якої довжини хвилі. З обох боків від нього на однакових відстанях видно менш яскраві максимуми першого порядку, потім ще менш яскраві максимуми другого порядку і т. д. Усі ці максимуми розміщені на однакових відстанях один від одного. Якщо на цю саму ґратку направити монохроматичне світло більшої довжини хвилі, то максимуми розмістяться рідше, тобто для того самого значення k максимум буде лежати далі від центрального.

Оскільки місце максимумів (крім центрального, що відповідає $k = 0$) залежить від довжини хвилі, то ґратка розкладає *біле* світло в кольоровий спектр (мал. 158, б). З обох боків від центральної білої лінії максимуми розміщуються в порядку зростання довжин хвиль (від фіолетового до червоного).



Мал. 158. Дифракційні спектри: а — монохроматичний; б — білого світла

З формули $d \sin \varphi = k\lambda$ видно, що для вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки треба виміряти тільки кут φ для даного значення k , оскільки d завжди відоме. Кут можна виміряти з великою точністю, отже, велику точність буде забезпечено і для визначення довжини хвилі. Зазначимо: що меншим є період ґратки, то точнішим буде результат вимірювання λ .

Дифракційну ґратку використовують для визначення складу світлового випромінювання будь-якої природи. Зі збільшенням загальної кількості щілин у ґратці зменшується ширина максимумів на екрані, що дає змогу бачити на ньому як окремі смуги максимуми променів з меншою різницею їхніх довжин хвиль. Говорять, що збільшення загальної кількості щілин у ґратці підвищує її *роздільну здатність*. Нині виготовляють ґратки, в яких на одному міліметрі нанесено понад тисячу штрихів, а загальна їх кількість у ґратці досягає ста тисяч.

Цікаву картину можна побачити на екрані, якщо на шляху світлових променів помістити дві однакові схрещені ґратки, тобто повернуті так, що їхні щілини взаємно перпендикулярні. Ми побачимо окремі світні плями. Коли періоди решіток різні й розміщені вони не впритул, то утворюється складніша система плям. Виявляється, що, аналізуючи розміщення плям на екрані в таких випадках, можна визначити відстань між ґратками та їх період. Це дало змогу дізнатися про розміщення атомів у кристалічних ґратках багатьох твердих тіл.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає явище дифракції світлових хвиль і як його можна спостерігати?
2. Чи можливе явище інтерференції та дифракції з ультрафіолетовими, інфрачервоними й рентгенівськими променями?
3. Якими уявленнями Френель доповнив принципи Гюйгенса?
4. Як зміниться: а) положення максимумів; б) інтенсивність центрального максимуму; в) ширина максимумів, — якщо половину дифракційної ґратки закрити непрозорою площиною так, щоб кількість штрихів зменшилась удвоє? Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?



Експериментуємо

1. За допомогою лазерної указки визначте густину доріжок (кількість доріжок, що падає на 1 мм уздовж радіуса диска) на компакт-дискові. Обладнання: лазерна указка з відомою довжиною хвиль випромінювання, компакт-диск, лінійка, мірна стрічка.
2. Порівняйте два способи визначення періоду дифракційної решітки. (Зазначений на решітці період попередньо заклейте непрозорим скотчем або лейкопластиром). Вважайте, що довжина хвиль зеленого світла дорівнює 0,55 мкм. Обладнання для першого способу: прилад для спостереження дифракції світла, дифракційна решітка з невідомим періодом. Обладнання для другого способу: дифракційна решітка з невідомим періодом, дифракційна решітка з відомим періодом, екран зі щілиною завширшки 0,5–1 мм, лінійка.



Приклади розв'язування задач

Задача. На дифракційну ґратку з періодом 0,01 мм падає біле світло. Яка ширина спектра першого порядку, якщо екран розміщено на відстані 3 м від ґратки? Довжина хвилі фіолетового кольору $\lambda_1 = 380$ нм, а червоного — $\lambda_2 = 760$ нм.

Дано:

$$\lambda_1 = 380 \text{ нм} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 760 \text{ нм} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$d = 0,01 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$AO = L = 3 \text{ м}$$

$$k = 1$$

$$\Delta b = ?$$

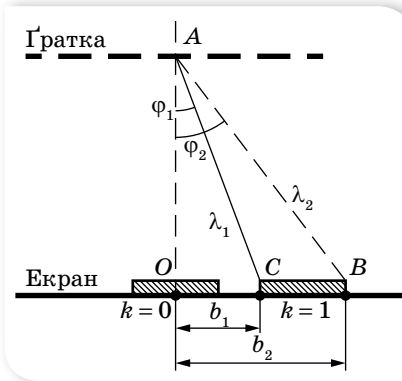
Розв'язання:

Умова дифракційних максимумів для червоних хвиль $d \sin \varphi_1 = k\lambda_1$, а для фіолетових — $d \sin \varphi_2 = k\lambda_2$.

Для малих кутів φ_1 і φ_2 можна вважати, що

$$\sin \varphi_1 \approx \text{tg } \varphi_1 = \frac{k\lambda_1}{d} \text{ і } \sin \varphi_2 \approx \text{tg } \varphi_2 = \frac{k\lambda_2}{d}.$$

З малюнка 159 видно, що $\Delta b = L(\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1)$ або $\Delta b = \frac{Lk}{d}(\lambda_2 - \lambda_1)$.



Мал. 159

Після підстановки даних отримуємо $\Delta b = 0,114$ м.

Відповідь: ширина спектра першого порядку — $0,114$ м.



Вправа 27

1. Визначте кут відхилення променів зеленого світла ($\lambda = 550$ нм) у спектрі першого порядку, отриманого за допомогою дифракційної ґратки, період якої $0,02$ мм.
2. На дифракційну ґратку, що має період 4 мкм, нормально падає монохроматична хвиля. Оцініть довжину хвилі, якщо кут між спектрами другого і третього порядків — $2^\circ 30'$. Кути відхилення вважайте малими.
3. Світло нормально падає на дифракційну ґратку. Найменший кут відхилення, за якого суміщаються лінії з довжинами хвиль 656 нм і 410 нм, дорівнює 41° . Визначте період дифракційної ґратки.
4. На плоску дифракційну ґратку нормально падає пучок світла. Під кутом 20° видно червону (669 нм) лінію спектра. Визначте період ґратки, якщо під цим само кутом видно і синю (446 нм) лінію в спектрі вищого порядку. Найбільший порядок спектра, за якого видно червону лінію, дорівнює 5 .

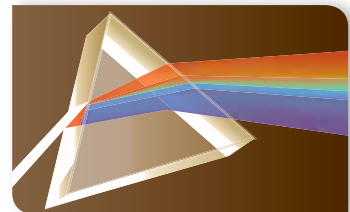
§ 35

Дисперсія світла

Явище дисперсії світла. Якщо в темній кімнаті скляну призму освітити пучком світла від лампи розжарювання, то, придивившись, можна побачити, що у склі на межі з повітрям пучок білого світла розщепився на декілька кольорових пучків (мал. 160).

Це явище вперше досліджував Ісаак Ньютон у 1666 р. й назвав його *дисперсією* (від лат. *dispergo* — розкидаю), а кольорову гаму — *спектром* (від лат. *spectrum* — марево).

Замість скла можна використовувати лід, органічне скло та інші прозорі для світла мате-



Мал. 160. Розкладання білого світла призмою

ріали. Що більший показник заломлення матеріалу, то яскравіше виражене явище дисперсії. Середовища, у яких спостерігається явище дисперсії, називають *диспергуючими*.

З'ясуймо, у чому суть явища дисперсії. У вакуумі всі світлові хвилі, так само як і електромагнітні хвилі інших діапазонів довжин хвиль (частот), поширюються з однаковою швидкістю $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Під час перетину межі поділу середовищ швидкість електромагнітної хвилі змінюється, унаслідок чого відбувається її заломлення. Причому *кожна монохроматична хвиля має свою певну швидкість поширення в середовищі*. Пояснення цього дає теорія дисперсії Гендріка Лоренца на основі електромагнітної теорії світла й електронної будови речовини. Під час проходження електромагнітної хвилі крізь діелектрик на кожний електрон діє електрична сила, під дією якої вони здійснюють коливання. Коливання електронів є джерелом вторинних хвиль, які накладаються на первинні хвилі. Вторинні хвилі внаслідок інерції електронів дещо запізнюються в часі і, накладаючись на первинні хвилі, дають результуючі хвилі з відставанням за фазою порівняно з первинними. Зсув фаз між первинною та результуючою хвилями залежить від частоти коливань напруженості електромагнітного поля E , тобто світло різних довжин хвиль (частот) матиме різні швидкості поширення в речовині, а отже, і різні значення показника заломлення, оскільки показник заломлення визначається як $n = \frac{c}{v}$.

Із закону заломлення світла $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v}$ випливає, що $\sin \gamma = \frac{v \sin \alpha}{c}$.

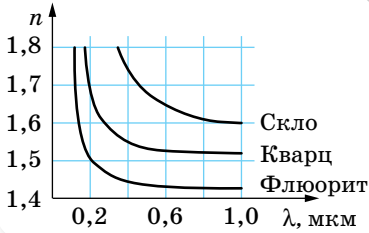
Оскільки швидкість поширення світла v в середовищі для кожної монохроматичної хвилі має своє певне значення, то для кожної монохроматичної хвилі $\sin \gamma$ і відповідно кут заломлення γ також набуватимуть певного значення.

Нині термін «дисперсія», який спочатку було введено для пояснення розкладання білого світла в спектр, має ширший зміст. У теорії хвиль термін «*дисперсія хвиль*» означає залежність фазової швидкості гармонічної хвилі від частоти (довжини) хвилі та, як наслідок, зміну форми довільних (негармонічних) збурень у процесі їх поширення.

Під *дисперсією світла* розуміють сукупність оптичних явищ, зумовлених залежністю діелектричної проникності речовини (а відповідно, і показника заломлення) від частоти (довжини) світлової хвилі.

Оскільки колір світла визначається частотою світлової хвилі, то вживають і таке визначення: *дисперсія світла* — це залежність показника заломлення світла (а отже, і швидкості) від його кольору.

Як правило, показник заломлення світла зростає зі збільшенням частоти світла (*нормальна дисперсія*). Проте поблизу смуг поглинання світла речовиною спостерігається обернене явище, так звана *аномальна дисперсія*, коли зі збільшенням частоти світла (зменшенням довжини хвилі) показник заломлення світла зменшується.



Мал. 161. Графічна залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин

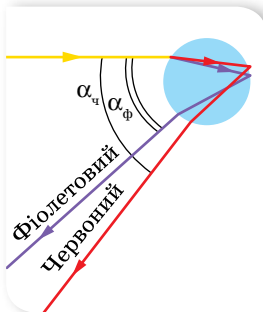
Нормальна дисперсія видимих променів спостерігається в усіх прозорих безбарвних діелектриках: кварці, склі, воді тощо. Мірою дисперсії, тобто величиною, що показує, на скільки розходяться за заломлення промені в спектрі, служить так звана середня дисперсія, яка є різницею показників заломлення для двох довжин хвиль: блакитної та червоної ($n_{\text{бл}} - n_{\text{чер}}$).

Графічну залежність показника заломлення від довжини хвилі для деяких речовин наведено на малюнку 161.

З графіків видно, що залежність $n = f(\lambda)$ має нелінійний характер і зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується. Короткі хвилі заломлюються сильніше, ніж довгі. Іншими словами, червоний колір у речовині поширюється з найбільшою швидкістю, тому менше заломлюється, а промінь фіолетового кольору поширюється з найменшою швидкістю і найбільше заломлюється.

Неперервний спектр світла. Світло Сонця, лампи розжарювання, свічки розкладається призмою в суцільний (неперервний) спектр. Це свідчить про те, що ці тіла випромінюють хвилі всіх можливих частот (довжин) хвиль.

З кривої дисперсії для скла (мал. 161) видно, що в області коротких хвиль показник заломлення скла зі зміною довжини хвилі змінюється швидко, а в області довгих хвиль — повільно. Тому дисперсійний спектр білого світла стиснутий у червоній частині й розтягнутий у фіолетовій. Як відомо, дифракційна ґратка також розкладає біле світло у спектр, але утворений нею спектр, окрім кольорових смужок, має ще й чорні. До того ж дифракційний спектр (мал. 158, § 34) відрізняється від дисперсійного ще й тим, що в ньому кольори розміщуються в порядку зростання довжин хвиль, і він рівномірно розтягнутий на всіх своїх ділянках.



Мал. 162. Заломлення світла в краплині води

Розкладанням білого світла на кольори внаслідок заломлення пояснюється виникнення веселки. Веселку видно тоді, коли спостерігач дивиться в напрямку від Сонця і в повітрі є краплі води (мал. 162).

Для певного кута падіння променів на краплю на межі вода—повітря всередині краплі відбувається повне відбивання. Оскільки фіолетові промені заломлюються більше, ніж червоні, після виходу з краплі вони розбігаються: червоні промені утворюють з падаючим променем кут близько 43° , а фіолетові — близько 41° .

Колір. Знаючи, що біле світло має складну структуру, можна пояснити велику різноманітність кольорів у природі. Якщо предмет, наприклад, аркуш паперу, відбиває всі промені різних кольорів, то він здаватиметься

білим. Трава й листя дерев здаються нам зеленими тому, що з усіх падаючих на них сонячних променів вони відбивають лише зелені, поглинаючи решту. Якщо подивитись на траву крізь червоне скло, яке «пропускає» тільки червоні промені, то трава здаватиметься майже чорною.

Відчуття того чи того кольору, яке виникає в очах спостерігача, залежить від частоти світлової хвилі, а не від її довжини. Унаслідок того, що під час переходу електромагнітної хвилі з одного середовища в інше її частота лишається незмінною, колір, який сприймається людиною в повітрі та, наприклад, у воді, буде однаковим.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр?
2. Яке світло буде поширюватися в речовині призми (склі) з більшою швидкістю — червоне чи фіолетове?
3. Подивіться крізь призму на білий аркуш паперу, коли її заломне ребро паралельне одному з боків аркуша. Як розташовані кольорові смуги відносно аркуша? Чому?



§ 36

Поляризація світла

Природне і поляризоване світло. Дослідимо ще одну властивість світлових хвиль — їх поляризацію. З дослідів Герца (§ 30) встановлено, що електромагнітні хвилі поперечні. Коливання зарядів у передавальній антені відбуваються вздовж її осі. Унаслідок цього в електромагнітній хвилі вектор напруженості електричного поля розташований у тій же площині, що й вісь антени, а вектор індукції магнітного поля — у перпендикулярній площині.

Напрямок векторів \vec{E} і \vec{B} залишається незмінним протягом усього часу поширення хвилі.



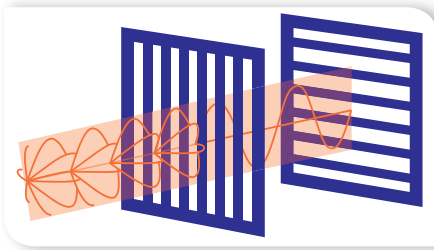
Хвилю, вектори \vec{E} і \vec{B} якої у процесі її поширення здійснюють коливання в певній площині, називають **плоскополяризованою**.

Світло — також електромагнітна хвиля, тому можна очікувати на поляризацію і світлової хвилі. Ураховуючи те, що у взаємодії світлової хвилі з речовиною вирішальну роль відіграє вектор напруженості електричного поля, а також для спрощення зображення світлової хвилі на малюнках надалі ми будемо говорити про коливання лише вектора напруженості.

Оскільки світло випромінюють атоми, кількість яких у речовині величезна, то зрозуміло, що таке світло не буде поляризованим (коливання вектора \vec{E} здійснюються в усіх можливих напрямках у площині, перпен-

дикулярній до напрямку поширення хвилі). Проте бувають випадки, коли світлова хвиля буде поляризованою (чи частково поляризованою).

Поляризація світла — стан світлової хвилі, за якого певні напрямки коливань електричного вектора \vec{E} переважають над іншими.



Мал. 163. Схема поляризації хвилі

Якщо на її шляху поставити ще одну таку само пластину, але повернуту відносно першої на 90° , то коливання крізь неї не пройдуть. Хвиля повністю погаситься.

Для поляризації світла використовують спеціальні пристрої з асиметрією оптичних властивостей. Зокрема, існують природні та штучні кристали, які мають оптичну анізотропію — неоднорідність оптичних властивостей у різних напрямках. Проходячи крізь такі кристали, світло поляризується.

Поляризатором називають пристрій, який перетворює природне світло на поляризоване.

Аналізатором називають пристрій, яким визначають, поляризована хвиля, що крізь нього проходить, чи ні.

Прикладом поляризатора (аналізатора) може бути природний кристал турмаліну, значення показника заломлення якого в різних напрямках різне. Завдяки цьому він поглинає випромінювання з коливаннями вектора \vec{E} одного певного напрямку, а випромінювання з коливаннями в перпендикулярному напрямку майже не поглинає. Цю властивість кристалів називають *дихроїзмом*.

Дібравши таку товщину турмалінової пластинки, за якої коливання одного напрямку цілком поглинаються в ній, дістають повністю поляризований промінь. Якщо пластинка буде тоншою, то у хвилі залишаються коливання у взаємно перпендикулярних напрямках, але амплітуда коливань в одному з них буде більшою. Таку хвилю називають *частково поляризованою*.

Різко виражений дихроїзм було виявлено в дуже маленьких кристаликів сульфату йодистого хініну. Під час виготовлення поляризатора целулоїдну плівку покривають тонким шаром таких кристаликів, відповідно зорієнтувавши їх. Зовні цю плівку накривають склом і дістають

поляризатор з великою поверхнею. Такі поляризатори називають *поляроїдами*. (Поляроїди винайшов у 1929 р. Едвін Ленд.) Такий поляроїд діє як набір паралельних щілин і майже без втрат пропускає світло однієї поляризації.

Поляризація внаслідок відбиття й заломлення світла. Кут Брюстера.

Отримати поляризоване світло з неполяризованого можна ще одним способом — відбиванням і заломленням.

Коли світло падає на поверхню прозорої речовини (наприклад, води) під довільним кутом, крім прямого, відбитий промінь виявляється плоскополяризованим переважно паралельно відбивній поверхні. Це добре знають рибалки, які використовують поляроїдні окуляри, щоб уникнути відблисків води.

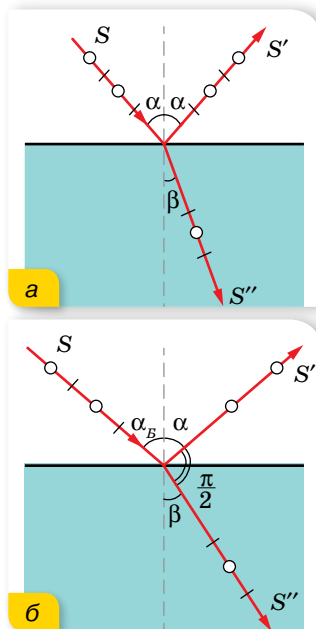
Вивчення цього явища показало, що в прозорих речовинах заломлений промінь завжди поляризується тільки частково, а для відбитого променя є один напрямок, у якому він поляризується повністю. На малюнку 164 схематично зображено промінь, який падає на межу поділу повітря й рідини під кутом α . У відбитому промені більше коливань, паралельних поверхні поділу (зображено кружечками), а в заломленому промені — перпендикулярних до них коливань (зображено рисочками). Ступінь поляризації цих променів залежить від кута падіння й показника заломлення. Установлено, що відбитий промінь повністю поляризується тоді, коли кут між відбитим і заломленим променями дорівнює 90° . Позначивши у такому випадку кут падіння α_B , запишемо закон заломлення світла:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B \right)} = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Співвідношення $\operatorname{tg} \alpha_B = n$ називають *законом Брюстера*, або умовою повної поляризації.

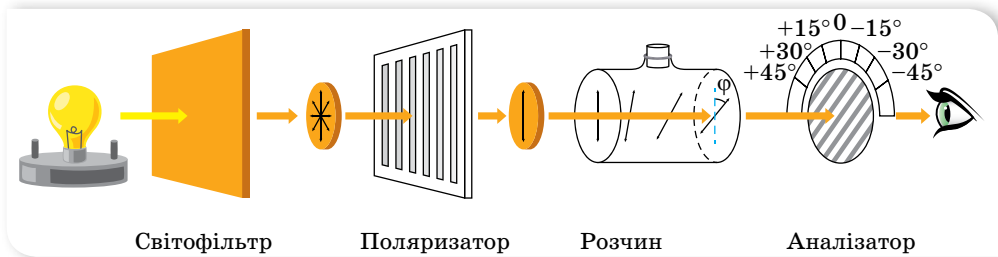
Використання поляризованого світла. Під час фотографування великих гладеньких поверхонь (наприклад, води) з'являються так звані відблиски — дзеркально відбиті світлові пучки, які істотно погіршують якість зображення. Щоб позбутися цих відблисків, на об'єктив фотоапарата надівають спеціальні фільтри. Оскільки відбите світло завжди частково або повністю поляризоване, то, повертаючи поляризаційний фільтр, можна встановити таке положення, за якого світло відблисків не потраплятиме в об'єктив фотоапарата.

Установлено також, що під час проходження плоскополяризованого світла крізь деякі розчини площина його поляризації повертається.



Мал. 164. Поляризація відбитої хвилі з довільним кутом падіння (а) і при падінні під кутом Брюстера (б)

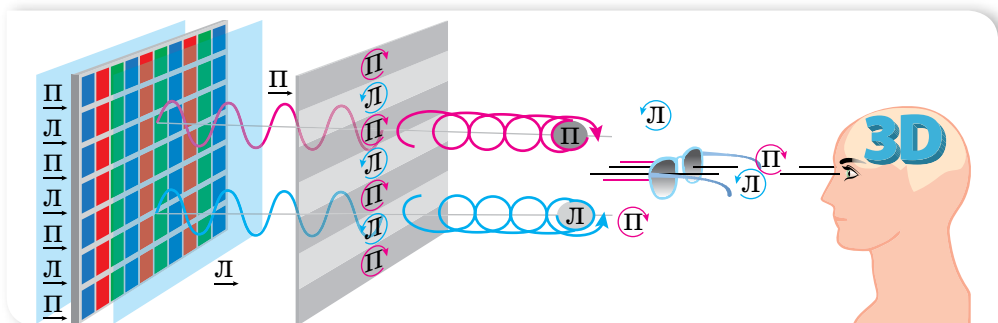
Наприклад, на малюнку 165 світло проходить крізь поляризатор, а потім — крізь розчин цукру в кюветі. Полярійд-аналізатор за кюветою, розташований під кутом 90° до поляризатора, мав повністю загасити світло, але цього не відбулося. Проте якщо аналізатор повернути ще на деякий кут φ , — світло гаситься. Це означає, що розчин у кюветі повертає на кут φ площину поляризації. Такі речовини називають оптично активними.



Мал. 165. Принцип дії цукрометра

Оптична активність речовин зумовлена асиметрією молекул, які мають форму спіралі, як, наприклад, молекули деяких білків. Деякі речовини (цукор, декстроза, *D*-глюкоза) повертають площину поляризації праворуч, а деякі речовини (амінокислоти, білки) — ліворуч. Кут повороту φ пропорційний концентрації розчину. Тому цю властивість використовують для виготовлення спеціальних пристроїв — цукрометрів, за допомогою яких визначають вміст цукру.

Спеціальні поляризаційні окуляри використовують під час перегляду стереофільмів у кінотеатрах. Отримати зображення у 3D-форматі можна й на домашньому комп'ютері за допомогою відповідних екранів. Вивчаючи властивості рідкокристалічних екранів, ми зазначали, що їм притаманна певна властивість, зумовлена самою технологією отримання зображення, — вони дають поляризоване світло.



Мал. 166. Механізм утворення зображення у 3D форматі за допомогою поляризованого світла

Завдяки цьому, використовуючи тонкі смужки плівочок-поляризаторів, можна створювати парні та непарні ряди пікселів, що мають різний напрямок поляризації. Лінзи окулярів є поляризаторами, у яких площини

поляризації повернуті так, що крізь одну лінзу видно парні ряди, а крізь іншу — непарні. Таким чином створюють зображення, які видно окремо лівим оком і правим оком. Мозок людини зіставляє два зображення й «бачить» його об'ємним (мал. 166).



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Чим відрізняється поляризоване світло від природного? Як отримують поляризоване світло? 2. У чому суть закону Брюстера? 3. Де на практиці застосовують явище поляризації світла?



Перевірте себе (§ 31–36)



1. Для роботи за письмовим столом освітленість його поверхні має бути не меншою ніж 50 лк. Сила світла лампи дорівнює 100 кд. Визначте висоту, на якій треба розмістити лампу над поверхнею стола.

А 0,7 м

В 1,0 м

Б 1,4 м

Г 0,5 м

2. Визначте довжину хвиль фіолетового світла, частота якого $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц у склі, де їхня швидкість $2,22 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

А $3 \cdot 10^{-7}$ м

В $4,4 \cdot 10^{-7}$ м

Б $4 \cdot 10^{-7}$ м

Г $3,6 \cdot 10^{-7}$ м

3. Вода освітлюється жовтим світлом довжиною хвилі 600 нм. Визначте довжину хвилі у воді та колір світла, який бачитиме плавець, що пірнув.

А 610 нм; жовтий

В 460 нм; жовтий

Б 810 нм; червоний

Г 460 нм; синій

4. Різниця ходу двох когерентних хвиль до точки на екрані дорівнює 900 нм. Довжина хвиль 0,6 мкм. Укажіть явище, що спостерігатиметься в цій точці.

А інтерференційний максимум

Б інтерференційний мінімум

В може бути і максимум, і мінімум

Г дифракційна картина

5. У деяку точку простору приходять дві когерентні світлові хвилі з різницею ходу 2,5 мкм. Визначте довжину хвилі, якщо в даній точці спостерігається інтерференційний максимум п'ятого порядку.

А 550 нм

Б 500 нм

В 450 нм

Г 600 нм

6. Дифракційна ґратка, період якої 0,01 мм, освітлюється світлом довжиною хвилі 500 нм. Визначте відстань між максимумами нульового й першого порядку на екрані, що віддалений від ґратки на 3 м.

А 10 см

Б 12 см

В 15 см

Г 8 см

7. Зіпсовану лампу замінили іншою, сила світла якої 35 кд. Як змінилася освітленість поверхні, якщо сила світла першої лампи була 100 кд, а нову лампу вдвічі наблизили до поверхні?

8. Сонце перебуває на кутовій висоті 10° над горизонтом. Порівняйте освітленості вертикального та горизонтального майданчиків однакових розмірів, розміщених поряд.
9. На мильну плівку ($n = 1,33$) падає біле світло під кутом 45° . За якої найменшої товщини плівки відбиті промені будуть забарвлені в жовтий колір ($\lambda = 0,6$ мкм)?
10. Радіуси двох сусідніх світлих кілець Ньютона, які спостерігаються в прохідному світлі, дорівнюють 4 мм і 4,9 мм. Визначте порядкові номери кілець, якщо радіус кривизни лінзи — 10 м.

§ 37

Відбиття світла. Дзеркала

Закони геометричної оптики. Пригадуєте, у 9 класі, окрім терміну «світло», ми використовували терміни «світловий промінь» і «світловий пучок»? Світловий промінь — уявна лінія, уздовж якої відбувається перенесення світлової енергії. Світловий промінь — суто геометричне поняття, його застосовують для схематичного зображення світлових пучків. У реальному житті маємо справу з пучками світла, а от для схематичного зображення світлових пучків використовують світлові промені.

Світловий промінь є головним поняттям геометричної оптики, яка ґрунтується на низці простих законів, установлених експериментально. Це:

- ▶ **закон прямолінійного поширення світла** — в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно;
- ▶ **закон незалежного поширення світла** — окремі пучки світла не впливають один на одний і поширюються незалежно;
- ▶ **закони відбиття і заломлення світла.**

Узагальненням усіх законів геометричної оптики є принцип Ферма, або принцип найменшого часу: поширення світла з однієї точки до іншої відбувається шляхом, що потребує найменшого часу порівняно з іншими шляхами між цими точками.

З доведенням законів відбиття й заломлення світла, ґрунтуючись на принципах Гюйгенса та Ферма, можна ознайомитися в електронному додатку.



Геометрична оптика є граничним випадком хвильової оптики. Тобто це розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світла в прозорих середовищах і принципи побудови зображень в оптичних системах без урахування хвильових властивостей світла. Але те, що хвильові властивості світла не враховуються, не означає, що закони геометричної оптики не можна пояснити згідно із хвильовою теорією.

Уявлення та закони геометричної оптики є правильними лише до тієї міри, до якої можна нехтувати явищами дифракції та інтерференції хвиль.

Закон відбиття світла. Закон відбиття справджується для хвиль будь-якої природи. Нагадаємо його:

падаючий промінь, відбитий промінь і перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений у точці падіння, лежать в одній площині; кут відбиття дорівнює куту падіння.

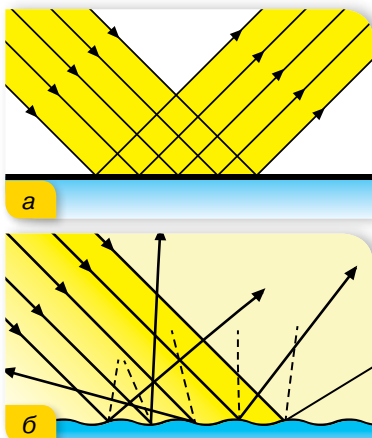
Дзеркальне та дифузне відбиття. Залежно від властивостей і якості поверхні відбиття розрізняють дзеркальне та розсіяне відбиття. Дзеркальною вважають поверхню, що має нерівності, розміри яких менші від довжини світлової хвилі. Наприклад, поверхні краплини ртуті, полірованого скла чи металу тощо. Паралельні промені після відбиття від дзеркальної поверхні будуть також паралельними. Якщо ж нерівності поверхні сумірні з довжиною світлової хвилі, то світло, відбите від поверхні, буде розсіяним (дифузним) (мал. 167). Саме завдяки такому відбиванню світла ми бачимо предмети, які не випромінюють світло.

Одержання зображень за допомогою дзеркал. На практиці використовують переважно *плоскі* та *сферичні* дзеркала.

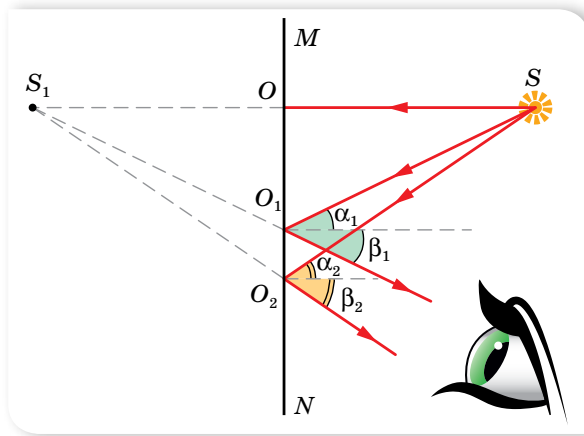
Зображення предмета в плоскому дзеркалі можна побудувати, скориставшись законами відбиття світла. Для цього з точки, зображення якої хочемо побудувати, проводимо довільні промені (на малюнку 168 з точки S проведено три промені, хоча зрозуміло, що для побудови точки на площині достатньо перетину двох променів). Після цього за законом відбиття світла будемо промені, відбиті від поверхні дзеркала, та їх продовження. Саме перетин продовжень відбитих променів є зображенням точки в плоскому дзеркалі.

Одержане зображення є прямим, уявним (оскільки одержане в результаті перетину не самих променів, а їх продовжень), таким, що дорівнює за розмірами предмету, і симетричним йому відносно площини дзеркала.

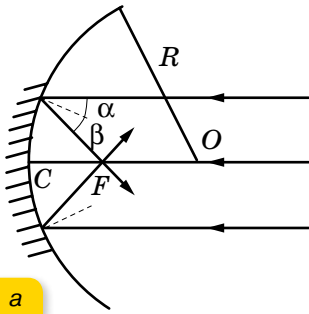
Нагадаємо, щоб визначити частину простору, з якої можна побачити зображення певної точки в плоскому дзеркалі, необхідно з'єднати зображення точки та крайні точки дзеркала.



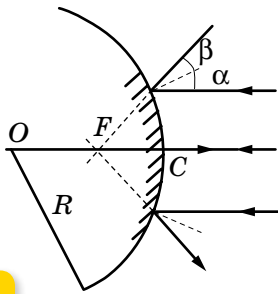
Мал. 167. Дзеркальне та дифузне відбиття



Мал. 168. Утворення зображення в плоскому дзеркалі



а



б

Мал. 169. Утворення зображень в увігнутому (а) та опуклому (б) дзеркалах

Поряд із плоскими дзеркалами широкого застосування набули сферичні дзеркала. Дзеркала, поверхню яких утворює частина поверхні кулі, називають *сферичними*. Вони бувають увігнуті й опуклі.

На малюнку 169 зображено приклади увігнутого та опуклого дзеркал. Точка O — *оптичний центр сферичної поверхні* дзеркала. Буквою C позначено вершину сферичної поверхні, яку називають *полюсом дзеркала*, або центром сферичної дзеркальної поверхні. Пряму OC , що проходить через центр дзеркальної поверхні O та вершину дзеркала C , називають *головною оптичною віссю дзеркала*. Усі інші осі, проведені через точку O , називають *побічними*.

Якщо спрямувати промені паралельно головній оптичній осі увігнутого дзеркала (мал. 169, а), то після відбиття від поверхні дзеркала промені зберуться в одній точці F , яка лежить на його головній оптичній осі. Цю точку називають *головним фокусом дзеркала*.

Якщо точкове джерело світла помістити у фокусі увігнутого дзеркала, то промені, відбившись від його поверхні, поширюватимуться паралельно головній оптичній осі дзеркала (згідно з оборотністю світлових променів).

Відстань OF від вершини дзеркала до головного фокуса називають *фокусною відстанню дзеркала*, вона дорівнює половині радіуса OC сферичної поверхні дзеркала, тобто $OF = 0,5 OC$. Таким чином, фокусна відстань сферичного дзеркала дорівнює половині радіуса сфери, частиною якого є дзеркало, $F = \frac{R}{2}$.

Якщо ж спрямувати світлові промені паралельно головній оптичній осі на опукле дзеркало, то відбиті промені будуть розходитися (мал. 167, б). Їхні продовження перетинатимуться в певній точці F , яка лежить за дзеркалом. Цю точку називають *головним фокусом опуклої лінзи*. Оскільки в цій точці перетинаються не самі промені, а їхні продовження, це означає, що *фокус опуклого дзеркала є уявним*.

Отже, увігнуті дзеркала — збиральні, головний фокус у них дійсний. Опуклі дзеркала — розсіювальні, головний фокус у них уявний.

Площину, яка перпендикулярна головній оптичній осі дзеркала і проходить через фокус, називають *фокальною площиною*. Зрозуміло, що для увігнутого дзеркала вона буде *дійсною*, для опуклого — *уявною*.

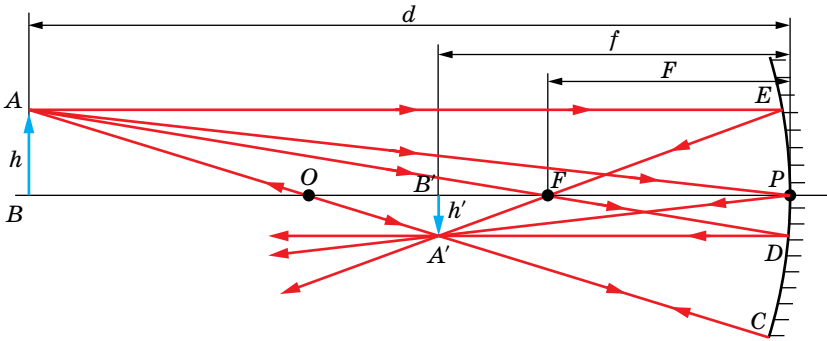
Величину, обернену до фокусної відстані, називають *оптичною силою* D сферичного дзеркала, $D = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$.

Одиницею оптичної сили в СІ є діоптрія (дптр), $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Оптична сила увігнутого дзеркала є додатною, опуклого — від'ємною.

Для побудови зображення будь-якої точки предмета найзручніше використовувати такі правила (мал. 170):

- ▶ якщо падаючий промінь проходить через оптичний центр дзеркала, то відбитий промінь також проходить через оптичний центр (промені AOC і COA лежать на одній прямій);

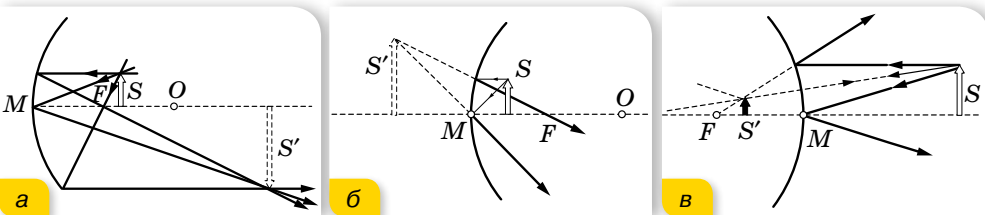


Мал. 170. Побудова зображення у сферичному дзеркалі

- ▶ якщо падаючий промінь AFD проходить через фокус дзеркала, то відбитий промінь DA' буде паралельним головній оптичній осі;
- ▶ якщо промінь AP падає на дзеркало в його полюсі, то відбитий промінь PA' є симетричним йому відносно головної оптичної осі;
- ▶ якщо падаючий промінь AE паралельний головній оптичній осі, то відбитий від дзеркала промінь EF проходить через фокус дзеркала.

Для побудови зображення предмета у вигляді відрізка прямої достатньо побудувати зображення двох його крайніх точок.

На малюнку 171 наведено приклади побудови зображення предмета у сферичних дзеркалах. Розташування й розміри зображення, одержаного за допомогою увігнутого дзеркала, залежать від положення предмета щодо дзеркала. Опукле дзеркало дає тільки уявне, зменшене зображення предмета, яке розташоване між уявним фокусом і полюсом. Уявні зображення є завжди прямими (не перевернутими), а дійсні зображення, навпаки, завжди перевернуті щодо предмета.



Мал. 171. Побудова зображень у сферичних дзеркалах

Позначимо відстань між світною точкою та дзеркалом літерою d , відстань між зображенням цієї точки та дзеркалом — літерою f . Ці величини пов'язані з радіусом сферичної поверхні дзеркала R співвідношенням

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}.$$

З урахуванням співвідношення $D = \frac{1}{F} = \frac{2}{R}$ цю залежність можна переписати у вигляді $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.

Одержана формула справджується у випадку, коли зображення і фокус дзеркала дійсні. Якщо ж зображення або фокус уявні, то перед літерою f або F ставлять знак «-».

Лінійне збільшення Γ розмірів зображення H порівняно з розмірами предмета h знаходять за формулою $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$.

Галузі застосування плоских і сферичних дзеркал вам добре відомі. Сферичні дзеркала використовують для виготовлення прожекторів, дзеркал огляду на транспорті, автомобільних фар, проєкційних і кишенькових ліхтарів тощо. Якщо взяти увігнуте дзеркало порівняно великих розмірів, то в його фокусі можна одержати дуже високу температуру, використовуючи енергію Сонця. Тут можна розмістити резервуар з водою для одержання гарячої води, скажімо, для побутових потреб. У медицині ними користуються ЛОР-лікарі, стоматологи. Крім того, увігнуті дзеркала застосовуються в телескопах-рефлекторах, за допомогою яких спостерігають небесні тіла.

ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Доведіть закон відбиття світла, спираючись на принцип Ферма. **2.** Схематично намалюйте сферичне увігнуте дзеркало і вкажіть його головну оптичну вісь, радіус і центр кривизни, головний фокус. **3.** Де відносно ввігнутого дзеркала з радіусом кривизни 1,2 м необхідно розташувати джерело світла, щоб отримати прожектор? **4.** На який кут повернеться промінь, відбитий від плоского дзеркала, коли дзеркало повернути на кут α ?

Приклади розв'язування задач

Задача. Опукле й увігнуте дзеркала мають однакові радіуси кривизни R . Відстань між їхніми вершинами дорівнює $2R$. У якій точці на оптичній осі дзеркал необхідно розташувати точкове джерело світла S , щоб промені після відбиття спочатку від опуклого, а потім від увігнутого дзеркал знову зібрались у точці S ?

Дано:
 R
 $\frac{2R}{a} - ?$
Розв'язання:

Нехай a — відстань від джерела до увігнутого дзеркала,
 f — відстань від зображення, утвореного опуклим дзеркалом,
до цього дзеркала (мал. 172).

Запишемо формулу опуклого сферичного дзеркала $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}$ або

$$\frac{1}{2R - a} - \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}. \text{ Звідки } f = \frac{R(2R - a)}{5R - 2a}.$$

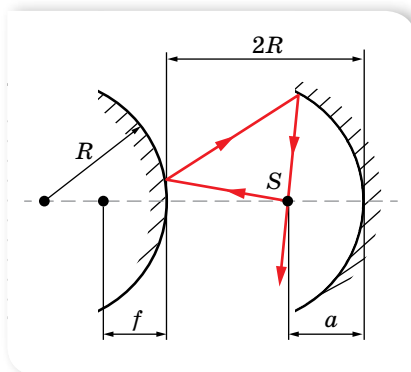
Зображення в опуклому дзеркалі є джерелом для увігнутого. Якщо точка перетину променів після двох відбивань збігається із джерелом, формула сферичного дзеркала набуває вигляду

$$\frac{1}{2R + f} + \frac{1}{a} = \frac{2}{R}.$$

Підставивши в цю формулу вираз для f , після перетворень отримуємо:
 $2a^2 - 6Ra + 3R^2 = 0$.

Звідси, враховуючи, що $a < 2R$, отримуємо $a \approx 0,63R$.

Відповідь: $a \approx 0,63R$.



Мал. 172



Вправа 28

1. На якій висоті висить вуличний ліхтар, якщо тінь від вертикально поставленої палиці заввишки 0,9 м має довжину 1,2 м, а коли палицю перемістити на 1 м від ліхтаря вздовж напрямку тіні, її довжина становитиме 1,5 м? Визначте таким способом, на якій висоті висить ліхтар, вважаючи, що безпосередньо виміряти відстань до джерела світла (по горизонталі) неможливо.
2. На горизонтальному дні водойми, глибина якої 1,2 м, лежить плоске дзеркало. Промінь світла падає на поверхню води під кутом 30° . На якій відстані від місця падіння цей промінь вийде з води після відбиття від дзеркала? Показник заломлення води — 1,33.
3. Висота Сонця над горизонтом 38° . Під яким кутом до горизонту треба поставити дзеркало, щоб сонячні промені потрапили на дно колодязя?
4. Плоске дзеркало утворює зі столом двограний кут α . На столі на відстані l від ребра двогранного кута лежить монета. Визначте відстань d , на яку зміщується зображення монети у дзеркалі, коли дзеркало повернути на кут φ відносно ребра двогранного кута.
5. Радіус кривизни увігнутого дзеркала 80 см. На якій відстані від дзеркала слід розташувати предмет, щоб його дійсне зображення було удвічі більше за предмет?
6. На головній оптичній осі увігнутого дзеркала радіусом 40 см лежить світна точка S на відстані 30 см від дзеркала. На якій відстані перед увігнутим дзеркалом потрібно розташувати плоске, щоб промені, відбиті дзеркалами, повернулись у точку S ?

§ 38

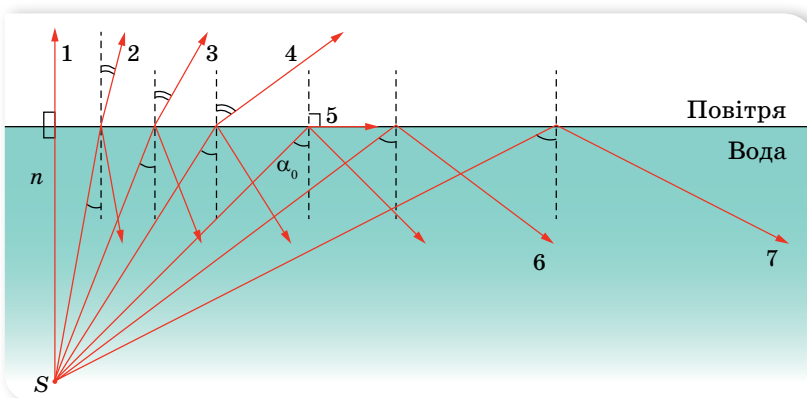
Заломлення світла

Закон заломлення світла. Повне відбиття. Пригадаймо закон заломлення світла:

падаючий промінь, заломлений промінь та перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений у точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ світла є величиною сталою, яка дорівнює відносному показнику заломлення двох середовищ, $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_1 і n_2 — абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ; n_{21} — відносний показник заломлення.

Закон заломлення світла дає змогу пояснити цікаве й практично важливе явище — *повне відбиття світла*.

Якщо промінь світла поширюється від точкового джерела з оптично більш густого в оптично менш густе середовище, то кут заломлення більший за кут падіння. Зі збільшенням кута падіння світлового променя збільшується і кут заломлення, водночас, інтенсивність заломленого променя зменшується (мал. 173). Досягши певного значення кута падіння α_0 , промінь взагалі не перетинає межу поділу середовищ — кут заломлення становить 90° . Коли кут падіння $\alpha > \alpha_0$ світло не переходить у друге середовище, а лише відбивається від його межі, тобто відбувається *явище повного внутрішнього відбиття*.



Мал. 173. Визначення умови повного відбиття

Явище, за якого світло, поширюючись у більш густому середовищі, відбивається від межі поділу з менш густим середовищем, не заломлюючись, називається **явищем повного відбиття**.

Кутом повного внутрішнього відбиття називається найменший кут падіння α_0 , починаючи з якого, світло повністю відбивається від межі поділу середовищ. Із закону заломлення світла випливає, що ним є кут, синус якого дорівнює $\frac{1}{n}$, тобто $\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$.

Саме повне відбиття спричиняє яскравий блиск краплинок роси, уламків скла тощо. Це явище використовують, огранюючи та шліфуючи дорогоцінне каміння. Оброблювальному камінцеві надають такої форми, щоб більшість падаючих на нього променів після заломлення відбивались від внутрішніх граней.

Волоконна оптика. Явище повного відбиття використовують у волоконній оптиці. Термін *волоконна оптика* з'явився у 50-х роках ХХ ст. Основним елементом волоконної оптики є оптичне волокно (мал. 174) (найчастіше тонка прозора скляна нитка). Зазначивши повного внутрішнього відбиття, світло поширюється всередині світловоду і здатне передавати оптичні сигнали без зменшення інтенсивності на великі відстані.

Явище повного відбиття використовують у біноклях, перископах, катафотах засобів дорожнього руху тощо.



Мал. 174. Оптичні волокна



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть суть явища повного внутрішнього відбиття світла. Що називають граничним кутом повного внутрішнього відбиття світла? Чому він дорівнює? 2. Яке практичне застосування повного внутрішнього відбиття світла? Що таке волоконна оптика?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Монохроматичний промінь падає під кутом $\alpha_1 = 60^\circ$ на бічну поверхню скляної рівнобедреної призми. Кут при вершині призми $\varphi = 40^\circ$. На який кут відхилиться промінь, що виходить із призми, якщо показник заломлення матеріалу призми $n = 1,54$?

Виведіть формулу для визначення кута зміщення променя для випадку, коли кут падіння на поверхню призми та заломний кут призми φ — малі.

Дано:

$$\alpha_1 = 60^\circ$$

$$\varphi = 40^\circ$$

$$n = 1,54$$

$$\theta = ?$$

$$\theta = f(\varphi) = ?$$

Розв'язання:

Скористаємось малюнком 175.

З $\triangle DEM$: $\gamma_1 + \alpha_2 = \varphi$, звідки $\alpha_2 = \varphi - \gamma_1$. З $\triangle DEN$:

$$\theta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\gamma_2 - \alpha_2) = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi \text{ або } \gamma_2 = \varphi + \theta - \alpha_1.$$

За законом заломлення на першій грані $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = n$.

$$\text{Тоді } \sin \gamma_1 = \frac{\sin \alpha_1}{n} = 0,562; \gamma_1 = 34^\circ 12'.$$

Закон заломлення на виході з призми:
 $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{1}{n}$. Звідки $\sin \gamma_2 = n \sin \alpha_2$ або
 $\sin(\varphi + \theta - \alpha_1) = n \sin(\varphi - \gamma_1)$.

Підставляючи числові значення, отримуємо:
 $\sin(\theta - 20^\circ) = n \sin 5^\circ 48' = 1,54 \cdot \sin 5^\circ 48'$.

Оскільки кут малий, то синус кута можна замінити його значенням, маємо $\theta - 20^\circ = 8^\circ 54'$, тоді $\theta = 28^\circ 54'$.

Щоб вивести формулу для визначення кута θ для малих α_1 і φ , запишемо:

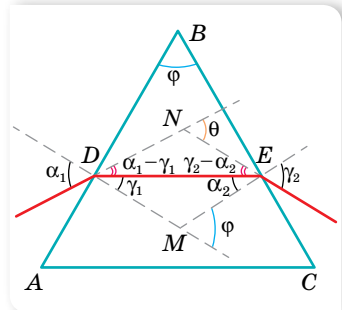
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} \approx \frac{\alpha_1}{\gamma_1} \approx n \text{ і } \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} \approx \frac{\alpha_2}{\gamma_2} \approx \frac{1}{n}, \text{ тоді } \alpha_1 \approx n\gamma_1 \text{ і } \gamma_2 \approx n\alpha_2.$$

Підставимо ці значення у вираз для θ :

$$\theta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\gamma_2 - \alpha_2) = n\gamma_1 - \gamma_1 + n\alpha_2 - \alpha_2 = (n-1)(\gamma_1 + \alpha_2);$$

оскільки $\gamma_1 + \alpha_2 = \varphi$, маємо $\theta = (n-1)\varphi$.

Відповідь: $\theta = 28^\circ 54'$; $\theta = (n-1)\varphi$.



Мал. 175

Задача 2. Промінь падає на плоскопаралельну скляну пластинку під кутом $\alpha = 30^\circ$ (мал. 176). Показник заломлення скла $n = 1,5$. Визначте товщину пластинки, якщо зміщення променя (відрізок CD) дорівнює 3,88 см.

Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$n = 1,5$$

$$CD = 3,88 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d = ?$$

Розв'язання:

З малюнка видно, що $\angle BAD = \alpha$;

$$\angle CAD = \alpha - \gamma; AC = \frac{CD}{\sin(\alpha - \gamma)};$$

$$AB = AC \cos \gamma.$$

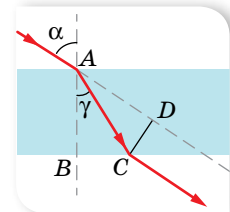
$$\text{Звідси } AB = \frac{CD \cos \gamma}{\sin(\alpha - \gamma)}.$$

Кут заломлення γ визначаємо із закону заломлення: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$.

$$\text{Звідси } \sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0,333, \gamma \approx 19^\circ 30', \alpha - \gamma = 10^\circ 30'.$$

Після підстановки даних отримуємо $AB = 0,2$ м.

Відповідь: 0,2 м.



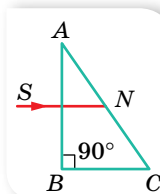
Мал. 176



Вправа 29

- На нижню грань плоскопаралельної скляної пластинки нанесено риску. Спостерігаєш, що диви́ться згори, бачиш риску на відстані 4 см від верхньої грані пластинки. Яка товщина пластинки?

2. Промінь падає під кутом 60° на скляну пластинку завтовшки 2 см з паралельними гранями. Визначте зміщення променя, який вийшов із пластини. Визначте зміщення за умови, що промінь під таким же кутом падає на цю саму скляну пластинку, розташовану у воді.
3. Маємо дві плоскопаралельні пластинки, притиснені щільно одна до одної. Товщина першої — 16 мм, показник заломлення — 1,5, товщина другої — 24 мм, показник заломлення — 1,8. На поверхню першої пластинки падає світло під кутом 48° . Визначте зміщення променя після виходу його з пластинки.
4. Чи може промінь, пройшовши крізь пластинку з паралельними гранями, зміститися так, щоб відстань між ним та його початковим напрямком була більшою за товщину пластинки?
5. Промінь SN падає на прямокутну скляну призму BAC (мал. 177) перпендикулярно до грані AB . Заломиться промінь на грані AC в точці N його падіння чи зазнає повного відбиття, якщо кут $A = 30^\circ$?
6. За якого найменшого значення заломного кута A скляної призми BAC (мал. 177) промінь SN зазнаватиме повного відбиття?
7. Промінь падає під кутом 50° на пряму трикутну скляну призму із заломленим кутом 60° . Визначте кут заломлення променя в точці виходу з призми.
8. Промінь падає перпендикулярно на бічну грань прямої скляної призми, в основі якої лежить рівнобедрений трикутник з кутом при вершині 20° . На скільки градусів відхилиться промінь, вийшовши з призми, від початкового напрямку, якщо промінь усередині призми падає: а) на другу бічну грань; б) на основу?
9. Визначте заломний кут призми зі скла з показником заломлення 1,56, якщо промінь падає перпендикулярно на одну її грань і виходить уздовж другої.
10. Визначте кут відхилення променя скляної призмюю, заломний кут якої 3° , якщо кут падіння променя на передню грань дорівнює нулю.
11. Промінь світла виходить із призми під тим самим кутом, під яким входить у неї, причому відхиляється від початкового напрямку на кут 15° . Заломний кут призми — 45° . Визначте показник заломлення матеріалу лінзи.
12. Промінь світла входить у скляну призму під кутом $\alpha = \frac{\pi}{6}$ і виходить з неї в повітря під кутом $\frac{\pi}{3}$, причому, пройшовши крізь призму, відхиляється на кут $\frac{\pi}{4}$ від попереднього напрямку. Визначте заломний кут призми.



Мал. 177

§ 39

Лінзи

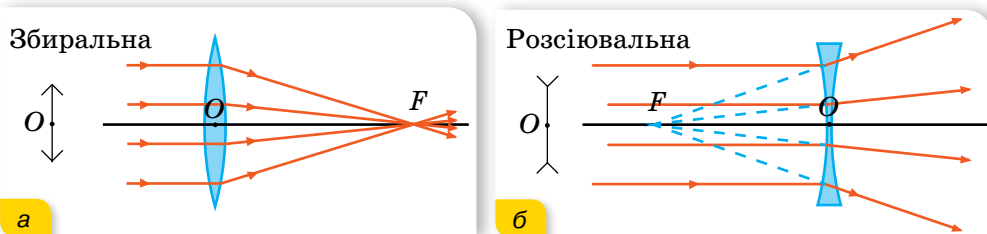
Лінзи. У 9 класі ми вже ознайомилися з лінзами та правилами побудови зображень, які отримують за їх допомогою. Пригадаймо основні поняття.

Лінзою називають прозоре тіло, обмежене з обох боків сферичними поверхнями (одна з поверхонь може бути плоскою).

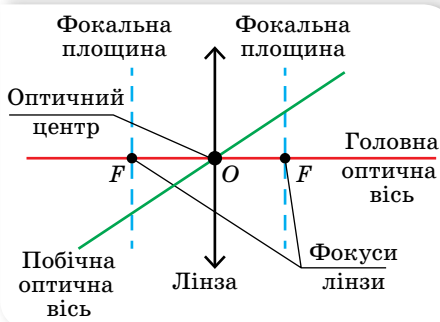
Унаслідок кривизни поверхонь промені, які проходять крізь лінзу, два рази заломлюються (як і в призмі), змінюючи свій напрямок поширення. Якщо товщина лінзи значно менша від радіуса її кривизни, то таку лінзу називають *тонкою*.

Якщо паралельний пучок променів, пройшовши крізь лінзу, сходиться в одній точці (фокусі), то таку лінзу називають *збиральною*, якщо ж паралельний пучок променів після проходження крізь лінзу стає розхідним, то таку лінзу називають *розсіювальною*.

На малюнку 178, *а* зображено збиральну лінзу, хід променів у ній та її умовне зображення, а на малюнку 178, *б* — розсіювальну лінзу, хід променів у ній та її умовне зображення. (Зауважимо, що збиральна лінза є опуклою, а розсіювальна увігнутою, лише коли показник заломлення речовини лінзи більший за показник заломлення навколишнього середовища.)



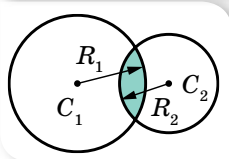
Мал. 178. Збиральна та розсіювальна лінзи



Мал. 179. Характеристики лінзи, які використовуються для побудови зображень

Лінза як оптична система має низку характеристик: фокус, фокальна площина, головна оптична вісь тощо. Зміст деяких термінів зрозумілий з малюнка 179.

Відстань від фокуса до оптичного центра називають *фокусною відстанню лінзи F*. Фокусна відстань збиральної лінзи є додатною, а розсіювальної — від'ємною. Величину, обернену до фокусної відстані, називають *оптичною силою лінзи D*,

$$D = \frac{1}{F}.$$


Мал. 180. Радіуси кривизни лінзи

У СІ оптичну силу лінзи вимірюють у діоптріях, $1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}}$.

Для сферичної лінзи $D = (n_{21} - 1) \left(\pm \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right)$, де n_{21} — відносний показник заломлення матеріалу лінзи; R_1, R_2 — радіуси кривизни поверхонь лінзи (мал. 180).

Знак «+» використовується для опуклих поверхонь, знак «-» — для увігнутих.

Побудова зображень, одержаних за допомогою лінз. Лінзи як оптичні прилади цінні тим, що за допомогою них отримують зображення предметів, які можуть випромінювати або відбивати світло.

На практиці для побудови зображень, отриманих за допомогою лінз, використовують чотири так звані зручні промені, хід яких відомий без використання закону заломлення.

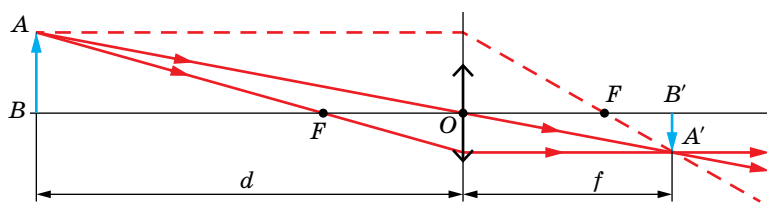
Хід зручних променів (мал. 181):

1. Якщо падаючий промінь паралельний головній оптичній осі, то заломлений промінь пройде через фокус.
2. Якщо падаючий промінь пройшов через фокус, то заломлений піде паралельно головній оптичній осі.
3. Промінь, який пройшов через оптичний центр, не заломлюється.
4. Якщо падаючий промінь паралельний побічній осі, то заломлений перетнеться із цією віссю у фокальній площині.

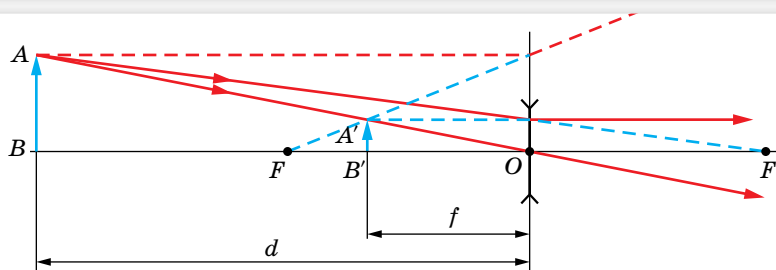
Зображення в лінзі може бути прямим або перевернутим, збільшеним або зменшеним, дійсним або уявним.

Якщо d — відстань від предмета до лінзи, то f — відстань від лінзи до зображення на екрані, F — фокусна відстань, то розміщення предмета і його зображення можна визначити за формулою тонкої лінзи:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D.$$



а



б

Мал. 181. Побудова зображень у збиральній та розсіювальній лінзах

Користуючись формулою тонкої лінзи, варто зважати на правило знаків:

- ▶ якщо лінза розсіювальна, то величину F беруть зі знаком «-»;
- ▶ якщо лінза дає уявне зображення, то і f також беруть з «-»;
- ▶ якщо предмет уявний, то і d беруть зі знаком «-».

Якщо h — висота предмета, а H — висота зображення, то можна визначити збільшення лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Тип і положення зображення предмета в збиральній лінзі залежать від його відстані d до лінзи. Характер співвідношення між предметом і його зображенням у збиральній лінзі наведено в таблиці 8.

Таблиця 8

Відстань від предмета до лінзи, d	Відстань до зображення, f	Тип зображення
$d \rightarrow \infty$	$f \approx F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d > 2F$	$2F > f > F$	Дійсне, обернене, зменшене, $\Gamma < 1$
$d = 2F$	$f = 2F$	Дійсне, обернене, рівне, $\Gamma = 1$
$2F > d > F$	$f > 2F$	Дійсне, обернене, збільшене, $\Gamma > 1$
$d \approx F$	$f \rightarrow \infty$	Не існує $\Gamma \rightarrow \infty$
$d < F$	$f < 0$	Уявне, пряме, збільшене, $\Gamma > 1$

Зображення предмета в розсіювальній лінзі за будь-якої відстані d від предмета до лінзи завжди уявне, пряме, зменшене та розміщене між переднім фокусом і лінзою, причому $f < d$.

Якщо оптична система складається з кількох лінз (їхні оптичні сили D_1, D_2, \dots, D_n), розміщених близько одна до одної, то виконується така формула:

$$D_{\text{системи}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n.$$

Про оптичні прилади читайте в електронному додатку.



Якщо ж лінзи розміщені в різних точках простору, то спочатку будують зображення, отримане від першої лінзи. Це зображення слугує предметом для другої лінзи і так далі. Повторюючи цей процес необхідну кількість разів, знаходять потрібне зображення для всієї оптичної системи.

Якщо лінза щільно прилягає до сферичного дзеркала, то $D = 2D_1 + D_2$, де D_1 — оптична сила лінзи, D_2 — оптична сила дзеркала.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть усі випадки побудови зображень, отриманих за допомогою збиральної лінзи; розсіювальної лінзи. 2. Що називають оптичною силою лінзи? У якому випадку оптична сила лінзи є додатною, а в якому — від'ємною? У яких одиницях вимірюють оптичну силу лінзи? 3. У яких умовах двоопукла скляна лінза з показником заломлення $n = 1,6$ стане розсіювальною? 4. Симетричну лінзу розрізали точно навпіл по площині симетрії. Яку частину початкової оптичної сили матимуть дві утворені лінзи?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. За допомогою лінзи з фокусною відстанню 20 см на екрані одержали зображення предмета. Відстань від лінзи до зображення — 1 м. Визначте відстань від лінзи до предмета.

Дано:

$F = 0,2 \text{ м}$

$f = 1 \text{ м}$

 $d = ?$ **Розв'язання:**

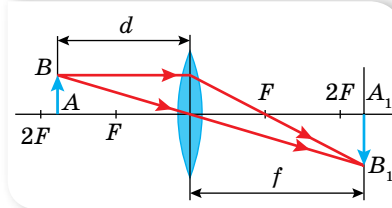
Оскільки зображення одержано на екрані, то лінза збиральна. У нашому випадку $f > 2F$, тоді $F < f < 2F$, тобто предмет розміщений між фокусною і подвійною фокусною відстанню.

Побудуємо хід променів через лінзу, використовуючи для побудови точки A два будь-які зручні промені (мал. 182).

Значення d визначимо з формули лінзи:

$$d = \frac{Fh}{f - F}; \quad d = \frac{0,2 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м} - 0,2 \text{ м}} = 0,25 \text{ м}.$$

Відповідь: 0,25 м.



Мал. 182

Задача 2. Оптична система складається з двох збиральних лінз 1 і 2 з фокусними відстанями $F_1 = 10 \text{ см}$ і $F_2 = 5 \text{ см}$. Лінзи розташовані на відстані $L = 35 \text{ см}$ одна від одної. Предмет розміщено на відстані $d_1 = 25 \text{ см}$ від першої лінзи. Визначте, де міститься зображення, утворене даною системою лінз, та яке збільшення системи.

Дано:

$F_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$

$F_2 = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$

$L = 35 \text{ см} = 0,35 \text{ м}$

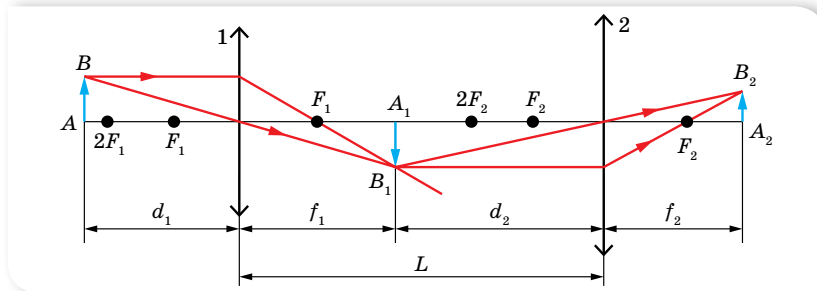
$d_1 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$

$f_2 = ?; \Gamma = ?$

Розв'язання:

З формули тонкої лінзи: $f_1 = \frac{F_1 d_1}{d_1 - F_1}; f_1 = 0,166 \text{ м}.$

Побудуємо хід променів через систему лінз (мал. 183).



Мал. 183

Збільшення, яке дає перша лінза: $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d_1}; \Gamma_1 = 0,664.$

З малюнка видно, що $d_2 = L - f_1$, $d_2 = 0,184 \text{ м}.$ Тоді $f_2 = \frac{F_2 d_2}{d_2 - F_2},$

$f_2 = 0,0688 \text{ м}.$ Збільшення другої лінзи: $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d_2}, \Gamma_2 = 0,375.$

Збільшення системи $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2, \Gamma = 0,25.$

Відповідь: $f_1 = 0,0688 \text{ м}; \Gamma = 0,25.$

Задача 3. Граничний кут зору для ока людини приблизно дорівнює $1'$. Якою має бути відстань між точками, що лежать на відстані найкращого зору (25 см), щоб людина могла бачити їх роздільно?

Дано:

$$\frac{d = 0,25 \text{ м}}{l = ?}$$

Розв'язання:

Зважаючи на величину кута зору, відстань між точками

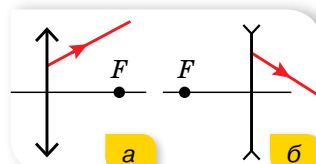
$$l = 25 \text{ см} \cdot \frac{1}{60 \cdot 57,3} = 0,073 \text{ мм} \approx 0,1 \text{ мм.}$$

Відповідь: 0,1 мм.



Вправа 30

- Визначте фокусну відстань двоопуклої скляної лінзи, зануреної у воду, якщо відомо, що її фокусна відстань у повітрі — 20 см. Абсолютний показник заломлення скла — 1,5; води — 1,33.
- Предмет міститься на відстані 90 см від екрана. Між предметом та екраном переміщують лінзу. З першої позиції лінза дає на екрані збільшене зображення предмета, а з другої — зменшене. Яка фокусна відстань лінзи, якщо лінійні розміри першого зображення в чотири рази більші за розміри другого?
- Екран міститься на відстані l від свічки. Ставлячи між свічкою та екраном збиральну лінзу, можна дістати чітке зображення свічки на екрані для двох положень лінзи, віддалених одне від одного на відстань a . Доведіть, що в даному випадку головну фокусну відстань лінзи можна обчислити за формулою $F = \frac{l^2 - a^2}{4l}$.
- Світна точка міститься на головній оптичній осі лінзи, фокусна відстань якої $F = 3$ см, на відстані $d = 4$ см від її оптичного центра. На відстані $\Delta = 3$ см від першої лінзи розміщена друга лінза такої самої оптичної сили. Оптичні осі обох лінз збігаються. Де буде зображення світної точки?
- На оптичній лаві розміщено дві збиральні лінзи з фокусними відстанями $F_1 = 12$ см і $F_2 = 15$ см. Відстань між лінзами $l = 36$ см. Предмет встановлено на відстані $d = 48$ см від першої лінзи. На якій відстані f від другої лінзи буде зображення предмета?
- Об'єктив складається з трьох контактуючих тонких лінз: перша двоопукла з фокусною відстанню 12,5 см, друга двовгнута з фокусною відстанню 10 см і третя двоопукла з фокусною відстанню 5 см. Визначте фокусну відстань об'єктива.
- На якій найменшій відстані одна від одної мають бути поділки вимірjuвального приладу, щоб учень, який сидить на останній парті за 8 м від столу, чітко розрізняв їх? Вважайте, що граничний кут зору — $2'$.
- Мікроскоп складається з об'єктива й окуляра, відстань між головними фокусами яких 18 см. Визначте збільшення, що дає мікроскоп, якщо фокусні відстані об'єктива й окуляра відповідно 2 і 40 мм. Побудуйте зображення предмета.
- Побудуйте графік залежності відстані f (від зображення до лінзи) від відстані d (від предмета до лінзи). Розгляньте також випадок, коли предмет — уявний.
- Обчисліть лінійне збільшення k через фокусну відстань F і відстань від предмета до лінзи d для випадків: а) $d > F$; б) $d < F$. Побудуйте графік залежності k від d .
- На малюнку 184 зображено хід променя після виходу зі збиральної (а) та розсіювальної (б) лінз. Знайдіть побудовою хід цих променів до лінзи.



Мал. 184



Перевірте себе (§ 37–39)



- Посередині між двома плоскими дзеркалами, паралельними одне одному, розміщено точкове джерело світла. Визначте швидкості (однакові), з якими мають рухатися обидва дзеркала, залишаючись паралельними одне одному, щоб перші уявні зображення в дзеркалах зближувалися зі швидкістю $6 \frac{M}{C}$.

А $6 \frac{M}{C}$	В $2 \frac{M}{C}$
Б $3 \frac{M}{C}$	Г $1,5 \frac{M}{C}$
- Визначте кут падіння світлового променя на скло ($n = 1,6$), щоб кут заломлення був удвічі меншим від кута падіння.

А 53°	В 30°
Б 74°	Г 38°
- Промінь падає нормально на бічну грань рівнобедреної трикутної скляної призми ($n = 1,5$). Визначте кут відхилення променя від початкового напрямку, якщо заломлюючий кут призми становить 40° .

А 40°	В 35°
Б 30°	Г 45°
- Предмет заввишки 4 м розташований на відстані 20 м від спостерігача. Фокусна відстань оптичної системи ока дорівнює 1,5 см. Визначте розмір зображення на сітківці ока.

А 3 см	В 2 см
Б 3 мм	Г 4 мм
- Визначте оптичну силу системи, що складається з двох щільно складених лінз із оптичними силами 3 дптр і 1,5 дптр.

А 1,5 дптр	В 4,5 дптр
Б 2,5 дптр	Г 2 дптр
- На який кут потрібно повернути дзеркало, щоб кут між падаючим і відбитим променями збільшився на α ?

А на α	В на $-\alpha$
Б на $\frac{\alpha}{2}$	Г на 180°
- Радіус кривизни увігнутого дзеркала — 48 см. Визначте фокусну відстань цього дзеркала.

А 48 см	В 0,24 м
Б 36 см	Г 0,96 м
- У дно озера забито стовп заввишки 4 м, який виступає з води на 1 м. Визначте довжину тіні від стовпа на дні озера, якщо промені падають на воду під кутом 45° .
- На яку максимальну глибину можна занурити у воду точкове джерело світла, щоб квадратний пліт зі стороною 4 м не пропускав світла в простір над поверхнею води? Центр плота розміщений над джерелом.
- Заломлюючий кут скляної призми дорівнює 60° . Кут падіння променя на бічну грань призми — 30° . Визначте кут відхилення променя від початкового напрямку після проходження крізь призму.

Розділ 3

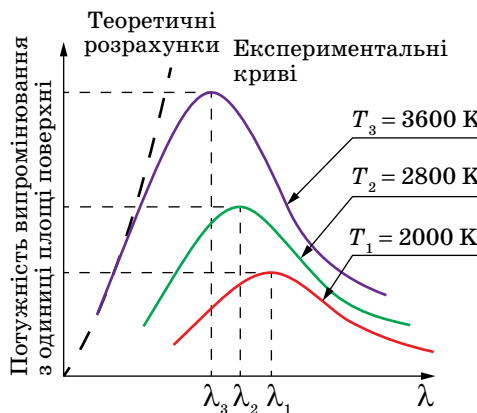
КВАНТОВА
ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

§ 40

Гіпотеза квантів Планка. Фотон

Зародження квантової теорії. Сьогодні ми знаємо, що світлу притаманні корпускулярні та хвильові властивості. Проте науковий доказ цьому було отримано шляхом тривалих досліджень і революційних рішень. Вивчення явищ дифракції, інтерференції та поляризації світла привело до утвердження в кінці XIX ст. електромагнітної хвильової теорії світла. Проте ця теорія не пояснювала розподілу енергії у спектрі випромінювання *абсолютно чорного тіла*. Абсолютно чорне тіло — це уявна модель. Абсолютно чорним вважають тіло, яке за будь-якої температури поглинає повністю всю енергію світла, що падає на нього. Незважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випромінювати тепло. Відповідно випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла найкраща, у порівнянні з усіма іншими тілами за тієї ж температури. Наближеним до випромінювання абсолютно чорного тіла є випромінювання багаття, Сонця тощо.

У чому ж суть проблеми? На малюнку 185 зображено експериментально отримані криві розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла. По осі абсцис відкладено довжину хвиль, по осі ординат — потужність випромінювання з одиниці поверхні абсолютно чорного тіла.



Мал. 185. Розподіл енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла

Звернімо увагу на форму кривих розподілу за різних температур. Для всіх кривих характерним є наявність максимуму, тобто існує довжина хвилі λ_{\max} , на якій випромінювання найбільше. З підвищенням температури λ_{\max} стає дедалі коротшою. Саме тому розжарене тіло з підвищенням температури стає спочатку червоним, потім оранжевим і, нарешті, жовто-білим. І саме наявність максимуму не вдавалося пояснити, ґрунтуючись на хвильовій теорії випромінювання.

Необхідне пояснення запропонував в 1900 р. німецький фізик Макс Планк. На відміну від зрозумілого уявлення про те, що поглинання й випромінювання світлових хвиль відбувається неперервно, Планк припустив, що тіло випромінює світло окремими порціями, які він назвав *квантами*¹ енергії. Енергія кванта пропорційна частоті випромінювання, $E = h\nu$. Коефіцієнт пропорційності h дістав назву *сталой Планка*.

Спираючись на цю ідею, Планк сформулював закон розподілу енергії у спектрі нагрітого тіла, який добре узгоджувався з експериментальними даними. На сьогодні значення сталої Планка визначено з високою точністю: $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Для більшості розрахунків використовують наближене значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Інколи використовують так звану зведену сталу Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Для виходу із ситуації, коли одні експерименти доводять, що світло поводить себе як хвиля, а інші — як потік частинок, данський фізик Нільс Бор (1885–1962) запропонував *принцип доповнюваності*, згідно з яким для пояснення природи світла потрібно використовувати й корпускулярні, й хвильові властивості світла — як два складники його природи, що доповнюють один одного. Хвильові й квантові властивості світла не можна протиставляти. Властивості неперервності, характерні для електромагнітного поля світлової хвилі, не виключають властивостей дискретності, характерних для квантів світла — фотонів.

Ідея Планка про переривчастий (дискретний) характер випромінювання й поглинання світла значно вплинула на весь подальший розвиток фізики. Проте сам Планк сприймав свою ідею як деякий математичний прийом, який давав змогу отримати правильний результат, пояснюючи теплове випромінювання, настільки неймовірно було уявити неперервний хвильовий процес дискретним, адже, за класичними уявленнями, неперервність принципово відрізняє хвилю від частинки.

Таким чином, світло має електромагнітну природу і йому притаманні двоїсті квантово-хвильові властивості, саме цю двоїстість мають на увазі, коли говорять про *корпускулярно-хвильовий дуалізм* світла. У видимого світла квантові та хвильові властивості виявляються однаковою мірою. Хвильові властивості світла виявляються у процесах його поширення, інтерференції, дифракції, поляризації, а корпускулярні — у процесах взаємодії світла з речовиною.

¹ Від лат. *quantum* — порція.

Для інших видів випромінювання спостерігається важлива закономірність: на малих частотах більшою мірою виявляються хвильові властивості (наприклад, для радіовипромінювання), а на великих частотах — квантові (наприклад, рентгенівське випромінювання).

Властивості фотона. Мінімальну порцію (квант) світлової енергії, яка локалізована в частинці, Альберт Ейнштейн називав *фотоном*.

У сучасній фізиці фотон розглядають як одну з елементарних частинок, проте, на відміну від частинок речовини, він має специфічні властивості:

1. Фотон є електрично нейтральною частинкою, тобто його заряд дорівнює нулю.
2. Зупинити чи загальмувати фотон неможливо, він або рухається зі швидкістю світла, або не існує. Швидкість руху фотона не залежить від вибору системи відліку й завжди дорівнює швидкості світла у вакуумі: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
3. На відміну від частинок речовини (електронів, атомів), фотони можуть порівняно легко випромінюватись або поглинатись. Тому не варто плутати швидкість поширення світлової хвилі в речовині зі швидкістю руху фотона. Фотони в речовині рухаються від частинки до частинки, поглинаються ними й знову виникають.
4. Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітного випромінювання, квантом якого він є: $E = h\nu$. Повну енергію фотона можна визначити й за законом взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$.
5. Імпульс фотона пов'язаний з його енергією співвідношенням $p = \frac{E}{c}$.
Після перетворень: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.
6. Маса спокою фотона дорівнює нулю. Ця властивість стосується тільки окремого фотона, а світло в цілому (як потік фотонів) має масу.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. У чому полягає суть гіпотези Планка? **2.** Чому довелося звернутися до уявлення про дискретність світлового потоку? **3.** Яке значення сталої Планка? Покажіть, що стала Планка вимірюється в тих же одиницях, що й момент імпульсу. **4.** Назвіть основні властивості фотона. **5.** Як визначити масу та імпульс фотона? Як напрямлений імпульс фотона?



Вправа 31

1. Визначте довжину хвилі фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу електрона, що має швидкість $10^4 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
2. Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим $\lambda = 0,75 \text{ мкм}$ і найкоротшим $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ хвилям видимої частини спектра.

3. До якого виду належать промені, енергія фотонів яких дорівнює $2 \cdot 10^{-17}$ Дж, $4 \cdot 10^{-19}$ Дж, $3 \cdot 10^{-23}$ Дж?
4. Визначте довжину хвилі променів, кванти яких мають таку саму енергію, що й електрон, який пролетів різницю потенціалів 4,1 В.
5. Визначте довжину хвилі й частоту випромінювання, маса фотонів якого дорівнює масі спокою електрона. Якого типу це випромінювання?
6. Джерело світла, потужність якого 100 Вт, випускає $5 \cdot 10^{20}$ фотонів за 1 с. Обчисліть середню довжину хвилі випромінювання.
7. Натреноване око, тривалий час перебуваючи в темряві, може сприймати світло з довжиною хвилі 0,5 мкм, якщо воно має потужність не менше $2 \cdot 10^{-17}$ Вт. Скільки фотонів потрапляє в такому разі на сітківку за 1 с?

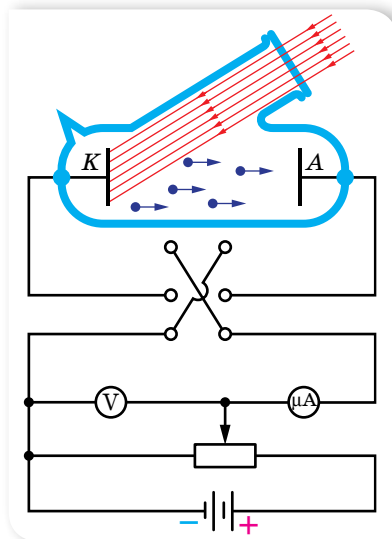
§ 41

Фотоефект

Явище фотоефекту. *Фотоефект* — це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан.

Це явище може виявлятися по-різному: як фотойонізація окремих атомів і молекул газу під дією опромінення світлом; як фотоелектронна емісія під дією електромагнітного випромінювання (зовнішній фотоефект); у зміні електропровідності під дією світла (внутрішній фотоефект); в ініціюванні фотоядерних реакцій тощо.

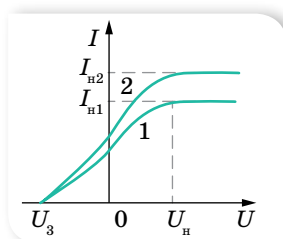
Уперше закономірності фотоефекту дослідив російський учений Олександр Григорович Столетов (1839–1896). У 1888 р. він створив установку, яка дала змогу добути електричний струм за допомогою зовнішнього фотоефекту (фотострум) і дослідити його залежність від інтенсивності та довжини хвилі випромінювання. На малюнку 186 зображено більш сучасну схему установки для дослідження явища фотоефекту. У скляний балон, з якого викачано повітря, уміщено два електроди. У балон на один з електродів крізь кварцове скло (прозоре не лише для видимого світла, а й для ультрафіолетового) надходить світло. На електроди подається напруга, яку можна змінювати за допомогою потенціометра й вимірювати вольтметром. Якщо освітлювати електрод, приєднаний до негативного полюса батареї, то з нього вивільняються електрони, які, рухаючись в електричному полі, утворюватимуть струм. Фотострум, що виникає, вимірюють міліамперметром.



Мал. 186. Схема установки для дослідження фотоефекту

За малих напруг не всі електрони, що їх вириває світло, досягають другого електрода. Якщо, не змінюючи світлового потоку, збільшувати різницю потенціалів між електродами, то сила струму зростатиме. За певної напруги вона досягає максимального значення і вже не збільшується. Найбільший фотострум, який дістають за незмінного світлового потоку, називають *фотострумом насичення*. Очевидно, що фотострум насичення створюється за таких напруг, коли всі електрони, вирвані світловим потоком з катода, досягають анода. Отже, фотострум насичення може бути кількісною характеристикою фотоefекту.

Змінюючи характеристики падаючого світла (збільшуючи чи зменшуючи світловий потік або змінюючи частоту випромінювання), можна встановити залежність величини фотоструму від характеристик світлового випромінювання. Якщо, не змінюючи світлового потоку, зменшувати напругу, то фотострум починає зменшуватись, однак навіть коли напруга спадає до нуля, фотострум не зникає. Це означає, що випромінювання, яке падає на катод, вириваючи з нього електрони, ще й надає їм кінетичну енергію. Величину цієї енергії визначають так. Якщо поміняти місцями полюси батареї, то електричне поле між електродами гальмуватиме рух електронів. Поступово підсилюючи затримуюче поле, можна зовсім припинити фотострум (мал. 187). У цьому разі навіть електрони, що вилетіли з максимальною швидкістю, вже не можуть подолати гальмівну дію електричного поля й долетіти до анода. Вимірявши затримуючу напругу U_3 , за якої припиняється фотострум, можна виміряти максимальну



Мал. 187.
Вольт-амперні характеристики фотоefекту (графіку 1 відповідає менший світловий потік, ніж графіку 2)

кінетичну енергію вибитих електронів $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$.

Продовжуючи дослід, можна встановити залежність величини максимальної кінетичної енергії фотоелектронів від характеристик світлового випромінювання.

І ще одну закономірність фотоefекту можна виявити, якщо замінювати матеріал, з якого виготовлено катод.

Закони зовнішнього фотоefекту. У результаті дослідів було встановлено три закони фотоefекту.

Кількість електронів, що вилітають з поверхні тіла під дією електромагнітного випромінювання, (а отже, і фотострум насичення) пропорційна його інтенсивності.

Перший закон фотоefекту легко пояснити з погляду хвильової природи світла: що більшою є енергія хвилі, то ефективніша її дія. Наступні два закони фотоefекту пояснити з позицій хвильової теорії світла не вдавалось. Виявилось, що:

максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти опромінення й не залежить від його інтенсивності.

Для кожної речовини залежно від її температури й стану поверхні існує мінімальна частота ν_0 , за якої ще можливий зовнішній фотоелектричний ефект. Мінімальну частоту ν_0 (або максимальну довжину λ_0) електромагнітного випромінювання, за якої відбувається фотоелектричний ефект, називають *червоною межею фотоелектричного ефекту*. Термін «червона межа» підкреслює, що фотоелектричний ефект обмежений з боку довгохвильової частини спектра. Отже, не кожне випромінювання здатне спричинювати фотоелектричний ефект. Світло, довжина хвилі якого більша за червону межу λ_0 , не спричинює фотоелектричний ефект, якою б не була його інтенсивність.

Досліди з освітлення катодів з різних матеріалів показали, що червона межа фотоелектричного ефекту різна для різних речовин і залежить від хімічної природи речовини й стану поверхні тіла.

Червона межа фотоелектричного ефекту визначається лише матеріалом освітлюваного катода й не залежить від його освітленості.

Другий і третій закони фотоелектричного ефекту не можна пояснити на основі електромагнітної теорії світла. Справді, за хвильовою теорією, фотоелектричний ефект має спостерігатися за будь-якої частоти (довжини) світлової хвилі, оскільки енергія, яку одержує електрон під час розгойдування його електромагнітною хвилею, залежить від енергії хвилі, а остання визначається амплітудою коливань, а не довжиною хвилі. Крім того, кінетична енергія вибитих електронів мала б залежати від освітленості поверхні, оскільки зі збільшенням освітленості електрону передавалась би більша енергія.

Рівняння фотоелектричного ефекту. У 1905 р. Альберт Ейнштейн показав, що закони фотоелектричного ефекту можна пояснити тільки з квантових уявлень про природу світла.

Пригадаймо, що електрон може вийти за межі якого-небудь тіла (наприклад, металу), тільки тоді, коли його кінетична енергія дорівнює або більша за роботу виходу $A_{\text{вих}}$ із цієї речовини. Нехай монохроматичне випромінювання, яке падає на метал, складається з фотонів, енергія яких $h\nu$. Електрони, розміщені недалеко від поверхні металу, поглинають фотони, які проникають у метал, набуваючи їхню енергію. Взаємодія випромінювання з речовиною в цьому разі складається з безлічі елементарних процесів, у кожному з яких один електрон поглинає повністю один квант енергії (один фотон). Якщо значення енергії фотона більше за роботу виходу, то електрон може вилетіти з металу. (Поясніть самостійно, чи може відбуватися зовнішній фотоелектричний ефект за взаємодії світла з будь-якою речовиною.)

Таким чином, енергія фотона, що поглинається в процесі зовнішнього фотоелектричного ефекту, витрачається на виконання роботи виходу електрона з металу і надання йому кінетичної енергії. Математично це записують *рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту*: $h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{к}}$.

Квантова теорія дає таке пояснення законам фотоелектричного ефекту:

1. Зі збільшенням інтенсивності монохроматичного випромінювання зростає кількість поглинутих металом фотонів, а отже, і кількість електронів, які вилітають з нього, прямо пропорційна інтенсивності випромінювання (*перший закон*).

2. З рівняння фотоефекту видно, що кінетична енергія електронів, які вилітають, залежить тільки від роду металу (який характеризується відповідною роботою виходу $A_{\text{вих}}$) та від частоти (довжини) падаючого випромінювання ($h\nu$), а від інтенсивності не залежить, $E_k = h\nu - A_{\text{вих}}$ (**другий закон**).
3. Якщо енергія фотона менша від роботи виходу $A_{\text{вих}}$, то за будь-якої інтенсивності випромінювання електрони з металу не вилітатимуть (**третій закон**). Мінімальну частоту падаючого випромінювання (червону межу ν_0) можна визначити з рівняння фотоефекту, припустивши, що вся енергія падаючого фотона йде на виконання роботи виходу ($E_k = 0$): $h\nu_0 = A_{\text{вих}}$ або $h \frac{c}{\lambda_0} = A_{\text{вих}}$.

З рівняння Ейнштейна можна визначити сталу Планка. Розрахунки підтверджують теоретично запропоноване Максом Планком значення $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с, яке він отримав, пояснюючи теплове випромінювання тіл. Збіг значень сталої Планка, здобутих різними методами, підтверджує правильність квантової теорії світла.

Застосування фотоефекту. Відкриття явища фотоефекту мало велике значення для кращого розуміння природи світла. Але цінність науки полягає не лише в тому, що вона з'ясує складну й багатогранну будову довкілля, а й у тому, що наука дає нам засоби, за допомогою яких можна удосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального та культурного життя. Практичне застосування фотоефекту пов'язане насамперед з перетворенням світлової енергії на електричну. Це реалізовано в сонячних батареях (мал. 188).



Мал. 188. Сонячні батареї

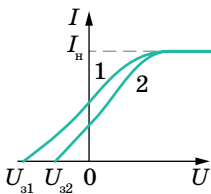
Про інші сфери застосування фотоелектричного ефекту читайте в електронному додатку.



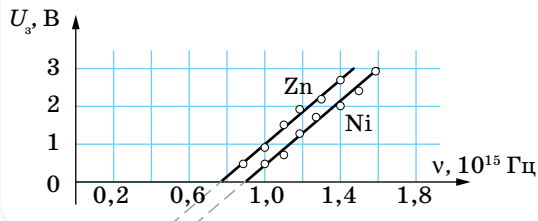
ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які закономірності виявляються у процесі зовнішнього фотоефекту? 2. Які суперечності виявились між закономірностями фотоефекту і хвильовою теорією світла? 3. Як з позицій квантової фізики пояснюються закони фотоефекту? 4. На малюнку 200 показано установку для вивчення зовнішнього фотоефекту. Змінюючи напругу між анодом і катодом вакуумної трубки, вимірюють силу струму в колі та знімають вольт-амперну характеристику фотоефекту (мал. 187, с. 210). Поясніть: а) від чого залежить значення затримуючої напруги U_3 , за якої значення фотоструму дорівнює нулю; б) чому за

умови великих додатних значень анодної напруги фотострум перестав збільшуватись, досягаючи максимально можливого в даних умовах значення I_n ; в) від чого залежить значення I_n ; г) чим пояснити, що для двох наведених графіків значення U_3 однакові, а значення I_n — різні? 5. Однією лампою, інтенсивність випромінювання якої не змінюється з часом, по черзі освітлюють два фотокатоди й одержують дві вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоефекту, графіки яких наведено на малюнку 189. Установіть: а) чому для вказаних графіків значення затримуючої напруги U_3 відрізняються; б) у якого з фотокатодів більша робота виходу й чому; 3) чому на графіках значення фотоструму насичення однакові. 6. На малюнку 190 наведено експериментальні криві залежності U_3 від ν для фотоефекту на двох металах — цинку та нікелі. Як видно з графіка, ці криві є прямими, тобто залежності носять лінійний характер. Поясніть: 1) чому залежності $U(\nu)$ носять лінійний характер; 2) які величини можна визначити, якщо за графіками виміряти: а) відрізки, що відтинають криві на осі напруг; б) нахил кривих до осі частот.



Мал. 189. Вольт-амперні характеристики зовнішнього фотоефекту



Мал. 190. Залежності U_3 від частоти ν для фотоефекту на двох металах

Приклади розв'язування задач

Задача. Металева пластинка освітлюється світлом з довжиною хвилі 420 нм. Робота виходу електронів з поверхні пластинки дорівнює 2 еВ. Визначте затримуючу різницю потенціалів, за якої припиниться фотострум.

Дано:

$$\lambda = 420 \text{ нм}$$

$$A_{\text{вих}} = 2 \text{ еВ}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$U_3 = ?$$

Розв'язання:

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}.$$

Фотострум припиниться, коли потенціальна енергія електрона в затримуючому полі почне дорівнювати його кінетичній енергії, тобто

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

Підставивши цей вираз у рівняння Ейнштейна, отримуємо

$$eU_3 = h\nu - A_{\text{вих}}.$$

Оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, зрештою маємо
$$U_3 = \frac{h \frac{c}{\lambda} - A_{\text{вих}}}{e}.$$

Після підстановки даних і враховуючи, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, визначаємо $U_3 = 0,95 \text{ В}$.

Відповідь: $U_3 = 0,95 \text{ В}$.



Вправа 32

1. Якої довжини промені світла треба спрямувати на поверхню цезію, щоб максимальна швидкість виривання фотоелектронів дорівнювала $2000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$? Червона межа фотоелекту для цезію — 690 нм.
2. Найбільша довжина хвилі світла, за якої відбувається фотоелект для вольфраму, дорівнює 0,275 мкм. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму; найбільшу швидкість руху електронів, що вириваються з вольфраму світлом довжиною хвилі 0,18 мкм; найбільшу енергію цих електронів.
3. Енергія фотона дорівнює кінетичній енергії електрона, що має початкову швидкість $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і прискорюється різницею потенціалів 4 В. Визначте довжину хвилі фотона.
4. У явищі фотоелекту електрони, що вириваються з поверхні металу випромінюванням частотою $2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, повністю затримуються гальмівним полем з різницею потенціалів 7 В, а частотою $4 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ — з різницею потенціалів 15 В. За цими даними обчисліть сталу Планка.
5. На поверхню деякого металу падає фіолетове світло довжиною хвилі 0,4 мкм. При цьому затримуюча напруга для вибитих світлом електронів — 2 В. Чому дорівнює затримуюча напруга в разі освітлення того самого металу червоним світлом довжиною хвилі 0,77 мкм?
6. Краплина води об'ємом 0,2 мл нагрівається світлом довжиною хвилі 0,75 мкм, поглинаючи щосекунди 10^{10} фотонів. Визначте швидкість нагрівання води.
7. Цезієву пластинку, робота виходу електронів з якої 1,9 еВ, опромінюють фіолетовим світлом довжиною хвилі $4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. До якого максимального потенціалу зарядиться пластинка?
8. Фотони з енергією 4,9 еВ виривають електрони з металу з роботою виходу 4,5 еВ. Визначте максимальний імпульс, що передається поверхні металу за вильоту кожного електрона.
9. Плоска пластинка з металу, червона межа фотоелекту для якого дорівнює $4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, освітлюється ультрафіолетовими променями довжиною хвилі 300 нм. За межами пластинки є однорідне магнітне поле індукцією $6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$, напрям якого паралельний площині пластинки. Визначте радіус кола, який описують фотоелектрони, що вилітають із пластинки.

§ 42

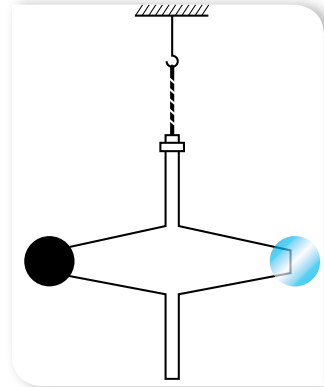
Тиск світла. Фотохімічна дія світла

Дослід Лебедева. Уперше висловив припущення про існування тиску світла Йоганн Кеплер у 1619 р., пояснюючи цим тиском відхилення хвостів комет, які наближались до Сонця. У 1873 р. Джеймс Максвелл теоретично розрахував силу тиску сонячного випромінювання на чорну поверхню, розташовану перпендикулярно до сонячних променів. Цей тиск приблизно дорівнював $4 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$. Згідно з теорією Максвелла світло,

як і будь-яка електромагнітна хвиля, чинить тиск на перешкоду. Під дією електричного поля хвилі електрони в тілах коливаються. Утворюється електричний струм. Цей струм напрямлений уздовж напруженості електричного поля. На електрони, які рухаються впорядковано, діє сила Лоренца магнітного поля. За правилом лівої руки, сила Лоренца напрямлена вздовж хвилі. Це і є сила тиску світла.

Проте жодних експериментальних даних, які б підтвердили існування світлового тиску, на той час не було. Виявити й виміряти тиск світла вдалось у 1900 р. російському фізику Петру Миколайовичу Лебедеву.

В експериментальній установці Лебедева (мал. 191) на тонкій пружній кварцовій нитці було підвішено коромисло з тонкими легкими пластинками з металевої фольги. Одна з пластинок була покрита тонким шаром сажі. Світло падало на пластинки. Чорною пластинкою світло поглиналось, дзеркальною — відбивалось. Про величину світлового тиску можна було зробити висновок, вимірявши кут закручування нитки. Проте на закручування нитки впливало неоднакове нагрівання боків пластинок (той бік, що повернутий до джерела світла, нагрівається дужче, ніж протилежний). Молекули повітря, що відбиваються від нагрітого боку, передають пластинці більший імпульс, ніж молекули, що відбиваються від холоднішого боку. Унаслідок цього виникає закручуючий момент, який у 1000 разів більший за закручуючий момент, зумовлений тиском світла. Щоб позбутися цього впливу, Лебедев помістив установку в скляний балон, з якого викачали повітря. Тиск світла, отриманий з експерименту, збігався зі значенням світлового тиску, розрахованим Максвеллом, з точністю до 2 %.



Мал. 191. Схема дослідження тиску світла

Пояснення тиску світла з квантових позицій. Квантова теорія світла пояснює причину світлового тиску досить просто. Фотони, подібно до звичайних частинок речовини, мають імпульс. Коли фотони поглинаються тілом, то вони передають тілу свій імпульс. За законом збереження, набутий імпульс тіла дорівнює зміні імпульсу фотонів. У випадку дзеркальної поверхні фотони відбиваються, і тіло отримує подвійний імпульс, а чорна пластинка, що поглинає фотони, отримує вдвічі менший імпульс, ніж дзеркальна. Це й зумовлює обертання пластинок. За другим законом Ньютона, зміна імпульсу тіла означає, що на тіло діє сила. Відношення сили до площі поверхні, на яку вона діє, і є тиском.

Таким чином, тиск світла пояснюється і хвильовою, і квантовою теоріями світла.

Тиск світла розраховують за формулою $p = (1 + k)\omega$, де $k = 0$ — для чорної поверхні, $k = 1$ — для дзеркальної поверхні, ω — густина енергії електромагнітної хвилі.

Інтенсивність хвилі, або густина потоку випромінювання I , визначається формулою $I = \frac{nh\nu}{S\Delta t}$ або $I = \omega c$, де c — швидкість світла, $nh\nu$ — сумарна енергія всіх фотонів, які падають на поверхню.

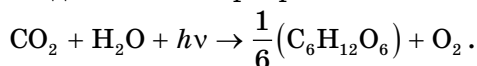
Сонячні промені приносять щосекунди 1370 Дж енергії на кожний квадратний метр поперечного перерізу Землі. Ця величина називається сонячною сталою $I_c = 1370 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Фотохімічна дія світла. Поглинання світла речовиною може супроводжуватись також хімічною дією світла. Хімічна дія світла виявляється в тому, що світло викликає такі хімічні перетворення, які без світла не відбуваються. Хімічні реакції, що перебігають унаслідок дії світла, називають *фотохімічними*. Наприклад, під дією ультрафіолетового випромінювання з молекул кисню утворюються молекули озону, $3\text{O}_2 + h\nu = 2\text{O}_3$. Як видно, у процесі фотохімічної реакції кожний поглинутий фотон взаємодіє з однією молекулою.



Мал. 192. Фотографії, отримані за допомогою космічного телескопа Габбла

Найважливішою фотохімічною реакцією є *фотосинтез* — процес утворення під дією світла вуглеводнів з виділенням кисню в рослинах і деяких мікроорганізмах за реакцією



Завдяки фотосинтезу на Землі зберігається безперервний кругообіг вуглецю й підтримується життя. Учені встановили, що фотосинтез хлорофілом вуглеводів, що містяться в рослинах, відбувається під дією червоних променів спектра сонячного світла. Приєднуючи до вуглеводневого ланцюга атоми інших елементів, одержуваних із ґрунту, рослини будують молекули вуглеводів, жирів і білків, створюючи їжу для людини й тварин.

Хімічну дію світла покладено в основу фотографії на фотоплівку (фотопластину). Основу такої фотографії становить фотохімічна реакція розкладу бромистого срібла. Зір людини також пояснюється особливими фотохімічними процесами, які відбуваються в сітківці ока.

Сьогодні такі приймачі випромінювання, як фотоемулсії, фотоелектронні помножувачі, електронно-оптичні перетворювачі (що перетворюють інфрачервоне випромінювання на видиме), ПЗЗ-матриці (від скорочення: прилади із зарядовим зв'язком), дають змогу астрономам реєструвати випромінювання небесних тіл у всьому діапазоні електромагнітного спектра.

Про інші явища, що пояснюються квантовими властивостями світла, читайте в електронному додатку.



Ви можете самостійно оцінити переваги фотографічного методу порівняно з візуальним, а також назвати переваги цифрової фотографії порівняно з фотоплівками. А з виведенням астрономічних досліджень у космос ученні мають змогу досліджувати унікальні його знімки (мал. 192).



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть ідею досліду Лебедева. **2.** Яка основна трудність виникала під час вимірювання тиску світла і як її вдалось подолати Лебедеву? **3.** Чи може фотон, зіткнувшись із перешкодою, віддати їй більше, ніж мав до зіткнення: а) енергії; б) імпульсу? **4.** У чому виявляється хімічна дія світла? **5.** Які реакції називають фотохімічними? Наведіть приклади фотохімічних реакцій.



Приклади розв'язування задач

Задача. Потік монохроматичного світла $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м падає нормально на плоску дзеркальну поверхню й тисне на неї із силою 10^{-8} Н. Визначте кількість фотонів, які щосекунди падають на цю поверхню.

Дано:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$F = 10^{-8} \text{ Н}$$

$$k = 1$$

$$n = ?$$

Розв'язання:

Тиск світла за нормального падіння на поверхню

$$\text{дорівнює } p = \frac{nh\nu}{Stc}(1+k).$$

$$\text{За визначенням, тиск } p = \frac{F}{S}, \text{ а } \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Підставивши ці вирази в рівняння, отримуємо $\frac{F}{S} = \frac{nhc}{Stc\lambda}(1+k)$,

$$\text{звідки } n = \frac{Ft\lambda}{h(1+k)}.$$

$$n = \frac{10^{-8} \text{ Н} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 1 \text{ с}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2} = 3,78 \cdot 10^{18} \text{ фотонів.}$$

Відповідь: $3,78 \cdot 10^{18}$ фотонів.



Вправа 33

1. На поверхню площею 50 см^2 , що повністю поглинає світло, за 1 с падає нормально до неї $1,5 \cdot 10^{20}$ фотонів жовтого випромінювання з довжиною хвилі 589 нм . Яка сила тиску цього випромінювання діє на дану поверхню у вакуумі?
2. На поверхню площею 100 см^2 щохвилини падає 63 Дж світлової енергії. Визначте світловий тиск у випадках, коли поверхня повністю відбиває й повністю поглинає світло.
3. Визначте силу світлового тиску сонячного випромінювання, що падає нормально на дзеркальну поверхню площею 30 м^2 . Вважайте, що сонячна стала дорівнює $1,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

- Пучок світла з довжиною хвилі 0,49 мкм, що падає перпендикулярно до поверхні, чинить на неї тиск 5 мкПа. Скільки фотонів щосекунди потрапляє на 1 м² цієї поверхні? Коефіцієнт відбиття світла від даної поверхні — 0,25.
- Визначте тиск світла на стінки електричної лампи потужністю 100 Вт. Колба лампи має сферичну поверхню радіусом 5 см, стінки якої відбивають 10 % світла. Вважайте, що вся спожита лампою потужність іде на випромінювання.



Виконцємо навчальні проекти

- ▶ Сонце — основне джерело енергії. Використання сонячної енергії.
- ▶ Тиск світла в космічних масштабах.
- ▶ Фотоелементи, їх використання.

§ 43

Хвильові властивості електронів. Електрони в атомі

Гіпотеза де Бройля. У 1923 р. французький фізик Луї де Бройль (1892–1987) розширив уявлення про корпускулярно-хвильовий дуалізм. Усвідомлюючи наявну в природі симетрію, він використав *принцип симетрії* та висловив таку гіпотезу: оскільки світло поводить себе в одних випадках як хвиля, а в інших — як частинка, то й об'єкти природи, які ми вважаємо частинками (електрони та інші матеріальні тіла), мають хвильові властивості.

Де Бройль припустив, що формули для розрахунку енергії ($E = h\nu$) та імпульсу $p = \frac{h}{\lambda}$ є універсальними — такими, що справджуються як для фотонів, так і для будь-яких інших частинок. Так, для частинки масою m , що рухається зі швидкістю v , відповідає хвиля довжиною $\lambda = \frac{h}{mv}$.

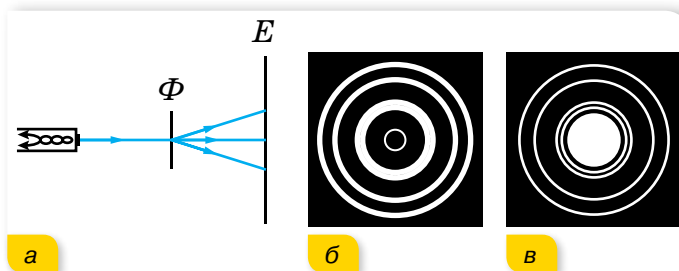
Величину λ називають *дебройлівською довжиною хвилі*.

Дебройлівська довжина хвилі звичайного тіла дуже мала, щоб її можна було виявити та виміряти. Так, наприклад, дебройлівська довжина хвилі м'яча масою 200 г, що летить зі швидкістю $15 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, становить приблизно $2,2 \cdot 10^{-34}$ м. Пригадайте, що типові хвильові властивості — інтерференція та дифракція — виявляються тільки в тому разі, коли розміри предметів або щілин співрозмірні з довжиною хвилі. Оскільки нам не відомі предмети або щілини, на яких би могли дифрагувати хвилі довжиною $2,2 \cdot 10^{-34}$ м, то хвильові властивості звичайних тіл виявити не вдається.

Для тіл малої маси (наприклад, електронів) дебройліська довжина хвилі має вже значно більше значення. Так, електрону, що рухається зі швидкістю $5,6 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}$, відповідає дебройлівська довжина хвилі $1,2 \cdot 10^{-10}$ м. Такі хвилі вже можна виявити експериментально.

Дифракція електронів. Оскільки міжатомні відстані в кристалі твердого тіла за величиною порядку 10^{-10} м і розташовані атоми в кристалі впорядковано, то кристал можна використати як дифракційну ґратку.

У 1927 р. американські фізики Клінтон Девіссон і Лестер Джермер досліджували відбивання електронів від монокристала нікелю (мал. 193, а). У проведених дослідах спостерігався неоднаковий розподіл відбитих пучків електронів. Отримані результати можна було пояснити як результат дифракції електронів. Незабаром у 1928 р. англійський фізик Джордж Томсон (син Джозефа Томсона) спостерігав дифракцію електронів під час проходження ними тонких металевих плівок. На малюнку 193, б зображено дифракційну картину від розсіювання електронів на алюмінієвій фользі, а на малюнку 193, в — аналогічну фотографію, отриману при опроміненні фольги рентгенівським випромінюванням.



Мал. 193. а — Схема досліду з дифракції електронів; б — дифракційна картина від розсіювання електронів на алюмінієвій фользі; в — дифракційна картина від розсіювання рентгенівських променів

Існування дифракції електронів незаперечно свідчить про хвильові властивості електронів. Як показали дослідження, хвильові властивості мають не лише електрони, а й інші частинки: протони, нейтрони та ін.

А яким же чином виявляються хвильові властивості електронів безпосередньо в атомі?

Постулати Бора. Відкриття складної будови атома — найважливіший етап становлення сучасної фізики, який позначився на її наступному розвитку. Багато часу та зусиль знадобилося ученим різних країн світу, щоб сформувалися сучасні уявлення про будову атома. Як ви знаєте, згідно з моделлю Резерфорда атом складається з масивного важкого ядра й електронів, що обертаються навколо нього. Будучи прогресивним кроком у розумінні будови мікросвіту, модель атома Резерфорда має лише історичну цінність. Проблема цієї моделі полягала в її нестабільності. Відповідно до теорії Максвелла, заряджена частинка, що рухається з прискоренням, має випромінювати. Відповідно, електрон, обертаючись навколо ядра, рухається з доцентровим

З історією становлення наукових пояснень будови атома можете ознайомитися за допомогою електронного додатку.



прискоренням, а отже, має випромінювати її, втрачаючи кінетичну енергію, падати на ядро. Такий атом має існувати протягом неймовірно малих інтервалів часу (близько 10 мільярдних частки секунди).

Вихід із ситуації запропонував данський фізик Нільс Бор у 1913 р. Він дійшов висновку, що планетарну модель атома Резерфорда варто доповнити ідеями квантової теорії, яка починала утверджуватись. Бор припустив, що електрони в атомах також не випромінюють енергію безперервно, випромінювати вони можуть лише під час переходу з одного енергетичного стану в інший.

Нільс Бор доповнив планетарну модель атома такими *постулатами*:

1. Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових, станах, кожному з яких відповідає певна енергія E_n . У стаціонарному стані електрон рухається по коловій орбіті радіусом r й атом енергію не випромінює (у Нільса Бора йшлося про радіус орбіти електрона, зараз ми говоримо про орбіталі електронів).
2. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu = E_k - E_n$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів).
3. Момент імпульсу електрона, що рухається зі швидкістю v_n на n -ій орбіті, радіус якої r_n , набуває дискретних значень $L = mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$,

де $n = 1, 2, 3 \dots, m$ — маса електрона, \hbar — зведена стала Планка.

Використовуючи закони механіки Ньютона та правила квантування, Бор зумів з високою точністю обчислити енергетичні стани атома Гідрогену. Проте застосування її до складніших атомів не давало таких блискучих результатів. За своєю природою вона була спрямована на вирішення конкретної проблеми: обґрунтування стабільності атома та пояснення лінійчатих спектрів. Незважаючи на це, теорія Бора в розвитку фізики відіграла значну роль.

По-перше, ідея квантування в моделі атома Бора узгоджувалася з ідеями де Бройля. Тим самим підтверджувалося, що *корпускулярно-хвильовий дуалізм закладений у самій структурі атома*.

По-друге, вона стала поштовхом для розвитку *квантової фізики*.

Закони руху в квантовій фізиці. Ідея квантування — одна з найважливіших ідей у науці ХХ ст. На її основі виникла й розвивається *квантова фізика*, яка дає можливість вивчати особливості мікросвіту — світу атомів, елементарних частинок та їх взаємодій. Не вдаючись у деталі математичного апарату квантової фізики (він досить складний), ми розглянемо, як, зокрема, вирішується основна задача механіки в квантовій фізиці. У мікросвіті можна лише передбачити, з якою *ймовірністю* в даний момент часу частинка може перебувати в певній точці простору. Для цього користуються співвідношенням невизначеностей, установленим у 1927 р. німецьким фізиком Вернером Гейзенбергом (1901–1976, Німеччина). Згідно із цим принципом, ми не можемо знати одночасно точних значень

координати x і відповідної цій координаті складової імпульсу p_x частинки. Якщо невизначеність Δx у вимірюванні координати порядку λ , $\Delta x \approx \lambda$, а невизначеність у зміні імпульсу $\Delta p_x \approx \frac{h}{\lambda}$, то добуток $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.

Коли Вернера Гейзенберга запитали, як уявити атом, він відповів: «Навіть не намагайтеся». Ви досить часто бачили малюнки, на яких частинки атома зображують у вигляді кульок. Але насправді це не так. Зважаючи на хвильову природу, електрон, рухаючись в атомі, займає тривимірну ділянку, як лопаті вентилятора, що в процесі обертання здатні заповнити кожний клаптик простору.

Завдяки квантовій фізиці вдалося пояснити будову атома, умови заповнення орбіталей електронами тощо.

З основними положеннями квантової механіки та фізичними основами побудови періодичної системи хімічних елементів можете ознайомитися в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Електрон і протон рухаються з однаковими швидкостями. Якій із цих частинок відповідає менша довжина хвилі? 2. Про що свідчить дифракція електронів? Яке практичне застосування вона має? 3. У чому планетарна модель атома Резерфорда не узгоджується із законами класичної фізики? 4. Сформулюйте постулати Бора.

§ 44

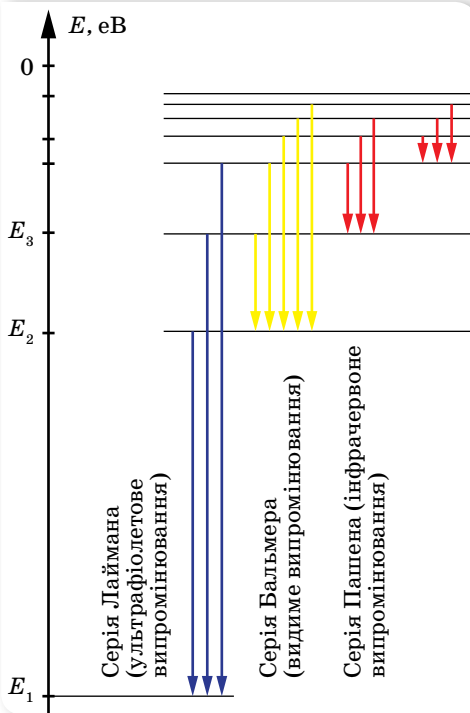
Випромінювання

Енергетичні рівні атома Гідрогену. Згідно з постулатами Бора перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu = E_k - E_n$, або $\nu = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}$, де k і n — цілі числа (номери стаціонарних станів).

Для наочності прийнято зображати значення енергій атомів у вигляді горизонтальних прямих, розташованих одна над одною на відстані, пропорційній різниці їх енергій. Найнижча пряма відповідає нормальному стану атома.

На малюнку 194, с. 222 зображено схему рівнів енергії атома Гідрогену.

Енергію електрона, що покинув атом (міститься на нескінченній відстані від ядра), приймають за нуль. Зрозуміло, що в цьому разі енергія будь-якого електрона, який перебуває ближче до ядра, буде меншою, а отже, від'ємною. У нормальному (не збудженому) стані енергія атома буде



Мал. 194. Енергетичні рівні в атомі Гідрогену

рівнів — випромінювання оптичного діапазону (серія Бальмера) й під час переходів на третій рівень — інфрачервоне випромінювання (серія Пашена). Серії названо на честь учених, які їх відкрили.

У 1885 р. вчителів фізики однієї зі швейцарських шкіл Йогану Бальмеру вдалося встановити для Гідрогену, що його частоти випромінювання у видимій частині спектра можна визначити за формулою $\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де R — постійна величина, $R = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, яку називають сталою Рідберга; k — ціле число, що набуває значень 3, 4, 5,

Із часом, після відкриття спектральних ліній не лише у видимій частині спектра, а й в інфрачервоній та ультрафіолетовій, формула набула вигляду $\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$, де n і k — цілі числа, $k > n$. Ця формула дістала назву формули Бальмера¹.

¹ У деяких навчальних посібниках можна зустріти й такий запис формули Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Річ у тім, що такий вигляд формули використовують у спектроскопії, коли спектральні лінії характеризують не частотою, а величиною, оберненою довжині хвилі. Звертаємо вашу увагу на те, що стала величина в обох випадках позначається однаково, але вона має різне значення. У даному разі $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

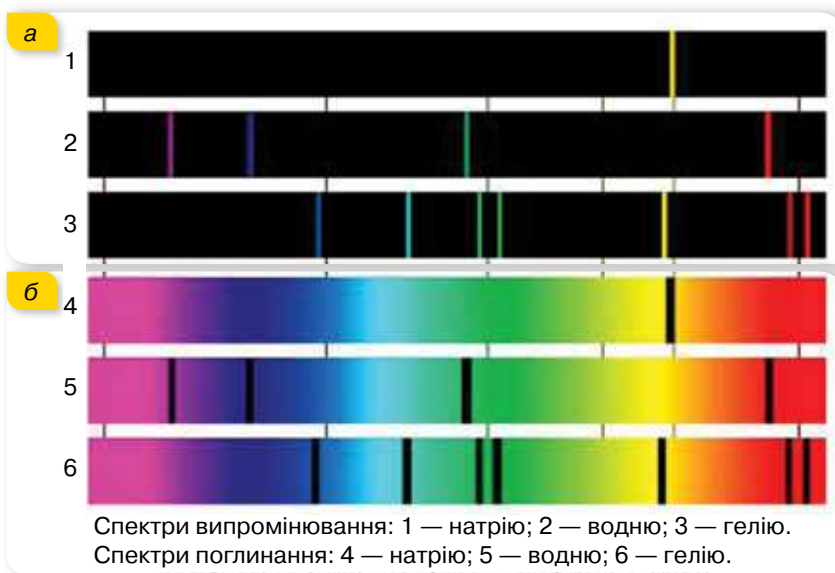
мінімальною й у випадку атома Гідрогену її значення $E_1 = -13,55 \text{ еВ}$. У першому збудженому стані (другий енергетичний рівень) атом Гідрогену матиме енергію $E_2 = -3,38 \text{ еВ}$, у другому — $E_3 = -1,5 \text{ еВ}$.

З основного стану в збуджений атом може перейти, отримавши ззовні в будь-який спосіб (наприклад, поглинувши фотон або зіткнувшись з іншим атомом) порцію енергії, яка дорівнює різниці енергії стаціонарних рівнів. Так, у випадку Гідрогену атом може перейти у збуджений стан, поглинувши енергію: $E_2 - E_1 = 10,17 \text{ еВ}$, або $E_3 - E_1 = 12,05 \text{ еВ}$ і т.д.

У збудженому стані електрон не може перебувати тривалий час. Під час переходів на перший рівень ($n = 1$) із другого, третього й т.д. випромінюються ультрафіолетові промені (серія Лаймана), під час переходів на другий рівень з вищих

Види спектрів. Отримані в такий спосіб випромінювання притаманні одноатомним газам. Спостерігають їх за допомогою спеціальних приладів — *спектроскопів*. А найвузчі лінії різних кольорів, що дістають під час світіння газів (або пари), називають *лінійчатим спектром випромінювання*.

Спектральний склад випромінювання різних речовин досить різноманітний. Проте всі спектри можна поділити на три групи: *лінійчаті, смугасті та неперервні*.



Мал. 195. Лінійчаті спектри випромінювання та поглинання

Лінійчатий спектр — це оптичне випромінювання поодиноких збуджених атомів, яке виникає завдяки квантовим переходам між електронними рівнями енергії (*атомні спектри*).

Лінійчаті спектри випромінюють усі речовини в газоподібному атомарному (але не молекулярному) стані, причому кожний хімічний елемент дає свій лінійчатий спектр, який не збігається зі спектрами інших елементів (мал. 195, а).

Головна властивість лінійчатих спектрів полягає в тому, що довжини хвиль (або частоти) лінійчатого спектра якої-небудь речовини залежать лише від властивостей атомів цієї речовини й зовсім не залежать від способу збудження світіння атомів.

Виняткову сталість частот випромінювання атомів було використано для визначення еталону основної одиниці часу — секунди. Для цього було взято одну із частот випромінювання атомів Цезію-133 і секунду означили як інтервал часу, протягом якого здійснюється певна кількість коливань (9 192 631 770), що відповідає цій частоті.

Поглинання світла речовинами також залежить від його довжини хвилі. Уперше такі дослідження провів у 1854 р. Густав Кірхгоф, який

установив, що *будь-яка речовина поглинає переважно промені такої довжини хвилі, які сама може випромінювати*. Пояснення спектрів поглинання впливає з постулатів Бора. *Лінійчаті спектри поглинання* мають вигляд темних ліній на фоні неперервної райдуги, розташування яких збігається з розташуванням кольорових ліній у спектрі випромінювання даного газу (мал. 195, б; с. 223).

Смугасти́й спектр має вигляд кольорових смуг, розділених темними проміжками (*молекулярні спектри*).

Утворення молекули з атомів змінює енергетичні рівні зовнішніх електронів, оскільки в молекулі вони взаємодіють один з одним. До того ж, виникають додаткові рівні, що відповідають коливанням атомів й обертанню молекули як цілого. Енергетичні рівні коливального та обертального рухів також квантовані. Таким чином, кожний атомний рівень розчіплюється на низку близьких рівнів. У результаті переходів між цими рівнями й виникає сукупність ліній, що утворює смугу.

У **неперервному** спектрі немає темних проміжків, і на екрані спектрального апарата можна побачити суцільну різнокольорову смугу. Це означає, що в спектрі наявні всі довжини хвилі.

Неперервний спектр випромінюють розжарені тверді тіла й розігріті рідини, які перебувають за даної температури у стані термодинамічної рівноваги з випромінюванням. Гази під високим тиском теж можуть випромінювати неперервний спектр. Ця обставина свідчить про те, що існування неперервного спектра зумовлене не тільки властивостями окремих випромінюючих атомів, а й значно *залежить від взаємодії атомів між собою*.

Про рентгенівське, теплове та люмінесцентне, а також спонтанне й вимушене випромінювання читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Зобразіть за допомогою схеми енергетичних рівнів атома Гідрогену перехід, який відповідає випромінюванню ультрафіолетових променів. 2. За яким принципом спектральні лінії Гідрогену об'єднано в серії? 3. Які речовини дають суцільний спектр? Які — лінійчатий? 4. Чим відрізняються лінійчаті спектри різних газів і пари?

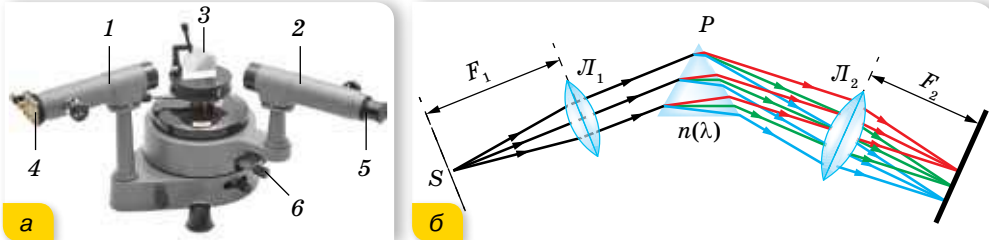
§ 45

Спектральний аналіз

Спектральні прилади. Одним із приладів, за допомогою якого досліджують спектри, є спектроскоп (мал. 196).

Основними елементами спектроскопа є коліматор 1, зорова труба 2, трикутна призма 3. У коліматорі є щілина 4, через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла *S*. Проходячи крізь призму, світло

заломлюється й дає спектр, який спостерігається крізь окуляр 5 зорової труби. Для захисту призми від стороннього світла її прикривають кришкою. За допомогою мікрометричного гвинта 6 можна зміщувати зорову трубу в горизонтальній площині та визначати довжину світлової хвилі, яка відповідає певній лінії спектра.



Мал. 196. Будова та принцип дії спектроскопа

Потрапляючи через об'єктив у зорову трубу, усі паралельні промені дають зображення щілини у фокальній площині об'єктива, а оскільки промені різних частот (кольорів) паралельні різним побічним осям, кожне зображення щілини (лінія певної частоти) буде на певному місці. Якщо спектроскоп призначено для вимірювань, то на зображення ліній за допомогою спеціального пристрою накладається зображення шкали з поділками, що дає змогу точно визначити положення ліній у спектрі.

Якщо замість зорової труби поставити лінзу та фотопластинку (або інший світлочутливий матеріал), то можна зафіксувати зображення спектра для подальшого дослідження. Такий прилад називають *спектрографом*, фотографію спектра — *спектрограмою*.

Для астрономічних досліджень спектральні прилади розміщують за фокусом об'єктива телескопа. Хоча нині в астрофізиці використовують і складніші прилади для спектрального аналізу різних видів випромінювання.

Спектральний аналіз і його застосування. Спектральний аналіз широко використовують у науці й техніці. Це один з найшвидших і найпростіших способів визначення складу різних хімічних сполук, оскільки кожний хімічний елемент має свій характерний лінійчатий спектр випромінювання (поглинання). За спектрами поглинання Сонця та зір досліджено їхній хімічний склад. Випромінювання поверхні Сонця (фотосфери), дає неперервний спектр. Це випромінювання має температуру близько $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і, проходячи крізь атмосферу Сонця (температура якої $2000\text{--}3000\text{ }^{\circ}\text{C}$), частково поглинається. Атмосфера Сонця поглинає світло певних частот фотосфери, і на тлі неперервного спектра фотосфери з'являється майже 20 000 ліній поглинання. За цими лініями було встановлено, що на Сонці є Гідроген, Кальцій, Натрій, Ферум та інші хімічні елементи. Уперше дослідження ліній поглинання у спектрі сонячного випромінювання провів у 1817 р. Йозеф фон Фраунгофер, тому ці лінії називають *фраунгоферовими*.

Під час проведення спектрального аналізу користуються спеціальними таблицями або атласами спектральних ліній, у яких наведено точне

розміщення ліній спектра кожного хімічного елемента або довжини хвиль, що їм відповідають. За допомогою спектрального аналізу було відкрито нові хімічні елементи — Рубідій і Цезій. Цікава історія відкриття Гелію. Спочатку його було виявлено під час аналізу спектра сонячного випромінювання в 1868 р., звідки й походить його назва (від грец. «геліос» — Сонце).

Основні переваги спектрального аналізу — дуже висока чутливість, простота й швидкість проведення — зумовлюють його широке використання в металургії й машинобудуванні, хімії й геології, медицині й біології та багатьох інших галузях науки й техніки.

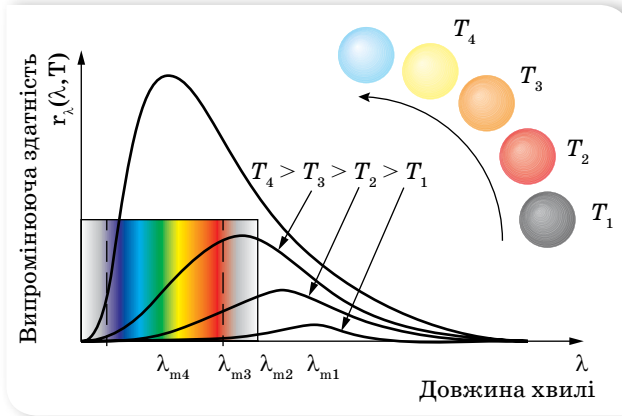
Закон Віна. На початку цього розділу ми вже з'ясували деякі особливості вигляду кривих розподілу енергії за довжиною хвилі для абсолютно чорного тіла (мал. 185, § 40), а саме: *довжина хвилі, на яку припадає найбільша енергія випромінювання, тим менша, що вища температура тіла.* Під час детального дослідження в 1893 р. Вільгельм Він виявив деяку закономірність, яку називають **законом Віна**: добуток довжини хвилі, яка відповідає максимуму випромінювання в спектрі абсолютно чорного тіла, на його абсолютну температуру є сталою величиною, $\lambda_{\max} T = b$, тут b — стала Віна, яка дорівнює $b = 0,002898 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Спектральний розподіл енергії теплового випромінювання якого-небудь реального тіла може помітно відрізнитись від спектра випромінювання абсолютно чорного тіла, проте має такий самий характер. Установивши, на яку довжину хвилі припадає найбільша енергія в спектрі випромінювання тіла, можна визначити його температуру. Цим способом можна визначити температуру розплавленого металу, Сонця, зір тощо. Такий спосіб визначення температури джерела випромінювання називають *оптичною пірометрією*.

Визначення фізичних властивостей і швидкості руху небесних тіл за допомогою їх спектрів. За зовнішнім видом спектрів небесних тіл можна не лише ототожнити хімічний склад світил. Наприклад, ширина їхніх спектральних ліній указує на температуру, тиск і наявність електричного або магнітного полів у небесного тіла. Великий тиск, електричне чи магнітне поле приводять до розширення, а також до розщеплення ліній у спектрі. Висока температура спричиняє явище йонізації — атоми втрачають частину електронів, тому спектр речовини з йонізованими атомами відмінний від спектра тієї ж речовини в нейтральному стані.

Розгляньмо докладніше методи *визначення температури* небесного тіла з його спектра.

Згідно із законом Віна довжина l_{\max} електромагнітної хвилі, що переносить максимальну енергію, пов'язана з температурою тіла, яке її випромінює, залежністю $T = \frac{0,002898}{l_{\max}}$, де l_{\max} виражено в метрах, а T — у кельвінах. За розташуванням максимуму кривої розподілу енергії у спектрі випромінювання (мал. 197) визначають l_{\max} і обчислюють температуру.



Мал. 197. Зміщення максимуму кривих енергії випромінювання тіл залежно від їхньої температури

Можна визначити температуру небесного тіла з аналізу його повного випромінювання. Для абсолютно чорного тіла в такому разі справедливий закон Стефана — Больцмана:

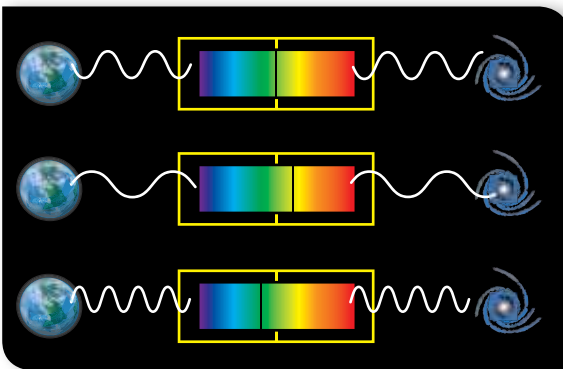
$$E = \sigma T_e^4,$$

де E — енергія, яку випромінює тіло з одиниці площі за одиницю часу, σ — стала Стефана — Больцмана, а T_e — ефективна температура.

Щоб за цією формулою визначити ефективну температуру небесного тіла, треба виміряти повну кількість енергії, яку воно випромінює за одиницю часу. Знаючи відстань до об'єкта та його радіус, обчислюють величину E і з формули Стефана — Больцмана визначають значення T_e .

Спектральні спостереження дають змогу визначати променеву швидкість небесного тіла. Це швидкість, з якою об'єкт наближається до спостерігача або віддаляється від нього. Метод вимірювання променевих швидкостей ґрунтується на застосуванні ефекту Доплера. Його вивів у 1842 р. Крістіан Доплер.

Згідно з ефектом Доплера рух тіла вздовж променя зору спостерігача спричиняє зміщення ліній у його спектрі (мал. 198).



Мал. 198. Зміщення ліній у спектрі зорі, спричинене ефектом Доплера

Вимірявши зміщення ліній у спектрі світила й знаючи швидкість світла, легко обчислити променеву швидкість v_r небесного тіла з формули:

$$\lambda' - \lambda = \left(\frac{v_r}{c}\right) \lambda, \text{ або } \Delta\lambda = \left(\frac{v_r}{c}\right) \lambda, \text{ чи } v_r = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right) c,$$

де λ — довжина хвилі нерухомого джерела світла, λ' — довжина хвилі, змінена внаслідок руху джерела світла вздовж променя зору, $\Delta\lambda$ — доплерівське зміщення спектральної лінії, v_r — швидкість руху джерела, c — швидкість світла.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чому біле світло, проходячи крізь призму, розкладається в кольоровий спектр?
2. Яке світло буде поширюватися в речовині призми (склі) з більшою швидкістю — червоне чи фіолетове?
3. Назвіть способи визначення температури зір.
4. Схарактеризуйте роль спектрального аналізу в астрономії.
5. Якою є температура поверхні зорі Сиріус, якщо максимум випромінювання в її спектрі припадає на довжину хвилі $\lambda_{\max} = 280,0$ нм?

§ 46

Атомне ядро

Протонно-нейтронна модель атомного ядра. Історію ядерної фізики прийнято відліковувати з 1896 р. У цьому році Анрі Беккерель відкрив явище радіоактивності, яке не можна було пояснити на основі тогочасних уявлень про будову атома.

На початку 30-х років ХХ ст. було досліджено структуру атомного ядра й розроблено його модель, яку й донині використовують для пояснення процесів мікросвіту. Згідно з цією моделлю, до складу ядра атома входять частинки двох видів — протони та нейтрони. (Надалі ми частіше вживатимемо термін «частинки», але не забуваймо, що ці частинки мають і хвильові властивості.)

Протон (позначається p) — стабільна елементарна частинка. З одного протона складається ядро атома Гідрогену. Протон має елементарний позитивний заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Нейтрон (позначається n) — електрично нейтральна частинка. Нейтрон — стабільна частинка лише у складі стабільних атомних ядер. Вільний нейтрон — нестабільна частинка, яка розпадається на інші частинки.

Нейтрони та протони як складові частинки атомного ядра мають спільну назву — *нуклони*.

Оскільки атом в цілому електронейтральний, а заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона, то кількість протонів Z у ядрі дорівнює кількості електронів в атомній оболонці. Число Z в атомному ядрі визначає атомний номер і його місце в таблиці Менделєєва. Кожне атомне ядро характеризується зарядом Ze , масою $m_{\text{я}}$ і масовим числом A , що дорівнює кількості нуклонів у ядрі, $A = N + Z$, де N — кількість нейтронів, Z — кількість протонів.

Позначаючи ядра хімічного елемента, вказують кількість протонів Z знизу й масове число A — зверху. Наприклад, ядро Гелію позначається так: ${}^4_2\text{He}$.

Енергія зв'язку. У ядрі зосереджена майже вся (понад 99,95 %) маса атома. Маси ядер прийнято вимірювати в атомних одиницях маси (а. о. м.). Маса протона $m_p = 1,672617 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 а. о. м. Маса нейтрона $m_n = 1,674920 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00866 а. о. м. (Згідно з формулою взаємозв'язку маси-енергії $E = mc^2$ маси ядер також вимірюють одиницями енергії — електрон-вольтами.)

Дослідженнями доведено, що загальна маса ядра завжди менша від суми мас частинок, з яких воно складається, тобто $M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$. Різницю між сумою мас нуклонів (нейтронів і протонів), які входять до складу ядра, і масою ядра називають *дефектом маси* Δm . Дефект маси визначає енергію зв'язку: що більший дефект маси, то більша енергія зв'язку й стійкіше ядро.

Енергія зв'язку ядра $E_{\text{зв}}$ визначається роботою, яку потрібно виконати, щоб розділити ядро на окремі частинки й віддалити їх одну від одної на таку відстань, на якій їхньою взаємодією можна нехтувати.

Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії: $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$. Оскільки енергію зв'язку зазвичай виражають у МеВ, а дефект мас — в а.о.м., і враховуючи, що $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1\text{еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, для обчислень

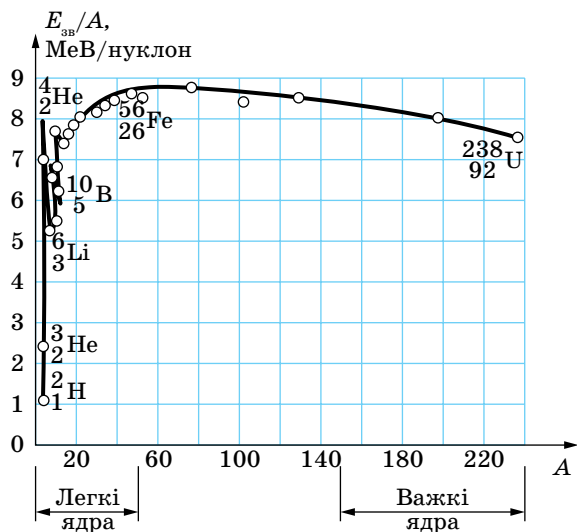
можна користуватись формулою $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}}$.

Якби не було дефекту маси, то ядро розпалося б на нуклони самостійно, без виконання роботи. Для забезпечення стабільності ядра його маса має бути меншою від суми мас його нуклонів.

Питома енергія зв'язку називають енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон.

На малюнку 199, с. 230 наведено криву залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер. Як видно з малюнка, питома енергія зв'язку спочатку зростає зі збільшенням масового числа, досягає насичення (близько 8 МеВ/нуклон для $A \approx 15$) і для $A > 60$ крива повільно спадає. Питома енергія зв'язку має максимум (приблизно 8,8 МеВ) для $A \approx 56$. Максимум кривої відповідає найстабільнішим ядрам.

Сильна взаємодія. Ядра атомів можна аналізувати не лише з погляду енергії, а й з позиції тих сил, що утримують нуклони в ядрі. Сили, які діють між ядерними частинками й зумовлюють утворення атомних ядер, мають особливий характер. Оскільки ці сили перевищують електромагнітну кулонівську силу відштовхування, яка, своєю чергою, перевищує гравітаційну силу притягання, то ці сили дістали назву *сильних (ядерних) сил*. Ядерні сили належать до нового типу взаємодії — *сильної взаємодії*.



Мал. 199. Крива залежності питомої енергії зв'язку від масового числа для стабільних ядер

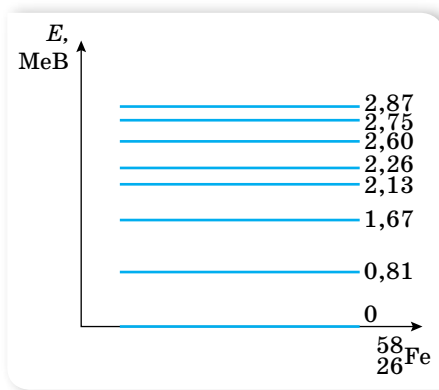
Дослідження показали, що ядерні сили притягання діють між будь-якими двома нуклонами на відстанях між центрами частинок близько $2 \cdot 10^{-15}$ м і різко зменшуються зі збільшенням відстані; на відстанях, більших за $3 \cdot 10^{-15}$ м, вони вже практично дорівнюють нулю. Коли ж нуклони, зіткнувшись, зближуються до відстані $0,5 \cdot 10^{-15}$ м, ядерні сили перетворюються на сили відштовхування. Пригадайте, подібний характер має взаємодія між молекулами, але сили й енергія взаємодії нуклонів у мільйони разів більші, а відстані між частинками — в мільйони разів менші.

Дуже малий радіус дії ядерних сил свідчить про те, що нуклони всередині ядра взаємодіють лише із сусідніми, а не з усіма нуклонами ядра. Відповідно можна помітити деяку схожість між атомним ядром та краплиною рідини. Нуклони в ядрі, як і молекули в рідині, взаємодіють тільки зі своїми найближчими сусідами. Густина ядра, як і краплини, не залежить від розміру. Поверхневі нуклони односторонньо пов'язанні з внутрішніми, і під дією сил поверхневого натягу ядро, як і краплина, має набувати сферичної форми. У збудженому ядрі нуклони коливаються, подібно до молекул у нагрітій краплині. Численні зіткнення можуть привести до того, що який-небудь з нуклонів дістане енергію, достатню для подолання ядерних сил, і вилетить з ядра. Коли заряджена частинка, наприклад, протон або α -частинка, перебуває на відстані, що перевищує радіус дії ядерних сил, то ядро діє на неї просто як позитивно заряджена краплина. Наведений опис називають *краплинною моделлю ядра*. Краплинна модель ядра дає змогу обчислити радіуси ядер і наочно пояснити деякі їхні властивості.

Але чи завжди процес зіткнення ядра з іншим ядром або частинкою буде супроводжуватись вильотом нуклона? Чи не може атомне ядро

поглинути енергію, одержану під час зіткнення, і перерозподілити її між нуклонами, що входять до його складу, змінивши тим само свою внутрішню енергію? Що відбуватиметься з таким ядром далі?

Відповіді на ці запитання дали досліди з вивчення взаємодії протонів з атомними ядрами. Виявляється, з поступовим збільшенням енергії протонів спочатку спостерігаються тільки пружні зіткнення з атомними ядрами, кінетична енергія не перетворюється на інші види енергії, а лише перерозподіляється між протоном і атомним ядром як однією цілою частинкою. Однак, починаючи з деякого значення енергії протона, можуть відбуватись і непружні зіткнення, в яких протон поглинається ядром і повністю віддає йому свою енергію. Ядро кожного ізотопу характеризується певним набором «порцій» енергії, які воно може сприйняти. Пояснення властивостей ядра в цьому разі здійснюють за допомогою *оболонкової моделі*. Згідно із цією моделлю, нуклони в ядрі не перемішані як завгодно, а, подібно до електронів у атомі, розміщуються зв'язаними групами, заповнюючи дозволені ядерні оболонки.



Мал. 200. Енергетичні рівні ядра атома Феруму

Таким чином, квантування енергії та низку інших параметрів є властивістю не лише атомів, а й атомних ядер. Проте між енергетичними діаграмами атомів та атомних ядер є суттєві відмінності. На малюнку 200 зображено енергетичну діаграму ядра ізотопу Феруму ${}_{26}^{58}\text{Fe}$. Зверніть увагу, що енергія, потрібна для переведення атомного ядра в збуджений стан, — порядку мегаелектронвольт, коли як для переведення у збуджений стан атома достатньо кількох електронвольт.

Самодовільний перехід атомного ядра зі збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням *гамма-квантів*. Гамма-кванти є найбільш короткохвильовим видом електромагнітного випромінювання.

Незважаючи на те, що оболонкова модель атома дає змогу пояснити спектри енергетичних станів, вона, як і краплинна модель, не спроможна пояснити всіх властивостей сильної взаємодії, зокрема *обмінний характер ядерних сил*. Як ми з'ясуємо згодом, нуклони взаємодіють між собою через третю частинку, якою вони постійно обмінюються.

ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Які характерні властивості ядерних сил відрізняють їх від інших типів сил — електричних, магнітних, гравітаційних? **2.** Не користуючись відповідними таблицями, порівняйте енергії зв'язку таких двох ядер: ${}^7_3\text{Li}$ та ${}^7_4\text{Be}$. **3.** Нуклони в ядрі мають кінетичну й потенціальну енергії. Яка за модулем сумарна енергія нуклонів більша? Чому?

Приклади розв'язування задач

Задача. Розрахуйте енергію зв'язку ядра атома Дейтерію. Відповідь наведіть в електрон-вольтах. Використайте необхідні довідкові дані з таблиць мас ізотопів.

Дано:

$$\begin{aligned} m_p &= 1,00728 \text{ а. о. м.} \\ m_n &= 1,00866 \text{ а. о. м.} \\ M_{\text{H}} &= 2,01410 \text{ а. о. м.} \\ m_e &= 0,00055 \text{ а. о. м.} \\ E_{\text{зв}} &= ? \end{aligned}$$

Розв'язання:

Енергія зв'язку ядра визначається як $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$, де Δm — різниця суми мас вільних частинок, що входять до складу ядра, і маси ядра (дефект маси ядра); c — швидкість світла у вакуумі.

Для знаходження різниці мас використовуємо з таблиць відомості про маси протона m_p , нейтрона m_n та атома Дейтерію M_{H} . Для знаходження дефекту маси ядра Дейтерію Δm необхідно вирахувати з маси атома дейтерію масу електрона, що утворює його оболонку:

$$\Delta m = m_p + m_n - m_{\text{я}} = m_p + m_n - (M_{\text{H}} - m_e).$$

Виконавши розрахунки, отримуємо $\Delta m = 0,00239$ а. о. м.

Оскільки $1 \text{ а. о. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$ і $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$,

то для обчислень можна користуватись формулою: $E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}}$.

$$E_{\text{зв}} = 0,00239 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МеВ}}{\text{а. о. м.}} = 2,23 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: $E_{\text{зв}} = 2,23 \text{ МеВ}$.



Вправа 34

- Обчисліть енергію зв'язку ядра Дейтерію ${}^2_1\text{H}$ в МеВ.
- Визначте енергію зв'язку ядра Алюмінію ${}^{27}_{13}\text{Al}$.
- Визначте енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон у ядрах ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{16}_8\text{O}$.
- Йони двох ізотопів Урану, що мають однакову валентність, рухаються в магнітному полі мас-спектрографа по дугах кіл з радіусами $R_1 = 1,224 \text{ м}$ і $R_2 = 1,232 \text{ м}$. Визначте відношення мас ізотопів. Яка маса m_1 йонів легкого ізотопу (в атомних одиницях маси), якщо маса йонів важкого ізотопу $m_2 = 238$ а. о. м.?

§ 47

Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Ізотопи. Природна і штучна радіоактивність. Одним з найбільш переконливих доказів складної будови атомів стало відкрите в 1896 р. французьким фізиком Антуаном Беккерелем явище природної радіоактивності. Унаслідок спостереження за великою кількістю радіоактивних

перетворень поступово з'ясувалося, що є речовини, які мають різні радіоактивні властивості (тобто розпадаються по-різному), але цілком однакові за хімічними властивостями. На цій підставі Фредерік Содді в 1911 р. висловив припущення про можливість існування елементів з однаковими хімічними властивостями, які, однак, відрізняються іншими властивостями (зокрема щодо радіоактивності). Ці елементи треба ставити в одну й ту саму чарунку періодичної системи Менделєєва. Фредерік Содді назвав такі елементи *ізотопами* (тобто такими, що займають однакові місця).

Атомні ядра з однаковим Z , але різними кількостями нейтронів N називаються *ізотопами*.

Наразі відомі ізотопи всіх хімічних елементів. Наприклад, Гідроген має три ізотопи:

${}^1_1\text{H}$ — Гідроген звичайний — основний ізотоп (стабільний).

${}^2_1\text{H} = {}^2_1\text{D}$ — Дейтерій (важкий водень); входить як домішка до природного водню (його вміст становить $\frac{1}{4500}$ частину).

${}^3_1\text{H} = {}^3_1\text{T}$ — надважкий водень — Тритій; отримують штучно, він радіоактивний.

Існування ізотопів доводить, що заряд атомного ядра й, отже, будова електронної оболонки визначають не всі властивості атома, а лише його хімічні властивості й ті фізичні, які залежать від периферії електронної оболонки, наприклад, розміри. Маса ж атома та його радіоактивні властивості не залежать від порядкового номера в таблиці Менделєєва.

З явищем радіоактивності ви вже частково ознайомилися в курсі фізики 9 класу. Пригадаймо ці відомості.

Радіоактивність — це спонтанне перетворення нестійких ізотопів хімічного елемента в ізотопи іншого хімічного елемента, яке супроводжується випусканням певних частинок.

Радіоактивний розпад ядер (радіоактивність) є властивістю самого атомного ядра; на швидкість протікання цього процесу не впливають зовнішні фактори (температура, тиск, електричне або магнітне поля тощо).

Радіоактивність нестабільних ізотопів, що трапляються в природі, називають *природною*. *Штучна* радіоактивність — це радіоактивність нестабільних ізотопів, отриманих у лабораторних умовах як продукти штучних перетворень атомних ядер.

Види радіоактивного випромінювання. Дослідження Антуана Беккереля, Ернеста Резерфорда, П'єра Кюрі, Марії Склодовської-Кюрі та інших учених показали, що радіоактивне випромінювання є трьох видів. Вони були названі умовно першими трьома літерами грецького алфавіту: α -, β -, γ -випромінювання.

Дослідження методом відхилення в магнітному полі, проведені Склодовською-Кюрі, а згодом й Резерфордом, показали, що радіоактивне випромінювання має різний електричний заряд: α -частинки — позитивний, β -частинки — негативний і γ -промені електрично нейтральні. Детальні

дослідження радіоактивного випромінювання підвели до з'ясування його природи.

α -частинки — це ядра атома Гелію (2 протони та 2 нейтрони). Характерною величиною α -частинок є їхня енергія (від 4 до 9 МеВ). Різні радіоактивні речовини випромінюють α -частинки різної енергії, однак усі α -частинки, випущені даною радіоактивною речовиною, мають цілком конкретну енергію. Найчастіше радіоактивна речовина випромінює не одну, а кілька груп α -частинок із цілком певним значенням початкової енергії. Пролітаючи крізь речовину, α -частинки поступово втрачають енергію, йонізуючи молекули речовини й, урешті, зупиняються. У повітрі за нормальних умов α -частинки утворюють у середньому приблизно 50 000 пар йонів на 1 см шляху. Довжина їхнього вільного пробігу в повітрі — від 2 до 12 см, у твердих речовинах і рідинах — кілька мікрометрів. Тому вони легко затримуються аркушем паперу.

β -частинки — це потік швидких електронів. Швидкості β -частинок можуть наближатись до швидкості світла й сягати $0,999 \cdot c$. На відміну від α -частинок, β -частинки даної радіоактивної речовини мають не однакові значення енергії. Енергія β -частинок може набувати значення від 0 до деякого максимального значення (характерного для даного хімічного елемента). Унаслідок відносно малої маси β -частинки розсіюються в речовині, їхні траєкторії мають покручений вигляд, для них не існує певної довжини вільного пробігу. Щоб затримати β -частинки, потрібен шар металу завтовшки близько 3 мм.

γ -промені — це короткохвильовий вид електромагнітного випромінювання, який виникає внаслідок переходу ядра зі збудженого стану в основний. Довжина хвилі γ -променів — порядку 10^{-10} м, що зумовлює їхню високу проникну здатність. Енергія γ -променів — від 0,02 до 2,6 МеВ. Для поглинання γ -променів потрібен шар свинцю завтовшки понад 20 см.

Альфа- й бета-розпади. Радіоактивне випромінювання є продуктом самодовільного розпаду атомних ядер радіоактивних елементів. При цьому деякі з ядер випускають лише α -частинки, інші — β -частинки. Є радіоактивні ядра, які випускають обидва види випромінювання. Зауважимо, що γ -промені, як правило, не є самостійним типом радіоактивності, воно супроводжує α - і β -розпади. Розглянемо детальніше види радіоактивного розпаду.

У процесах радіоактивного розпаду всіх трьох видів виконуються класичні закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу та електричного заряду. Для радіоактивного розпаду виконується і ще один закон — **закон збереження кількості нуклонів**: загальна кількість нуклонів у будь-якому радіоактивному розпаді залишається незмінною (нуклони не зникають і не виникають, відбувається їх перетворення).

Радіоактивний розпад супроводжується перетворенням одного хімічного елемента на інший. Ядро, що утворюється внаслідок α -розпаду, буде відрізнятись від вихідного тим, що воно втрачає 2 протони та 2 нейтрони. Наприклад, при α -розпаді радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ утворюється елемент, порядковий номер якого $Z = 88 - 2 = 86$ і масове число $A = 226 - 4 = 222$. Отже, у результаті утворюється радон ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$.

Загальне *рівняння α -розпаду* записують у вигляді ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$.

Якщо механізм α -розпаду дістав просте й природне пояснення, то механізм β -розпаду довгий час залишався нерозгаданим. Дійсно, звідки при β -розпаді з'являються електрони, адже їх немає у складі ядра?

Зрозуміло, що β -частинка не є електроном оболонки атома, тому що видалення електрона з оболонки є йонізацією атома, у результаті якої не відбувається зміни хімічної природи атома. Таким чином, оскільки β -частинка не є складовою частиною ядра і не є електроном, вирваним з оболонки атома, можна припустити, що β -частинка «народжується» в результаті процесів, які відбуваються всередині ядра. Перевіримо цю гіпотезу.

У процесі β -розпаду масове число залишається незмінним, отже, залишається незмінною загальна кількість нуклонів у ядрі. При цьому змінюється (підвищується) на одиницю заряд ядра, тобто кількість протонів збільшується на одиницю. Відповідно кількість нейтронів має зменшитись на одиницю (оскільки масове число A залишається незмінним). Отже, β -розпад можна пояснити як перетворення одного з нейтронів на протон з випусканням β -частинки. Дійсно, самодовільний процес перетворення протона в нейтрон має супроводжуватись виділенням енергії (якби цього не було, то такий процес не міг би відбутися самодовільно, ядру потрібне було б надходження енергії ззовні).

Згідно із законом взаємозв'язку маси-енергії, виділена енергія має відповідати масі електрона. Проте було встановлено, що енергії, які виділялись під час β -розпаду, мають значення від 0 до деякого максимального значення E_m . Неперервний характер спектрів β -випромінювання виявився несподіваним, адже це начебто означало невиконання закону збереження енергії. Як показали детальніші дослідження, закон збереження імпульсу та моменту імпульсу також не виконувалися при β -розпаді. Для подолання цих труднощів швейцарський фізик Вольфганг Паулі в 1930 р. запропонував гіпотезу, згідно з якою при β -розпаді з ядра вилітає ще одна частинка, яка не має електричного заряду й маса якої надзвичайно мала. Гіпотетична частинка могла б мати відповідну енергію, імпульс, що й забезпечило б виконання законів збереження. Експериментально виявити цю частинку вдалось лише в 50-х роках ХХ ст.

Згодом були відкриті й інші процеси перетворення частинок і виявлені нові частинки (та їх античастинки), що зумовило появу нового напрямку у фізиці — *фізики елементарних частинок*. Більш детально про це — в наступних параграфах.

Щодо процесів β -розпаду, то встановлено їх два види: β^+ - та β^- -розпади. При β^- -розпаді один з нейтронів усередині ядра перетворюється на протон, електрон і *антинейтрино*: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$. Електрон і антинейтрино вилітають з ядра, а нуклони, які залишились, утворюють нове ядро.

Таким чином, загальне *рівняння β -розпаду* (природного) записують у вигляді: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$.

При β^+ -розпаді протон перетворюється на нейтрон і одночасно випускаються *позитрон і нейтрино*: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}^0_{+1}e + \nu$. Це перетворення відбувається

з поглинанням енергії, оскільки маса протона менша від маси нейтрона, і самодовільно відбуватись не може.

Що ж до γ -випромінювання, то воно зазвичай виникає услід за α - і β -розпадами, оскільки атомне ядро в результаті розпадів перебуває у збудженому стані, і, переходячи на нижчий енергетичний рівень (у нормальний стан), випромінює γ -квант.

Закон радіоактивного розпаду. Макроскопічний зразок радіоактивного ізотопу містить величезну кількість радіоактивних ядер. Ці ядра розпадаються не одночасно, а протягом деякого часу. Процес розпаду має випадковий характер: ми не можемо точно передбачити, коли розпадеться певне ядро. Проте, використовуючи теорію ймовірності, ми можемо визначити, скільки ядер розпадеться протягом деякого часу. Іншими словами, кількість розпадів ΔN (або ядер, які розпались), що відбуваються протягом малого інтервалу часу Δt , є пропорційною цьому інтервалу Δt та повній кількості ядер N : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$.

Коефіцієнт пропорційності λ називають *сталю розпаду*. Для кожного ізотопу стала розпаду має своє значення. Що більша λ , то більшою є швидкість розпаду (активність ізотопу). Знак «мінус» указує на те, що кількість радіоактивних ядер зменшується.

Для $\Delta t \rightarrow 0$ ΔN буде дуже малою величиною порівняно з N , і отримане рівняння можна записати в диференціальній формі: $dN = -\lambda N dt$ або $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$.

Після інтегрування $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$, де N_0 — початкова кількість ядер при $t = 0$, N — кількість ядер, що не розпалась на момент часу t , отримуємо $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ або $N = N_0 e^{-\lambda t}$. Отриманий вираз і є *законом радіоактивного розпаду*.

Закон радіоактивного розпаду описує розпад великої кількості ядер будь-якого радіоактивного ізотопу: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, λ — стала радіоактивного розпаду — характеризує частку радіоактивних ядер, які розпадаються за час t .

Закон справджується в середньому для великої кількості ядер. Якщо атомів мало, то говорити про певний закон радіоактивного розпаду не можна. Закон радіоактивного розпаду є ще одним прикладом статистичного закону, оскільки він установлює, яка в середньому кількість атомів розпадеться за даний інтервал часу. Але завжди бувають неминучі відхилення від середнього значення, і що менше атомів у досліджуваному зразку, то більші ці відхилення.

Швидкість розпаду (або загальна кількість розпадів за одиницю часу) називають *активністю ізотопу*:

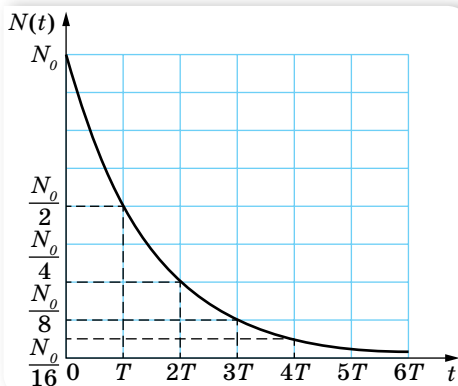
$$A = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Одиниця активності — бекерель, 1 Бк.

1 Бк дорівнює активності джерела, з якою за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця — кюрі, $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Як видно, активність A ізотопу зменшується з часом за експонентою з такою ж швидкістю, як і кількість ядер, що не розпалась, N (мал. 201).

Період піврозпаду. Швидкість розпаду характеризують також *періодом піврозпаду* T .



Мал. 201. Графічне відображення закону радіоактивного розпаду

Період піврозпаду T — інтервал часу, за який розпадається половина радіоактивних ядер.

Періоди піврозпаду для різних ізотопів достатньо сильно різняться, наприклад, у $^{11}_6\text{C}$ він становить 20 хв, у $^{14}_6\text{C}$ — 5600 років.

Закон радіоактивного розпаду, записаний через період піврозпаду, має вигляд $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$, де N — кількість атомних ядер, що не розпались на даний момент часу t , N_0 — початкова кількість ядер. Не важко побачити, що період піврозпаду обернено пропорційний сталій розпаду. Що більшим є період піврозпаду, то менша стала розпаду. Точний зв'язок сталої розпаду з періодом піврозпаду має вигляд: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$.

Отримання й застосування радіонуклідів. Радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів (як природні, так і отримані у процесі штучної радіоактивності) мають свої галузі застосування. Основою їх практичного використання є такі їхні властивості:

- будь-який радіоактивний ізотоп є «міченим» атомом відповідного елемента, тобто атомом, поведінку якого можна спостерігати за його радіоактивним випромінюванням;
- будь-яке радіоактивне випромінювання має певну проникну здатність, тобто властивість поширюватись і поглинатись у даному середовищі певним чином;
- радіоактивні випромінювання йонізують речовину;
- під дією нейтронів та інших випромінювань великої енергії в речовині утворюється наведена радіоактивність.

Відповідно до цих властивостей виділяють і основні методи їх використання. Наприклад, використовуючи «мічений» атом, можна дізнатися про швидкість обміну речовин у тканинах живого організму, про швидкість руху крові в судинах або нафтопродуктів трубопроводами тощо.

У медицині за допомогою мічених атомів проводять діагностику деяких захворювань, вивчають вміст тих чи тих речовин у різних тканинах й органах людини, обмін речовин в організмі тощо. Йонізуюча здатність радіоактивних випромінювань використовується для руйнування злоякісних пухлин, стерилізації фармацевтичних препаратів та харчових продуктів.

Наведена радіоактивність (зокрема, опромінення нейтронами) використовується для дослідження вмісту речовини. Деякі з атомів стабільних ізотопів досліджуваної речовини, захопивши нейтрони, перетворюються на радіоактивні ізотопи. За характером наведеного радіоактивного випромінювання можна зробити висновки про наявність у речовині тих чи тих домішок. Особливістю методу є те, що він дає змогу виявити домішки в дуже малих концентраціях. Цей метод використовують для встановлення віку археологічних об'єктів (за вмістом у них радіоактивного ізотопу Карбону-14).



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. Що є причиною радіоактивного випромінювання? Яка природа α -, β -, γ -випромінювання? **2.** Альфа-частинку поглинула речовина. Куди поділась α -частинка? **3.** Чому під час радіоактивного розпаду з ядра атома вилітає саме α -частинка, а не окремо один або два протони чи нейтрони? **4.** Чому виникає γ -квант у ядрі атома в процесі його радіоактивного розпаду? **5.** Який закон електродинаміки постулює той факт, що в разі перетворення нейтрона на протон виникає саме електрон, що випромінюється з ядра як β -частинка? **6.** Чим характеризується швидкість розпаду радіоактивного ізотопу?



Приклади розв'язування задач

Задача. Деяка маса радіоактивного Радію містить $25 \cdot 10^6$ атомів. Скільки атомів розпадеться за добу, якщо період піврозпаду Радію — 1602 роки?

Дано:

$$N_0 = 25 \cdot 10^6$$

$$t = 1 \text{ доба}$$

$$T = 1602 \text{ роки}$$

$$\Delta N = ?$$

Розв'язання:

Оскільки час t малий порівняно з періодом піврозпаду, то можна скористатись наближеною формулою для визначення кількості ядер, що розпались:

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t.$$

$$\Delta N = \frac{0,693 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1 \text{ доба}}{1602 \cdot 365 \text{ дб}} \approx 30.$$

Відповідь: $\Delta N = 30$.



Вправа 35

1. Яка частка радіоактивних ядер деякого елемента розпадається за час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?

2. За який час розпадеться 80 % атомів радіоактивного ізотопу Хрому $^{51}_{24}\text{Cr}$, якщо період його піврозпаду — 27,8 доби?
3. Було встановлено, що в радіоактивному препараті відбувається $6,4 \cdot 10^8$ розпадів ядер за хвилину. Визначте активність цього препарату в беккерелях $\left(1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{розп}}{\text{хв}}\right)$.
4. За який час у препараті з постійною активністю 8,2 МБк розпадеться $25 \cdot 10^8$ ядер?
5. Визначте період піврозпаду Радону, якщо за 1 добу з мільйона атомів розпадається 175 000 атомів.
6. Радіоактивний Натрій-24 розпадається, викидаючи β -частинки. Період піврозпаду Натрію — 14,8 год. Обчисліть кількість атомів, що розпадається в 1 мг даного радіоактивного зразка за 10 год.
7. Маємо урановий препарат з активністю 20,7 МБк. Визначте в препараті масу ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$ з періодом піврозпаду $7,1 \cdot 10^8$ років.
8. Під час археологічних розкопок знайдено шматок деревини, у якій вміст радіоактивних ядер ізотопу Карбону C^{14} на 1,5 % менший, ніж у свіжозрубаній деревині. Період піврозпаду ізотопу Карбону становить 5579 років. Установіть, скільки років тому було зрубано знайдено деревину.
9. Зразок, що містить 1 мг Полонію-210, вміщено в калориметр із теплоємністю $8 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. У результаті α -розпаду полоній перетворюється на Плюмбум-206. На скільки підніметься температура в калориметрі за 1 год? Період піврозпаду Полонію — 138 дб. Вважайте, що α -частинки не вилітають за межі калориметра.

§ 48

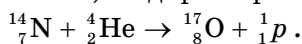
Ядерні реакції

Ядерні реакції. Вивчення природної радіоактивності показало, що перетворення одного хімічного елемента на інший зумовлене внутрішньо-ядерними процесами, тобто змінами, які відбуваються всередині атомних ядер. У зв'язку з цим було здійснено спроби штучного перетворення одних хімічних елементів на інші завдяки впливу на атомні ядра. Виняткова стабільність ядер нерадіоактивних елементів свідчить про те, що їх зміна може статись лише під час надзвичайно великого енергетичного зовнішнього впливу. Ефективним засобом такого впливу виявилось бомбардування атомних ядер частинками високої енергії. Спочатку для бомбардування використовували α -частинки радіоактивного випромінювання. Пізніше почали використовувати й інші заряджені частинки, попередньо надавши їм великої швидкості (кінетичної енергії) у спеціальних прискорювачах. Процес перетворення атомних ядер називають ядерною реакцією.

Ядерні реакції — процес перетворення атомних ядер унаслідок їх взаємодії з елементарними частинками або з іншими ядрами.

Як видно з визначення, ядерні реакції зумовлюються зовнішніми чинниками. Частинки високої енергії (α , β , n , p), зіткнувшись із ядром, можуть спричинити різноманітні перетворення.

У 1919 р. Ернест Резерфорд здійснив першу ядерну реакцію, бомбардуючи азотну мішень α -частинками, і відкрив протон (p):



Відкриття Резерфорда привело до створення нової галузі наукових досліджень — штучного перетворення хімічних елементів, яка й сьогодні має важливе наукове та практичне значення. У 1932 р. вперше було застосовано штучно отримані прискорені протони для розщеплення ядра Літію: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1p \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$. Цього ж року Джеймс Чедвік відкрив нейтрон (n): ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0n$, а Фредерік Жоліо-Кюрі, здійснивши реакцію ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0n$, уперше отримав штучний радіоактивний ізотоп фосфору ${}^{30}_{15}\text{P}$, який є джерелом позитронів. Так було відкрито позитрон ${}^+_0e$.

Енріко Фермі показав, що нейтрони є більш придатними для ініціювання ядерних реакцій, оскільки вони не мають електричного заряду й не відштовхуються ядром, як протони чи α -частинки (котрі мають долати «кулонівський бар'єр»). У 1938 р. Отто Хан, Фрідріх Штрассман і Ліза Майтнер здійснили поділ ядра Урану-235 нейтронами: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{145}_{56}\text{Ba} + {}^{88}_{36}\text{Kr} + 3{}^1_0n$ (один із можливих варіантів поділу). Це відкриття було не лише значним науковим досягненням — воно стало доленосним для всього світу. Саме реакція поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$ лежить в основі дії й атомної електростанції, й атомної бомби.

Залежно від виду частинок, якими бомбардується ядро хімічного елемента, від енергії цих частинок, а також від виду бомбардованих ядер можуть відбуватись різні ядерні реакції. Розрізняють такі типи ядерних реакцій.

- 1. Реакція захоплення.** Ядро поглинає бомбардуючу частинку й перетворюється на нове, масивніше ядро. Прикладом може бути реакція ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1p \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$, у якій протон поглинається ядром Бору й виникає ядро Карбону. Зазвичай у реакціях такого типу нове ядро утворюється в збудженому стані та, випромінивши один або кілька γ -квантів, переходить у нормальний (основний) стан.
- 2. Поглинання** ядром бомбардуючої частинки та **випускання** новоутвореним ядром однієї або кількох частинок. Прикладом такої реакції може бути реакція ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n$. Тут Дейтрон поглинається ядром Берилію, а проміжне ядро, що утворилось, випромінює нейтрон і перетворюється на ядро атома Бору.
- 3. Поділ ядра.** Під дією бомбардування ядер частинками великих енергій можливе розщеплення ядра на кілька частин. Так, наприклад, ядро атома Бору внаслідок бомбардування протонами достатньо великої енергії може розпастись на три α -частинки. Ця реакція відбувається у два етапи. Спочатку вилітає одна α -частинка ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1p \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$, але ядро Берилію виявляється сильнозбудженим і розпадається ще на дві α -частинки: ${}^8_4\text{Be} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

Якщо частинка високої енергії влучає в ядро масивного елемента, останнє може розпастись на велику кількість частинок або на уламки приблизно однакової маси.

4. **Реакція синтезу.** Це реакція злиття (синтезу) легких атомних ядер у більш важке. Синтез можливий лише за дуже високих температур — порядку 10^8 К і вищих (тому їх ще називають *термоядерними реакціями*). Наприклад, синтез Гелію з Дейтерію і Тритію, ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Термоядерні реакції відіграють вирішальну роль в еволюції Всесвіту, зокрема шляхом термоядерних реакцій сформувались хімічні елементи. Енергія випромінювання зір — це енергія термоядерних реакцій, що відбуваються в їхніх надрах. Для Сонця основною реакцією є перетворення чотирьох протонів на ядро атома Гелію, що супроводжується виділенням енергії понад 26 МеВ за один цикл.

У земних умовах отримати температуру, за якої можлива термоядерна реакція, можна, лише застосувавши ядерний вибух (на цьому ґрунтується принцип дії водневої бомби) або потужний імпульс лазерного випромінювання (керована термоядерна реакція синтезу).

Енергетичний вихід ядерної реакції. Під час ядерних реакцій обов'язково виконуються закони збереження (електричного заряду, енергії, імпульсу та моменту імпульсу, кількості нуклонів). На основі закону збереження і перетворення енергії можна розрахувати енергетичний вихід ядерної реакції.

Енергетичний вихід ядерної реакції $E_{\text{вих}}$ — це енергія, яка виділяється як продукт реакції (або затрачається для здійснення реакції). Вона дорівнює різниці енергій спокою всіх ядер і частинок до та після реакції.

$E_{\text{вих}} = \Delta mc^2$, де Δm — *дефект маси*, який можна розрахувати як різницю між сумою мас спокою ядер і частинок до та після ядерної реакції. Якщо сумарна маса продуктів реакції менша від суми мас вихідних ядер, то реакція супроводжується виділенням енергії — у вигляді кінетичної енергії утворених частинок. Якщо ж сумарна маса продуктів реакції більша за сумарну масу вихідних ядер, то така реакція для свого перебігу потребує енергетичної підтримки.

Ядерна енергетика. Пошук способів перетворення й використання енергії є не просто проблемою дослідження науковців. Енергонезалежність, енергетична безпека є однією з найважливіших проблем внутрішньої та зовнішньої політики держав. Розвиток людського суспільства нерозривно пов'язаний з використанням природних ресурсів нашої планети, зі споживанням різних видів енергії у дедалі більших масштабах. Усі здобутки сучасної цивілізації можливі завдяки тій величезній кількості штучної енергії, яку виробляє людство. Виробництво теплової та електричної енергії ґрунтується на процесі спалювання копалин-

енергоресурсів — вугілля, нафти, газу. Завдяки науковим дослідженням людина дістала у своє розпорядження величезну силу, нове могутнє джерело енергії, закладене в ядрах атомів, — ядерну енергію. В історії людства не було наукової події, більш визначної за своїми наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану.

Для України атомна (ядерна) енергетика є стратегічно важливим елементом енергозабезпечення. Сьогоднішній і прогнозований внесок її становить близько 55 % електроенергії, що виробляється в країні. За кількістю ядерних реакторів Україна посідає дев'яте місце у світі та третє в Європі. В Україні діють 4 атомні електростанції з 15 енергоблоками, одна з яких — Запорізька АЕС, яка із 6 енергоблоками загальною потужністю в 6000 МВт, є найпотужнішою в Європі.

Детальніше про принцип дії ядерних реакторів, проблеми та перспективи використання ядерної енергетики читайте в електронному додатку.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Чим ядерна реакція відрізняється від хімічної? Які бувають типи ядерних реакцій? У чому полягає основна відмінність ядерних реакцій на нейтронах? **2.** Як обчислюється енергетичний вихід ядерної реакції?



Приклади розв'язування задач

Задача 1. Обчисліть енергетичний вихід ядерної реакції ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$. Для наближених обчислень можна використати відносні атомні маси елементів (див. табл. на форзацах)

Дано:

$$m_{\text{оN}} = 14,00307 \text{ а. о. м}$$

$$m_{\text{оHe}} = 4,00260 \text{ а. о. м}$$

$$m_{\text{оO}} = 16,99991 \text{ а. о. м}$$

$$m_{\text{оH}} = 1,00783 \text{ а. о. м}$$

$$E_{\text{вих}} = ?$$

Розв'язання:

Енергетичний вихід ядерної реакції

$$E_{\text{вих}} = \Delta m c^2 \text{ (у Дж) або } \Delta E = \Delta m_{\text{а.о.м.}} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}} \text{ (у МеВ).}$$

$$\Delta m = m_{\text{оN}} + m_{\text{оHe}} - m_{\text{оO}} - m_{\text{оH}}.$$

Після підстановки даних отримуємо: $\Delta m = -0,0014 \text{ а.о.м.}$

$$\Delta E = -0,0014 \text{ а.о.м.} \cdot 931 \frac{\text{МеВ}}{\text{а.о.м.}} = -1,303 \text{ МеВ.}$$

Знак мінус указує на те, що енергія в даній реакції поглинається.

Відповідь: $-1,303 \text{ МеВ.}$

Задача 2. Потужність атомної установки підводного човна дорівнює 14,7 МВт. Ядерним паливом є збагачений уран ${}^{235}_{92}\text{U}$. Визначте запас пального, необхідний для плавання човна протягом 30 діб, якщо за поділу одного ядра урану виділяється 200 МеВ енергії.

Дано:

$$P = 14,7 \text{ МВт} = 1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт};$$

$$t = 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб};$$

$$E_0 = 200 \text{ МеВ} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж};$$

$$\mu = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

 $m = ?$ **Розв'язання:**

Спожита потужність за місяць становить: $P = \frac{E}{t}$, де E — енергія, що виділяється за поділу всіх N ядер урану, що містяться в пальному масою m .

$$N = \frac{m}{\mu} N_a, \text{ де } \mu \text{ — молярна маса урану.}$$

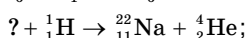
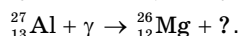
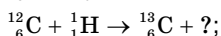
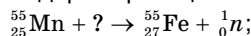
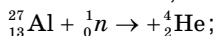
Оскільки за поділу одного ядра виділяється енергія E_0 , то за поділу всіх ядер: $E = NE_0$.

$$\text{Таким чином, } P = \frac{E_0 m N_a}{\mu t}. \text{ Звідси } m = \frac{P \mu t}{E_0 N_a}.$$

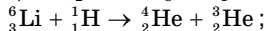
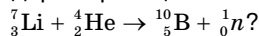
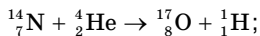
$$m = \frac{1,47 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 24 \text{ год} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 30 \text{ діб}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 0,495 \text{ кг}.$$

Відповідь: 0,495 кг.**Вправа 36**

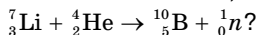
1. Допишіть позначення, яких бракує в рівняннях таких ядерних реакцій:



2. Виділяється чи поглинається енергія під час таких ядерних реакцій:



3. Яку мінімальну енергію повинна мати α -частинка, щоб відбулася ядерна реакція:



4. Кінетична енергія α -частинки після лобового пружного зіткнення зменшилась на 64 %. З ядром якого атома могло відбутися зіткнення?

5. Протон з кінетичною енергією 5 МеВ налітає на ядро ${}_{3}^7\text{Li}$, що перебуває у спокої. У результаті реакції вилітають дві α -частинки з однаковими енергіями. Визначте кут між напрямками руху α -частинок.

6. Визначте мінімальну енергію та частоту гамма-кванта, здатного «розбити» ядро Дейтерію на протон і нейтрон.

§ 49**Елементарні частинки**

Поняття елементарної частинки. Ще 1949 р. Луї де Бройль (1892–1987, Франція) запропонував створити міжнародну організацію для здійснення наукових досліджень мікросвіту. У 1954 р. офіційно відкрито європейську організацію з ядерних досліджень (ЦЕРН) —



Мал. 202. Прискорювачі елементарних частинок

найбільшу у світі лабораторію фізики високих енергій. Сьогодні фізика елементарних частинок стала новою, великою і самостійною галуззю науки. Дослідження елементарних частинок у земних умовах здійснюється за допомогою прискорювачів частинок різних конструкцій: лінійних прискорювачів, циклотронів, синхрофазотронів, колайдерів (мал. 202) тощо. Проводять дослідження і природних потоків частинок — *космічного проміння*.

На початок 60-х років ХХ ст. кількість відкритих елементарних частинок стала настільки великою, що виникли сумніви, чи всі частинки, які називають елементарними, повністю відповідають цій назві.

Поняття елементарних частинок ґрунтується на факті дискретної будови речовини. Ряд елементарних частинок має складну внутрішню структуру, проте розділити їх на частини неможливо. Інші елементарні частинки є безструктурними й можуть вважатися первинними *фундаментальними частинками*.

Елементарна частинка — збірний термін, що належить до мікрооб'єктів у суб'ядерному масштабі.

Найхарактернішою особливістю елементарних частинок є їхня здатність до перетворень і взаємодії. Водночас дочірні частинки не є структурними складовими материнських, а народжуються в актах перетворення.

Отже, за сучасними уявленнями, елементарні частинки не просто «цеглинки» світобудови, це специфічні об'єкти мікросвіту. До того ж їм властивий особливий вид фундаментальної взаємодії — *слабка взаємодія*. За інтенсивністю слабка взаємодія в багато (приблизно в 10^{14}) разів менша від сильної і навіть електромагнітної взаємодії. Проте вона значно більша за гравітаційну взаємодію, оскільки маси елементарних частинок надто малі, а радіус їхньої взаємодії становить лише 10^{-18} м.

Типи фундаментальних взаємодій. Щоб зрозуміти механізм слабкаї взаємодії, пригадаймо інші відомі нам типи взаємодій і їхній характер.

Вивчаючи механіку, ми ознайомились із гравітаційною взаємодією (силами всесвітнього тяжіння) і деякими виявами електромагнітної взаємодії (силами пружності, тертя). В електродинаміці ми вивчили електромагнітну взаємодію, а в ядерній фізиці — сильну (ядерну).

Щоб зрозуміти характер слабкаї взаємодії, звернімося ще раз до електромагнітної. На самому початку вивчення електродинаміки ми з'ясували, що електричні сили діють на відстані. Посередником, що передає взаємодію, є поле. Можна стверджувати, що сила, з якою одна заряджена частинка діє на іншу, зумовлена електричним полем, що його створює перша частинка. Аналогічним способом магнітне поле є посередником магнітних сил.

Згодом ми з'ясували, що електромагнітні поля можуть поширюватись у вигляді хвиль у просторі, а також, що світлу властивий корпускулярно-

хвильовий дуалізм. Унаслідок чого і можна пояснити електромагнітну взаємодію між зарядженими частинками: 1) як *взаємодію через поле* і 2) як *обмін фотонами між частинками*.

На малюнку 203 зображено наочний приклад того, як у результаті обміну частинками відбувається взаємодія. На малюнку 203, а діти кидають одне в одного подушки. Спіймавши подушку, кожна дитина відкочується назад. Це ілюстрація сили відштовхування. Якщо діти намагаються вирвати подушки з рук одне одного (мал. 203, б), то кожний тягне партнера до себе. Це ілюстрація сили притягання.

Подібним чином може відбуватись електромагнітна взаємодія між зарядженими частинками: одна із заряджених частинок випромінює фотон і зазнає внаслідок цього віддачу. Інша частинка поглинає фотон. За такої взаємодії відбувається передача енергії та імпульсу від однієї частинки до іншої, і посередником при цьому є фотон.

У 1935 р. японський фізик Хідекі Юкава (1907–1981) висловив припущення, що подібним чином відбувається і сильна взаємодія між нуклонами в ядрі. Подальші дослідження показали, що посередником сильної взаємодії є глюони.

Таким чином, природно припустити, що мають існувати посередники слабкої та гравітаційної взаємодій. Пошук таких частинок тривав десятиліттями. У 1983 р. Карло Руббіа заявив про довгоочікуване відкриття *проміжних бозонів* — частинок, через які відбуваються слабкі взаємодії.

Пошук квантів гравітаційного поля — гравітонів поки що не дав результатів.

Властивості відомих на цей час основних типів взаємодій зведено в таблиці 9.

Таблиця 9

Тип взаємодії	Характер взаємодії	Радіус дії	Квант взаємодії
Сильна	Забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі	$r = 10^{-15}$ м	Мезон/глюон
Електромагнітна	Взаємодія між електрично зарядженими частинками	$r = \infty$	Фотон
Слабка	Взаємодія, яка виявляється в розпадах частинок, а також у дії нейтрино на речовину	$r = 10^{-15}$ м	Бозон
Гравітаційна	Універсальна взаємодія, властива всім без винятку частинкам, які мають масу (у мікросвіті суттєвої ролі не відіграє)	$r = \infty$	Гравітон (?)

Перед фізиками поставлено задачу створити теорію, яка б об'єднала всі типи взаємодій, пояснивши їх з єдиної точки зору. Ця ідея впливає

зі сприйняття навколишнього світу як єдиного цілого. Задача ця надзвичайно складна. Ейнштейн у свій час витратив багато років (40 останніх років свого життя), щоб об'єднати гравітаційну та електромагнітну взаємодії, проте це йому не вдалося.

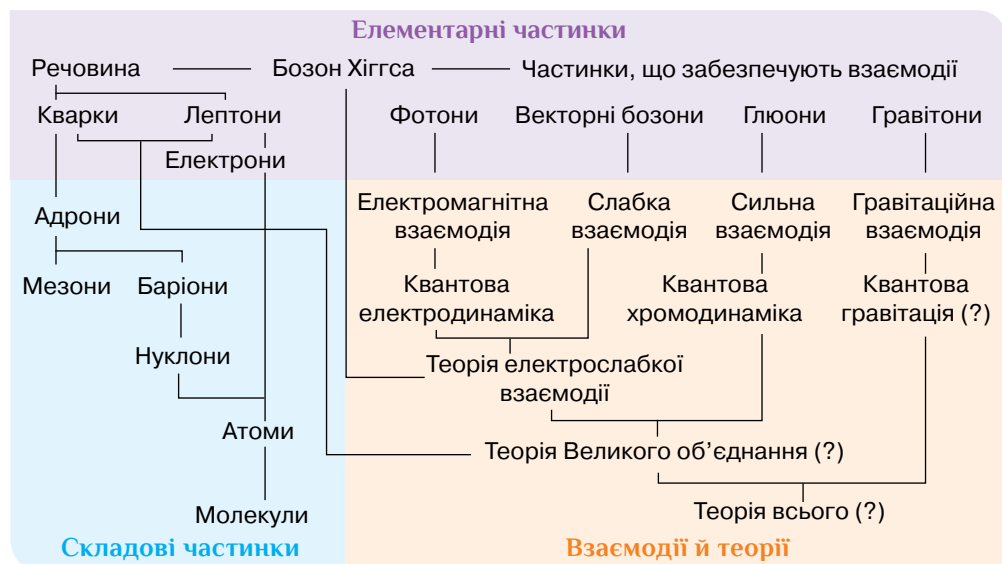
На початку 60-х років ХХ ст. американські фізики Стівен Вайнберг і Шелдон Глешоу та пакистанський фізик Абдус Салам запропонували так звану калібрувальну теорію, яка об'єднує слабку й електромагнітну взаємодії. У цій теорії слабка й електромагнітна взаємодії розглядаються як два різні вияви єдиної, більш фундаментальної взаємодії. У ній фотони — посередники електромагнітної взаємодії — розглядаються як векторні бозони. А проміжні бозони: W^+ -бозон, W^- -бозон та Z^0 -бозон (нестабільні частинки, час життя яких $3 \cdot 10^{-25}$ с) — є посередниками слабкої взаємодії.

Створення теорії електрослабкої взаємодії було відзначено присудженням Вайнбергу, Глешоу й Саламу Нобелівської премії з фізики 1979 р.

Класифікація частинок. За властивостями елементарні частинки поділяють на такі групи:

- 1) за масою. Легкі частинки — *лептони* (до них належить електрон), найважчі — *адрони* (до них належать протони та нейтрони), й особлива частинка — *фотон* — частинка без маси, яка здатна існувати лише в русі зі швидкістю світла;
- 2) за видом взаємодії. Для гравітаційної — *гравітони*¹, для електромагнітної взаємодії — *фотони*, сильну взаємодію зумовлено *глюонами*, слабку — *векторними бозонами*.

Більше про елементарні частинки ви дізнаєтеся, проаналізувавши малюнок 204.



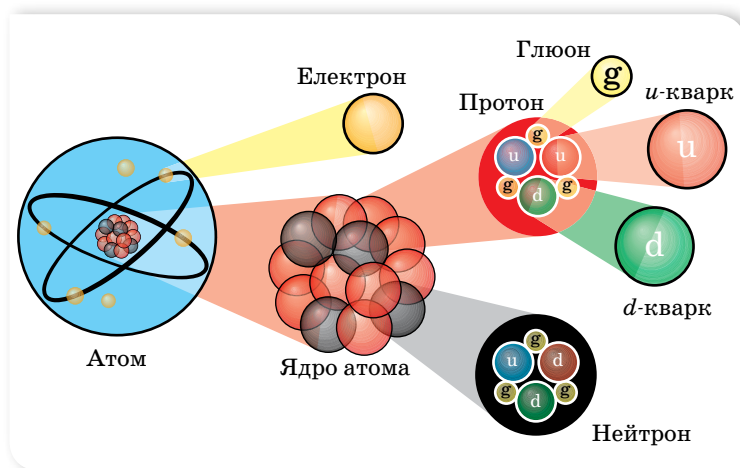
Мал. 204. Класифікація елементарних частинок

¹ Існування гравітонів поки не доведено експериментально через слабкість гравітаційної взаємодії, проте його вважають цілком імовірним.

Майже всі частинки, які можна безпосередньо спостерігати, належать до лептонів або адронів. Головна відмінність між ними в тому, що адрони беруть участь у сильній взаємодії, а лептони — ні. До того ж лептонів є лише 6, а адронів — понад сотню. Це дало підставу вважати, що адрони не є суто елементарними частинками й складатяться з фундаментальніших частинок — *кварків*.

Саме кварки та лептони є «будівельним матеріалом» для речовин. Завдяки взаємодії кварків існують ядра атомів. Формування електронних оболонок навколо ядра веде до утворення атомів (мал. 205).

Детальніше про способи реєстрації елементарних частинок читайте в електронного додатку.



Мал. 205. «Будівельний матеріал» речовин

Кожна частинка має античастинку (позначається тильдою над позначенням частинки). Маса, час існування і спіни частинки й античастинки однакові. Інші параметри, зокрема електричний заряд і магнітний момент, однакові за модулем, але протилежні за знаком. Прикладами частинок і античастинок є електрон і позитрон, протон і антипротон, нейтрон і антинейтрон, нейтрино і антинейтрино. Зіткнення частинки і античастинки приводить до їх взаємної анігіляції, внаслідок якої вони перетворюються на інші форми матерії.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Яку частинку називають елементарною? Назвіть стабільні елементарні частинки.
2. Який тип фундаментальної взаємодії характерний для елементарних частинок?
3. Що загального можна сказати про механізм усіх фундаментальних взаємодій?



Виконуємо навчальні проекти

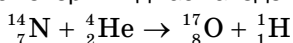
- ▶ Які питання ядерної енергетики вирішуються у нашій країні та світі?
- ▶ Альтернативні джерела енергії.
- ▶ Проблеми реєстрації нейтрино.
- ▶ Біологічна дія радіаційного випромінювання.



Перевірте себе (§ 40–49)



1. Укажіть, від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів і як саме.
 - А** від заряду електронів; обернено пропорційно
 - Б** від частоти світла; лінійно
 - В** від маси електронів; прямо пропорційно
 - Г** від швидкості фотонів; прямо пропорційно
2. Червона межа фотоефекту для срібла дорівнює 0,26 мкм. Визначте роботу виходу електронів зі срібла.
 - А** $4,65 \cdot 10^{-9}$ Дж
 - Б** $6,37 \cdot 10^{-19}$ Дж
 - В** $7,37 \cdot 10^{-19}$ Дж
 - Г** $7,65 \cdot 10^{-19}$ Дж
3. Укажіть правильне продовження твердження «Лінійчатий спектр випромінює речовина в...».
 - А** газоподібному молекулярному стані
 - Б** газоподібному атомарному стані
 - В** твердому стані
 - Г** будь-якому агрегатному стані
4. У результаті серії послідовних радіоактивних розпадів атом Урану ${}_{92}^{238}\text{U}$ перетворився на стабільний атом Плюмбуму ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Визначте кількість α -розпадів і β -розпадів.
 - А** 6 і 4
 - Б** 8 і 4
 - В** 8 і 6
 - Г** 6 і 2
5. Період піврозпаду ізотопу Цезію (${}_{55}^{137}\text{Cs}$) дорівнює 30 рокам. Визначте, скільки відсотків атомів цього ізотопу розпадеться за 150 років.
 - А** 82,2 %
 - Б** 87,5 %
 - В** 96,9 %
 - Г** 98,1 %
6. Поверхню літію опромінують світлом частотою 10^{15} Гц. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, якщо робота виходу електронів з літію — 2,4 еВ.
7. Атоми Гідрогену в основному стані поглинають фотони з довжиною хвилі 102,8 нм. Скільки різних спектральних ліній можна спостерігати за переходу атомів у незбудований стан?
8. На яку мінімальну відстань α -частинка наблизиться до нерухомого ядра атома Стануму, якщо її маса $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг, а швидкість руху — $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?
9. Скільки води можна нагріти від 20 °С до 100 °С за рахунок енергії, що виділяється при поділі 4,7 г урану-235? Вважайте, що під час кожного поділу ядра Урану виділяється енергія 200 МеВ.
10. Виділяється чи поглинається енергія під час наведеної ядерної реакції?



Розділ 4

АСТРОНОМІЯ

§ 50

Поняття зорі.

Найближча зоря — Сонце

Зоря як небесне тіло. Залежно від об'єму, маси, температури, віку та інших параметрів розрізняють різні типи зір. Попри велике їхнє розмаїття, загальні властивості в більшості з них однакові.

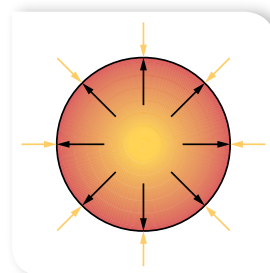
Зоря — це багатошарова розжарена плазмо-газова куля, утримувана в стані рівноваги силами власної гравітації та внутрішнім тиском, у надрах якої відбуваються (або колись відбувались) реакції термоядерного синтезу.

У надрах зір температура досягає значень 10–40 млн К, величезна густина, а тиск у мільярди разів більший за атмосферний тиск на Землі. За таких умов зоря може перебувати у стаціонарному стані лише завдяки тому, що в кожному її прошарку внутрішній тиск газу врівноважений дією сил гравітації. Такий стан називають *гідростатичною рівновагою* (мал. 206).

Для стаціонарного стану зорі властива не лише гідростатична (механічна) рівновага, а й теплова. Теплова рівновага означає, що всю енергію, яка утворюється в надрах зорі, вона випромінює своєю поверхнею в навколишній простір. Якщо тепловідведення перевищить продукування енергії, зоря почне стискатися, а отже, й розігріватися (пояснить, чому саме нагріватися, а не охолоджуватися). Це прискорить термоядерні реакції в надрах, виробіток енергії збільшиться, і тепловий баланс відновиться знову. У цьому сенсі зорі є стійкими системами, що саморегулюються.

Фізичні параметри Сонця. Вивчаючи Сонце — найближчу до нас, і тому найдоступнішу для дослідження, зорю, можна дізнатися багато чого про зорі загалом. Розглянемо фізичні параметри Сонця, порівнюючи їх із земними (табл. 10).

Зверніть увагу на середню густину Сонця — $1409 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Таке середнє значення обумовлено тим, що в зовнішніх шарах Сонця густина в мільйони разів менша, а в центрі — у 100 раз більша, ніж середня густина. Речовина Сонця дуже йонізована, тобто атоми втратили свої зовнішні



Мал. 206.
Гідростатична
рівновага зорі

електрони й разом з ними стали вільними частинками йонізованого газу — плазми.

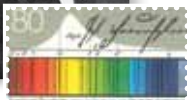
Таблиця 10

Маса M_{\odot}	$\approx 2 \cdot 10^{30}$ кг	$\approx 330\,000$ земних мас і в 750 разів перевищує масу всіх інших планет, разом узятих
Радіус (екваторіальний), R_{\odot}	700 000 км	≈ 109 земних радіусів
Середня густина, ρ_{\odot}	1409 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	0,255 густини Землі
Площа поверхні	$6,1 \cdot 10^{18}$ м ²	12 000 земних площ
Температура поверхні	≈ 6000 К	
Температура ядра	$\approx 15 \cdot 10^6$ К	
Світність, L_{\odot}	$3,85 \cdot 10^{26}$ Вт	

Хімічний склад Сонця визначено з аналізу його спектра. Перші ґрунтовні дослідження спектра Сонця здійснював у 1815 р. Йозеф фон Фраунгофер, який описав у спектрі Сонця понад 570 окремих темних ліній (мал. 207, а).



а



У 1857 р. німецькі фізики Густав Кірхгоф і Роберт Бунзен (мал. 207, б) порівняли довжини хвиль фраунгоферових ліній з досліджуваними в земних лабораторіях довжинами хвиль, що їх випромінюють (і поглинають) відомі хімічні елементи. Так було ототожнено близько десяти елементів. А справжнім тріумфом астрофізики стало відкриття нового хімічного елемента — Гелію.



б

Найбільшу частку зоряної речовини становлять два елементи: Гідроген (~ 73 % від маси й ~ 92 % від об'єму), Гелій (~ 25% від маси й ~ 7% від об'єму). Серед інших елементів, що виявлені на Сонці, такі — Ферум, Нікель, Оксиген, Нітроген, Силіцій, Сульфур, Магній, Карбон, Неон, Кальцій та Хром. Загалом у спектрі Сонця виявлено лінії 72 хімічних елементів, визначено їхню відносну кількість.

Світність Сонця визначає потужність його випромінювання, тобто кількість енергії, що випромінює поверхня Сонця в усіх напрямках за одиницю часу:

$$L_{\odot} = 4\pi R^2 \cdot q, \text{ де } q = 1,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \text{ — сонячна стала, що по-}$$

казує, яку енергію отримує 1 м² поверхні Землі за 1 с за умови, що Сонце розташоване в зеніті, R — відстань від Земля до Сонця. За підрахунками, світність Сонця — близько $3,85 \cdot 10^{26}$ Вт.

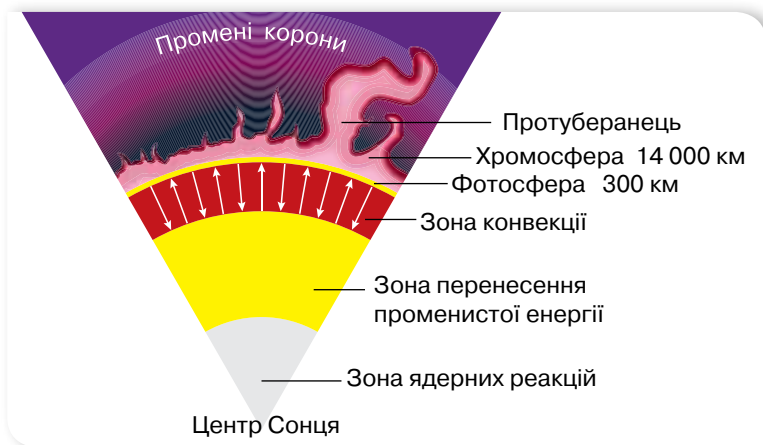
Сонце випромінює ультрафіолетові, видимі, інфрачервоні, рентгенівські та гамма-хвилі, які вже через 8 хв досягають орбіти Землі, віддаленої

від Сонця на $1,5 \cdot 10^8$ км. Хоча верхніх шарів атмосфери Землі дістається лише мала частка сонячної енергії, проте її достатньо, щоб десятки тисяч разів забезпечити наявну енергетичну потребу всієї земної кулі. Із Сонця весь час витікає плазма зі швидкістю $300\text{--}400 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ — сонячний вітер, який теж досягає Землі.

Як бачимо, наше світило випромінює просто колосальну кількість світлової і теплової енергії. І питання, на скільки вистачить цього «пального», турбувало вчених. За їхніми підрахунками, кожен секунду Сонце випромінює стільки енергії, що це в 100 000 разів більше за енергію, яку людство виробило протягом усієї своєї історії. Водночас маса Сонця щосекунди зменшується на 4,26 млн тонн! Цифри приголомшливі. Але якщо порівняти це значення із загальною масою Сонця, то все не так страшно, оскільки загальна маса Сонця — $2 \cdot 10^{30}$ кг, і цього має вистачити на мільярди років.

Як кожне тіло, що складається з газів, наша зоря обертається нерівномірно: швидше у близьких до екватора зонах (період обертання становить 25 діб), ніж у полярних (майже 34 доби). Швидкість обертання на екваторі — близько $7000 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

Будова Сонця. Залежно від температури та характеру процесів, що визначаються цією температурою, у будові Сонця умовно виділяють області з різним фізичним станом речовини та розподілом енергії (мал. 208).

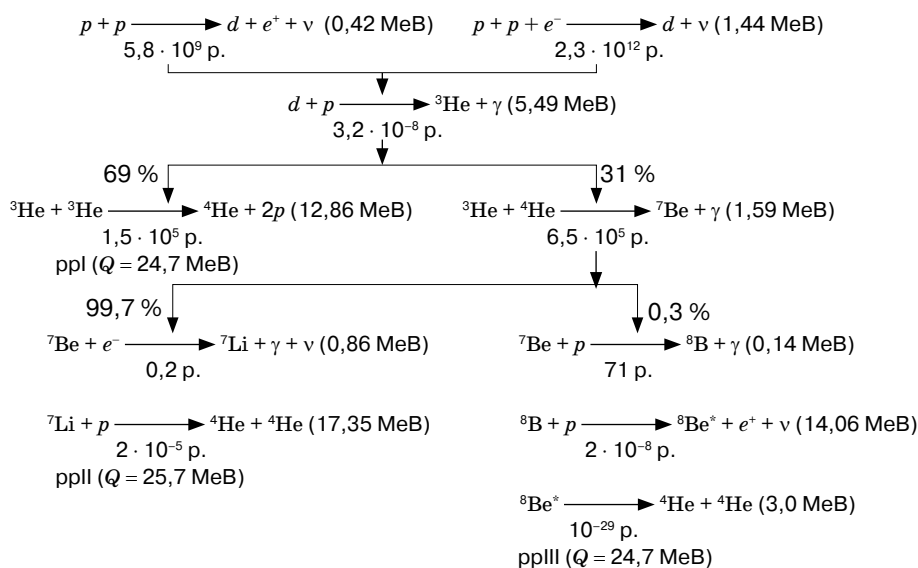


Мал. 208. Будова Сонця

У центрі світила міститься *ядро*, радіус якого становить 0,3 від радіуса Сонця і в якому відбуваються ланцюгові термоядерні реакції. На відстані до 0,7–0,8 радіуса Сонця ядро оточене *зоною променистого переносу* енергії і далі — *конвективною зоною*. Над конвективною зоною простягається зовнішня оболонка Сонця — *атмосфера*. Атмосфера, своєю чергою, поділяється на фотосферу, хромосферу та корону.

Хоча ядро Сонця безпосередньо спостерігати не можна, фізичні умови в ньому відомі досить точно. У центрі Сонця густина газу становить

близько $1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (у 13 разів більша, ніж у свинцю!), тиск — близько $2 \cdot 10^{18}$ Па, а температура — близько 15 000 000 К. За такої температури й тиску ядра атомів водню (протони) мають дуже великі швидкості (сотні кілометрів за секунду) і можуть стикатися одне з одним, незважаючи на дію електростатичної сили відштовхування. Деякі зіткнення завершуються ядерними реакціями, у результаті яких з водню утворюється гелій і виділяється велика кількість тепла. Нижче подано схему ланцюгової протон-протонної реакції.



Незважаючи на тривалість цих процесів, завдяки величезній кількості протонів, щосекунди на випромінювання перетворюється 4,26 млн тонн речовини ($3,6 \cdot 10^{38}$ протонів). (На Землі ланцюгові термоядерні реакції з виділенням великої енергії здійснювались протягом дуже короткого часу (10^{-7} – 10^{-6} секунди) під час вибухів водневих бомб.)

Ядро — єдине місце на Сонці, де енергія й тепло утворюються від термоядерної реакції, інша частина зорі нагріта цією енергією. Уся енергія ядра послідовно проходить крізь шари, аж до фотосфери, з якої випромінюється у вигляді сонячного світла. Без перешкод покидають Сонце нейтрино, бо мають дивовижну здатність: проникати крізь величезну товщу речовини й не вступити у взаємодію із жодним атомом.

У зоні *променистої рівноваги*, або *зоні радіації*, що оточує ядро на відстані від $\frac{1}{3}$ до $\frac{2}{3}$ радіуса Сонця, енергія поширюється шляхом послідовного поглинання і наступного перевипромінювання речовиною квантів електромагнітної енергії. При цьому замість одного поглинутого гамма-кванта великої енергії атоми, як правило, послідовно випромінюють кілька квантів з меншою енергією. Як наслідок, жорсткі γ -кванти дробляться на менш енергійні, і врешті-решт до фотосфери дістаються

кванти видимого і теплового випромінювання, які зрештою вивільняються назовні. Загалом процес передачі енергії від центральних областей до фотосфери дуже повільний і триває мільйони років.

У *конвективній* зоні енергія передається вже не випромінюванням, а за допомогою конвекції, тобто завдяки перемішуванню гігантських бурхливих областей газу, які трохи відрізняються одна від одної температурою та густиною.

Відразу за конвективною зоною починається *сонячна атмосфера*, що простягається далеко за межі видимого диска Сонця. Нижній шар атмосфери (фотосфера) містить тонкий прошарок газів, який ми сприймаємо як поверхню Сонця (мал. 209, а).

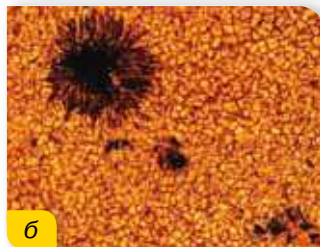
Температура фотосфери зменшується з висотою, і той її шар, випромінювання якого людське око сприймає як поверхню Сонця, має температуру близько 6000 К.

Розглядаючи фотографії Сонця, можна побачити гранули й плями на його поверхні (мал. 209, б). Дослідження показали, що гранули — це потоки гарячого газу, які підіймаються догори, тоді як у темних, дещо прохолодніших місцях, газ опускається донизу. Гранули свідчать про те, що під фотосферою в глибших шарах Сонця перенесення енергії до поверхні здійснюється завдяки конвекції. Сонячні *плями* — це темні утворення на Сонці, вони є областями виходу у фотосферу сильних магнітних полів. Супутниками плям є *факели* — місця, де на поверхню Сонця піднімається гарячіша речовина, ніж в інших ділянках фотосфери.

Над фотосферою простягається *хромосфера* (у перекладі з грец. — «забарвлена сфера»), шар розрідженого газу, який можна побачити під час повного сонячного затемнення у вигляді вузького жовто-червоного кільця. Товщина хромосфери становить 12–15 тис. км, а температура зростає від 4500 К на межі з фотосферою до 100 000 К у її верхніх шарах. Сонячна хромосфера дуже неоднорідна: у ній є довгасті, схожі на язички полум'я утворення — так звані *спікули*. Тому хромосфера нагадує траву, що горить (мал. 210, а). Через спікули відбувається обмін речовини хромосфери з *короною*, яка лежить вище.



а



б

Мал. 209.
Фотосфера (а),
гранули та сонячні
плями (б)



а



б

Мал. 210.
Хромосфера (а)
і корона (б) Сонця

Корона має сріблясто-білий колір і простягається на висоту в кілька сонячних радіусів, поступово переходячи в міжпланетний простір (мал. 210, б). Температура її на межі з хромосферою становить 100 000 К, а далі зростає до 2 000 000 К. Яскравість корони в мільйон разів менша, ніж яскравість фотосфери, і не перевищує яскравості Місяця вповні, а тому спостерігається лише під час повної фази сонячного затемнення або за допомогою спеціальних телескопів. Корона не має чітких обрисів, її неправильна форма змінюється з часом.

Будова корони неоднорідна: у ній можна спостерігати промені, дуги, окремі згущення речовини. Сонячна корона є джерелом безупинного потоку плазми, що рухається аж до околиць нашої планетної системи. Цей потік, який складається з великої кількості протонів, електронів, ядер гелію та інших хімічних елементів, називають *сонячним вітром*. Поблизу Землі швидкість сонячного вітру становить близько $400 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, а густина — 10 частинок на 1 см^3 , тобто в мільярд мільярдів разів менша від густини земної атмосфери.

Поширюючись далеко за орбіти планет-гігантів, сонячний вітер утворює велетенську *геліосферу*. Зону, де частинки через взаємодію з розрідженим міжзоряним газом втрачають свою кінетичну енергію і сонячний вітер припиняється, називають геліопаузою, і саме нею зазвичай позначають межу сфери впливу Сонця.

В атмосфері Сонця, крім плям і грануляції, часто можна спостерігати *факели* (ділянки з підвищеною температурою), *протуберанці* (пасма сонячної речовини), а також *спалахи* — доволі швидкі й енергетично дуже потужні явища. Усі ці утворення належать до проявів активності Сонця, що змінюється циклічно.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. «Боротьба» яких сил забезпечує тривале існування зорі? Що б відбулося, якби на Сонці раптово зникла сила тяжіння? 2. Про що свідчить наявність гранул у фотосфері Сонця? 3. Що зумовлює термоядерні реакції, які відбуваються в ядрі Сонця? 4. Назвіть відмінності в переносі енергії від ядра до поверхні Сонця в різних його шарах.

§ 51

Сонячна активність і її прояви на Землі

Поняття сонячної активності та її прояви в атмосфері Сонця. Час від часу в атмосфері Сонця виникають утворення, що контрастують із загальним виглядом його поверхні. Це — плями й факели у фотосфері, протуберанці в короні, а також найграндіозніші явища, що зароджуються в хромосфері, а потім охоплюють усі шари сонячної атмосфери — сонячні спалахи.

Плями, факели, протуберанці, сонячні спалахи називають *активними утвореннями* на Сонці (мал. 211), а їх появу й розвиток — проявами *сонячної активності*. Багаторічні спостереження Сонця показали, що впродовж кожних 11-ти років кількість проявів сонячної активності поступово збільшується, а потім поступово спадає. Цей період назвали *11-річним циклом сонячної активності*.

Поява цих утворень має спільну причину — різку зміну в деяких ділянках на поверхні Сонця напруженості магнітного поля.

Сонячні плями інколи мають такі розміри (40 000–50 000 км), що їх можна бачити неозброєним оком, але, звісно, через захисні фільтри. З'ясовано, що в сонячних плямах відбуваються направлені рухи речовини: темними волокнами півтіні газ витікає з плями назовні, тоді як світлими волокнами, навпаки, — з навколишньої фотосфери гаряча речовина тече в напрямку до плями. Найважливішою особливістю плям і причиною їх появи є наявність у них сильних магнітних полів. Магнітні силові трубки, що внаслідок конвективних рухів речовини формуються в підфотосферних шарах Сонця, час від часу спливають у фотосферу.

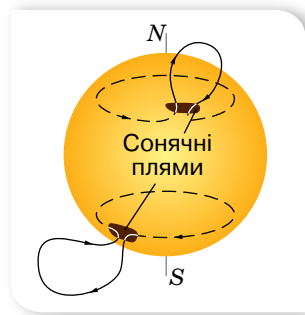
Потужне магнітне поле на деякий час гальмує винос гарячої речовини з глибших шарів, що й спричиняє охолодження цієї ділянки фотосфери. Існують сонячні плями від кількох днів до кількох місяців. Іноді на Сонці зовсім немає плям, а іноді їх буває кілька десятків водночас.

Якщо група плям перебуває поблизу краю сонячного диска, то зазвичай навколо неї видно безліч факелів — факельне поле. Очевидно, факели — це місця, де на поверхню Сонця піднімається гарячіша речовина, ніж в інших ділянках фотосфери. Майже завжди факели виникають трохи раніше плям та існують у середньому втричі довше.

На краю сонячного диска у спеціальний телескоп можна побачити протуберанці (від лат. «здуваюся») — гігантські вогняні струмені, що виникають у сонячній короні або проникають у неї із хромосфери.

Усі протуберанці поділяють на спокійні, що існують кілька тижнів або навіть місяців, і активні, що існують набагато менше часу. Спокійні протуберанці руйнуються повільно, й речовина, викинута в простір, поступово «тане» подібно до земних хмар. Активні протуберанці швидко піднімаються над сонячним диском і швидко осідають донизу.

Одними з найцікавіших і найпотужніших проявів сонячної активності є спалахи — нестационарні процеси, що охоплюють усі шари атмосфери Сонця. Найслабкіші спалахи тривають 5–10 хв, а найпотужніші вирують упродовж кількох годин.



Мал. 211. Активні утворення на Сонці

Найпотужніші сонячні спалахи навіть породжують сонячні космічні промені, серед яких, крім протонів та електронів, трапляються ядра хімічних елементів, присутніх в атмосфері Сонця. Частинки сонячних космічних променів рухаються в міжпланетному просторі з майже світловими швидкостями.

Вплив сонячної активності на Землю. Швейцарський астроном Йоганн Вольф запропонував для кількісної оцінки активності Сонця використовувати умовну величину, названу пізніше числом Вольфа, W :

$$W = 10g + f,$$

де g — кількість груп плям, при цьому за групу приймають також кожну окрему пляму; f — загальна кількість плям на видимій півкулі Сонця.

Під час хромосферного спалаху на Сонці відбувається викид у міжпланетний простір підсиленого потоку заряджених частинок, які вже через 10–12 год досягають орбіти Землі. Під тиском магнітного поля, створеного таким потоком, на денному боці Землі магнітосфера стискається ще більше, унаслідок чого напруженість геомагнітного поля збільшується. Потім магнітосфера розширюється, і напруженість геомагнітного поля зменшується. Так виникає одноразовий сплеск геомагнітного збурення, який триває близько години.

Якщо спалах на Сонці потужний і тривалий, то й підсилений потік частинок у сонячному вітрі довго не вичерпується. У магнітосферу надходить один імпульс за іншим, напруженість геомагнітного поля багато разів різко змінюється, і, замість одного короткого сплеску, відбувається їх серія. Таку швидку зміну напруженості магнітного поля Землі називають *магнітною бурєю*. Магнітні бурі можуть тривати від кількох годин до кількох діб. Найчастіше вони трапляються близько максимуму 11-річного циклу сонячної активності.

Уплив сонячної активності відчуває техносфера й біосфера планети, і часом це призводить до дуже негативних наслідків. Зазнають аварій космічні апарати; виходить з ладу електроніка авіалайнерів, що здійснюють польоти поблизу полюсів; перегорають електротрансформатори, що призводить до аварій у лініях електропередач; посилюється корозія металевих труб магістральних нафто- й газоводів тощо.

Потужні сонячні спалахи і спричинені магнітні бурі можуть змінювати циркуляцію земної тропосфери, а також впливати на поведінку живих організмів, зокрема людини. Медична статистика свідчить, що в дні, коли відбуваються сильні спалахи, у півтора-два рази збільшується кількість захворювань серцево-судинної системи (інфаркт міокарда, інсульт тощо) і кількість смертей із цієї причини. Відомо також про кореляцію між появою спалахів і зростанням кількості транспортних пригод.

Починаючи з 1900 р., збитки від різного роду катастроф, пов'язаних із сонячною активністю, оцінюють у трильйони доларів. Щоб завчасно передбачити вплив сонячної активності на біосферу та соціально-економічну систему Землі, необхідно проводити моделювання «космічної погоди», яке неможливе без моніторингу глобальних змін Сонця на тривалих відрізках часу. *Геліобіологія* — розділ біофізики, що вивчає вплив змін

активності Сонця на земні організми. основоположником геліобіології був російський фізик Олександр Леонідович Чижевський (його перша робота в цій галузі вийшла в 1915 р.), однак на зв'язок між коливаннями активності Сонця й багатьма виявами життєдіяльності в мешканців Землі вказував до нього шведський учений Сванте Арреніус та інші.

Феномен «космічної погоди» нині визнано одним з важливих завдань, що вимагає докладного вивчення.

ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Завдяки яким спостереженням встановили, що Сонце буває «спокійним» і «активним»? **2.** Що є причиною сонячної активності? **3.** Як сонячна активність впливає на біосферу? Наведіть приклади.



Експериментуємо

Спостереження за Сонцем онлайн:

<http://spacegid.com/izobrazheniya-solntsa-so-sputnika-soho.html>



Виконуємо навчальні проекти

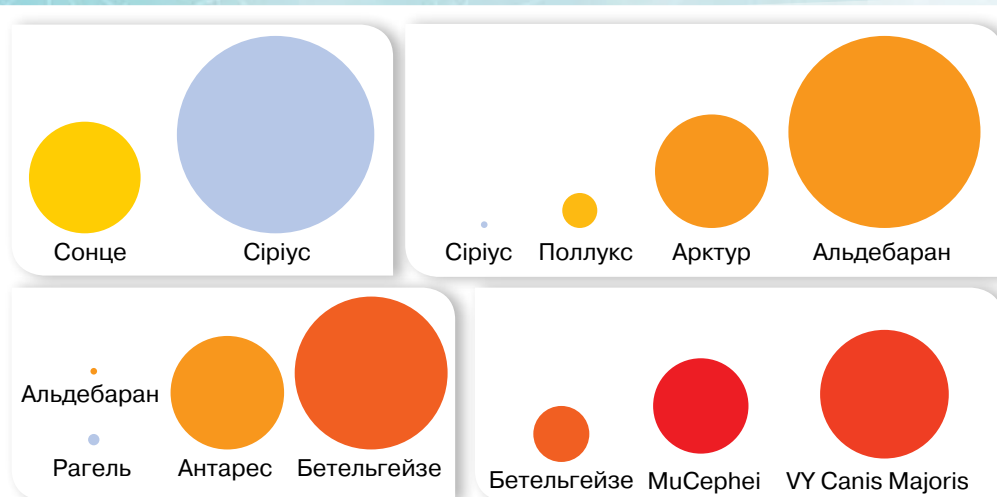
- ▶ Геліобіологія.
- ▶ Космічна погода.

§ 52

Зорі. Класифікація зір

Фізичні параметри зір. Різноманітність світу зір тривалий час залишалася прихованою від людського ока. Розвиток фізики й конструювання астрономічних приладів дали змогу усвідомити, наскільки всі зорі різні.

Основними фізичними параметрами зорі, які можуть бути тим чи тим способом визначені зі спостережень, є потужність її випромінювання (в астрономії світність), маса, радіус, температура та хімічний склад. Перелічені параметри змінюються в дуже широких межах. Для зручності параметри зір порівнюють з відповідними параметрами Сонця. Так, маси відомих зір лежать у межах від 0,01–0,03 до 60–70 сонячних мас. У своїх розмірах зорі демонструють ще більше розмаїття. За розмірами розрізняють: зорі-надгіганти (мають найбільший розмір), зорі-гіганти, зорі-карлики (Сонце — це зоря-карлик), нейтронні зорі (зовсім малі). На малюнку 212, с. 258 відображено розміри деяких зір у порівнянні.



Мал. 212. Розміри деяких зір у порівнянні

Якби зоря Бетельгейзе опинилася на місці Сонця, то зайняла б собою частину Сонячної системи аж до орбіти Марса.

Ще ширший діапазон значень світності зір. У порівнянні із Сонцем світність деяких яскравих зір має такі значення:

Сонце	1
Альтаір	10
Сіріус	23
Вега	54
Арктур	102
Капелла	150
Полярна	17 600
Бетельгейзе	25 000
Рігель	70 000

За кольором і температурою зорі поділяють на:

- ▶ блакитні (найбільш розжарені, з температурою більше 30 000 К);
- ▶ білі (з температурою 10 000 К);
- ▶ жовті (з температурою 6000 К, Сонце — жовта зоря);
- ▶ червоні (найхолодніші, з температурою близько 3000 К).

За розташуванням: поодинокі та кратні — зв'язані силами тяжіння (подвійні, потрійні тощо).

За часом свого розвитку: давні й молоді.

За фізичними властивостями речовини в надрах: нормальні зорі, білі карлики й нейтронні зорі.

Усі параметри зорі пов'язані між собою. Упродовж свого існування зоря змінює масу, розміри, світність, температуру. Простежити життя зорі від початку до кінця неможливо, проте можна спостерігати багато зір, що перебувають на певних стадіях розвитку, і за цими даними відновити еволюційний шлях кожної зорі.

Спектральна класифікація зір. Головним джерелом інформації про зорю є її випромінювання. За допомогою спектрального аналізу можна встановити якісний і кількісний хімічний склад світила, його температуру, наявність магнітного поля, швидкість руху та багато іншого. Сонце та інші зорі оточені газовими атмосферами. Неперервний спектр їхньої видимої поверхні перетинається темними лініями поглинання, які виникають, коли проміння проходить через атмосферу зір та атмосферу Землі. Виявилось, що за хімічним складом зорі практично однакові: 73 % становить Гідроген, 25 % — Гелій, 2 % — інші елементи.

Відомо, що максимум потоку випромінювання від зорі локалізується в певному діапазоні довжин хвиль, який залежить від ефективної температури (пригадайте про особливості випромінювання абсолютно чорного тіла, § 40, та закон Віна, § 45).

Ефективна температура, T_{eff} — це температура абсолютно чорного тіла, яке створює потік випромінювання на різних довжинах хвиль такої самій потужності, що й реальне тіло.

Для зорі з певними світністю L (яка пов'язана з потоком випромінювання) та радіусом R ефективна температура визначається із закону Стефана — Больцмана й дорівнює:

$$T_{\text{eff}} = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2} \right)^{\frac{1}{4}},$$

де $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ — стала Стефана — Больцмана.

Загалом закон Стефана — Больцмана встановлює залежність енергії випромінювання з одиниці площі поверхні за одиницю часу від ефективної температури тіла, що випромінює: $E = \sigma T_{\text{eff}}^2$. Або енергія, яка випромінюється за час t абсолютно чорним тілом з поверхні S за температури T , дорівнює:

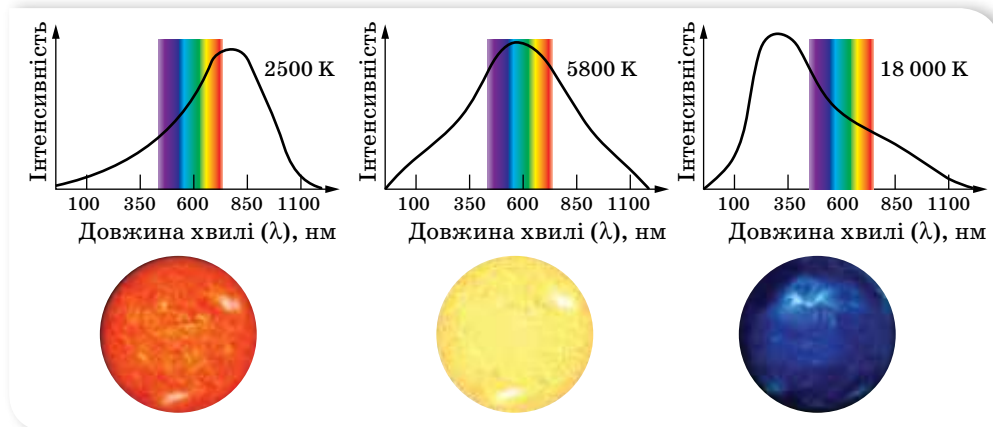
$$E = \sigma T^4 S t = 4\pi R^2 \sigma T^4 t.$$

Порівнюючи енергію випромінювання Сонця й зорі, можна визначити її радіус. Виведіть самостійно цю формулу: $\frac{R}{R_{\odot}} = (L)^{0,5} \frac{T_{\odot}^2}{T^2}$, де L — світність зорі в одиницях світності Сонця.

Отже, зорі мають різну ефективну температуру й різний візуальний колір (мал. 213, с. 260): від яскраво-блакитного (гарячі зорі з $T_{\text{eff}} = 60\,000\text{--}50\,000$ К) до темно-червоного (холодні зорі з $T_{\text{eff}} = 3000\text{--}1000$ К). Є окремий клас зір — коричневі карлики, які випромінюють енергію тільки в інфрачервоній частині спектра.

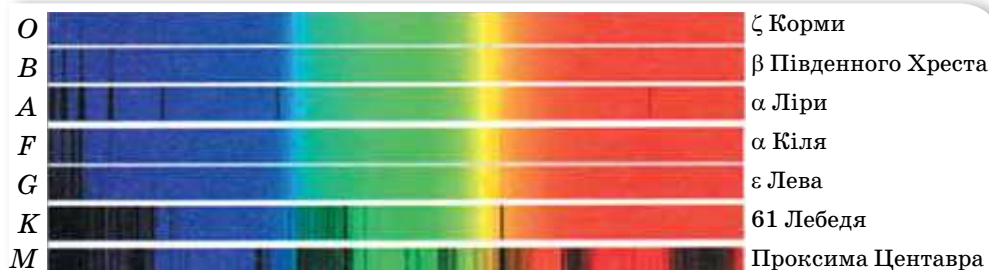
Застосовуючи спектрограф, потік випромінювання від зорі розкладають у спектр і вимірюють за допомогою ПЗЗ матриці. Спектри зір, так само як і спектр Сонця, — це спектри поглинання, де на тлі неперервного спектра є багато темних ліній. З аналізу цих спектральних ліній можна отримати дані щодо вмісту атомів та йонів хімічних елементів, ефек-

тивної температури, поверхневої гравітації (а отже, й маси) тощо. Тому наявність або відсутність певних спектральних ліній одразу дає інформацію щодо приблизної ефективної температури, що покладено в основу спектральної класифікації.



Мал. 213. Інтенсивність випромінювання зір з різною температурою

Спектри було розміщено в ряд, у якому два сусідні спектри мало різнилися між собою, але на кінцях ряду вони були разюче несхожими (мал. 214). Потім цей ряд було поділено на сім окремих класів і кожний з них позначено літерою в такій послідовності: *O—B—A—F—G—K—M* (англійське прислів'я: «Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me» — «О, будь гарною дівчиною, поцілуй мене»).



Мал. 214. Поділ спектрів на класи

Такий поділ спектрів на класи з невеликими змінами й доповненнями використовують дотепер і називають його *гарвардською класифікацією* зоряних спектрів.

Гарвардська спектральна класифікація (табл. 11) є одновимірною і ґрунтується лише на ефективній температурі зір, яка може набувати значень від 2000 К до 40 000 К. Тому кожний спектральний клас указує на зорі з відповідною ефективною температурою, а отже, й певним кольором.

Таблиця 11

Клас	Температура, К	Дійсний колір	Видимий колір
<i>O</i>	30 000–60 000	блакитний	блакитний
<i>B</i>	10 000–30 000	біло-блакитний	біло-блакитний і білий
<i>A</i>	7500–10 000	білий	білий
<i>F</i>	6000–7500	жовто-білий	білий
<i>G</i>	5000–6000	жовтий	жовтий
<i>K</i>	3500–5000	помаранчевий	жовто-помаранчевий
<i>M</i>	2000–3500	червоний	помаранчево-червоний

Кожний спектральний клас поділяють на 10 підкласів: *A0*, *A1*, ... *A9*.

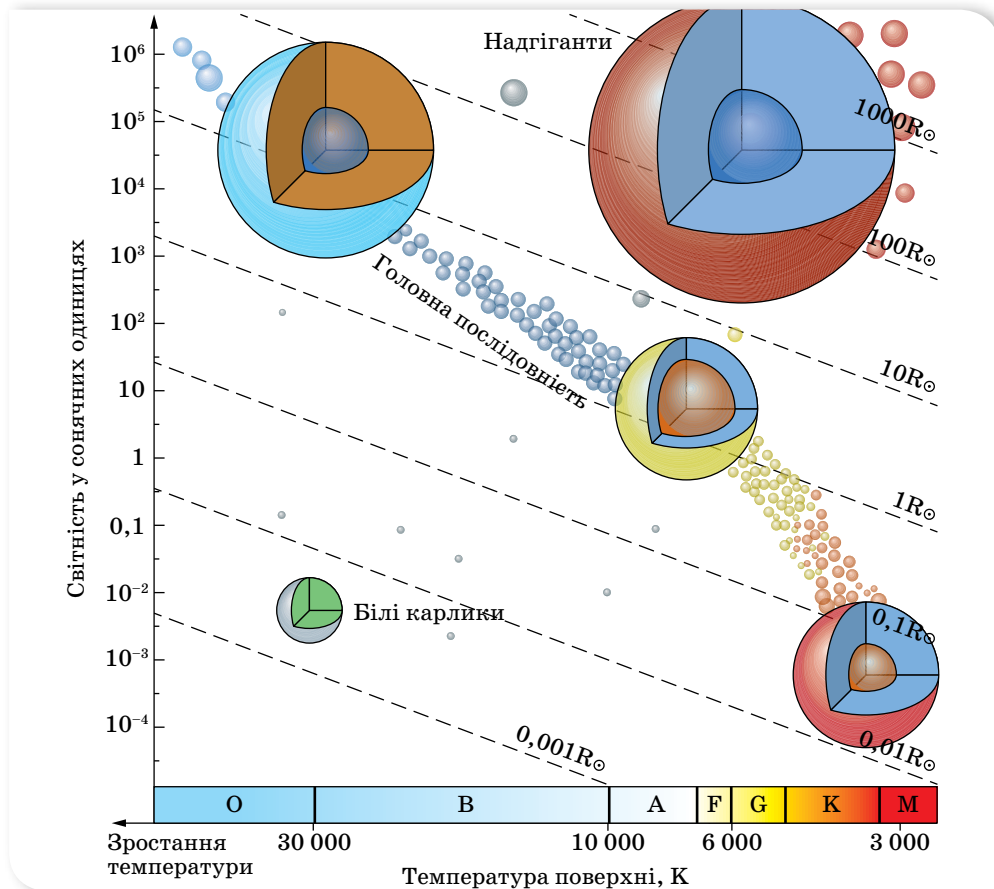
Після того як астрономи змогли фіксувати випромінювання зір в інфрачервоній частині спектра й виявили нові типи зір, для їх класифікації після класу *M* було введено клас *L* для коричневих і клас *T* для холодних червоних карликів. А також клас *Y* — для субкоричневих карликів.

Діаграма спектр-світність. На початку ХХ ст. данський астроном Ейнар Герцшпрунг і дещо пізніше американський астрофізик Генрі Рассел виявили залежність між виглядом спектра і світністю зір. Цю залежність вони ілюстрували графіком, на якому вздовж вертикальної осі відкладають світність зорі (абсолютну зоряну величину), а вздовж горизонтальної — спектральний клас (температуру). Так з'явилася діаграма (мал. 215, с. 262), що показує зв'язок двох зоряних параметрів — спектрального класу (температури) та світності (абсолютної зоряної величини). Її називають *діаграмою спектр-світність* або (на честь обох учених) *діаграмою Герцшпрунга — Рассела* ($\Gamma - P$).

Значна частина зір на діаграмі $\Gamma - P$ розміщена вздовж діагональної смуги, що простягається з верхнього лівого кута в нижній правий. Її названо *головною послідовністю*, а зорі, що лежать на цій смугі, — зорями головної послідовності. Зазначимо, наше Сонце також є зорею головної послідовності та перебуває в тій її частині, що відповідає жовтим зорям.

Поза головною послідовністю праворуч угорі на діаграмі $\Gamma - P$ розміщено зону червоних гігантів і надгігантів. Це холодні зорі (близько 3000 К), що мають набагато більші світності, ніж зорі з такою самою температурою на головній послідовності. Пояснення цієї розбіжності просте: ці зорі мають більші світності через більші розміри. Аналогічно, відмінністю в розмірах можна пояснити значно меншу, ніж у зір головної послідовності, світність групи гарячих білих зір, що є в лівому нижньому куті на тій же діаграмі. Це — білі карлики, дуже компактні зорі з великою густиною й розмірами у десятки чи то й сотні разів меншими від розмірів Сонця. Речовина *білих карликів* і ядер деяких червоних гігантів і надгігантів має таку велику густину, що газ, з якого вона складається, перебуває у «виродженому» стані. За такого стану ядра атомів в одиниці

об'єму запаковані набагато щільніше, ніж у звичайному газі, а тиск газу не залежить від його температури. Тобто тиск залишається високим, навіть якщо температура газу спадає до нуля. Середня густина білих карликів набагато вища за густину нормальних зір — у середньому $10^6 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$.



Мал. 215. Діаграма спектр–світність

Діаграма спектр–світність, демонструючи залежність зоряних параметрів (температура на поверхні й у ядрі, світність, тривалість життя) від початкової маси зорі, дає змогу простежити весь її життєвий шлях від «народження» до «смерті», про що йтиметься в наступному параграфі.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗУМІЮ

1. Які характеристик зір відносять до головних? 2. Назвіть три основні групи, на які поділяють усі зорі відповідно до фізичних властивостей речовини в їхніх надрах. 3. Що відображає послідовність спектральних класів гарвардської класифікації? Які зорі мають найвищу температуру на поверхні й до якого спектрального класу вони належать? 4. Зв'язок яких параметрів зір показує діаграма Герцшпрунга — Рассела?

§ 53 Еволюція зір

Зародження зір. Згідно з найпоширенішою думкою, зорі утворюються внаслідок гравітаційної конденсації речовини міжзоряного середовища. Ще в першій половині ХХ ст. було з'ясовано, що космічний простір заповнює міжзоряна речовина у вигляді надзвичайно розрідженого *газу* та *пилу*. Оскільки розподіл міжзоряної речовини неоднорідний, то існують цілі газово-пилові комплекси. І не в кожному такому комплексі відбувається зореутворення. Міжзоряне середовище має дві фази — щільні холодні хмари та розріджене середовище з вищою температурою. За умови, що гравітаційна енергія зв'язку частинок хмари більша за суму енергії теплового руху частинок, а енергія обертання хмари як цілого більша за магнітну енергію, відбувається стиснення (колапс) хмар. Зореутворення відбувається шляхом послідовної, що здійснюється в кілька етапів, фрагментації масивних хмар. Цим пояснюється те, що зорі зароджуються не поодинокі, а скупченнями й разом із планетами.

Такі області зореутворення називають світлими дифузними туманностями. Колапсуючий об'єкт зоряної маси називається протозорею. У широкому сенсі термін протозоря вживають щодо всіх трьох стадій еволюції газової хмари в зорю, а у вузькому сенсі — лише щодо другої стадії.

Стадії формування зорі з газопилової хмари такі:

1. Ізотермічний колапс і формування компактного ядра.
2. Акреція (в астрофізиці так називають процес падіння речовини на масивне космічне тіло з навколишнього середовища під дією сили тяжіння) протяжної оболонки на сформоване ядро.
3. Повільне стискання ядра після завершення акреції. Ця стадія характерна тільки для зір невеликої маси (менше трьох мас Сонця).

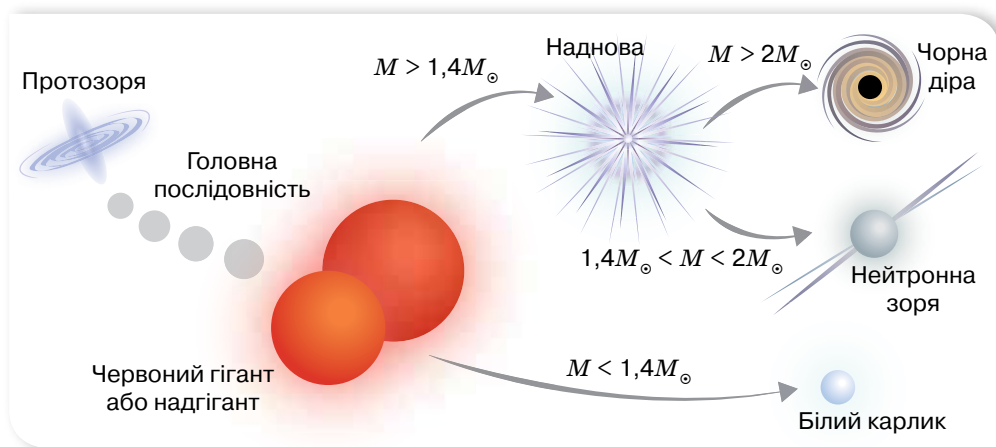
Від початкової маси протозорі залежить спосіб еволюції та тривалість життя майбутньої зорі.

Якщо маса протозорі була в декілька разів більша, ніж маса Сонця, то під час гравітаційного стиснення утворюються гарячі зорі, температури яких — від 10 000 до 60 000 К (належать до спектральних класів О, В). Протозорі з такою початковою масою, як маса Сонця, під час гравітаційного стиснення нагріваються до температури 6000 К. Найменша маса, яка необхідна для початку термоядерних реакцій у надрах зорі, дорівнює майже 0,08 маси Сонця. Протозорі з масою, у декілька разів меншою, ніж сонячна, можуть перетворитися тільки на червоних карликів, що випромінюють енергію в інфрачервоній частині спектра.

Зорі у стані гравітаційної рівноваги. Протягом свого тривалого життя кожна зоря може як збільшувати, так і зменшувати всі свої основні параметри — температуру, світність і радіус. Проте майже 90 % тривалості життя зорі перебувають у стані гравітаційної рівноваги (розміщуються на головній послідовності на діаграмі Г — Р). За цих умов зоря не змі-

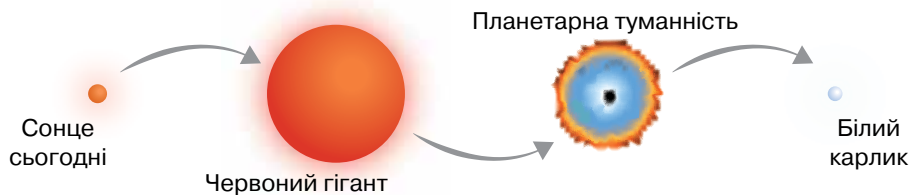
ное своїх параметрів, бо інтенсивне випромінювання енергії з поверхні компенсується джерелом енергії в надрах — термоядерними реакціями. Такий процес триває доти, доки половина Гідрогену в ядрі не перетвориться на Гелій, і тоді інтенсивність термоядерних реакцій може зменшитися. Тривалість стаціонарної фази в житті зорі залежить, знову-таки, від її маси. Розрахунки показують, що такі зорі, як Сонце, у стані рівноваги світять не менш ніж 10 млрд років. Більш масивні зорі, у надрах яких термоядерні реакції протікають інтенсивніше, в рівновазі світять 100 млн років, а найдовше «мерехтять» маленькі червоні карлики — їхній вік може перевершувати 10^{11} років.

Кінцеві стадії еволюції зір. Кінцевий етап еволюції зорі також залежить від її маси. Якщо маса зорі у стані гравітаційної рівноваги більша за половину, але менша від двох мас Сонця, то після того як Гідроген у ядрі здебільшого «вигорить», термоядерні реакції перестають виробляти достатню кількість енергії, зоря знову починає стискатися, поки ядро знову не розігріється до температури, за якої починається вже інша термоядерна реакція — Гелій перетворюється на Карбон з виділенням більшої кількості енергії. Світність зорі зростає в десятки разів, вона розширюється («розпухає»), стає червоним гігантом. Коли ж закінчиться і Гелій, зорі просто «скидають» частину своєї маси (так формуються планетарні туманності), і на цьому етапі все залежить від маси зорі (мал. 216).



Мал. 216. Кінцеві стадії еволюції зір

Якщо маса зорі незначна (не перевищує 1,4 маси Сонця), то її ядро не спроможне втримати роздуту оболонку, яка поступово віддаляється, утворюючи *планетарну туманність*. Після остаточного розсіювання оболонки залишається лише гаряче ядро зорі — *білий карлик*. Ядерних джерел енергії в зорі немає, і вона ще дуже довго світить, повільно охолоджуючись. Такий шлях розвитку буде в Сонця: орієнтовно через 8 млрд років, пройшовши стадію червоного гіганта, воно стане білим карликом (мал. 217).



Мал. 217. Еволюція Сонця

Еволюція масивних зір проходить бурхливіше. Наприкінці свого існування така зоря може вибухнути *надновою*, а її ядро, різко стиснувшись, стане *нейтронною* зорею або *чорною дірою*.

Після спалаху зорі всі планети, які оберталися навколо неї, випаровуються і перетворюються на газопилову туманність, з якої в майбутньому може утворитися нове покоління зір. Тобто у Всесвіті спостерігається своєрідний колообіг речовини: зорі — спалах зір — туманність — і знову народження молодих зір.

Нейтронні зорі. Нейтронні зорі можуть бути в діаметрі всього 20 км, що відповідно зумовлює величезну густину такої зорі, за якої вільні електрони ніби «вдавлюються» в протони. Щоб ви змогли уявити таку густину, тільки одна ложечка такого матеріалу буде важити мільярд тонн. Гравітація на такому об'єкті у 2 млрд разів сильніша за земну. У міру стискання такі зорі сильно розкручуються й починають випромінювати радіохвилі з певною, вельми стабільною частотою. Саме так і були виявлені реальні нейтронні зорі в 1967 р., існування яких теоретично розрахував ще в 1932 р. Лев Давидович Ландау.

Випромінювання від нейтронної зорі поширюється в простір на величезні відстані у вигляді конусів (мал. 218). Конуси випромінювання, наче прожектори, обертаються разом із зорею і з тим же періодом, що й вона. Якщо Земля потрапляє в такий конус, ми маємо можливість реєструвати пульсуючі сигнали від нейтронної зорі, тому її ще називають *пульсаром* (*радіопульсаром*).

Нові й наднові зорі. Нові й наднові зорі є прикладом вибухових процесів у зорях, що завершують еволюційний шлях.

Зорі, блиск яких раптово зростає в тисячі й навіть мільйони разів (у середньому на 12 зоряних величин), називають *новими* зорями. Причина вибухів нових зір — особливості обміну речовиною в тісних подвійних системах, компоненти яких мають маси, близькі до сонячної або й менші від неї, а відстань між ними лише трохи перевищує їхні розміри.



Мал. 218. Модель випромінювання нейтронної зорі

Якщо одна із зір уже стала білим карликом, а друга ще перебуває на головній послідовності або є холодним гігантом одного з пізніх спектральних класів K чи M , під дією сили тяжіння багата на водень речовина з поверхневих шарів зорі-компаньйона перетікає на білий карлик. З накопиченням водню і збільшенням температури й щільності на поверхні білого карлика до певної критичної величини у збагаченому воднем шарі починаються термоядерні реакції з перетворення водню на гелій. Цей процес протікає надзвичайно швидко, й енергія вивільняється через вибух. Виникає потужна ударна хвиля, яка скидає зовнішні шари зорі в навколишній простір. Скинута газова оболонка розширюється, внаслідок чого зростає блиск зорі, що й спостерігають як появу нової.

Проте після спалаху перетікання газу на білий карлик починається знову, і за деякий час (до 1000 років) спалах повторюється.

Спалах *наднової* зорі має незрівнянно більші масштаби, ніж спалах нової. Адже її блиск зростає на десятки зоряних величин упродовж кількох діб. Поява наднової в іншій галактиці демонструє всю грандіозність цього явища, адже часом її блиск у максимумі перевищує сумарну яскравість усієї зоряної системи, у якій вона спалахнула. Такою, наприклад, була наднова 1972 р. в галактиці NGC 5253, що світила майже в 13 разів яскравіше, ніж материнська галактика.

Під час вибуху наднова скидає свою оболонку, яка далі розширюється зі швидкістю від 5000 до 20 000 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$, і за деякий час ми спостерігаємо на місці наднової туманність специфічної форми. Такою є Крабоподібна туманність у сузір'ї Тельця. Її появу пов'язують з надною 1054 р., яку було зафіксовано в китайських хроніках. За останні 1000 років у нашій Галактиці відомо про кілька наднових: серед них уже згадувана 1054 р. — у Тельці, 1572 р. — у Кассіопеї, її спостерігав Тихо Браге, 1604 р. — у Змієносці, її спостерігав Йоганн Кеплер. Усього за другу половину ХХ ст. спостерігалось близько 1000 спалахів. Спостереження за вибухом наднової цілеспрямовано виконують не тільки професійні астрономи й не лише завдяки автоматизованим системам пошуку, а й астрономи-аматори й навіть учні.

Зорі, що спалахують як наднові, поділяють на два основні типи. Наднові I типу є старими зорями з масами в 1–2 сонячних у складі тісних подвійних систем. А надновими II типу внаслідок гравітаційного колапсу стають одиночні масивні зорі з масами не менш ніж 8–10 сонячних мас, що перебувають на кінцевому етапі еволюції. При цьому, залежно від маси, зоря, що вибухнула, може взагалі зруйнуватись доценту, а може залишити після себе нейтронну зорю.

Варто зазначити, що оболонка, зірвана під час спалаху наднової зорі, складається з газу, збагаченого багатьма хімічними елементами — киснем, магнієм, кремнієм, залізом, нікелем та іншими. Ці елементи — продукти термоядерних реакцій, що відбулися на завершальному етапі еволюції зорі. Збагачена речовина оболонки, викинута після спалаху в міжзоряний простір, може згодом зіткнутися з галактичними газовими хмарами й тим самим підвищити в них рівень вмісту хімічних елементів,

важчих за водень і гелій. Таким чином, унаслідок спалахів наднових зір вміст важких елементів у міжзоряному середовищі кожної галактики із часом зростає.

Чорні діри. Чорні діри утворюються на останній стадії еволюції зір з масою більшою, ніж дві маси Сонця. Можливість існування чорних дір впливає з того, що для кожного тіла з масою M існує таке граничне значення радіуса R , так званого *гравітаційного радіуса* $\left(R = \frac{2GM}{c^2} \right)$, де c — швидкість світла), за якого гравітаційне поле на поверхні стає таким великим, що друга космічна швидкість дорівнює швидкості світла.

На завершальних етапах життя зорі з масою ядра понад дві маси Сонця гравітаційний колапс може тривати необмежено. За такого колапсу навіть тиск нейтронного газу не здатен зупинити невпинне стискання, зоря може досягти гравітаційного радіуса $R < 10$ км і перетворитись на такий дивовижний об'єкт, як *чорна діра*.

Такий об'єкт не буде випускати з гравітаційного поля навіть квантів світла, тому він стає невидимим, і від нього ми не можемо отримати інформацію за допомогою електромагнітних хвиль. Подібних чорних дір, або своєрідних зоряних могил, у космосі може налічуватися навіть більше, ніж звичайних зір. Отримують інформацію про чорну діру за допомогою гравітаційного поля, яке безслідно не може зникнути. Поблизу чорних дір спостерігаються незвичайні фізичні процеси. Величезна сила тяжіння змінює геометрію простору й часу. Це виявляється у викривленні світлових променів, які проходять повз чорну діру. Ближче до чорної діри промені закручуються вздовж спіралі, й світло наче засмоктується у гравітаційне провалля, з якого немає виходу (мал. 219).



Мал. 219. Модель чорної діри



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

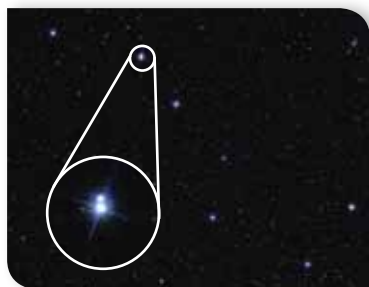
1. Коли параметри зорі залишаються сталими? **2.** Які зорі світять найдовше? **3.** Скільки часу може світити Сонце в стані рівноваги? **4.** Як гинуть зорі великої маси? **5.** Чи може зоря червоний карлик перетворитись на білого карлика?

§ 54 Подвійні, кратні та змінні зорі

Подвійні та кратні зорі. Спочатку подвійними зорями вважали кожні дві дуже близькі на небесній сфері зорі. Але після того як астрономи навчилися визначати відстані до зір, з'ясувалося, що деякі з них насправді далекі одна від одної, фізично між собою не пов'язані й лише проєктуються в дуже близькі точки на небесній сфері. Тепер такі зорі називають *оптичними подвійними зорями*. На відміну від них, *фізичними подвійними зорями* є зорі, що під дією взаємних сил тяжіння обертаються навколо спільного центра мас, утворюючи єдину динамічну систему. На основі теоретичних моделей припускають, що подвійні зорі охоплюють до 70 % від усієї сукупності зір.

Відповідно до засобів, якими вони були виявлені, фізичні подвійні зорі поділяють на три класи. Якщо подвійність виявлено в наслідок візуальних спостережень (зорі видно окремо за допомогою оптичних засобів), то їх називають *візуально-подвійними* (мал. 220).

Якщо подвійність виявлено в результаті фотометричних досліджень періодичних змін блиску системи, такі подвійні називають *затемнювано-змінними*, бо ці зміни виникають, коли компоненти тісної системи

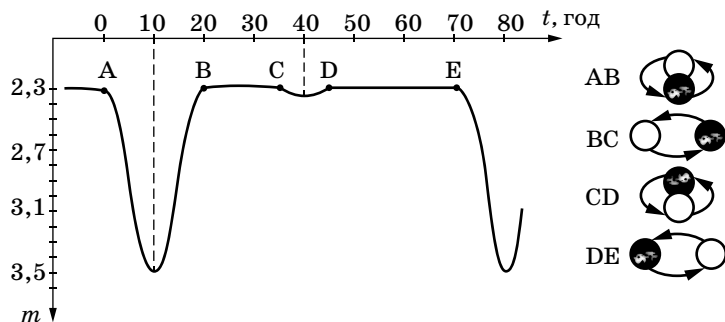


Мал. 220. Візуально-подвійна зоря Міцар і Алькор із сузір'я Великої Ведмедиці

затемнюють одна одну. На малюнку 221 показано схему й криву блиску затемнювано-змінної зорі Алголь у сузір'ї Персея.

Спектрально-подвійними зорями називають ті системи, у спектрі яких лінії зазнають періодичних роздвоєнь (мал. 222).

При цьому внаслідок ефекту Доплера найбільшої величини роздвоєння ліній, спільних для спектрів обох зір, спектр подвійної зорі досягає за найбільшої променевої швидкості компонентів: коли один з них рухається в напрямку до спостерігача,



Мал. 221. Схема затемнення та крива блиску затемнювано-змінної зорі

а інший — від нього. Часто один з компонентів спектрально-подвійної системи є таким слабким, що його спектральних ліній не видно. Тоді замість роздвоєння ліній спостерігають періодичне зміщення ліній яскравого компонента то в синій, то в червоний бік спектра. Ніні створено дуже точні вимірювальні прилади з високою роздільною здатністю, що дають змогу вимірювати коливання ліній у спектрах, навіть якщо воно зумовлене невидимим компонентом дуже малою в порівнянні з видимою зорею маси. Саме в такий спосіб відкривають планети біля інших зір (екзопланети).

Іноді в подвійній системі зорі перебувають так близько одна до одної, що під дією взаємних сил тяжіння їхня форма спотворюється. При цьому вони активно обмінюються речовиною. Такі пари називають *тісними подвійними системами* (мал. 223).

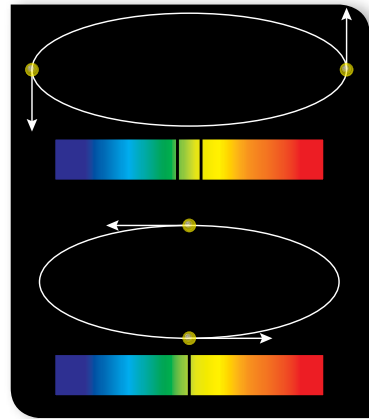
Сьогодні астрономи мають можливість спостерігати такі незвичайні пари на різних етапах їхнього розвитку. Вони допомагають ученим краще зрозуміти механізм зоряної еволюції. Важливість вивчення подвійних зір, окрім усього іншого, полягає в тому, що в таких системах можна визначити найважливіший параметр зорі — її масу. Найточніше маси визначають у системах, де відбуваються взаємні затемнення зір.

Утворювати єдину динамічну систему можуть не лише дві, а й три та більше зір. Такі зорі називають кратними. Більшість фізично кратних зір — потрійні (зазвичай, це пара близько розташованих зір, і одна зоря досить віддалена від їхнього спільного центру мас). Системи з більшою кількістю компонент загалом є гравітаційно нестабільними й розпадаються, із часом «викидаючи» одну або кілька зір за межі системи.

Змінні зорі. Змінні зорі — це зорі, блиск яких змінюється. Залежно від маси, розмірів, віку, причин змінності їх розділяють на три великі класи:

- ▶ *пульсуючі* — це зорі, які періодично розширюються і стискаються, а їхній блиск синхронно посилюється й послаблюється;
- ▶ *затемнені* — система з двох (іноді трьох або більше) зір, що обертаються довкола одного центру мас;
- ▶ *еруптивні* — зорі, що змінюють блиск нерегулярно (або лише одного разу).

Кожний клас, своєю чергою, поділяється на типи, в окремих випадках виділено підтипи.

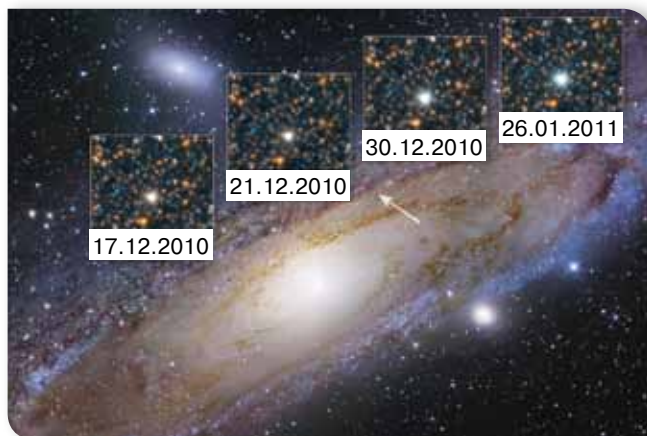


Мал. 222.
Роздвоєння ліній
у спектрі подвійної зорі



Мал. 223. Модель тісної
подвійної системи

Серед пульсуючих змінних найбільш відомі цефеїди, названі так за прототипом — зіркою δ -Цефея. Зміна кольору, світності та швидкості руху поверхневого шару в класичній цефеїді відбувається з певним періодом (мал. 224).



Мал. 224. Коливання блиску цефеїд

Головною особливістю цефеїд є залежність період–світність, відкрита 1908 р. Генрієтою Левітт (США). Ця залежність дає змогу за виявленим зі спостережень періодом змінності обчислити світність цефеїди, а потім і відстань до неї. Завдяки цьому цефеїди стали «маяками» Всесвіту, адже, маючи великі світності, вони помітні з дуже великих відстаней, зокрема й далеко за межами нашої Галактики. Визначивши відстань до цефеїди в іншій галактиці, легко встановити відстань і до самої галактики, у якій її спостерігають.



ЗНАЮ, ВМІЮ, РОЗЦІМЮ

1. У чому полягає відмінність між оптичними й фізичними подвійними зорями? **2.** Як дізнаються про подвійність зорі, коли з двох зір можна побачити лише одну? **3.** Поясніть, у яких випадках у спектрі спектрально-подвійної зорі можна бачити розщеплення ліній, а в яких — зміщення? **4.** Поясніть важливість вивчення подвійних зір. **5.** Чому цефеїди називають «маяками Всесвіту»?

§ 55

Наша Галактика

Будова й структура Галактики. У Всесвіті є мільярди галактик, серед яких і наша Галактика (пишеться з великої літери, щоб уникнути плутанини з іншими). Наша Галактика — це величезна система, у якій

обертаються навколо центра 400 млрд зір. Неозброєним оком на всій небесній сфері ми бачимо близько 6000 зір і проекцію частини Галактики — Молочний Шлях. В Україні її ще називали Чумацький Шлях, Стан, Божа Дорога (мал. 225). Назву Молочний Шлях використовують і як власну назву нашої Галактики.



Мал. 225. Наша Галактика: а — жовтим колом обведено зорі Галактики, які ми бачимо; б — Чумацький шлях; в — В. Гершель

Вивчати будову Галактики не просто, адже ми перебуваємо всередині цієї зоряної системи. Однак, незважаючи на такі ускладнення, астрономи, починаючи від перших робіт Вільяма Гершеля у XVIII ст., знайшли методи, скориставшись якими, змогли розкрити багато її таємниць.

Якби ми могли подивитися на Галактику ззовні, наприклад, «згори», то побачили б, що вона нагадує плоский диск, у якому чітко простежуються спіральні рукави (мал. 226, а).



Мал. 226. Будова Галактики: а — «вигляд згори»; б — «вигляд збоку»

За сучасними уявленнями, Галактика має дві складові частини — плоску та сферичну (мал. 226, б). *Сферична підсистема* — гало, або *корона* — складається з газу та дуже старих неяскарих зір. Радіус гало, згідно з даними космічного телескопа ім. Габбла, дорівнює 300 000 св. р.

Об'єкти гало концентруються біля центра Галактики, утворюючи балдж (з англ. bulge — *опуклість*). *Плоска підсистема — диск* — складається переважно з газу, молодих зір та їхніх скупчень. Вік більшості об'єктів диска — до 1 млрд років. Діаметр диска — 100 000 св. р., а товщина центральної зони 10 000 св. р. У центрі Галактики розташоване *ядро* діаметром 4000 св. р. Концентрація зір у ядрі дуже висока, ймовірно, у його центрі є дуже масивна чорна діра.

Дослідження зір, а всі зорі, які ми бачимо над головою в ясну ніч, належать нашій Галактиці, показало, що вони істотно різняться між собою фізичними параметрами. Тому зоряне населення Галактики поділяють на дві групи — два типи населення. До населення I типу належать зорі, що заповнюють спіральні гілки Галактики, зорі розсіяних скупчень, довгоперіодичні цефеїди. Важливими представниками населення I типу є гарячі зорі — білі гіганти, зорі ранніх спектральних класів. Населення II типу — це зорі кулястих скупчень, зорі ядра Галактики. Серед цього типу населення виділяють яскраві червоні надгіганти.

Аналіз хімічного складу зоряних атмосфер привів до висновку, що в зір населення I типу (плоска підсистема Галактики) металів приблизно у сто разів більше, ніж у зорях II типу (сферична підсистема). Це зміцнило переконання астрономів у тому, що розподіл зір на підсистеми має глибокий еволюційний сенс (зокрема, виявлено, що в цілому населення I типу значно молодше, ніж населення II типу).

Не лише зорі населяють нашу Галактику. Окрім зір, у ній є зоряні скупчення й асоціації, а також туманності. Значна частина речовини нашої Галактики сконцентрована в міжзоряному просторі — у газопилових хмарах. Довкола Галактики (у полі її сили тяжіння) є кілька десятків невеликих зоряних систем — її супутники.

Туманності, що є в Галактиці, поділяють, відповідно до їх зовнішнього вигляду, на планетарні й дифузні, а відповідно до фізичної природи — на газові, пилові та газопилові. Усі планетарні туманності й частина дифузних є газовими. Пилові туманності бувають і світлими, і темними (мал. 227). Темні туманності поглинають світло зір, що містяться далі. Якщо поблизу туманності є достатньо яскрава зоря, то туманність відбиває її світло й завдяки цьому стає світлою туманністю. Темною є туманність Кінська Голова, що міститься на відстані близько 1500 св. р. у сузір'ї Оріона. Видно Кінську Голову тому, що позаду неї є яскрава туманність IC 434, яка випромінює червоне світло.

Якщо ж зорі, що перебувають поблизу або всередині туманності, дуже гарячі, то, йонізуючи своїм ультрафіолетовим випромінюванням газ, що входить до її складу, вони змушують його світитися так само, як це відбувається в полярних снігах на Землі. Тоді до відбитого пилом світла додається власне випромінювання газів туманності.

Найвідомішою серед світлих туманностей є знаменита туманність Оріона, яку видно навіть неозброєним оком як слабеньку хмарку (мал. 227).

Окрім дифузних, існують також компактні туманності правильної форми, які поділяють на волокнисті та планетарні. І якщо саме з дифузними

туманностями пов'язують на сьогоднішній день утворення зір, то волокнисті та планетарні туманності формуються на завершальних стадіях розвитку зір зі скинутих ними оболонок. Принаймні частина волокнистих туманностей — це залишки спалахів наднових. Про одну з них ми вже згадували — Крабоподібну туманність із сузір'я Тельця.

Планетарними названо туманності кільцеподібної форми, які здалека мають вигляд слабких кілець або дисків. Планетарні туманності світяться за рахунок ультрафіолетового випромінювання тих зір, чиїми оболонками вони колись були.

Місце Сонячної системи в Галактиці. Наша Сонячна система розташована на краю спірального рукава (Оріона). Найявніші спіральних гілок у Галактиці пояснюють гігантськими хвилями стиснення і розрідження міжзоряного газу, які пробігають галактичним диском. Важливим є те, що орбітальна швидкість Сонця в Галактиці майже збігається зі швидкістю руху хвиль стиснення. Саме тому наша планетна система залишається попереду фронту хвилі вже кілька мільярдів років. Ця обставина, ймовірно, мала велике значення для виникнення і збереження життя на Землі. Відстань до центра Галактики становить близько 9000 пк (25 000 св. р.). Перебуваючи на такій відстані, Сонце здійснює один оберт навколо нього за майже 230 млн р., які становлять галактичний рік $\left(\text{швидкість руху Сонця} — 220 \frac{\text{км}}{\text{с}} \right)$. Земля вже облетіла навколо центра

Галактики приблизно 25 разів, але науковці не можуть дійти згоди, в якому напрямку обертається наша спіральна Галактика: закручується чи розкручується.

Водночас Сонячна система міститься в дещо особливій ділянці Галактики (мал. 228, с. 274). Цю ділянку називають Місцевою Бульбашкою (англ. — Local Bubble), бо вона має вигляд міхура. Специфіка цієї ділянки полягає в тому, що всередині неї густина



а

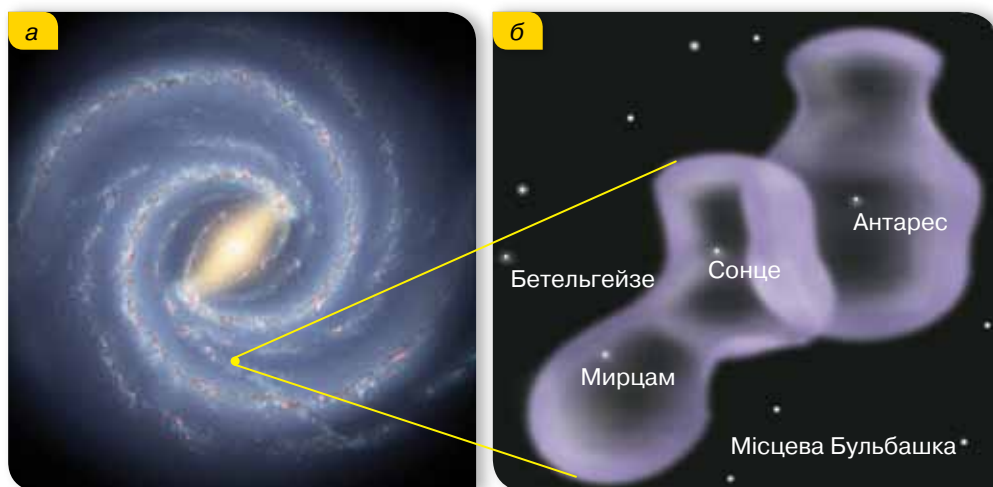


б



в

Мал. 227. Туманності:
а — Кінська Голова;
б — Оріона;
в — Крабоподібна



Мал. 228. Розташування Сонця в Галактиці (а) та Місцева Бульбашка (б)

міжзоряного газу не більша за 1 атом на 10 см^3 — це приблизно у п'ятеро менше, ніж у навколишньому просторі. Сонце разом із планетами увійшло в цю хмару, за різними оцінками, від 44 до 150 тис. р. тому, а вийде з неї протягом найближчих десятків або сотень тисяч років.

Як ми знаємо, Сонячна система рухається, оточена величезним «коконом» магнітного поля — геліосферою (§ 50). Геліосфера відхиляє заряджені частинки міжзоряної речовини, і всередину Сонячної системи вони не проникають. Лише частинки, що не мають заряду, проникають у внутрішню частину нашої планетної системи, потрапляють у сферу впливу Сонця та падають на нього.

Супутники Галактики. Перші два супутники нашої Галактики було відкрито 1519 р. під час навколосвітньої подорожі Фернандо Магеллана. Ці туманні плями, видимі неозброєним оком на зоряному небі Південної півкулі Землі, назвали відповідно Великою й Малою Магеллановими Хмарами — скорочено ВМХ і ММХ (мал. 229). Неозброєним оком видно й галактику Туманність Андромеди, яку спочатку вважали за туманність, тому за нею збереглась така назва.

На сьогодні кількість супутників нашої Галактики зросла до кількох десятків. Ці об'єкти лежать, зокрема, в сузір'ях Геркулеса, Діви, Лева, Великого Пса та інших.

Усі вони є невеликими (за розміром, масою, кількістю зір) галактиками, що перебувають у полі тяжіння нашої. Ймовірно, повільно відбувається процес поглинання Галактикою цих карликових зоряних систем. Через кілька мільярдів років наша Галактика поглине й обидві Магелланові Хмари. Ця подія приведе до того, що Галактика додатково отримає велику кількість міжзоряної речовини (її стане приблизно вдвічі більше, ніж є нині), а також багато молодих яскравих зір, що будуть утворюватися. Загалом такі зміни омолодять нашу зоряну систему — вона, ймовірно, стане активнішою, ніж тепер.



а



б

Мал. 229. Найближчі галактики: а — Велика й Мала Магелланові Хмари; б — Туманність Андромеди

Зоряні скупчення. Для будь-яких галактик спільним є те, що це гравітаційно пов'язані системи із зір, зоряних скупчень, міжзоряного газу та пилу, планет та інших космічних об'єктів, які обертаються навколо спільного центра. Просто пов'язані взаємним тяжінням групи зір спільного походження називають *зоряними скупченнями*. У сузір'ї Тельця спостерігаються Плеяди, де неозброєним оком — видно групу із 7–8 зір, а на світлинах із тривалою експозицією можна отримати близько 300 слабких зір. Поруч з Альдебараном розташоване об'єднання зір — Гіади. Ці та аналогічні їм тісні зоряні групи неправильної форми називають *розсіяними зоряними скупченнями*. У кожному з них сотні або й тисячі зір, які мають спільне походження, об'єднанні силою всесвітнього тяжіння й разом рухаються у просторі. Діаметри розсіяних зоряних скупчень становлять 10–20 св. р. Більшість розсіяних скупчень складаються тільки із зір головної послідовності, а це означає, що вік цих утворень не перевищує 10–100 млн р., тобто вони доволі «молоді». Зараз відомо близько 1200 розсіяних зоряних скупчень, і майже всі вони розташовані в Молочному Шляху чи поблизу нього.

Окрім розсіяних, спостерігають і зоряні скупчення сферичної чи еліпсоїдної форми, які називають *кулястими*. Вони мають величезні розміри (до 300 св. р.) і складаються із сотень тисяч зір. Значна кількість червоних гігантів у кулястих зоряних скупченнях свідчить про поважний вік цих утворень. Найстарші з них існують 13–15 млрд р. На відміну від розсіяних, кулясті зоряні скупчення сконцентровані біля центра Галактики. Зараз відомо близько 150 кулястих зоряних скупчень.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМІЮ

1. Поясніть, чому складно досліджувати нашу Галактику. **2.** Назвіть основні складові частини будови Галактики. **3.** На основі яких спостережень і коли було виявлено спіральну структуру Галактики? **4.** Поясніть, чому зорі в Галактиці поділені на два типи населення? **5.** Коротко опишіть місце розташування Сонячної системи в Галактиці.

§ 56 Галактики

Типи галактик. Ще якихось сто років тому астрономи сприймали нашу Галактику як увесь зоряний Всесвіт. Однак ще в добу Фрідріха Гершеля на зоряному небі виявили тьмяні цятки, які хвилювали астрономів. Як з'ясувалося у 20-х роках минулого століття, багато із цих об'єктів є зоряними системами, тобто галактиками. Відтоді позагалактична астрономія — підрозділ астрономії, що досліджує ці зоряні світи, дослідила тисячі близьких і далеких галактик (мал. 230).

Галактики — головні «блоки», з яких нині складається Всесвіт, — це гігантські зоряні системи, пов'язані в єдине ціле гравітаційною взаємодією.

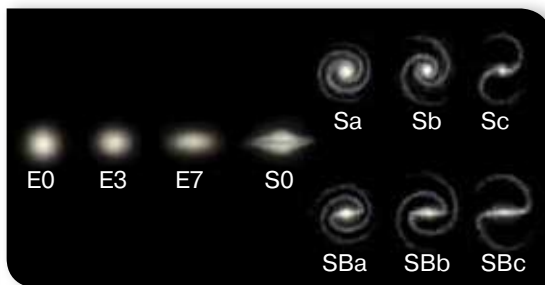
Світ галактик дуже розмаїтий. Тому не дивно, що нині є кілька класифікацій цих об'єктів. Першим у 1925 р. галактики за їх зовнішнім виглядом класифікував Едвін Габбл. Він виділив три типи галактик: *еліптичні*, *спіральні* та *неправильні* (мал. 231).

В еліптичних галактиках (їх позначають літерою *E*) зорі розподілені переважно сферично-симетрично, що робить ці галактики схожими на кулясті скупчення. У цих галактиках містяться здебільшого старі зорі зоряного населення II, серед яких найяскравіші — червоні гіганти. Саме вони забарвлюють у червонуваті кольори всю галактику в цілому. Через відсутність у таких галактиках міжзоряної матерії процеси зореутворення в них не відбуваються. Маси еліптичних галактик дуже різняться між собою: від менших за один мільйон (карликові еліптичні галактики) до кількох тисяч мільярдів сонячних мас (гігантські еліптичні галактики).

Спіральним галактикам (*S*) притаманна структура у вигляді плоского тонкого диска, де перебуває більша частина зір. Залежно від ступеня «закрученості» рукавів, ці галактики поділяють на три типи й позначають *Sa*, *Sb*, *Sc*. Диски спіральних галактик зазвичай складаються з молодих зір зоряного населення I, які переважно локалізуються в спіралях. Старі зорі населення II перебувають у гало, тобто на периферії галактики.



Мал. 230. Галактики, що вдалося зафіксувати за допомогою телескопа «Габбл»



Мал. 231. Класифікація галактик за їх зовнішнім виглядом, запропонована Едвіном Габблом

Крім того, міжзоряний простір у дисках спіральних галактик заповнений великою кількістю пилу та газу, з яких активно утворюються зорі.

Усі інші галактики через неможливість визначити їхню форму класифікують як неправильні (*Ir*). Маса цих галактик дуже малі (соті частки маси нашої Галактики), і зазвичай вони є супутниками більших галактик. Типовий приклад таких зоряних систем — Магелланові Хмари. У неправильних галактиках є багато міжзоряної речовини й молодих зір.

У 40-х роках ХХ ст. було відкрито першу галактику, що випадає з традиційної класифікації Габбла, — це галактика з активним ядром. До таких галактик належать: *радіогалактики*, *квазари* та деякі інші. Для всіх цих об'єктів, у порівнянні зі звичайними галактиками, властива дуже інтенсивна енергетична діяльність у центральних зонах, зокрема в ядрі.

Радіогалактики — зоряні системи, випромінювання яких у радіодіапазоні в тисячі й десятки тисяч разів потужніше, ніж у Молочного Шляху або схожих на нього зоряних систем. Підраховано, що одна галактика на мільйон є радіогалактикою, і здебільшого такими бувають гігантські еліптичні галактики з компактним ядром розмірами менше ніж парсек. Імовірно, ці об'єкти належать до класу галактик з активними ядрами.

У 60-ті роки ХХ ст., коли кількість виявлених галактик і радіогалактик стала досить великою, було зроблено ще одне важливе відкриття: деякі з потужних, але надзвичайно віддалених радіоджерел за спостережень в оптичному діапазоні своїм зовнішнім виглядом більше нагадували зорі, аніж галактики. Їх було виділено в особливий клас і названо *квазарами* (квазізоряними радіоджерелами). Природа квазарів упродовж двох десятиків років була для астрономів загадкою. Однак кропіткі спостереження дали змогу встановити: квазари — не що інше, як дуже компактні й активні ядра деяких галактик, де в об'ємі розмірами із Сонячну систему відбувається колосальне виділення енергії. Завдяки цьому ядра є такими яскравими, що слабкі спіральні рукави галактик дуже важко побачити.

Квазари належать до широкого загалу галактик з активними ядрами, у яких містяться надмасивні (від 100 млн до 1 млрд сонячних мас) чорні діри. Речовина, яка падає в чорну діру, формує навколо неї в екваторіальній площині кільцеву структуру, яку називають *акреційним диском*. Падаючи в діру вздовж спіралі, газ унаслідок внутрішнього тертя сильно нагрівається й випромінює інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові, рентгенівські промені, а часом і гамма-кванти, які можна зареєструвати.

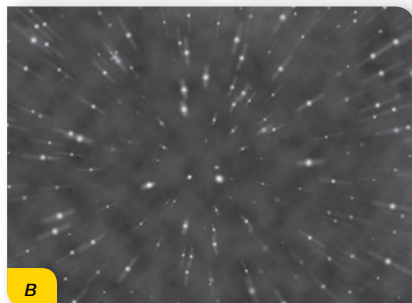
Розмаїття галактик з активними ядрами, ймовірно, лише зовнішнє й залежить від того, під яким кутом їх видно. Споглядаючи галактику з ребра, її оптичного випромінювання, значно ослабленого пилом, ми не бачимо. Але з ділянок обабіч галактичного диска, куди простягаються два перпендикулярні до його площини викиди речовини з ядра, нас без перешкод досягають радіохвилі — тоді це радіогалактика. Якщо галактика зорієнтована так, що викид спрямований уздовж лінії зору спостерігача, то можна спостерігати її дуже яскраве ядро. Така галактика проявляє себе як квазар. І нарешті, якщо площина галактичного диска має якийсь кут нахилу до променя зору спостерігача, то, залежно від

величини цього кута, об'єкт має вигляд або радіогалактики, або квазара. Крім того, можливо, що квазари й радіогалактики — це об'єкти одного роду, які перебувають на різних етапах своєї еволюції.

Закон Габбла. Спостереження галактик розпочалися ще в 20-х роках минулого століття. Американський астроном Едвін Габбл та бельгійський астроном, священник і математик Жорж Леметр, досліджуючи спектри галактик, виявили важливу закономірність: що далі галактика від Землі, то з більшою швидкістю вона рухається, віддаляючись від нас (мал. 232). Залежність між відстанню до галактики та швидкістю її віддалення називають *законом Габбла*¹:

$$v = Hr,$$

де v — швидкість віддалення галактики від спостерігача, r — відстань до неї, H — стала Габбла.



Мал. 232.

а — Е. Габбл (1889–1953);
б — Ж. Леметр (1894–1966);
в — моделювання розбігання галактик

Сталу Габбла визначають на підставі спостережень і нині її значення оцінюють приблизно в $74,2 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$ (кілометрів за секунду на мегапарсек). На таку величину зростає швидкість руху галактики за кожний мегапарсек.

Закон Габбла також дає змогу оцінити вік Всесвіту. Вимірявши швидкості віддалення галактик та експериментально визначивши H , можна отримати оцінку часу, протягом якого галактики розбігаються. Це і є прогнозований час існування Всесвіту.

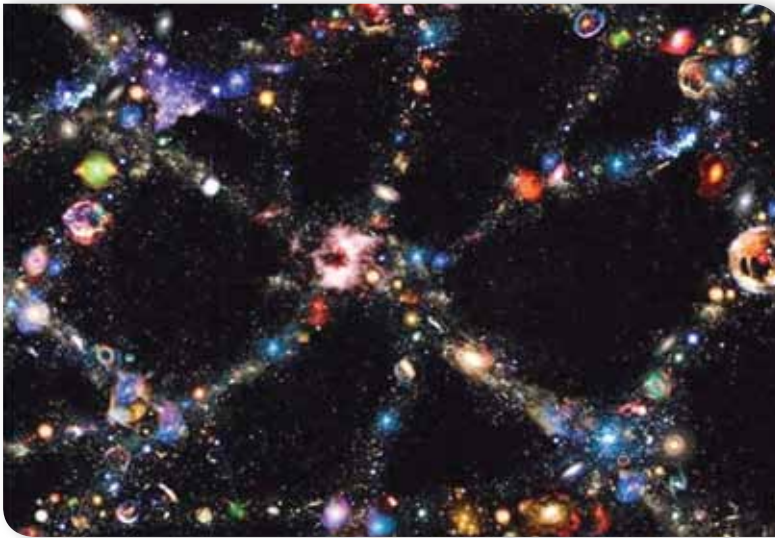
Із закону Габбла випливають два важливі висновки. Всесвіт розширюється в буквальному сенсі слова «в нікуди». Іншими словами, галактики не просто розлітаються в різні боки в порожньому просторі, а розсовується сам простір. Водночас такі об'єкти, як зорі чи галактики, не зазнають цього розширення (принаймні досі це не зареєстровано), бо завдяки гравітації є стійкими утвореннями. Ще

одна особливість цього розширення — зі спостережень із Землі здається, що скупчення галактик розбігаються однаково в різних напрямках, згідно із законом Габбла так, ніби наша Галактика є центром Всесвіту. Однак це оманливе враження. Спостерігач будь-де у Всесвіті буде бачити однакову картину — усі галактики розбігаються від нього. Це означає, що у Всесвіті немає центра, від якого йде розширення.

¹ У 2018 р. виконавчий комітет Міжнародного астрономічного союзу прийняв рішення перейменувати його на закон Габбла — Леметра.

Другий висновок — Всесвіт колись мав початок. Такого висновку легко дійти, якщо подумки «прокрутити назад» умовну кінострічку розширення Всесвіту. У результаті ми дійдемо до моменту часу, коли вся речовина нашого світу була зосереджена в одній точці.

Великомасштабна модель Всесвіту. Ще в другій половині 50-х років минулого століття було виявлено, що більша частина найяскравіших галактик, видимих із Землі, утворюють цілісну структуру (мал. 233). Дослідження розподілу скупчень і надскупчень галактик у великих об'ємах простору впродовж останніх 50 років дало змогу космологам створити великомасштабну модель Всесвіту. Згідно із цією моделлю, Всесвіт має комірчасту структуру, тобто складається з велетенських порожнин (їх називають войдами), схожих на бджолині стільники, що дотикаються один до одного.



Мал. 233. Модель комірчастої структури Всесвіту

Скупчення й надскупчення галактик, зібрані у волокнисті структури, «нитки» завдовжки в десятки мегапарсек, утворюють своєрідні «стіни», які охоплюють порожнини. Та насправді порожнини — не зовсім порожні. Тепер відомо, що там, де ми бачимо начебто пустий простір, міститься темна матерія, природа якої досі не відома.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Назвіть галактики, які можна спостерігати неозброєним оком. У якій півкулі неба їх видно? **2.** За якою ознакою Е. Габбл розподілив галактики на типи? **3.** Поясніть, чим відмінні галактики різних типів. **4.** Яким чином проявляють себе галактики з активними ядрами? Чим зумовлена ця активність? **5.** Поясніть суть закону Габбла. **6.** На підставі яких спостережних результатів було відкрито закон Габбла? **7.** Поясніть, як оцінюють вік Всесвіту.

§ 57

Елементи сучасної космології

Космологічні моделі Всесвіту. Всесвіт як ціле вивчає окремий розділ астрономії — космологія. Моделі, за допомогою яких намагаються описати загальні закономірності еволюції Всесвіту як цілого, називають космологічними моделями. Відтоді, як Ісаак Ньютон створив теорію гравітації на підставі закону всесвітнього тяжіння, в астрономії панувала *теорія стаціонарного Всесвіту* — класична ньютонівська космологія. Вона спиралась на такі постулати: а) Всесвіт завжди був, є і буде стаціонарним, тобто незмінним (змінюватися можуть конкретні космічні системи, але не світ у цілому); б) простір і час абсолютні, метрично нескінченні, однорідні й ізотропні та не залежать від матеріальних об'єктів і процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Ньютонівська космологія приховує в собі два парадокси, пов'язані з постулатом нескінченності Всесвіту. Перший парадокс дістав назву *гравітаційного*. Суть гравітаційного парадоксу: якщо Всесвіт нескінченний і в ньому існує нескінченна кількість небесних тіл, то сила тяжіння буде нескінченно великою і Всесвіт має зазнати колапсу, а не існувати вічно. Другий парадокс називають *фотометричним*: якщо існує нескінченна кількість небесних тіл, то світність неба має бути нескінченною. Але ми такого явища не спостерігаємо.

Ще один парадокс — *термодинамічний* — пов'язаний із законами термодинаміки, відповідно до яких будь-яка система, що не обмінюється енергією з іншими системами (для Всесвіту в цілому такий обмін, очевидно, виключений), прагне до найбільш вірогідного рівноважного стану — до стану з максимумом ентропії, за якого теплота рівномірно розподілиться між усіма тілами. А що це означає для Всесвіту? Це означає його «теплову смерть». Всесвіт продовжуватиме своє існування, він не зникне, не перетвориться на ніщо, але всі термодинамічні процеси в ньому повністю припиняться. Висновок про теплову смерть Всесвіту сформулював Рудольф Клаузіус у 1865 р.

Розв'язати ці парадокси покликана сучасна космологія. Першу релятивістську космологічну модель Всесвіту розробив Альберт Ейнштейн у 1917 р. Він відкинув постулати ньютонівської космології про абсолютність і нескінченність простору і часу, а також застосував *космологічний принцип*, згідно з яким наш Всесвіт є однорідним та ізотропним. Поняття *однорідності* означає — вигляд Всесвіту в один і той самий момент часу не залежить від місця спостереження. Вивчаючи Всесвіт з будь-якої його точки в один і той самий момент часу, ви отримаєте однакові результати. А поняття *ізотропності* означає — властивості Всесвіту не залежать від напрямку, в якому його спостерігають. Усі напрямки у Всесвіті — рівноправні.

Потрібно зауважити, що на відносно невеликих масштабах (до 80 Мпк, або 260 млн св. р.) «нитки» та «стіни», утворені зі скупчень і надскупчень

галактик, що огортають велетенські порожнини — войди, є відхиленням від однорідності. Бо з різних точок цього об'єму картина ближнього Всесвіту буде дещо різною. Але як свідчать астрономічні спостереження: на великих масштабах (більших за 100 Мпк) однорідність розподілу матерії у Всесвіті й відсутність виділених напрямків виконуються з належною точністю.

Космологічну модель Всесвіту Альберт Ейнштейн розробив, спираючись на основне рівняння тяжіння, яке входить до створеної ним *загальної теорії відносності* (ЗТВ). Це рівняння пов'язує кривизну простору-часу з матерією — речовиною, що заповнює викривлений простір, який розглядають. Згідно із цією теорією, простір і час — величини взаємозалежні. Їх визначає розподіл гравітаційних мас у Всесвіті. А властивості Всесвіту як цілого зумовлені значенням середньої густини речовини та іншими фізичними параметрами. Тобто з рівнянь випливало, що Всесвіт не є стаціонарним, а має або стискатись, або розширюватись.

Альберт Ейнштейн ще передбачав, що викривлення простору-часу масивними об'єктами має породжувати гравітаційні хвилі, які поширюються зі швидкістю світла. Гравітація є найслабшою з-поміж чотирьох фундаментальних сил. Отже, тільки космічні явища колосальних масштабів, як-от зіткнення або взаємодія чорних дір, нейтронних зір або пульсарів, чи вибух наднової, — можуть стати джерелом відчутних для нас гравітаційних хвиль.

Перші докази існування гравітаційних хвиль (мал. 234, *а*) були отримані в 1974 р., коли в системі однієї з подвійних зір зареєстрували зменшення періоду обертання внаслідок втрати енергії через випромінювання гравітаційних хвиль. За це відкриття американські радіоастрономи Джозеф Тейлор і Расселл Халс у 1993 р. отримали Нобелівську премію.

Зареєструвати гравітаційні хвилі вчені змогли лише в 2016 р. завдяки лазерному інтерферометру гравітаційно-хвильової обсерваторії (LIGO) (мал. 234, *б*). За це відкриття Райнер Вайс, Беррі Беріш і Кіп Торн отримали Нобелівську премію 2017 р.



а



б

Мал. 234. Гравітаційні хвилі у Всесвіті:
а — моделювання процесу утворення гравітаційних хвиль;
б — установка для їх фіксації на Землі

Але на початку ХХ ст. ідеї Альберта Ейнштейна не узгоджувалися з відомими астрономічними спостережними даними. Для тодішніх астрономів простір не залежав від часу, а Всесвіт був нескінченним у часі й безмежним у просторі. Щоб отримати розв'язок свого рівняння для статичного й незмінного Всесвіту, Ейнштейн увів до нього безрозмірну космологічну сталу, яка мала протидіяти силам гравітації, тобто діяти у зворотному напрямку й запобігати стисканню.

Коли було з'ясовано, що основне рівняння тяжіння ЗТВ має не одне, а багато розв'язків, з'явилися інші космологічні моделі Всесвіту. У 1922 р. російський математик і геофізик Олександр Олександрович Фрідман (мал. 235) запропонував розв'язки рівняння тяжіння ЗТВ, з яких випливало кілька сценаріїв розвитку Всесвіту. Серед них був цікавий варіант, коли космологічна стала дорівнювала нулю. Тоді еволюція Всесвіту стає залежною від початкового значення густини речовини, а Всесвіт, заповнений масою, на яку діє сила тяжіння, не може бути статичним. Він має або розширюватися, або стискатися.



Мал. 235. Олександр Фрідман

Якщо середня густина речовини й випромінювання ρ_c у Всесвіті дорівнює або менша від деякої критичної величини ρ_k , ($\rho_c = \rho_k$, або $\rho_c < \rho_k$), то Всесвіт необмежено розширюється від початкового точкового стану (точки сингулярності). Якщо ρ_c більша за ρ_k , ($\rho_c > \rho_k$), то розширення Всесвіту на якомусь етапі зміниться на стискування, що триватиме аж до точки сингулярності. Нині, за різни-

ми оцінками, значення $\rho_k \sim (8-9,3) \cdot 10^{-30} \frac{\Gamma}{\text{см}^{-3}}$.

Космологічні моделі Всесвіту Фрідмана, як і його попередників, були за своєю суттю математичними моделями. Їх ще треба було перевірити на практиці, виконуючи астрономічні спостереження. І ці спостереження не забарились. У 1926 р. Едвін Габбл виявив факт розбігання галактик.

Становлення теорії Великого вибуху. У 1927 р. Жорж Леметр запропонував космологічну модель Всесвіту — теорію Великого вибуху, згідно з якою наш світ виник унаслідок вибуху надгустої матерії («первинного атома»). У 1948 р. одесит, а згодом американський фізик-теоретик і астрофізик Джордж (Георгій) Гамов припустив, що утворені під час періоду анігіляції фотони існують і донині, утворюючи космічний фон. Часто його називають реліктовим випромінюванням, оскільки воно насправді є реліктом ранньої епохи розвитку Всесвіту.

Коли в 1965 р. американські радіоастрономи Арно Пензіас і Роберт Вільсон зареєстрували реліктове випромінювання, це стало одним із доказів на користь теорії Великого вибуху.

Основні етапи еволюції Всесвіту згідно з теорією Великого вибуху. Хоча момент народження нашого Всесвіту називають Великим вибухом,

варто розуміти, що зі звичайним вибухом він не має нічого спільного. Звичайний вибух відбувається в певну мить у певному місці простору та іноді справді буває грандіозним. Проте до моменту Великого вибуху не було ані простору, ані часу. Простір і час виникли після Великого вибуху. Тобто наслідком цієї події стала поява Всесвіту, який почав розширюватися. А тому порівнювати подію народження Всесвіту зі звичайним вибухом не можна.

Сучасні астрономічні та фізичні уявлення не пояснюють однозначно того, що було до Великого вибуху або відразу після нього. Але відомі й перевірені на практиці закони фізики уможливають наукову екстраполяцію в минуле аж до моменту $t = 10^{-43}$ с від початку розширення.

Це так званий час Планка, що є гіпотетичною граничною природною одиницею вимірювання масштабу часу (квантом часу), яку ввів німецький фізик-теоретик Макс Планк. Подій у проміжку часу, що менший за час Планка, від $t = 0$ до $t = 10^{-43}$ с відомими нині законами фізики описати неможливо: вони в цьому часовому інтервалі просто не діють. Саме тому науковці не знають, що відбувалось у крихітну частку часу тривалістю 10^{-43} с, яка минула після Великого вибуху, тобто від часу $t = 0$.

Теоретичні розрахунки показують, що у віці 10^{-43} с Всесвіт був дуже малим ($l \approx 10^{-33}$ см) і мав величезну густину, але потім він зазнав розширення від дуже малих до неймовірно великих розмірів.

В економіці подібні процеси називають інфляцією, тому космологічну теорію, що описує перші миті існування Всесвіту, називають *інфляційною* теорією Великого вибуху. Її запропонував у 1980 р. американський вчений Алан Гут. Вона є вдосконаленою теорією Великого вибуху.

Початок інфляції було спричинено «хибним» вакуумом, або псевдовакуумом, — різновидом фізичного вакууму з від'ємним тиском (основними параметрами вакууму є енергія і тиск, залежно від цих параметрів вакуум може перебувати в різних енергетичних станах). Такий тиск створює силу відштовхування, що діє як *антигравітація*. Що вища енергія вакууму, то вищий тиск, а в разі псевдовакууму — відштовхування. Псевдовакуум — нестабільний і дуже швидко розпадається, перетворюючись на вакуум з низьким рівнем енергії. Вивільнена внаслідок розпаду енергія витрачається на утворення великої кількості елементарних частинок — кварків та антикварків, з яких уже через десятитисячну частку секунди утворились різні частинки, серед яких — протони й нейтрони та їхні античастинки. Інакше кажучи, з енергії виникає речовина, яка має високу температуру.

Далі розвиток Всесвіту відбувається так, як передбачає стандартна космологія Великого вибуху.

Після закінчення інфляції Всесвіт розширювався й охолоджувався. Ще через одну десятитисячну частку секунди за температури 10^{12} К відбулась анігіляція протонів з антипротонами й нейтронів з антинейтронами з утворенням фотонів. Та вочевидь від самого початку концентрація частинок перевищувала кількість античастинок приблизно на одну мільярдну

частку. Саме ці частинки стали будівельним матеріалом для світу речовини — галактик, зір, планет тощо. З фотонів, що утворилися під час анігіляції, значною мірою складається реліктове випромінювання. Через 1 с після Великого вибуху за температури 10^{10} К Всесвіт став прозорим для нейтрино, тоді як протони, нейтрони, електрони й позитрони були перемішані з фотонами. Через 3 с температура знизилася до $3 \cdot 10^9$ К, й електрони проанігілювали з позитронами, а ще через 3 хв за температури $3 \cdot 10^8$ К почалося утворення перших ізотопів і хімічних елементів — Дейтерію, Гелію, Літію.

У наступні 300 000 років помітних змін не відбувалося. Увесь цей час Всесвіт був непрозорим для світла, бо електрони, протони, ядра гелію і в значно меншій кількості ядра літію, з яких складалася первісна плазма, безперервно поглинали, випромінювали й розсіювали фотони, без можливості вільного поширення. Та врешті-решт, розширюючись далі, Всесвіт охолонув до температури близько 3000 К. Тоді енергія фотонів стала меншою від сили кулонівського притягання електронів і протонів, а відстані між частинками — достатньо великими для того, щоб фотони перестали розбивати щойно утворені нейтральні атоми водню та гелію. Зв'язані в атомах, частинки перестали заважати руху фотонів, і Всесвіт раптово став «прозорим» для випромінювання: світло відокремилося від речовини. Від цього моменту випромінювання вільно поширюється у Всесвіті, бо практично не взаємодіє з речовиною. З фізичної точки зору принципова різниця між видами матерії (речовиною й електромагнітним випромінюванням) полягає в тому, що швидкість елементарних частинок (електронів, протонів, нейтронів), з яких утворені зорі, планети і, нарешті, ми з вами, ніколи не може досягти швидкості світла, у той час як кванти електромагнітних хвиль ніколи не можуть мати швидкість, меншу від швидкості світла.

Отже, через 300 000 років після Великого вибуху панівною формою матерії у Всесвіті стає речовина (видима й невидима). Відтак починають швидко збільшуватися в розмірах неоднорідності речовини. Розвиток гравітаційної нестійкості в наступні мільйони років «змусив» речовину збиратися в окремі згустки — протогалактики, у яких приблизно через мільярд років після Великого вибуху почали утворюватися перші зорі.

Темна речовина і темна енергія. Перший доказ на користь існування темної матерії було отримано Фріцем Цвіккі в Каліфорнійському технологічному інституті 1933 р. Він досліджував скупчення галактик у сузір'ї Кома та отримав свідчення про існування невидимої маси. Цвіккі оцінив загальну масу скупчення на базі руху галактик поблизу її краю та порівняв її з видимою масою, оціненою за кількістю галактик і загальною яскравістю скупчення. Він виявив, що розрахована маса приблизно в 400 разів більша за візуально спостережувану. Маса видимих галактик у скупченні було занадто мало для пояснення їхніх орбітальних швидкостей. Цей факт відомий як «проблема прихованої маси». Цвіккі зробив висновок, що існує якась невидима форма матерії, яка забезпечує

достатню кількість маси, а отже, і гравітації, що не дає змоги скупченню розлітатись.

Згідно з нинішніми уявленнями, темна матерія відіграла особливу роль у формуванні великомасштабної структури Всесвіту. Якби темної матерії не було, то ця структура не змогла б виникнути. Ймовірно, спочатку виникли згустки темної матерії (їх називають гравітаційними ямами), а потім звичайна матерія скупчилась навколо них. Якщо темна матерія заповнює увесь Всесвіт, то це означає, що галактики існують не ізольовано, а в рамках колосальної мережевої структури, основою якої є темна матерія. Отже, галактики — скупчення звичайної матерії, розміщені у вузлових точках всесвітньої мережі з темної матерії. Галактики — це лише «піки» в концентрації речовини, розподіленої у Всесвіті.

Природа темної матерії досі не відома. Нині пошуки темної матерії виконують як прямими, так і непрямыми методами. Велика частка доказів існування темної матерії походить з вивчення галактик. Одним з ефектів, що виявляється під час вивчення галактик, є гравітаційне лінзування. Ще в ЗТВ Ейнштейна вказується, що масивне тіло своїм гравітаційним полем викривлює простір. За допомогою гравітаційного лінзування можна дослідити гравітаційний потенціал досліджуваного об'єкта. Так, було встановлено, що існують скупчення галактик — найбільш стабільні системи у Всесвіті. І вірогідно, що цю стабільність забезпечує маса, яка проявляє себе тільки в гравітаційній взаємодії — темна маса, або темна матерія.

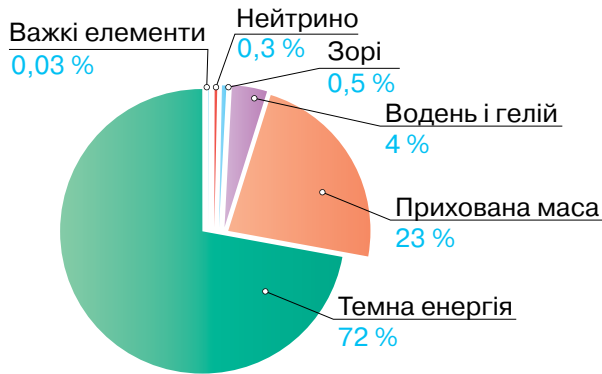
Невелика частина темної матерії може виявитися баріонною темною матерією астрономічних тіл, як-от масивні компактні об'єкти гало (планети, чорні діри, холодні зорі на кшталт коричневих карликів тощо), які складаються зі звичайної матерії, однак випромінюють мало або взагалі не випромінюють електромагнітного випромінення. Більшість темної матерії у Всесвіті — не баріонна. І вважається, що вона не взаємодіє зі звичайною речовиною завдяки електромагнітній взаємодії.

Згодом було виявлено, що Всесвіт на космологічних відстанях розширюється швидше, ніж це впливає із закону Габбла, тобто розширення Всесвіту відбувається з прискоренням. Оскільки звичайна гравітуюча речовина не може надавати галактикам додаткової швидкості, навпаки, вона сповільнює розліт, то з факту прискореного розширення випливає, що у Всесвіті є субстанція, спроможна діяти, як антигравітація і саме вона прискорює всі далекі об'єкти. Цю субстанцію назвали *темною енергією*. Природа темної енергії також достеменно не відома.

На сучасному етапі вік Всесвіту становить 13,7 млрд років. Його складниками є: 73 % — темна енергія, 23 % — невидима темна матерія (допоки не з'ясованої природи) і лише 4 % — видима речовина, яку можна реєструвати всіма можливими приладами, а також різні поля й випромінювання (мал. 236).

Подальша еволюція Всесвіту залежить від природи темної енергії. Розрізняють закриті й відкриті космологічні моделі.

«Закрита» модель. Припускають, що в майбутньому розширення Всесвіту зміниться його стисненням. Відштовхуючись від загальної маси



Мал. 236. Баланс речовини, темної матерії та темної енергії в нашому Всесвіті

Всесвіту 10^{52} т, можна припустити, що приблизно через 30 млрд років він почне стискатися, а через 50 млрд років знову повернеться в сингулярний стан, з якого він виник. Настане Великий хруст, який згодом перейде у новий Великий вибух. Повний цикл розширення і стиснення Всесвіту становить близько 100 млрд років. Таким чином, Всесвіт може бути представлений як грандіозна замкнута система, яка зазнає безлічі еволюційних циклів. За переходу від одного циклу до іншого деякі загальні параметри Всесвіту можуть бути змінені. Наприклад, можуть бути змінені фундаментальні фізичні константи.

Зовсім інакше постає майбутнє Всесвіту у «відкритих» космологічних моделях, які, по суті, є сценаріями «теплової смерті» Всесвіту.

Варіант 1. Прискорене розширення Всесвіту триватиме вічно. Відстані між скупченнями галактик ставатимуть дедалі більшими, порожнеча щораз глибошою, простір між ними — чимраз чорнішим. Зорі поступово витратять своє ядерне паливо, згаснуть і вже ніколи не засвітяться знову, бо газ, з якого вони утворюються, буде вичерпано. Залишаться тільки охолоділи колишні білі карлики, нейтронні зорі та чорні діри. Але і карлики, і нейтронні зорі також зникнуть, бо ті нейтрони й протони, з яких вони складаються, розпадутся. Приблизно через 10^{100} років чорні діри «випаруються» й перетворяться на випромінювання. Отак у Всесвіті зникне будь-яка структура й організація, лише необмежено довго триватиме розширення сукупності фотонів, нейтрино та вкрай розрідженого газу з електронів і позитронів, які ще залишилися. Усі «життєві сили» такого Всесвіту поступово виснажаться і замруть. Нескінченний простір, холод і темрява — ось неминучий фінал такого Всесвіту.

Варіант 2. Прискорене розширення ставатиме дедалі швидшим, і розвиток Всесвіту відбуватиметься за сценарієм, який називають «Великим розривом». Необмежене збільшення густини енергії спричинить катастрофічне зростання антигравітації, як наслідок — катастрофічне падіння гравітаційних сил і «розрив» об'єктів. Надскупчення розпадутся на

окремі галактики, галактики на окремі зорі, розірветься Сонячна система, далі планети, кожна молекула, кожний атом і навіть кожна елементарна частинка.

Проте допоки фізичну природу темної енергії ще тільки з'ясовують, усе це — тільки гіпотези. Відомо тільки, що темна енергія існує і створює антигравітацію.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗУМЮ

1. Поясніть суть космологічного принципу. **2.** У чому відмінність між класичною ньютонівською космологією та релятивістською космологічною моделлю Всесвіту А. Ейнштейна. **3.** Що таке космологічна модель Всесвіту? **4.** Поясніть, чи коректно порівнювати Великий вибух і вибух звичайний. **5.** Чому відомі закони фізики не можуть описати першу мить після Великого вибуху? **6.** Що таке реліктове випромінювання? **7.** Як виявляє себе у Всесвіті темна матерія; темна енергія?

§ 58

Життя у Всесвіті. Мультивсесвіт

Умови виникнення життя на Землі. Наш Всесвіт, що виник після Великого Вибуху, пройшов складний еволюційний шлях, аж поки в ньому не виникла найскладніша форма організації матерії — життя. Проблема походження життя на Землі є фундаментальною для сучасного природознавства. Багато є ще не з'ясованого, але головний постулат відомий: життя — явище космічне.

Пошуки життя за межами Землі. Знайти просте життя в межах Сонячної системи досі не вдалося, але шанси ще є. Якщо не на Марсі, то, можливо, в океані Європи — супутника Юпітера, чи на поверхні Титана — супутника Сатурна. Нині для дослідження цих тіл Сонячної системи з метою пошуку на них ознак життя готують спеціальні космічні місії.

У питанні життя за межами Землі є дві суттєві складові частини: перша — це пошук ознак життя як такого, а друга — реєстрація сигналів від позаземних цивілізацій або відправлення в космос повідомлень від землян у надії, що хтось їх зареєструє, розшифрує, а потім надішле відповідь. Ці стратегії науковці й ентузіасти пошуку позаземного життя реалізують у рамках наукових програм SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence, пошук позаземного розуму) і METI (Messaging to Extraterrestrial Intelligence, послання позаземним цивілізаціям).

Програма SETI вирішує суто наукове завдання реєстрації сигналу, його декодування й виділення з нього осмисленої інформації. Завдання

Детальніше про особливості виникнення життя на нашій планеті читайте в електронного додатку.

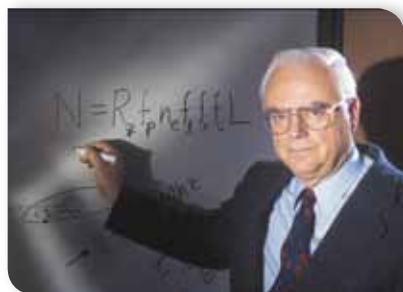


програми METI інше — скласти послання, яке будь-яка розвинена розумна істота не ототожнить із природним явищем, а сприйме як послання від іншої розумної істоти.

Загалом інтерес до контакту між земною і позаземними цивілізаціями виник наприкінці 50-х років минулого століття (мал. 237). Тоді з'явилося кілька наукових публікацій, у яких автори розглядали різні способи такого зв'язку. У 1961 р. в Національній радіоастрономічній обсерваторії США відбулася перша конференція з питань контактів з позаземними цивілізаціями. На ній професор астрономії й астрофізики Каліфорнійського університету Santa Cruz Френк Дрейк запропонував рівняння (тепер його називають формулою Дрейка) оцінки кількості цивілізацій у нашої Галактиці, з якими ми потенційно можемо сконтактуватися:

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L,$$

де N — кількість позаземних цивілізацій нашої Галактики, готових вступити в контакт; R — кількість зір, які щорічно виникають у Галактиці; f_p — частка зір, що мають планети; n_e — середня кількість планет у зір, які мають відповідні для життя умови; f_l — ймовірність зародження життя на планеті з відповідними умовами; f_i — ймовірність появи розумного життя на планеті; f_c — відношення планет, розумні мешканці яких здатні до контакту й шукають його, до кількості планет, на яких існує розумне життя; L — час існування високорозвинутої, готової до контакту цивілізації.



а



б



в

Мал. 237. а — Ф. Дрейк і його формула; б — послання Аресибо; в — «золоті пластинки» з посланнями від землян

Проте оцінка кількості потенційних цивілізацій у Галактиці досі лишається складним завданням. Хоча після відкриття екзопланет, яких на 2017 р. відомо вже понад 3600, погляди прихильників існування життя у Всесвіті зміцнилися.

З 1999 р. пошук сигналів з космосу може виконувати кожний власник персонального комп'ютера. Для цього треба приєднатися до проєкту SETI@home, започаткованого астрономами Каліфорнійського університету. Він став одним з перших проєктів, які згодом почали позначати терміном *громадська наука*. Суть його полягає в тому, що для опрацювання великої кількості даних, отриманих, наприклад, з астрономічних

спостережень, у професійних астрономів не вистачає ресурсів (здебільшого часу й людей). Тому стало вже звичним залучати добровольців до обробки результатів спостережень за принципом розподілених обчислень (коли один комп'ютер опрацьовує якусь окрему частину з великого масиву даних).

Перше радіопослання землян до позаземних цивілізацій було відправлене 1974 р. за допомогою 300-метрової антени радіотелескопа в Аресибо. Сигнал спрямували в бік кулястого скупчення М 13, що лежить на відстані 7670 пк (25 тис. св. р.) від Землі. Закодований сигнал містить базові відомості про людину, Землю та Сонячну систему. У кінці літа 1977 р. агентство НАСА запустило два міжзор'яні дослідницькі зонди Вояджер-1 і Вояджер-2. На кожному установили «золоту пластинку» з набором зображень і звуків, що дають уявлення про життя на Землі. У Космос спрямовували сигнали (вони містили малюнки, світлини, фрагменти музичних творів тощо) ще кілька разів. Для цієї мети використовували й 70-метровий радіотелескоп, розміщений поблизу м. Феодосія в Криму.

Але всі намагання зареєструвати сигнал від позаземних цивілізацій досі не досягли успіху. Це наводить на роздуми як щодо існування життя за межами Землі, так і щодо методів і засобів пошуку сигналів. Одні науковці вважають, що в питанні міжзор'яного зв'язку треба мінімізувати властивий людині антропоцентризм і спиратися на максимально простий математичний апарат. Інші застерігають землян: не варто сигналізувати в Космос, адже невідомо, хто відгукнеться. Однак проти таких поглядів є вагомий аргумент: з початком радіо- і телетрансляцій Земля випромінює радіосигнали в космос, які легко може зареєструвати розвинена цивілізація, що перебуває на відстані до 30 пк (100 св. р.) від нашої планети.

У питаннях пошуку зв'язків з іншими цивілізаціями існує так званий парадокс Фермі, суть якого зводиться до запитання: «Якщо навіть у нашій Галактиці дуже багато розвинених цивілізацій, то чому ми із Землі не спостерігаємо видимих слідів їхньої діяльності, адже за мільярди років існування вони мали б розселитися по всій Галактиці».

Отже, Космос мовчить, наші сучасні засоби астрономічних спостережень не реєструють у Всесвіті виявів діяльності високорозвинених цивілізацій і доказів відвідин іншопланетянами Землі. Знайти пояснення цьому факту не вдається. Гіпотез існує багато, але жодна з них досі не стала теорією.

Антропний принцип. У 1973 р. на симпозиумі, присвяченому 500-річчю від народження Коперника, астрофізик Брендон Картер виступив з доповіддю про те, що незвичний збіг значень низки (до 30) незалежних одна від одної фізичних сталих не випадковий. Він уможливорює утворення складних структур різних масштабів — від вірусів і бактерій до галактичних скупчень. Картер висловив припущення: існування людства свідчить про те, що закони Всесвіту цьому сприяють, і назвав свою ідею антропним принципом (від грец. *anthropos* — людина).

Картер сформулював антропний принцип так: «Очікувані результати спостережень мають бути обмежені умовами, які потрібні для нашого існування як спостерігачів». Це означає, що закони природи в певному сенсі спеціально обрані так, щоб допустити наше існування.

Питання існування інших всесвітів. Досі багато науковців скептично ставляться до антропного принципу, а деякі з них вважають, що уявлення про важливість тонкого налаштування фізичних констант у нашому Всесвіті дуже перебільшені. Однак антропний принцип знайшов пояснення в рамках ідеї про Мультиверсум (мультивсесвіт), тобто про існування величезної кількості всесвітів, окремі з яких випадково є придатними для життя.

Ідея мультиверсуму виникла як результат вдосконалення інфляційної моделі виникнення Всесвіту. Виявилося, інфляція є одвічним явищем. Вона відбувається повсякчас і повсюди. Безупинно виникають окремі ділянки інфляційного розширення, спричиненого розпадом псевдовакууму. Деякі з них породжують окремі всесвіти. Ми якраз живемо в одному з таких всесвітів. Вічна інфляція породжує велику кількість всесвітів з усіма можливими значеннями базових фізичних сталих.

Проте і це питання взаємодії окремих всесвітів, їх співіснування та розміщення поки що лишається відкритим.



ЗНАЮ, ВМЮ, РОЗЦМЮ

1. Поясніть відмінності між програмами SETI й METI. **2.** У чому полягає парадокс Фермі? **3.** Поясніть суть антропного принципу. У рамках якої ідеї і як саме було пояснено антропний принцип? **4.** Яке явище спричиняє появу великої кількості всесвітів?



Виконємо навчальні проекти

- ▶ З історії вивчення Галактики.
- ▶ Історія відкриття квазарів.
- ▶ Послання позаземним цивілізаціям.
- ▶ Міжзор'яні польоти й можливі контакти між цивілізаціями.
- ▶ Пошуки життя за межами Землі.



Перевірте себе (§ 50–58)



- Укажіть правильний варіант пояснення грануляції у фотосфері Сонця.
 - наявність хвильових процесів на поверхні Сонця
 - конвекційне перенесення енергії
 - дуже холодні плями
 - випромінювання нейтрино
- Що спонукає частинки сонячного вітру покинути Сонце і прискорено рухатися проти його сили тяжіння в міжпланетний простір?
 - сила газового і світлового тиску у високотемпературній короні
 - темна енергія
 - антигравітація
 - сила гравітації ядра Галактики
- Зорі якого кольору мають на поверхні найвищу температуру?
 - блакитні
 - білі
 - жовті
 - червоні
- Які зорі світять довше за інші?
 - гіганти спектрального класу O
 - білі зорі спектрального класу A
 - червоні гіганти спектрального класу M
 - червоні карлики спектрального класу M
- Який космічний об'єкт називають пульсаром?
 - червоний гігант
 - нейтронну зорю
 - білий карлик
 - пульсуючу зорю
- На що може перетворитись у майбутньому зоря, яка має масу, більшу за дві маси Сонця?
 - на чорну діру
 - на нейтронну зорю
 - на пульсар
 - на білого карлика
- На скільки тонн щосекунди зменшується маса Сонця, якщо в простір випромінюється $E = 3,88 \cdot 10^{26}$ Дж світлової енергії?
 - на чорну діру
 - на нейтронну зорю
 - на пульсар
 - на білого карлика
- На диску Сонця видно три групи плям: у першій — дві плями, у другій — три й у третій — чотири плями. Є ще дві поодинокі плями. Визначте число Вольфа.
 - на чорну діру
 - на нейтронну зорю
 - на пульсар
 - на білого карлика
- Деяка зоря має температуру поверхні $T = 4T_{\odot}$, а її світність $L = 1024 L_{\odot}$. Який радіус R зорі порівняно із радіусом Сонця?
 - на чорну діру
 - на нейтронну зорю
 - на пульсар
 - на білого карлика
- Як відрізнити далекі галактики від зір нашої Галактики, що розміщені в тому самому напрямку, в якому видно галактики?
 - на чорну діру
 - на нейтронну зорю
 - на пульсар
 - на білого карлика



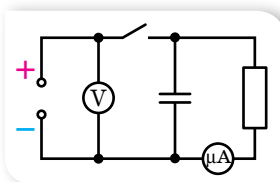
ПРАКТИКУМ

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

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

Вказівки щодо виконання роботи

1. Складіть електричне коло за схемою (мал. 238).
2. Замкнувши коло, зарядіть конденсатор до напруги джерела U .
3. Розімкніть коло. Вимірюйте силу струму в колі в різні моменти часу в процесі розрядження конденсатора через резистор і мікроамперметр.
4. Побудуйте графік залежності сили струму в колі від часу й обчисліть площу фігури, обмеженої осями та графіком залежності. Ця площа відповідатиме заряду q , який пройшов через мікроамперметр за час розрядження конденсатора.
5. Обчисліть електроємність конденсатора як відношення заряду q конденсатора до напруги U на його обкладках.



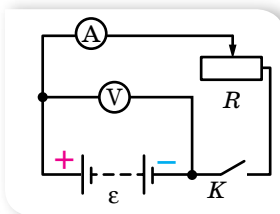
Мал. 238

ВИМІРЮВАННЯ ЕРС І ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

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

Вказівки щодо виконання роботи

1. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на малюнку 239.
2. Запишіть покази вольтметра при розімкненому вимикачі K . Ця напруга приблизно дорівнює ЕРС джерела за умови, що опір вольтметра значно перевищує внутрішній опір джерела.
3. Замкніть коло й реостатом відрегулюйте силу струму так, щоб відлік амперметра дорівнював цілому числу поділок.
4. Запишіть значення сили струму I й напруги на зовнішній ділянці кола U .
5. Обчисліть напругу на внутрішній ділянці кола $U_{\text{в}} = \varepsilon - U$.
6. Визначте внутрішній опір джерела струму за формулою $r = \frac{U_{\text{в}}}{I}$.
7. Змінюючи положення повзунка реостата, повторіть дослід тричі. Виконайте обчислення. Визначте середнє значення внутрішнього опору джерела струму.



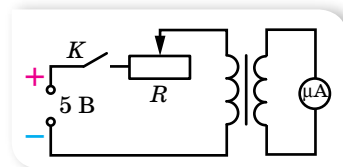
Мал. 239

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

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

Вказівки щодо виконання роботи

1. Приєднайте котушку з 1200 витків до гальванометра. Швидко вставте магніт у котушку, спостерігаючи одночасно за показами приладу. Залишіть магніт у котушці та спостерігайте за стрілкою приладу. Потім швидко витягніть магніт з котушки, спостерігаючи за показами гальванометра. Зробіть висновок.
2. Повільно вставте в котушку, яка замкнена на гальванометр, або витягніть з неї два магніти, складені однойменними полюсами. Повторіть дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясуйте, в яких випадках сила індукційного струму більша та як змінюється напрямок струму під час досліду.
3. Повторіть досліди, рухаючи котушку відносно нерухомого магніту. Зробіть висновок.
4. Послідовно з гальванометром приєднайте ще й реостат і приблизно з однаковою швидкістю вставляйте в котушку (або витягуйте з неї) магніт. При цьому реостат спочатку введіть на нуль ($R = 0$), а в іншому досліді введіть повністю ($R = 10$ Ом). Зафіксуйте покази гальванометра й зробіть висновок.
5. Складіть електричне коло за схемою (мал. 240).
6. Використовуючи ключ, замкніть і розімкніть коло, зафіксуйте напрямок відхилення стрілки гальванометра. За напрямком відхилення стрілки визначте напрямок індукційного струму, напрямок індукції магнітного поля цього струму, а за полярністю джерела струму — напрямком струму в первинній котушці та напрямком індукції магнітного поля цього струму. Поясніть, який напрямок має індукційний струм порівняно з індукуючим під час замикання й розмикання індукуючого струму, а також під час збільшення та зменшення індукуючого струму. Перевірте виконання в цих дослідах правила Ленца.
7. Використовуючи те само коло, повністю введіть реостат, замкніть коло й за допомогою реостата швидко збільшуйте й зменшуйте опір кола. Зафіксуйте максимальне відхилення стрілки гальванометра в момент замикання кола, під час швидкого та повільного зменшення опору кола. Зробіть висновок про значення ЕРС індукції в цих дослідах.
8. Вставте й вийміть з обох котушок сталеве осердя. Увесь час спостерігайте за показами гальванометра.



Мал. 240

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ НИТЯНОГО МАЯТНИКА

Обладнання: нитяний маятник зі змінною довжиною нитки, масштабна лінійка, годинник.

Вказівки щодо виконання роботи

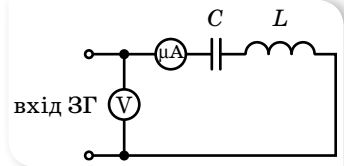
1. Виміряйте l — довжину маятника.
2. Відхиліть маятник на малий кут (5° – 10°) і визначте час 10 повних коливань t . Визначте період коливань T . Вимірювання повторіть тричі за різних значень l .
3. За формулою періоду коливань нитяного маятника визначте значення g .

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Обладнання: генератор звуковий шкільний або лабораторний, міліамперметр, вольтметр змінного струму, конденсатор паперовий 6 мкФ, котушка розбірного електромагніту, комплект з'єднувальних провідників.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Складіть електричне коло за схемою, зображеною на малюнку 241. Увімкнувши звуковий генератор, установіть на його виході напругу 5 В. Змінюючи частоту змінної напруги від 200 до 3000 Гц із кроком 20 Гц, зніміть покази міліамперметра (I_1), підтримуючи напругу на виході генератора незмінною. Результати вимірювань запишіть у таблицю.
2. Побудуйте графік залежності сили струму в контурі від частоти та визначте резонансну частоту ν_0 контура.
3. З'єднайте послідовно з котушкою індуктивності та конденсатором резистор з електричним опором 10–30 Ом. Установіть напругу на виході генератора 5 В і виконайте вимірювання сили струму (I_2), описані в пункті 1.
4. За новими результатами вимірювань побудуйте резонансну криву на тому самому аркуші, на якому побудували першу криву, і поясніть відмінність між кривими.



Мал. 241

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ

Обладнання: електрична лампа з прямою ниткою розжарювання, вимірювальна установка з лінійкою 1 мм/под. та екраном з поділками, дифракційна ґратка (1/100).

Вказівки щодо виконання роботи

1. Визначте період дифракційної ґратки d за формулою $d = \frac{1}{N}$ (мм), де $N = 100$.
2. Помістіть дифракційну ґратку в рамку приладу й зафіксуйте його в підставці.
3. Дивлячись крізь дифракційну ґратку, спрямуйте прилад так, щоб джерело світла було видно крізь вузьку прицільну щілину. Водночас по обидва боки екрана на лінійці видно дифракційні спектри кількох порядків. (У випадку похилого розташування спектрів поверніть ґратку на певний кут до усунення перекосу.)
4. За шкалою визначте положення середин кольорових смуг l у спектрах першого порядку. Вимірювання l проведіть для смуг одного кольору ліворуч і праворуч та визначте середні значення відстаней. Результати запишіть у таблицю.
5. Визначте за допомогою лінійки відстань L від дифракційної ґратки до шкали рухомого екрана.
6. Обчисліть довжини світлових хвиль $\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}$ для семи кольорів і запишіть їх у таблицю.
7. Повторіть вимірювання з іншою відстанню екрана від ґратки та для інших дифракційних порядків. Порівняйте отримані результати.
8. Спрямуйте на дифракційну ґратку промінь монохроматичного світла від лазерної указки. Отримайте дифракційну картину. Запишіть у зошиті, чим відрізняється ця картина від попередньої. Проведіть вимірювання аналогічно до попередніх завдань і визначте довжину хвилі лазерного випромінювання.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНОГО Й ЛІНІЙЧАТОГО СПЕКТРІВ РЕЧОВИНИ

Обладнання: спектроскоп двотрубний з відліковим мікрометричним гвинтом, трубки спектральні, прилад для засвічування спектральних трубок «Спектр», джерело електроживлення для практикуму ІВП-І, ключ, комплект з'єднувальних провідників, дротина зі жмутком вати на підставці, колба зі спиртом, сіль кухонна, сірники.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Вставте 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 підведіть упритул до спектральної трубки й увімкніть струм.
2. Спостерігаючи крізь окуляр зорової труби й обертаючи мікрометричний гвинт, поступово побачте всі спектральні лінії гелію. Перемищаючи окуляр, отримайте чітке їх зображення.
3. Мікрометричним гвинтом поверніть зорову трубу вправо так, щоб у полі зору з'явилася крайня червона спектральна лінія. Сумістіть зображення вертикальної нитки з цією лінією і запишіть покази мікрометра в таблицю. Мікрометричний гвинт має крок 1 мм, а головку його поділено на 50 рівних частин, отже, ціна поділки на головці — 0,02 мм. Цілі міліметри відлічуйте за нерухомою шкалою на циліндрі, а частки соті — за шкалою на головці гвинта.
4. Обертаючи мікрометричний гвинт, пересувайте зорову трубу до суміщення нитки з кожною з наступних спектральних ліній. Для кожної лінії запишіть відлік мікрометра в таблицю проти зазначених довжин хвиль гелію, взятих з довідника.
5. За записами відліків мікрометричного гвинта й довжинами хвиль, які відповідають цим відлікам, побудуйте криву. Для цього вздовж осі абсцис відкладайте показання мікрометра, а вздовж осі ординат — довжину світлових хвиль, узявши відповідний масштаб. Через знайдені точки проведіть плавну криву.
6. Змочіть шматочок вати, намотаний на дротину, і закріпіть його за допомогою підставки на висоті щілини коліматора. Підпаліть вату і спостерігайте слабкий суцільний спектр. Обсипте вату, на якій горить спирт, дрібною кухонною сіллю і спостерігайте появу на тлі суцільного спектра яскравої жовтої лінії пари натрію. Сумістіть з нею нитку й запишіть показання мікрометричного гвинта. Користуючись побудованою кривою, визначте довжину хвилі жовтої лінії натрію.

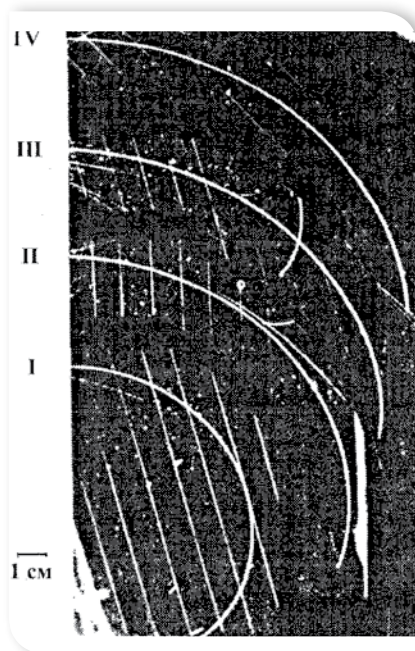
ВИВЧЕННЯ ТРЕКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗА ГОТОВИМИ ФОТОГРАФІЯМИ

Обладнання: фотографії треків заряджених частинок, трикутник або лінійка із ціною поділки 1 мм, циркуль, аркуш прозорого паперу, олівець.

Вказівки щодо виконання роботи

1. Розгляньте фотографії треків (мал. 242, с. 206). Трек I належить протону, треки II, III і IV — частинкам, які потрібно ідентифікувати. Вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини фотографії й дорівнює 2,17 Тл. Початкові швидкості всіх частинок однакові й перпендикулярні до напрямку магнітного поля.
2. Накладіть на фотографію аркуш прозорого паперу й перенесіть на нього треки.

3. Для кожного треку проведіть дві хорди та в їхніх серединах поставте перпендикуляри. На перетині перпендикулярів лежать центри кіл.
4. Виміряйте радіуси кривизни треків частинок, перенесених на папір, на початкових ділянках. Поясніть, чому траєкторії частинок є дугами кіл. Яка причина відмінностей у кривизні траєкторій різних ядер? Пояснення запишіть у зошит.
5. Виміряйте радіуси кривизни на початку і в кінці одного з треків. Поясніть, чому кривизна траєкторії кожної частинки змінюється від початку до кінця пробігу частинки.
6. Поясніть причини відмінності в товщині треків різних ядер. Чому трек кожної частинки товстіший у кінці пробігу, ніж на початку? Пояснення запишіть у зошит.
7. Порівняйте питомі заряди $\frac{q}{m}$ частинки III і протона I, знаючи, що початкові швидкості частинки і протона — однакові. Відношення питомих зарядів частинок обернене до відношення радіусів їхніх траєкторій, оскільки $\frac{q}{m} = \frac{v}{B \cdot R}$.
8. Ідентифікуйте частинку III за наслідками дослідження.
9. Інші треки належать ядрам Дейтерію та Тритію. З'ясуйте, якому саме ядру належить трек II, а якому — трек IV.



Мал. 242

Відповіді

Вправа 1

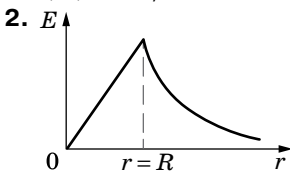
- Збільшилася в 1,8 раза;
зменшилася в 1,25 раза.
- $\frac{q^2}{\pi \epsilon_0 a^2}$.
- $3,5 \cdot 10^{-3}$ Н.
- 0,12 м.
-

Вправа 2

- На прямій, яка з'єднує заряди, на відстані $1/3a$ від меншого і $2/3a$ від більшого; на тій самій прямій на відстані a від меншого і $2a$ від більшого.
- 70 кВ/м; 10 кВ/м; 50 кВ/м; 50 кВ/м.
- $\frac{3q}{2\pi \epsilon_0 a^2}$.
- $E_1 = E_2 = 2,8 \cdot 10^4$ Н/Кл.
- На 7° .
- 3° .
- $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^2 - \left(\frac{qE}{m}\right)^2}} = 1,56$ с.

Вправа 3

- 0; 0; 245 Н/Кл.



- $E = 0$.
- 3,4 Н/м.
-
- $R = 2,5$ м; $E = 113$ кВ/м; в 1,1 раза.
- Так. $d = 4,5$ мм.

Вправа 4

- $5,3 \cdot 10^8$ м/с²; $2 \cdot 10^4$ м/с; $0,4 \cdot 10^{-5}$ с.
- 6 см.
- 113 мкДж.
- 1,2 мкДж.
- $A = \frac{q_3(q_2 - q_1)}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2} = 0,3$ мДж.

Вправа 5

- 0,1 м; $2,6 \cdot 10^{-8}$ Кл; 1,8 кВ.
- 65 В.
- а) ± 6 кВ; б) 0; в) $\pm 4,2$ кВ.
- 3,5 кВ.
- $8,4 \cdot 10^6$ м/с.

Вправа 6

- $1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл; $1,8 \cdot 10^{-7}$ Кл.
- $12 \cdot 10^{-4}$ Кл; 120 В; 60 В; 40 В.
-
- $C_1 = \frac{C_2 U_2}{U_1 + U_2} = 1$ мкФ.
- 6.
- Від 10 до 170 нФ для паралельного з'єднання та від 2,23 до 3,27 нФ — для послідовного.
- 93 мДж/м³.
- 36 Дж; 15 кВт.
- $1,44 \cdot 10^{-5}$ Дж.
- $\epsilon = \frac{CU^2 + 2\Delta W}{CU^2 - 2\Delta W} \approx 1,7$.
- 705 нДж; 293 нДж.
- $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Вправа 7

- 4,5 В; 1 Ом.
- 6 Ом, 33 %, 67 %.
- $q = C\epsilon \frac{R_2}{R_2 + r}$.
- $q = C\epsilon \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$; $q = C\epsilon$.

Вправа 8

- а) 0,6 Ом; б) 2 Ом; в) 1,3 Ом; г) 1 Ом; д) 1,4 Ом; е) 1,8 Ом; ж) 0,5 Ом.
- 3 А.
- $\approx 1,1$ А.
- $I_1 = I_2 = 0,44$ А; $I_3 = 0,88$ А; $I_4 = 2,75$ А; $I_5 = 2,18$ А; $I_6 = 1,45$ А; $I_7 = 3,63$ А.
- $I_1 = 1,25$ А; $I_2 = 0,25$ А; $I_3 = 1,5$ А.
- 6,7 Ом.
- $I = 0,04$ А; $I_1 = 0$; $I_2 = 0,04$ А.
- $I = 1$ А; $I_1 = 0,6$ А; $I_2 = I_4 = 0,5$ А; $I_3 = 0,4$ А; $I_5 = 0,1$ А.
-
- $U = 20$ В; $I = 2$ А; $r = 2$ Ом; $P = 40$ Вт; $\Delta P = 8$ Вт; $P_{\text{пов}} = 48$ Вт.

Вправа 9

$$1. \alpha = \frac{R_1 - 1}{R_2} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1};$$

$$t_1 - t_2 \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{U^2}{10P} \approx 14,4 \text{ Ом.}$$

2. 19,2 м.

3. $l_1 \approx 43,6 l_2$.

$$4. \Delta R = \frac{2\alpha \rho_0 l_0 t}{S}; \Delta R' = \frac{2\rho_0 l_0 t}{S} (\alpha + \beta).$$

Вправа 10

1. 6,1 год; 5,3 Вт · год.

2. 0,054 кг.

3. 20 Вт.

4. 1,3 Ом.

5. 297 К.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. В; 2. Б; 3. Г; 4. Г; 5. А; 6. Б; 7. В;

8. 18 кДж; 9. $2,09 \cdot 10^{-2}$ кг, 0,23 м³;

10. 3,1 Ом.

Вправа 11

$$1. B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{I_1}{l+s} + \frac{I_2}{s} \right].$$

2. 58 А.

3. 66,6 мкТл.

4. $5,5 \cdot 10^{-5}$ Тл.5. $2 \cdot 10^{-3}$ Н; $8 \cdot 10^{-3}$ Н; $6 \cdot 10^{-3}$ Н.**Вправа 12**

1. 20 мТл.

$$2. B = \frac{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}{I \cdot l}.$$

3. 0,04 Тл.

4. 0,1 Н · м.

5. $9,3 \cdot 10^{-24}$ А · м².6. $6,3 \cdot 10^{-13}$ Н; 3,1 мм.

$$7. \frac{R_n}{R_e} = \frac{m_n}{m_e}.$$

8. $6 \cdot 10^3$ м/с; $6 \cdot 10^{-7}$ Тл; 0,18 м.9. $7,6 \cdot 10^6$ м/с.

10. 1000 км/с.

Вправа 131. а) 0,5 А; б) 0,7 А; в) 0,3 А,
ліворуч зі швидкістю 10 м/с.

$$2. I = \frac{Bvl}{r+R} = 0,1 \text{ А}; F = \frac{B^2 vl^2}{r+R} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Н};$$

$$P = \frac{B^2 v^2 l^2}{r+R} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт.}$$

$$3. q = BvlC = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$W = \frac{B^2 v^2 l^2 C}{2} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Дж.}$$

Вправа 14

1. 2 мТл.

2. 0,1 А.

3. 120 Дж, зменшаться в 4 рази.

4. 2,5 Дж.

5. 6,4 Дж.

6. 2500 В.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Г; 2. В; 3. Б; 4. Б; 5. Г; 6. В; 7. А;

8. 0,5 Тл; 9. 0,1 Тл; 10. $4 \cdot 10^{-16}$ Н.**Вправа 15**

1. 1,4 см; -1,4 см.

2. $x = 0,1 \sin 5\pi t$; 1,36 м/с.

$$3. x = 0,2 \cos \frac{\pi}{2} t.$$

$$4. x = 5 \cdot 10^{-2} \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{6} \right) \text{ (м).}$$

$$5. v_x = -\pi \sin 20\pi t; a_x = -20\pi^2 \cos 20\pi t;$$

$$0,25 \text{ м}; -2,7 \text{ м/с}; -100 \text{ м/с}^2.$$

$$6. \text{ а) } x = 5,5 \cdot 10^{-2} \cos \left(\frac{\pi}{3} t + \frac{\pi}{6} \right);$$

$$\text{ б) } x = 0,1 \cos 20\pi t.$$

$$7. x = 0,2 \cos \frac{\pi}{2} t.$$

8. 35 мм; 0.

Вправа 16

1. 2,8 Дж; 3,8 м/с.

2. 150 мДж; 50 мДж.

$$3. \frac{T}{8}; \frac{3T}{8}; \frac{5T}{8}; \frac{7T}{8}.$$

$$4. x = 0,1 \cos 10\pi t; F = -10 \cos 10t;$$

$$10 \text{ Н}; -5 \text{ Н.}$$

$$5. x = 4 \cdot 10^{-2} \sin \left(\pi t + \frac{\pi}{3} \right).$$

6. 0,314 с.

Вправа 17

- 2 с; 0,5 Гц; $\pi \text{ с}^{-1}$.
- 9:1.
- 18 см; 50 см.
- Відставатимуть у всіх випадках.
- Зменшиться у 2 рази.
- 2,5 с.
- 9,81 м/с².

Вправа 18

- $q = 10^{-4} \cos 500t$; $i = -0,05 \sin 500t$;
 $u = 100 \cos 500t$; 50 мА; 100 В.
- $4\pi \cdot 10^{-5} \text{ с}$; 2 мкКл; 0,5 В (на кожному конденсаторі).
- $i = U_m \sqrt{\frac{3C}{4L}}$.
-
- $Q = \frac{3}{8} CU_m^2 = 0,6 \text{ Дж}$.
- 120 мкДж; 40 мкДж.

Вправа 19

- $e = 0,1\pi \sin 10\pi t$; нормаль до площини рамки паралельна лініям індукції; 5 с⁻¹; 0,01 Вб; 0,314 В.
- $\Phi = BS \cos \omega t = 0,08 \cos 50t$;
 $e = BS\omega \sin \omega t = 0,4 \sin 50t$.
- 50 В; 0,4 с; 2,5 Гц; $e = 50 \cos 5\pi t$.
- 100 Гц; 10 мс; 5 А; 2,5 А.
- 100 В; 0; -200 В.
- Половину.

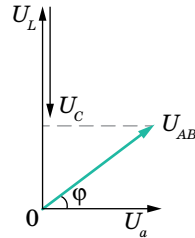
Вправа 20

- 26,4 мкФ; 130 В.
- 4,6 мА; 73,4 В; 146,6 В.
- 72,5 %; 68,5 %.
- 3,74 мкФ.
- Не менше ніж 319 В.
- $i = 1,38 \sin 314t$; напруга відстає від струму за фазою на $\pi/2$;
 $q = -4,4 \cdot 10^{-3} \cos 314t$.
- 0,13 Гн; 30 Вт; 11 Вт.
- 4,1 Ом.
- 300 Гц.
- 74 %; 68 %.

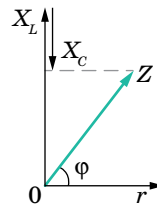
Вправа 21

- 1,34 А; 121 В; 134 В; 295 В.
- 156 В.
- 130 В; 26 Ом; 5 А.
- 12,7 мГн.

5. 5 Ом;



6. 50 В;

**Вправа 22**

- 95 %.
- 880; 144; 6, 11.
- 124 Вт.
- 9,6 мм².
- 1,5 А.
- 120 кВ.
- $e = \sin 314t$; 222 В.

Вправа 23

- Збільшити в 9 разів.
- 18 км; 8300 с⁻¹.
- 9000; 225 м.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- А; 2. А; 3. А; 4. А; 5. А; 6. Б; 7. 10 мА;
- $e = 4,71 \sin (157t)$; 4,71 В; 3,33 В; 0,04 с;
- 25 Гц; 9. 2 мкФ; 10. 5,6 А.

Вправа 24

- 0,3 м.
- $8 \cdot 10^4 \text{ лк}$.
- Стане в 3 рази більшим.
- 60°.
- 12 лк.
- 173 кД.
- $15 \cdot 10^3 \text{ лм}$.
- 30 лк.
- На відстані 1,4 м від лампи в 100 кД.
- 50 см.

Вправа 25

- $\Delta = S_1O - SO = 0$.
- 2,4 мм.
- 600 нм.
- Відстань між максимумами освітленості a , b , v збільшується.

Вправа 26

- $1,9 \cdot 10^{-3}$ м.
- 295 нм.
- Чорною; плівка буде здаватись то жовтою, то чорною.
- $5,13 \cdot 10^{-5}$ рад.
- $k = 5$; $k + 1 = 6$; $\lambda = 0,5$ мкм.
- 1,5 мкм.
- 675 нм.
- 1,56.

Вправа 27

- $1,5^\circ$.
- 0,17 мкм.
- 5 мкм.
- 3,9 мкм.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

- Б; 2. А; 3. В; 4. Б; 5. Б; 6. В; 7. Збільшиться в 1,4 раза; 8. Освітленість вертикального майданчика більша в 5,7 раза.
- 0,13 мкм; 10. 2; 3.

Вправа 28

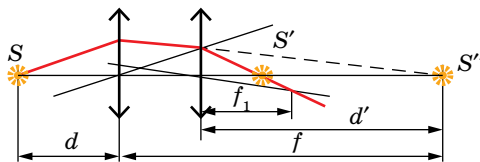
- 3,9 м.
- 97 см.
- 64° .
- $d = 2l \sin \varphi$. Зображення монети повернеться на кут 2φ навколо ребра двогранного кута, залишаючись на тій же відстані від нього.
- 0,6 м.
- 0,45 м.

Вправа 29

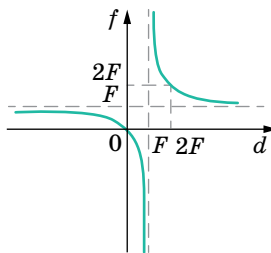
- $6 \cdot 10^{-2}$ м.
- 1,2 см; 1 см.
- На 1,6 см.
- Не може.
- Відбудеться.
- 39° .
- 56° .
- а) на 13° униз; б) на 20° угору.
- $39^\circ 52'$.
- 0,026 рад.
- 1,3.
- $\pi/4$.

Вправа 30

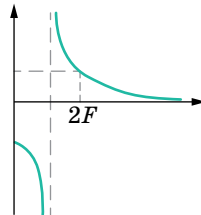
- 0,78 м.
- $F = 2/9 L = 20$ см.
-
- 2,25 см.



- 60 см.
- $F = \frac{F_1 F_2 F_3}{F_1 F_2 + F_2 F_3 + F_1 F_3} \approx 5,5$ см.
- 0,5 см.
- 562.
- 9.



- а) $k = \frac{F}{d - F}$; б) $|k| = \frac{F}{F - d}$.

**ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ**

- Г; 2. Б; 3. В; 4. Б; 5. В; 6. Б; 7. В;
- 2,9 м; 9. 1,7 м; 10. 82° .

Вправа 31

- $0,73 \cdot 10^{-10}$ м.
- $2,6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $5 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- Рентгенівські; видимі; радіохвилі.
- 0,3 мкм.
- $2,4 \cdot 10^{-12}$ м; $1,2 \cdot 10^{20}$ Гц.
- 0,99 мкм.
- 53.

Вправа 32

1. 94 нм.
2. $7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $9,1 \cdot 10^5$ м/с;
 $3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.
3. $1,8 \cdot 10^{-7}$ м.
4. $6,4 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.
5. 0,51 В.
6. $3,15 \cdot 10^{-9}$ К/с.
7. 3,1 В.
8. $3,45 \cdot 10^{-25}$ кг · м/с.
9. 5,7 см.

Вправа 33

1. $1,7 \cdot 10^{-5}$ Н.
2. $7 \cdot 10^{-7}$ Па; $3,5 \cdot 10^{-7}$ Па.
3. $2,8 \cdot 10^{-4}$ Н.
4. $2,9 \cdot 10^{21}$.
5. 12 мкПа.

Вправа 34

1. 2,2 МеВ.
2. 220 МеВ.
3. 5,6 МеВ; 8 МеВ.
4. 1,013; 235 а.о.м.

Вправа 35

1. 0,29.
2. Через 64,5 доби.
3. 10,7 МБк.

4. За 5 хв 5 с.
5. $3,3 \cdot 10^5$ с.
6. $9,3 \cdot 10^{18}$.
7. 0,26 кг.
8. 121 рік.
9. 25 %.

Вправа 36

1. ${}_{11}^{24}\text{Na}$; ${}_{+1}^0e$; ${}_{12}^{26}\text{Mg}$; ${}_{1}^1\text{H}$; ${}_{1}^1\text{H}$.
2. Вбирається; виділяється, вбирається.
3. 2,8 МеВ.
4. Ізотоп Оксигену ${}_{8}^{16}\text{O}$.
5. 161° .
6. 2,2 МеВ; $5,3 \cdot 10^{20}$ Гц.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б; 2. Г; 3. Б; 4. В; 5. В; 6. $2,79 \cdot 10^{-19}$ Дж;
7. Три; 8. $6,9 \cdot 10^{-14}$ м; 9. 1147 т; 10. Поглинається.

ПЕРЕВІРТЕ СЕБЕ

1. Б; 2. А; 3. А; 4. Г; 5. Б; 6. А;
7. $4,31 \cdot 10^6$ т/с; 8. 61; 9. $2R_{\odot}$; 10. Якщо на світлині небесний об'єкт видно як чіткий кружок, то це зоря. Якщо ж об'єкт на світлині має невеликий розмитий обрис або в нього еліптична чи якась інша некругова форма, то це — галактика.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Автоколивання 116, 128
- Акцептор 59
- Альфа-розпад 235
- Альфа-частинка 233
- Амплітуда коливань 100
- Аніон 62
- Античастинка 247
- Бета-розпад 236
- Бета-частинка 233
- Взаємодії 245
- Галактики 276
- Гамма-квант 233
- Ґратка дифракційна 179
- Діелектрична проникність речовини 22
- Діюче (ефективне) значення
 - ▶ напруги 132
 - ▶ струму 132
- Діаграма спектр–світність 261
- Дисперсія 182
- Дифракція 122, 178
- Довжина хвилі 119
- Донор 59
- Електроємність 31
- Електроліз 62
- Електромагнітна індукція 85
- Електронно-дірковий перехід 60
- Електростатична індукція 19
- Електрорушійна сила 40
- Енергія
 - ▶ електричного поля 34
 - ▶ магнітного поля 94
 - ▶ темна 285
- Енергетичні рівні 222
- Енергетичний вихід ядерної реакції 241
- Закон
 - ▶ Ампера 72
 - ▶ Біо — Савара — Лапласа 75
 - ▶ Брюстера 187
 - ▶ відбивання світла 191
 - ▶ Габбла 278
 - ▶ заломлення світла 196
 - ▶ збереження електричного заряду 7
 - ▶ збереження кількості нуклонів 234
 - ▶ зміщення Віна 226
 - ▶ електромагнітної індукції 87,89
 - ▶ Кулона 7
- ▶ Ома 41
- ▶ повного відбивання 196
- ▶ радіоактивного розпаду 235
- ▶ Стефана — Больцмана 227
- Закони
 - ▶ Фарадея 63
 - ▶ фотоелефекту 210, 211
- Заряд
 - ▶ електричний 6
 - ▶ пробний 9
 - ▶ точковий 7
- Зоря 249
 - ▶ змінна 269
 - ▶ наднова 265
 - ▶ нова 265
 - ▶ нейтронна 265
 - ▶ подвійна (кратна) 268
- Зоряні скупчення 275
- Ізотоп 232
- Індуктивність 92
- Інтерференція 121, 170
- Кандела 164
- Катіон 62
- Квант 207
- Кварк 247
- Когерентність 169
- Коливання
 - ▶ вільні (власні) 99, 125
 - ▶ вимушенні 101, 115, 131
 - ▶ гармонічні 103
- Конденсатор 32
- Контур коливальний 124
- Коефіцієнт трансформації 147
- Лінії
 - ▶ напруженості електричного поля 2
 - ▶ індукції магнітного поля 74
- Люмен 164
- Люкс 165
- Магнітна індукція 74, 88
- Модуляція 158
- Момент
 - ▶ магнітний 79
 - ▶ обертальний 79
- Мультиверсум (мультивсесвіт) 290
- Надпровідність 56
- Напруга 28, 39
- Напруженість електричного поля 10

- Опір
- ▶ електричний 30
 - ▶ ємнісний 135
 - ▶ індуктивний 139
- Оптична довжина шляху 169
- Оптична сила 220
- Освітленість 165
- Період
- ▶ електричних коливань 128
 - ▶ коливань математичного маятника 112
 - ▶ піврозпаду 237
- Планка стала 207
- Поверхня екіпотенціальна 27
- Показник заломлення
- ▶ абсолютний 153
 - ▶ відносний 196
- Поле
- ▶ вихрове 74
 - ▶ індукційне 88
 - ▶ електромагнітне 73
 - ▶ електростатичне 9
 - ▶ однорідне 12
 - ▶ потенціальне 23
 - ▶ стаціонарне 40
- Поляризація 186
- Постулати Бора 220
- Потік
- ▶ вектора напруженості електричного поля 14
 - ▶ магнітної індукції 85
 - ▶ електромагнітного випромінювання 155
- Потенціал електричного поля 26
- Правила Кірхгофа 47
- Правило Ленца 86
- Принцип
- ▶ антропний 289
 - ▶ суперпозиції 11, 75
- Радіоактивність 232
- Рівняння
- ▶ електромагнітної хвилі 153
 - ▶ механічної хвилі 119
- Різниця потенціалів 27
- Речовина темна 285
- Робота виходу 211
- Розряд газовий 66
- Резонанс 115
- ▶ напруг 143
 - ▶ струмів 144
- Самоіндукція 92
- Світловий потік 164
- Світність 250, 259
- Сила
- ▶ Ампера 78
 - ▶ консервативна 22
 - ▶ Лоренца 80
 - ▶ світла 164
- Сонячна стала 250
- Спектр
- ▶ дифракційний 180
 - ▶ дисперсійний 182
 - ▶ лінійчатий 223
 - ▶ неперервний 223
 - ▶ смугастий 223
- Спектральні класи зір 260
- Струм
- ▶ змінний 131
 - ▶ індукційний 85
 - ▶ постійний 38
- Температура ефективна 289
- Теорема Остроградського–Гаусса 14
- Теорія
- ▶ Великого вибуху 282
 - ▶ відносності загальна 281
 - ▶ стаціонарного всесвіту 280
- Тиск світла 215
- Трансформатор 145
- Умови інтерференції 170
- Фаза 103
- Формула Дрейка 288
- Фотон 208
- Фотоэффект 209
- Фронт хвилі 119
- Хвиля
- ▶ де Бройля 218
 - ▶ електромагнітна 151
 - ▶ механічна 118
 - ▶ стояча 120
- Частинка елементарна 244
- Число Вольфа 256
- Ядерна реакція 239
- Яскравість 16

Навчальне видання

*ЗАСЕКИНА Тетяна Миколаївна
ЗАСЕКИН Дмитро Олександрович*

ФІЗИКА І АСТРОНОМІЯ

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

Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

ВИДАНО ЗА РАХУНОК ДЕРЖАВНИХ КОШТІВ. ПРОДАЖ ЗАБОРОНЕНО

Редактор *О. С. Ісак*
Головний художник *І. П. Медведовська*
Технічний редактор *Е. А. Авраменко*
Коректор *С. В. Войтенко*

Для оформлення підручника використано малюнки та фотоілюстрації авторів:
*Akira Okumura, Ateens Chen, Bill Snyder, CERN, Deborah Lee Soltesz, ESA, Gary Daines, Jeff Dai,
Jonathan Knowles, Ligo Caltech, Luis Argerich, NASA, Noel Carboni, а також матеріали сайту freepik.com.*

Формат 70x100 $\frac{1}{16}$.
Ум. друк. арк. 24,624 + 0,324 форзац.
Обл.-вид. арк. 22,20 + 0,55 форзац.
Зам. №
Наклад 3880 пр.

ТОВ «Український освітянський видавничий центр «Оріон»»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

Серія ДК № 4918 від 17.06.2015 р.

Адреса видавництва: вул. Миколи Шепелева, 2, м. Київ, 03061

Віддруковано у ТОВ «КОНВІ ПРІНТ»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції

Серія ДК № 6115, від 29.03.2018 р.

03680, м. Київ, вул. Антона Цедіка, 12, тел. +38 044 332-84-73.

Показник заломлення (середній для видимого світла)

Алмаз	2,4	Повітря	1,00029	Скло	1,6
Вода	1,3	Сірковуглець	1,63	Спирт етиловий	1,36

Періоди піврозпаду деяких радіоактивних речовин

Ізотоп	Період піврозпаду	Ізотоп	Період піврозпаду
Вісмут $^{210}_{83}\text{Bi}$	5,02 діб	Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 діб
Іридій $^{192}_{77}\text{Ir}$	75 діб	Стронцій $^{90}_{38}\text{Sr}$	28 років
Кальцій $^{45}_{20}\text{Ca}$	164 діб	Торій $^{233}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ років
Натрій $^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 год	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ років
Полоній $^{210}_{84}\text{Po}$	138 діб	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радій $^{226}_{85}\text{Ra}$	1600 років		

Відносна атомна маса деяких ізотопів¹, а. о. м.

Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса
Гідроген ^1_1H	1,00783	Бор $^{11}_5\text{B}$	11,00930	Алюміній $^{27}_{13}\text{Al}$	27,9769
Дейтерій ^2_1H	2,01410	Карбон $^{12}_6\text{C}$	12,0	Силіцій $^{28}_{14}\text{Si}$	27,9769
Тритій ^3_1H	3,01605	Нітроген $^{14}_7\text{N}$	13,00574	Силіцій $^{30}_{14}\text{Si}$	29,97377
Гелій ^3_2He	3,01603	Нітроген $^{14}_7\text{N}$	14,00307	Фосфор $^{31}_{15}\text{P}$	30,97376
Гелій ^4_2He	4,00260	Оксиген $^{16}_8\text{O}$	15,99491	Ферум $^{56}_{26}\text{Fe}$	55,9349
Літій ^6_3Li	6,01512	Оксиген $^{17}_8\text{O}$	16,99913	Кобальт $^{59}_{27}\text{Co}$	58,93320
Літій ^7_3Li	7,01600	Флуор $^{19}_9\text{F}$	18,99840	Нікол $^{60}_{29}\text{Ni}$	59,9308
Берилій ^7_4Be	7,01693	Неон $^{20}_{10}\text{Ne}$	19,99244	Ксенон $^{131}_{54}\text{Xe}$	130,9051
Берилій ^9_4Be	8,00531	Натрій $^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977	Уран $^{235}_{92}\text{U}$	235,0493
Берилій ^9_4Be	9,01218	Натрій $^{24}_{11}\text{Na}$	23,99097	Уран $^{238}_{92}\text{U}$	238,05353
Бор $^{10}_5\text{B}$	10,01294	Алюміній $^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154		

Таблиця значень синусів і тангенсів для кутів 0–90°

Градуси	Синуси	Тангенси	Градуси	Синуси	Тангенси	Градуси	Синуси	Тангенси
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,804
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,6249	62	0,8829	1,881
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,963
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,145
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,246
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,356
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,475
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,605
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,747
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,904
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,078
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,271
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,487
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,732
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,036	76	0,9703	4,011
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,072	77	0,9744	4,331
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,111	78	0,9781	4,705
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,150	79	0,9816	5,145
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,192	80	0,9848	5,671
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,235	81	0,9877	6,314
21	0,3584	0,3839	52	0,7880	1,280	82	0,9903	7,115
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,327	83	0,9925	8,114
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,376	84	0,9945	9,514
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,428	85	0,9962	11,43
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,483	86	0,9976	14,30
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,540	87	0,9986	19,08
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,600	88	0,9994	28,64
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,664	89	0,9998	57,29
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,732	90	1,0000	∞
30	0,5000	0,5774						

¹ Щоб визначити масу ядра, треба відняти сумарну масу електронів. Маса спокою електрона становить 0,0005486 а. о. м.



ISBN 978-617-7712-53-3



9 786177 712533