

Серія  
«РЯТІВНИК»

ВИДАВНИЦТВО  
**РАНOK**

Ю. Є. Крот

# Фізика

в означеннях, таблицях і схемах

**7–11 класи**

- Основні поняття й закони класичної та сучасної фізики
- Означення фізичних величин та явищ
- Формули для обчислення фізичних величин
- Фундаментальні фізичні сталі
- Інформація про відомих учених, які є вихідцями з України



УДК 372.853(075.4)=161.2  
ББК 74.265.1  
К83

Серія «Рятівник»

Рецензенти:

*В. Г. Падалка*, доктор фіз.-мат. наук, професор;  
*Н. В. Столяревська*, учитель ЗОШ № 4 м. Харкова

Видано за ліцензією ТОВ Видавництво «Ранок»

**Крот Ю. Є.**

К83 Фізика у визначеннях, таблицях і схемах. 7–11 класи. — 6-те вид. — Х.: Веста, 2011. — 112 с. — (Серія «Рятівник»).

ISBN 978-966-08-2303-7

Зміст посібника відповідає чинній програмі з фізики для загально-освітніх навчальних закладів. Довідник містить основні фізичні закони, визначення, терміни тощо. Зручне розташування матеріалу у вигляді таблиць і схем та міжсторінкові посилання значно полегшують роботу.

Посібник допоможе школярам узагальнити і систематизувати знання з фізики, вдосконалити навички самостійної роботи з довідковою літературою.

Призначено для учнів 7–11 класів, абітурієнтів і вчителів фізики.

УДК 372.853(075.4)=161.2  
ББК 74.265.1

Довідкове видання

*КРОТ Юлії Євгенович*

**ФІЗИКА У ВИЗНАЧЕННЯХ, ТАБЛИЦЯХ І СХЕМАХ**  
**7–11 класи**  
*6-те видання*

Редактор *О. В. Костіна*. Тех. редактор *О. В. Сміян*

Код Т0088У. Підписано до друку 28.09.2010. Формат 60×84/16.

Папір друкарський. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 7,15.

ТОВ «Веста». Свідоцтво ДК № 3323 від 26.11.2008.

61064 Харків, вул. Бакуніна, 8а

Для листів: 61045 Харків, а/с 3355. Е-mail: office@ranok.kharkov.ua

Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

З питань реалізації: (057) 712-91-44, 712-90-87.

Е-mail: commerce@ranok.kharkov.ua

«Книга поштою»: (057) 717-74-55, (067) 546-53-73.

Е-mail: pochta@ranok.kharkov.ua

www.ranok.com.ua

© Ю. Є. Крот, 2008

© Ю. Є. Крот, перероб., 2009

© ТОВ Видавництво «Ранок», 2011

ISBN 978-966-08-2303-7

# Зміст

## МЕХАНІКА

<b>Кінематика</b> .....	8
Основні поняття .....	8
Рівномірний прямолінійний рух .....	9
Рівнозмінний прямолінійний рух.....	9
Додавання швидкостей .....	10
Прискорення.....	10
Рівняння кінематики рівнозмінного прямолінійного руху (при $\underline{a} = \text{const}$ ) .....	11
Графіки залежності кінематичних величин від часу .....	11
Рівномірний криволінійний рух .....	12
Характеристики руху матеріальної точки по колу (або обертання тіла).....	12
Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту .....	13
<b>Динаміка</b> .....	13
Основні поняття .....	13
Імпульс .....	14
Сила. Імпульс сили .....	14
Закони динаміки (закони Ньютона).....	15
Густина .....	16
Додавання сил .....	16
Принцип відносності Галілея.....	17
Гравітація (всесвітнє тяжіння).....	17
Теорії (гіпотези) гравітації .....	17
Сила тяжіння .....	18
Центр ваги .....	19
Вага .....	19
Залежність ваги тіла від його прискорення .....	19
Рух штучних супутників Землі .....	19
Перша космічна швидкість .....	20
Момент сили .....	20
Пружність .....	20
Закон пружних деформацій (закон Гука).....	21
Механічні властивості тіл .....	21
Сили тертя .....	22
Закон збереження імпульсу.....	22
Реактивний рух .....	23
Механічна робота.....	23
Енергія.....	23
Закон збереження механічної енергії .....	24
Коефіцієнт корисної дії.....	25

**Статика** ..... 26

    Статика твердого тіла ..... 26

    Рівновага тіла із закріпленою віссю обертання ..... 26

    Важіль ..... 26

    Статика рідин і газів..... 27

    Тиск..... 27

    Закон Паскаля ..... 27

    Власний тиск рідини ..... 27

    Сполучені посудини (відкриті)..... 28

    Закон Архімеда ..... 28

    Атмосферний тиск ..... 29

    Гідравлічний прес ..... 29

**МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА**

    Структура речовин ..... 30

    Особливості руху і взаємодії молекул..... 30

    Ідеальний газ ..... 31

    Основне рівняння МКТ газу..... 31

    Наслідки основного рівняння ..... 31

    Рівняння стану ідеального газу ..... 32

    Моль ..... 32

    Ізопроцеси в газах ..... 33

    Закон Шарля з використанням температури  
    за Цельсієм ..... 34

    Адіабатний процес ..... 35

    Температурна шкала Кельвіна (термодинамічна шкала)..... 35

**Термодинаміка** ..... 35

    Робота в термодинаміці..... 35

    Внутрішня енергія речовини ..... 36

    Закон збереження енергії ..... 36

    Перший закон термодинаміки ..... 36

    Застосування першого закону термодинаміки  
    до ізопроцесів і адіабатного процесу..... 36

    Необоротність теплових процесів.  
    Другий закон термодинаміки ..... 37

    Теплові двигуни..... 37

    Цикл Карно ..... 37

**Агрегатні стани речовини** ..... 38

    Різновиди впорядкованості (на прикладах води і льоду) ..... 38

    Випаровування рідини і конденсація пари..... 38

    Кипіння ..... 39

    Вологість повітря. Точка роси..... 39

    Змочування. Капілярні явища..... 39

    Тверді тіла ..... 40

Кристалічна ґратка. Елементарна комірка .....	40
Анізотропія.....	41
Рідкі кристали .....	41
Аморфні тіла .....	41
Плавлення .....	42
Теплофізичні характеристики речовини .....	42
Рівняння теплового балансу .....	43

## **ЕЛЕКТРОСТАТИКА**

<b>Електрична взаємодія тіл та її особливості .....</b>	<b>44</b>
Носії електрики.....	44
Роль тертя в електризації тіл .....	44
Закон Кулона .....	45
Закон збереження заряду .....	46
<b>Електростатичне поле .....</b>	<b>46</b>
Напруженість електростатичного поля .....	46
Лінії напруженості (силові лінії).....	47
Напруженість поля точкового заряду.....	47
Принцип суперпозиції полів.....	48
Діелектрична проникність .....	49
Потенціал електростатичного поля.....	50
Потенціальність електростатичного поля .....	51
<b>Електрична ємність .....</b>	<b>51</b>
Конденсатори .....	52
Ємність плоского конденсатора.....	52
З'єднання конденсаторів.....	53
Енергія електростатичного поля .....	53

## **ЕЛЕКТРОДИНАМІКА**

<b>Електричний струм .....</b>	<b>54</b>
Сила струму .....	55
Джерела струму. Електрорушійна сила.....	55
Закон Ома для однорідної ділянки кола.	
Електрична провідність і опір.....	56
Закон Ома для повного кола .....	57
Робота й потужність струму. Закон Джоуля — Ленца .....	57
Носії опору в колах. З'єднання резисторів .....	58
<b>Електричний струм у різних середовищах .....</b>	<b>59</b>
Надпровідність.....	59
Струм в електролітах. Електроліз .....	59
Струм у газі.....	60
Струм у вакуумі.....	61
Емісія електронів.....	61
Вакуумні діод і тріод .....	61

Струм у напівпровідниках .....	62
Напівпровідниковий діод .....	62
Транзистор .....	63

### **МАГНЕТИЗМ**

Магнітне поле. Експериментальні факти .....	64
Індукція магнітного поля. Сила Лоренца .....	65
Магнетизм струмів у провідниках різної форми .....	65
Сила Ампера .....	66
Закон взаємодії прямолінійних провідників із струмом (закон Ампера) .....	67
Формулювання одиниці сили струму .....	67
Рамка зі струмом у магнітному полі .....	68
Речовини в магнітному полі .....	68
Магнітний потік .....	70
Явище електромагнітної індукції .....	71
Правило Ленца .....	71
Самоіндукція .....	72
Енергія магнітного поля .....	72

### **КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ**

<b>Поняття коливання (зокрема гармонічного) .....</b>	<b>73</b>
Характеристики гармонічного коливання .....	74
Пружинний і математичний маятники.	
Формули періодів їх коливань .....	74
Перетворення енергії при гармонічних коливаннях .....	75
Затухаючі (згасаючі) коливання .....	75
Вимушені коливання .....	76
Резонанс .....	76
Поняття механічних хвиль. Поперечні та поздовжні хвилі ..	77
Звук. Швидкість звуку .....	77
Інтенсивність звуку. Гучність звуку .....	78
<b>Електричні коливання .....</b>	<b>78</b>
Процеси перетворення енергії у коливальному контурі .....	79
Період коливань у контурі .....	79
Вимушені електричні коливання. Змінний струм .....	79
Генератор змінного струму .....	80
Резонанс в електричному колі .....	81
Трансформатори .....	81
Електромагнітні хвилі .....	82
Випромінювання і приймання електромагнітних хвиль .....	82
Принципи радіозв'язку .....	82

### **ОПТИКА**

Шкала електромагнітних хвиль .....	83
Світло .....	83

<b>Геометрична (променева) оптика</b> .....	84
Закони відбивання світла .....	84
Закони заломлення світла .....	84
Повне відбивання світла .....	85
Побудова зображення предмета у плоскому дзеркалі .....	86
Побудова зображень у лінзах .....	86
<b>Хвильова оптика</b> .....	88
Когерентність .....	88
Інтерференція .....	88
Дифракція .....	89
Дисперсія. Розкладання білого світла у спектр .....	90
Види спектрів .....	90
<b>СУЧАСНА ФІЗИКА</b>	
<b>Елементи спеціальної теорії відносності</b> .....	91
Принцип відносності Ейнштейна .....	91
Відносність довжини і часу .....	91
Релятивістський закон додавання швидкостей .....	92
Взаємозв'язок енергії й маси .....	92
<b>Квантова оптика</b> .....	93
Фотоефект і його закони .....	93
<b>Атомна і ядерна фізика</b> .....	95
Моделі атома .....	95
Досліди Резерфорда .....	95
Постулати Бора .....	96
Схеми будови і принципу дії рубінового лазера .....	96
Склад ядер атомів. Ізотопи .....	97
Дефект маси. Енергія зв'язку ядер .....	97
Ядерні реакції .....	98
Радіоактивність .....	98
Закон радіоактивного розпаду .....	99
Методи реєстрації іонізуючих випромінювань .....	99
Лічильник Гейгера .....	99
Камера Вільсона .....	99
Бульбашкова камера .....	99
Поділ ядер урану .....	100
Термоядерні реакції .....	100
Додаток .....	101
Алфавітний покажчик .....	110
Література .....	112

# Механіка

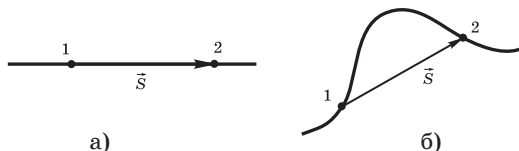
Розділ фізики, що вивчає найпростішу форму руху матерії — механічний рух тіл (зміну їхніх положень у просторі).

## Кінематика

Розділ механіки, в якому описується рух тіла, але не аналізуються його причини.

### ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

**Матеріальна точка** — це тіло, розміри якого можна не враховувати за даних умов.



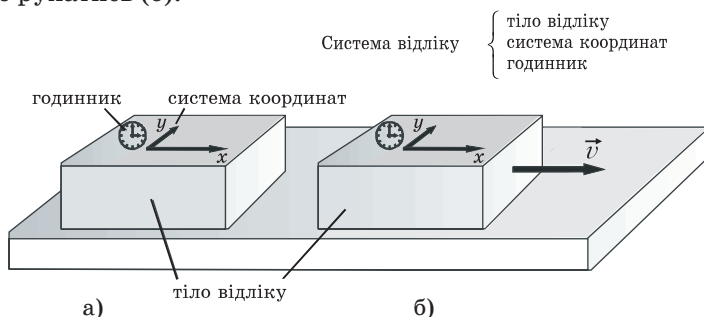
**Траєкторія** — лінія в просторі, вздовж якої рухається матеріальна точка (а — прямолінійний рух, б — криволінійний).

**Переміщення**  $\vec{s}$  — відрізок прямої, що з'єднає дві точки траєкторії і напрямлений у бік руху.

**Шлях**  $s$  (або  $l$ ) — довжина траєкторії (або її ділянки).

**Система відліку (С.В.)** — сукупність тіла відліку, системи координат і годинника.

Тіло відліку може перебувати у стані відносного спокою (а) або рухатись (б).





### Рівномірний прямолінійний рух

Це рух матеріальної точки уздовж прямої з однаковими переміщеннями протягом будь-яких рівних проміжків часу.

**Швидкість** — відношення переміщення матеріальної точки ( $\vec{s}$ ) до часу ( $t$ ), за який воно відбулося. Швидкість-вектор:

$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ , характеризує бистроту руху. Використовують також **шляхову швидкість (скаляр)**  $v = \frac{s}{t}$ .

Одиниці швидкості:  $[v] = \frac{м}{с}$  (або  $[v] = \frac{1м}{1с} = 1 \frac{м}{с}$ ).

### Рівнозмінний прямолінійний рух

Це рух матеріальної точки уздовж прямої, у процесі якого протягом будь-яких рівних проміжків часу її швидкість змінюється однаково.

Середня швидкість-вектор	Середня швидкість-скаляр
$\vec{v}_{\text{сеп}} = \frac{\vec{s}}{t}$ $s = v_{\text{ср}} t$	$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$ $\vec{v}_{\text{рез}} = \vec{v}_{\text{ср}}$

Середню швидкість можна виразити як середнє арифметичне швидкостей у початковий і кінцевий моменти часу.

$$\text{Тоді } s = \left( \frac{v_0 + v}{2} \right) t.$$

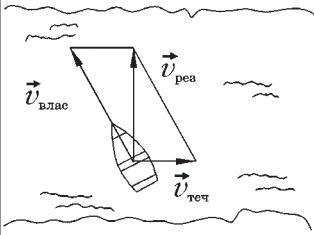
**Миттєва швидкість** — швидкість за нескінченно малим проміжком часу.

На прикладі шляхової швидкості:  $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = s'$ .

lim (від «limes» або «limitis» — межа); Δ — скінченний приріст; d — нескінченно малий приріст.

(«'» — позначка похідної)

### Додавання швидкостей



Часто тіло бере участь у декількох незалежних рухах. Швидкість результуючого складного руху дорівнює векторній сумі швидкостей окремих рухів (додавання здійснюється за правилом паралелограма чи трикутника).

Тут:  $a_{\dots} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Приклади: рух по річці човна з веслярем, рух літака при сильному вітрі, ходьба пасажера у вагоні, що рухається.

### Прискорення

У випадку рівнозмінного прямолінійного руху для будь-якого проміжку часу  $\Delta t$  прискорення дорівнює відношенню зміни швидкості  $\Delta \vec{v}$  (або  $\Delta v$ ) за цей проміжок до  $\Delta t$  (характеризує швидкість зміни швидкості).

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

При цьому  $\vec{a} = \text{const}$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad [a] = \text{м/с}^2.$$

При цьому  $\vec{F}_2 = \vec{F}_{\text{тяж}} =$

У випадку довільнозмінного прямолінійного руху (при  $|\vec{a}| \neq \text{const}$ ) розглядають середнє і миттєве прискорення.

#### Середні величини

$$|\vec{F}_{\text{тяж}}| \approx |\vec{F}_r|$$

$$F_{\text{тяж}} = R_{\text{ц.с}}$$

#### Миттєві величини

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}'$$

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = v'$$

Рівняння кінематики  
рівнозмінного прямолінійного руху  
(при  $\vec{a} = \text{const}$ )

Записуються з використанням скалярів  $s$ ,  $v$  і  $a$  або проекцій векторів  $\vec{s}$ ,  $\vec{v}$  і  $\vec{a}$  на вісь абсцис, напрямлену вздовж траєкторії у бік руху.

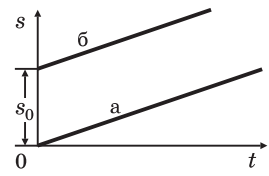
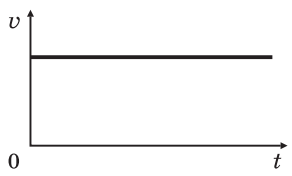
1.  $v = v_0 + at$ ,      2.  $s = v_0t + \frac{at^2}{2}$ ,      3.  $v^2 = v_0^2 + 2as$ .

З рівняння (3):

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad \text{при } v_0 = 0, v = \sqrt{2as}.$$

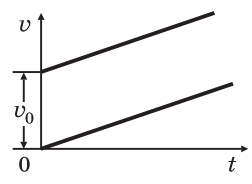
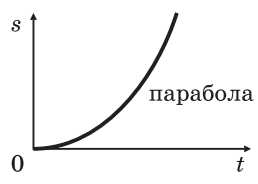
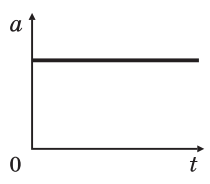
Графіки залежності  
кінематичних величин від часу

1. При  $\vec{v} = \text{const}$ .



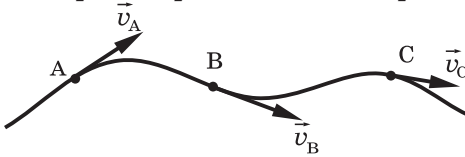
(Рівняння:  
а)  $s = vt$ , б)  $s = s_0 + vt$ )

2. При  $\vec{a} = \text{const}$



Рівномірний криволінійний рух

1. Траєкторія — довільна крива.

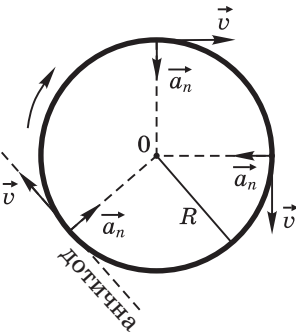


(миттєва швидкість напрямлена уздовж дотичної)

2. Траєкторія — коло.

У процесі рівномірного руху по колу матеріальна точка за будь-які рівні проміжки часу проходить однакові шляхи по дузі цього кола.

Характеристики руху матеріальної точки по колу (або обертання тіла)



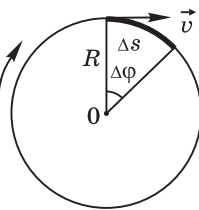
Період  $T$  — час одного обходу кола матеріальною точкою:

$T = \frac{t}{N}$ , де  $N$  — число обходів за час  $t$ .

Частота обертання тіла  $n$  — число обертів тіла за одиницю часу:

$$n = \frac{N}{t}, [n] = \text{с}^{-1}.$$

Усюди прискорення  $\vec{a}$  перпендикулярне до дотичної (направлене по **нормалі** до неї), і тому називається **нормальним прискоренням**  $\vec{a}_n$ ; це прискорення напрямлене **до центра** кола, і тому називається також **доцентровим прискоренням**  $\vec{\Sigma}_C^n$ .



$\vec{v}$  — лінійна швидкість.

Лінійна швидкість — скаляр  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ .

При  $N=1$  шлях дорівнює довжині кола, час дорівнює періоду  $T$ ,

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi Rn.$$

Кутова швидкість  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ .  $[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \text{с}^{-1}$ .

При  $N=1$  радіус  $R$  описує кут  $2\pi$  і повертається в початкове положення

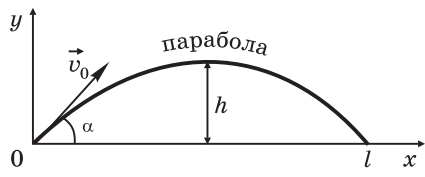
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

Зв'язок лінійної і кутової швидкостей

$$v = \omega R.$$

Доцентрове або нормальне прискорення:

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



Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

(опір повітря не врахований)  
Висота підйому

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Дальність польоту  $l = v_0^2 \sin 2\alpha / g$ .

Час польоту  $t = 2v_0 \sin \alpha / g$

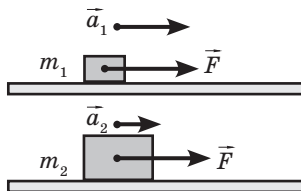
( $g$  — прискорення вільного падіння, с. 18)

## Динаміка

Розділ механіки, в якому вивчається вплив взаємодії тіл на їх рух.

Основні поняття

**Інертність** — здатність тіла зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху.



Однакові дії на два однорідні тіла різного розміру надають тілам на деякий момент часу неоднакових прискорень.

Щоб досягти  $a_2 = a_1$ , треба, щоб  $t_2 > t_1$ .

Кількісна міра інертності тіл — маса  $m$  (від «mass»).

$[m]$  = кг, еталон кілограма — циліндр зі сплаву платини й іридію, діаметр і висота циліндра 39 мм.

**Інерціальна система відліку** (І. С. В.) — така С. В., відносно якої швидкість тіла, що рухається поступально, не змінюється, якщо на нього не діють інші тіла або якщо дії на нього інших тіл взаємно компенсуються.

**Інерція** — явище збереження незмінної швидкості тілом, на яке не діють інші тіла або зовнішні впливи на яке взаємно компенсуються.

**Імпульс**

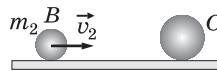
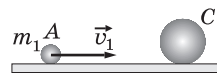
Імпульс (імпульс тіла, кількість руху)  $\vec{p}$ , (від «push» — поштовх).

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

(кінематико-динамічна характеристика).

Імпульси тіл різної маси можуть бути однаковими, якщо  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{m_1}{m_2}$ .

(тут тіла А і В штовхатимуть тіло С)



**Сила. Імпульс сили**

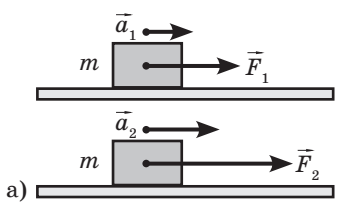
Сила (від «force») — кількісна міра взаємодії тіл,  $[F]$  = Н (ньютон).

Імпульс сили  $\vec{I}$  (від «impulse» — спонукання):  $\vec{I} = \vec{F}t$ .

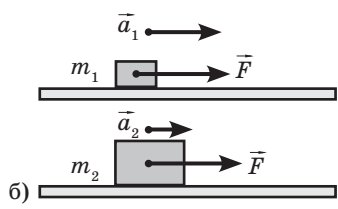
Закони динаміки  
(закони Ньютона)

**Перший закон Ньютона** — твердження існування І.С.В.: існують такі системи відліку, відносно яких тіло, що рухається поступально, зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла або дії інших тіл компенсуються

**Другий закон Ньютона:**



Отже:  $a \sim F$ .



$$a \sim \frac{1}{m}.$$

Крім того,  $\vec{a} \parallel \vec{F}$ ,

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

Модуль прискорення тіла прямо пропорційний модулю прикладеної до тіла сили (або рівнодійній декількох сил) і обернено пропорційний його масі.

Отримаємо більш універсальну формулу другого закону:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad m d\vec{v} = \vec{F} dt, \quad d(m\vec{v}) = \vec{F} dt,$$

$$\boxed{d\vec{p} = \vec{F} dt}, \text{ або } \boxed{\Delta\vec{p} = \vec{F} \Delta t}$$

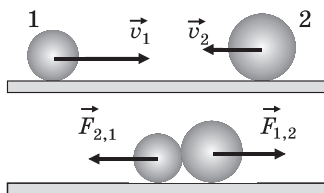
(зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили).

Із формули другого закону Ньютона отримаємо вираз:

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

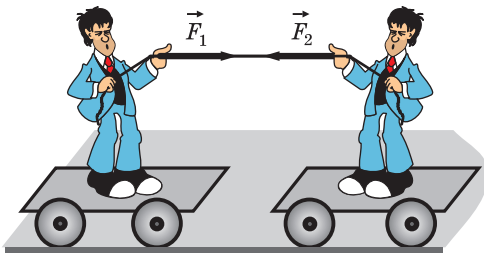
Звідси одиниця сили:  $[F] = \text{Н}$  (ньютон),  $1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$ .

### Третій закон Ньютона



$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

Будь-які два тіла діють одне на одне із силами чисельно рівними і протилежно напрямленими.



Сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  за третім законом Ньютона прикладені до різних тіл, і не можна говорити про їх рівнодійну.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

### Принцип відносності Галілея

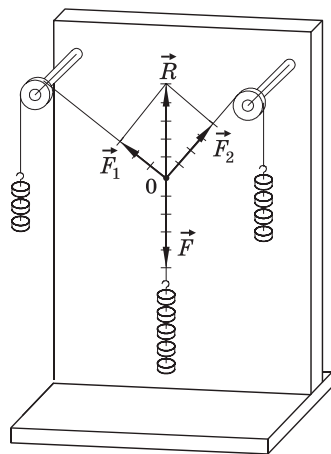
- Ніякими механічними експериментами всередині І.С.В. не можна встановити, чи у спокої вона, чи рухається з  $\vec{v} = \text{const}$ .
- Заміна однієї І.С.В. іншою не впливає на жоден механічний процес.

### Додавання сил

Якщо на тіло діє декілька сил, то їх вплив можна замінити однією силою  $\vec{R}$  (рівнодійною):

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Якщо рівнодійна сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  не дорівнює нулю, то ці сили можна зрівноважити, приклавши зрівноважувальну силу  $F$ , яка дорівнює  $\vec{F} = -\vec{R}$ . Якщо на тіло діє більше ніж дві сили, то спочатку додають деякі дві з них, одержану сумарну силу додають до якоїсь третьої сили і т. д.

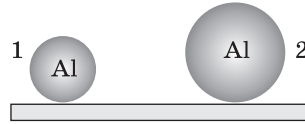




### Густина

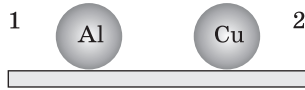
Тіла 1 і 2 (наприклад, алюмінієві кульки) однорідні.

$V_2 > V_1$ $m_2 > m_1$	$m \sim V$ (маса прямо пропорційна об'єму)
----------------------------	--------------------------------------------



Тіла 1 і 2 з різних матеріалів:  
1 — алюміній, 2 — мідь.

$V_2 = V_1$ $m_2 \neq m_1$	$m = \rho V$ , де $\rho$ — густина $\rho = m/V$ ; $[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
-------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------



### Гравітація (всесвітнє тяжіння)

Усі тіла притягуються одне до одного. Така універсальна взаємодія (гравітаційна) тим сильніша, чим масивніші взаємодіючі тіла і чим ближче вони одне до одного.

Формула закону всесвітнього тяжіння записується для тіл, що розглядаються як матеріальні точки:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де  $r$  — відстань між тілами,  $m_1$  і  $m_2$  — їх маси.

Коефіцієнт  $G$  — гравітаційна стала,

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

### Теорії (гіпотези) гравітації

1. Навколо тіл — гравітаційне поле. Гравітаційну взаємодію розглядають як обмін тіл гравітонами (експериментально вони не виявлені).

2. Навколо будь-якого тіла (особливо масивного) простір викривлений, тому інші тіла рухаються повз це тіло по заздалегідь викривлених траєкторіях.

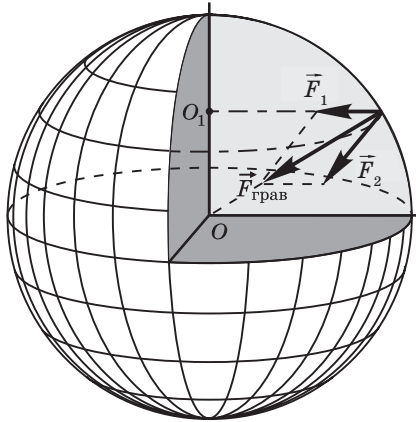
Прояви гравітації: притягання тіл до Землі; океанські припливи й відпливи; обертання планет довкола Сонця; еволюція зірок (білі карлики, чорні діри тощо).

### Сила тяжіння

**Сила тяжіння** (сила реального притягання тіл до Землі) — прояв гравітації. За другим законом Ньютона  $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$ , де  $\vec{g}$  — прискорення вільного падіння біля поверхні Землі.  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і, отже,  $\vec{g}$  залежать від широти місцевості.

Усюди, крім полюсів, частина  $\vec{F}_1$  сили земної гравітації  $\vec{F}_{\text{грав}}$  забезпечує тілу доцентрове прискорення. Тому сила реального притягання тіл до Землі в неполярних місцевостях  $\vec{F}_{\text{тяж}} = \vec{F}_2$  дещо відрізняється від  $\vec{F}_{\text{грав}}$ , модуль якої присутній у формулі закону всесвітнього тяжіння.

Відповідно до другого закону Ньютона



$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{тяж}}}{m}.$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{\text{тяж}} = \vec{F}_{\text{грав}} - \vec{F}_1;$$

$$\vec{F}_{\text{тяж}} \neq \vec{F}_{\text{грав}},$$

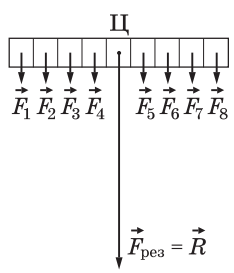
$$\text{однак } |\vec{F}_{\text{тяж}}| \approx |\vec{F}_{\text{грав}}|.$$

Наданій географічній широті прискорення вільного падіння  $\vec{g}$  однакове для всіх тіл; на різних широтах  $\vec{g}$  різне.

$$g_{\text{на полюсах}} \approx 9,83 \text{ м/с}^2,$$

$$g_{\text{на екваторі}} \approx 9,78 \text{ м/с}^2.$$

### Центр ваги

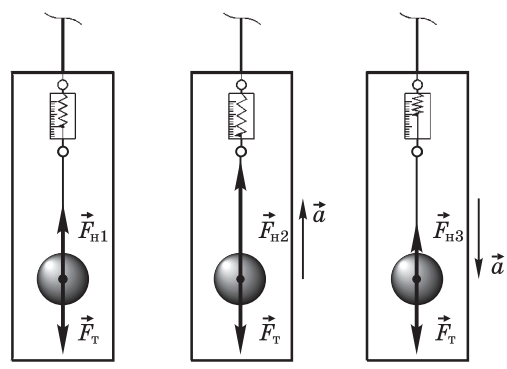


Для будь-якого тіла центр ваги — це точка прикладання рівнодійної  $\vec{R}$  усіх елементарних сил тяжіння, що не змінюється при повороті тіла. Властивість точки Ц: сили, що прикладаються до тіла в точці Ц, не можуть викликати обертання тіла.

### Вага

Вага тіла  $\vec{P}$  — це сила, з якою тіло діє на опору або на підвіс. Якщо тіло не має прискорення, то  $P = mg$ , при цьому:  $|\vec{P}| = |\vec{F}_{тяж}|$ . Ці дві сили прикладені до різних тіл.

### Залежність ваги тіла від його прискорення у вертикальному напрямку



( $\vec{F}_{н1,2,3}$  — сили натягу)  
 $P_2 > P_1 > P_3$

$P_1 = mg$        $P_2 = m(g+a)$        $P_3 = m(g-a)$

### Рух штучних супутників Землі

Рух супутника — сума руху за інерцією (як результату запуску ракети) й вільного падіння. На супутник і на всі тіла в ньому діє лише сила тяжіння, проявом чого є невагомість. Така невагомість називається динамічною.

### Перша космічна швидкість

**Перша космічна швидкість** — швидкість, якої треба надати тілу (ракеті), щоб воно оберталось навколо небесного тіла по коловій орбіті як супутник. Для планети Земля при малій висоті тіла над Землею ( $h \approx 0$ ):  $R_{\text{орб}} = R_3$ .

$$mg = \frac{mv^2}{R_{\text{орб}}}, \quad v_1 = \sqrt{gR_{\text{орб}}} \approx \sqrt{g_0 R_3} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Для орбіти довільної висоти  $h$ :

$$v = \sqrt{G \frac{m_3}{R_3 + h}} = \sqrt{\frac{gR_3^2}{R_3 + h}}.$$

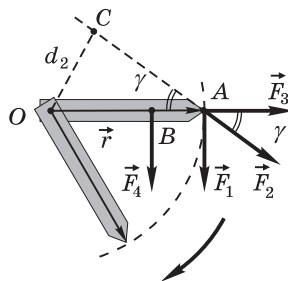
### Момент сили

Сила, прикладена до тіла не в центрі ваги, може викликати обертання тіла.

Обертання тіла залежить не лише від діючої на нього сили, але й від її плеча. Плече  $d$  — найкоротша відстань від центра обертання  $O$  (або від осі обертання) до лінії дії сили.

Обертаюча дія сили визначається моментом сили:

$$M = Fd, \quad [M] = \text{Н} \cdot \text{м} \neq \text{Дж.}$$



$$d = r \sin \gamma$$

$$M_1 > M_2; M_1 > M_4; M_3 = 0.$$

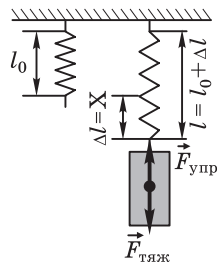
$$M_1 = F_1 \cdot OA; M_2 = F_2 \cdot OC,$$

$$M_3 = F_3 \cdot 0 = 0; M_4 = F_4 \cdot OB.$$

### Пружність

**Пружність** — це здатність деформованих тіл відновлювати початкову форму й об'єм після припинення зовнішньої дії.

Сили пружності виникають при деформації тіл і напрямлені протилежно до сил, що викликають деформацію.



### Закон пружних деформацій (закон Гука)

Сила пружності прямо пропорційна зміні довжини тіла:

$$F_{\text{пр}} = -k\Delta l = -kx ,$$

де  $k$  — жорсткість тіла, що деформується (пружини). Для стержня:

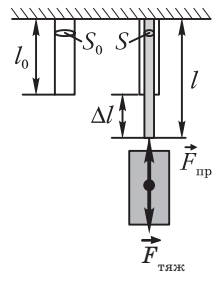
$$\frac{F_{\text{пр}}}{S_0} \sim \frac{\Delta l}{l_0} , \quad \frac{F_{\text{пр}}}{S_0} = E \frac{\Delta l}{l_0} = E\varepsilon ,$$

де  $\frac{F_{\text{пр}}}{S_0} = \sigma$  — механічне напруження,

$\varepsilon$  — відносне видовження,

$E$  — модуль пружності матеріалу (модуль Юнга).

$$[\sigma] = [E] = \text{Па (паскаль)}, \quad 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} .$$



### Механічні властивості тіл

При  $\sigma > \sigma_{\text{пр}}$  деформація не пружного, а пластичного характеру (після розвантажування в деталі наявна залишкова деформація). Коефіцієнт запасу міцності (запас міцності):

$$K_3 = \frac{\sigma_{\text{м}}}{\sigma_{\text{реал}}} ;$$

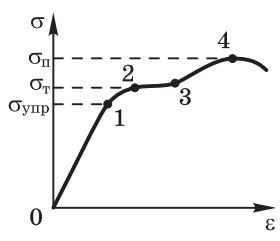
Мінімальний запас міцності:

$$K_{\text{з.м}} = \frac{\sigma_{\text{м}}}{\sigma_{\text{пр}}} ;$$

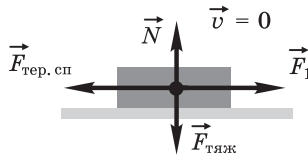
де  $\sigma_{\text{пр}}$  — межа пружності,

$\sigma_{\text{п}}$  — межа плинності,

$\sigma_{\text{м}}$  — межа міцності (у разі подальшого підвищення навантаження матеріал руйнується).



Сили тертя

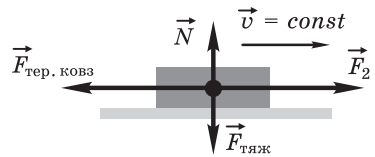


Якщо сила  $\vec{F}_1$  (с. 21) не зрушила тіло, то  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_{\text{тер.сп}}|$ .

$F_{\text{тер.ковз}} \sim F_{\perp}$  (сила нормального притиснення).

$$|\vec{F}_{\perp}| = |\vec{N}|,$$

де  $\vec{N}$  — сила реакції опори.



Якщо під дією сили  $F_2 > F_1$  тіло рухається рівномірно, то

$$|\vec{F}_{\text{тер.ковз}}| = |\vec{F}_2|.$$

Отже:  $F_{\text{тер.ковз}} \sim N$ ,

$$F_{\text{тер.ковз}} = \mu N$$

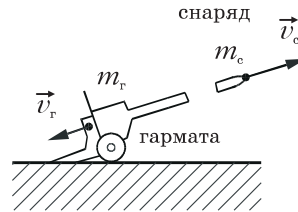
Якщо  $\vec{F} > \vec{F}_2$ , тіло рухається прискорено.

$\mu$  — коефіцієнт тертя, який залежить від стану поверхонь тіл, що дотикаються одне до одного під час руху (від якості обробки, наявності мастил), і від матеріалу тіл.

Якщо тіло поставити на котки або на колеса, то сила тертя, що виникає під час руху (кочення) тіл, у десятки разів менша:

$$F_{\text{тер.коч}} \ll F_{\text{тер.ковз}}.$$

Закон збереження імпульсу



На підставі третього закону Ньютона

$$\Delta(m_1 \vec{v}_1) = -\Delta(m_2 \vec{v}_2),$$

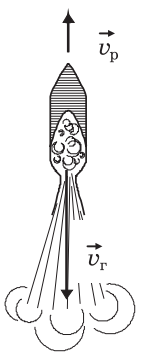
$$\Delta(m_1 \vec{v}_1) + \Delta(m_2 \vec{v}_2) = 0,$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \text{const}.$$

**Закон збереження імпульсу** — векторна сума імпульсів тіл, що складають замкнену систему, не змінюється (замкнена система — така, в якій тіла взаємодіють лише між собою):

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots = \text{const}.$$

### Реактивний рух



**Реактивний рух** — рух тіл за рахунок викидання з них струменя газу або рідини (приклад останнього — плавання каракатиць і медуз). Такий рух — прояв закону збереження імпульсу.

Принцип реактивного руху реалізований у ракетах (сигнальних, метеорологічних, військових, космічних).

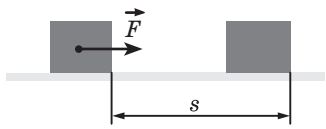
$$(m_p + m_n)v_0 = m_p v_p + m_r v_r,$$

де  $m_p$  — маса ракети;  $m_r$  — маса газу;  $m_n$  — маса палива ( $m_r \approx m_n$ ).

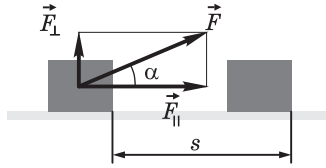
При  $v_0 = 0$  (старт із Землі) маємо:

$$v_p = -\frac{m_n}{m_p} v_r \quad (v_p \sim m_n, v_p \sim v_r).$$

### Механічна робота



$$A = F s$$



$$A = F_{\parallel} s = F s \cos \alpha$$

У механіці робота  $A$  (від німецького «Arbeit») — скалярна фізична величина, що характеризує рушійну дію сили.

$$[A] = \text{Дж (джоуль)}, \quad 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

### Енергія

Енергія  $W$  (від «work» — робота, оскільки енергія — характеристика здатності тіла виконувати роботу) або  $E$  (від «energy») — універсальна кількісна міра руху, що не змінюється при переході однієї форми руху (наприклад, механічної) в іншу (наприклад, у теплову).

У механіці зміна енергії дорівнює виконаній роботі:

$$\Delta W_{\text{мех}} = A .$$

### Механічна енергія

1. Кінетична (енергія руху):

$$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} .$$

2. Потенціальна (енергія взаємодії тіл або ділянок тіла):

а) енергія тіла, піднятого над поверхнею Землі,

$$W_p = mgh ;$$

б) енергія пружно деформованого тіла:

$$W_p = \frac{kx^2}{2} . \quad [W] = [A] = \text{Дж} .$$

Потужність  $N$  (або  $P$  від «power») — характеристика швидкості виконання роботи:

$$P = N = \frac{A}{t} ; \quad [N] = \text{Вт (ват)}, \quad 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} .$$

$$\text{При } \vec{v} = \text{const} : N = \frac{Fs}{t} = Fv , \quad F \sim \frac{1}{v}$$

(можна змінювати силу тяги двигуна автомобіля, наприклад при підйомі, шляхом зміни його швидкості).

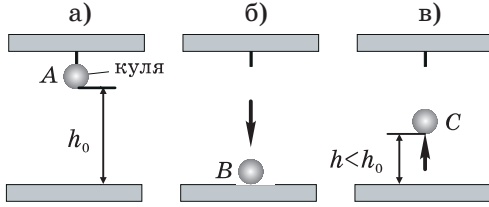
### Закон збереження механічної енергії

У замкненій системі тіл умовою збереження повної механічної енергії системи є взаємодія тіл тільки під дією сил гравітації і (чи) пружності (так званих потенціальних чи консервативних сил):

$$W = W_{\text{к}} + W_p = \text{const} .$$



Щоб виконалась умова  $W = \text{const}$ , треба, щоб  $F_{\text{тертя}} = 0$  і  $F_{\text{опору}} = 0$ , що в реальних умовах нездійсненно.



(На рис. б і в стрілками зображено напрямки руху кулі.)

$$W_A = W_{p \max}, \quad W_B = W_{k \max}, \quad W_C = W_{pC} + W_{kC}.$$

$$W_{kA} = 0. \quad W_{pB} = 0.$$

На практиці повна механічна енергія

$$W = W_k + W_p \neq \text{const}$$

унаслідок перетворення частини механічної енергії на теплову (за рахунок сил тертя й опору) не зберігається навіть в ізольованій системі.

### Коефіцієнт корисної дії

Унаслідок неминучості існування тертя й опору середовища,

$$A_{\text{корисна}} < A_{\text{повна}}, \text{ однак } A_{\text{корисна}} \sim A_{\text{повна}}.$$

Чим менші протидіючі фактори, тим більша  $A_{\text{корисна}}$  при тій самій  $A_{\text{повній}}$ , тобто тим більший коефіцієнт  $\eta$  у цій пропорційності:

$$A_{\text{корисна}} = \eta A_{\text{повна}},$$

звідки коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{A_{\text{корисна}}}{A_{\text{повна}}}.$$

Часто говорять «затрачена» робота. Це некоректно, *затрачується* енергія, а робота *виконується*.

## Статика

Розділ механіки, який вивчає умови відносного спокою тіла.

### Статика твердого тіла

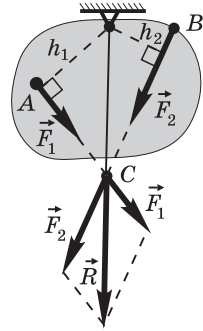
Рівновага тіла  
із закріпленою віссю обертання

Умова рівноваги:

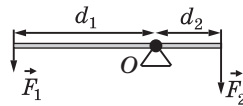
лінія дії рівнодійної  $\vec{R}$  усіх прикладених до тіла сил має проходити через центр (вісь) обертання.

$$\vec{F}_1 h_1 = \vec{F}_2 h_2; F_1 h_1 = F_2 h_2; M_1 = M_2 \text{ —}$$

тіло перебуває в рівновазі, якщо моменти прикладених до нього сил чисельно рівні і діють у протилежних напрямках.



Важіль



$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_1}{d_2}; F_1 d_1 = F_2 d_2;$$

Відносно точки  $O$ :  $M_1 = M_2$ ;  $M_1 - M_2 = 0$ .

Узагальнення на будь-яке число сил: важіль перебуває у рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів сил, що діють на важіль, дорівнює нулю.

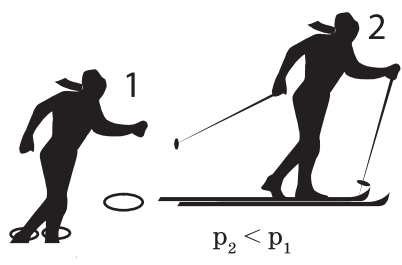
## Статика рідин і газів

Статика рідин і газів вивчає рівновагу рідких і газоподібних середовищ.

### Тиск

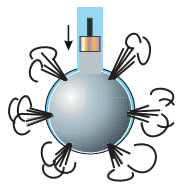
**Тиск** чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні перпендикулярно до цієї поверхні.

$$p = \frac{F_{\perp}}{S},$$



$[p] = \text{Па (паскаль)}, 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$

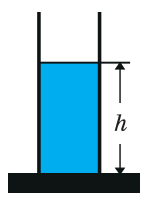
### Закон Паскаля



Тиск, який чиниться на рідини або газу, які містяться в замкненій посудині, передається в них рівномірно в усіх напрямках. (Причина — велика рухомість молекул.)

Використання: гідравлічні преси, гальма, підйомники (домкрати).

### Власний тиск рідини (гідростатичний)



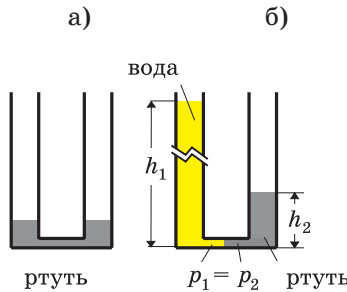
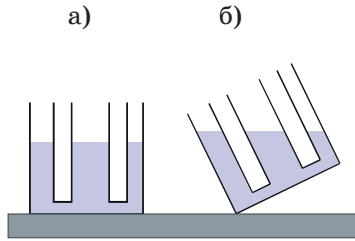
На дно посудини площею  $S$  діє вага  $P$  стовпчика рідини заввишки  $h$ , створюючи тиск

$$p = \frac{P}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho ghS}{S} = \rho gh.$$

Висновки: а)  $p \sim h$ ,  
б)  $p \sim \rho$ ,

$$p = \rho gh$$

### Сполучені посудини (відкриті)



1. Будь-яка рідина встановлюється у сполучених некапілярних посудинах на одному рівні (незалежно від числа посудин, їх розмірів і нахилу відносно горизонту).

2. У сполучених посудинах висоти різнорідних рідин, які не змішуються, обернено пропорційні їх густинам:

$$\frac{P_{h_1}}{S_1} = \frac{P_{h_2}}{S_2}; \quad \frac{\rho_1 V_1 g}{S_1} = \frac{\rho_2 V_2 g}{S_2};$$

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2;$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad h \sim \frac{1}{\rho}.$$

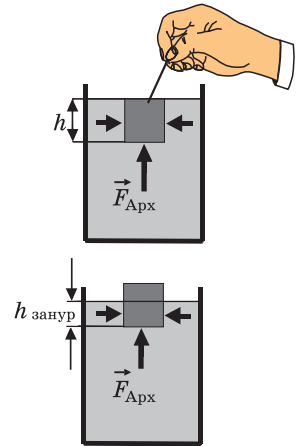
### Закон Архімеда

Нехай верхня грань кубика розташована на рівні поверхні води. Тоді сили тиску води, що діють з боків, взаємокомпенсуються. Сила, напрямлена вертикально вгору, називається виштовхувальною або силою Архімеда. Ця сила чисельно дорівнює вазі стовпчика води висотою  $h$  і основою, що дорівнює основі кубика:

$$F_A = P_{\text{столб}} = m_{\text{столб}} g = \rho_{\text{жидк}} V_{\text{тела}} g.$$

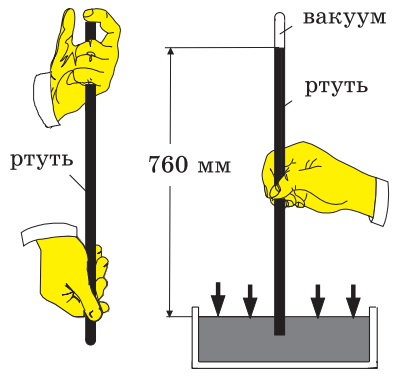
При неповному зануренні кубика:

$$F_A = \rho_{\text{жидк}} V_{\text{погр. части тела}} g.$$



Закон Архімеда: на тіло, занурене в рідину (або газ), діє виштовхувальна сила (сила Архімеда), яка чисельно дорівнює вазі витісненої тілом рідини (або газу).

### Атмосферний тиск



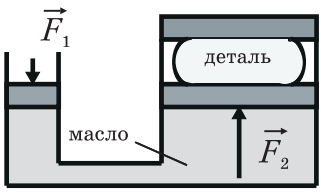
Поверхня Землі — дно повітряного океану, який (як і звичайний океан) здійснює тиск на цю поверхню і на предмети на ній. У досліді Вівіані — Торрічеллі тиск атмосфери, переданий ртуттю в чаші, зрівноважився тиском стовпа ртуті заввишки 0,76 м.

### Нормальний атмосферний тиск

$$p_0 = \rho_{\text{рт}} g h_0 = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{С}^2} \cdot 0,76 \text{ м} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

(у позасистемних одиницях  $p_0 = 760$  мм ртутного стовпа (мм рт. ст.)).

### Гідравлічний прес



Зовнішня сила  $\vec{F}_1$  створює в рідині під поршнями перерізів  $S_1$  і  $S_2$  однаковий тиск (відповідно до закону Паскаля):

$$p_1 = p_2;$$

$$\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1}; \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

(виграш у силі:  $F_2 > F_1$ ).

Використання гідравлічних пресів: штамповка металевих виробів (наприклад, кузовів автомобілів), карбування монет, пресування керамічних заготовок, вичавлення олії з насіння та соку з фруктів.

# Молекулярна фізика

Це розділ фізики, у якому закони механіки застосовуються не до кожної окремої молекули речовини, а до їх сукупності. При цьому використовуються усереднені фізичні величини.

## Структура речовин

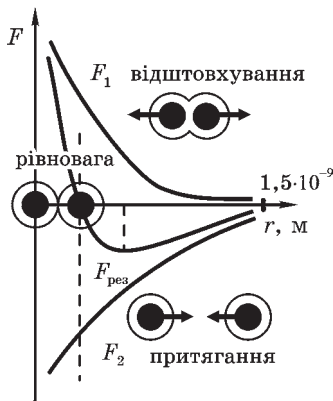
Деякі прості речовини (гелій, аргон, неон; графіт, алмаз) утворені з електрично нейтральних *атомів*, а метали — з позитивних *іонів* та *колективізованих електронів*.

Більш складні речовини складаються з *молекул* (груп атомів одного або кількох елементів), найпростіші молекули:  $H_2, N_2, O_2$ . Іноді умовно кажуть про існування одноатомних молекул.

## Особливості руху і взаємодії молекул

Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) ґрунтується на трьох положеннях:

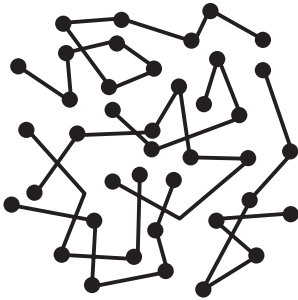
- 1) речовина складається з молекул;
- 2) молекули речовини перебувають у безперервному русі;
- 3) молекули речовини взаємодіють одна з одною (притягуються або відштовхуються).



Особливості руху молекул зумовлені особливостями сил взаємодії, результуюча яких при великих міжмолекулярних відстанях (газ) дорівнює нулю, при менших відстанях (рідина) — відмінна від нуля і максимальна при ще менших відстанях (кристал).

**Дифузія** — це проникнення молекул деякої речовини в ділянки простору, в яких перебувають молекули іншої речовини, і навпаки (взаємна дифузія).

### Броунівський рух



Ботанік Броун, розглядаючи під мікроскопом краплю рідини з урівноваженими в ній частинками (пилком), спостеріг їхній безладний рух.

Частинки пилку рухаються під ударами невидимих у мікроскоп молекул.

Дифузія і броунівський рух — підтвердження правильності МКТ.

### Ідеальний газ

Сукупність величезної кількості молекул, розмірами яких і взаємодією на відстані можна знехтувати. Єдина їх взаємодія — пружні зіткнення.

При достатньо низькому тиску і високій температурі реальні гази (наприклад, азот) за своїми властивостями близькі до ідеального газу.

### Основне рівняння МКТ газу

Тиск газу  $p$  на внутрішню поверхню посудини — результат безладних ударів безлічі молекул. При цьому:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2},$$

де  $n = \frac{N}{V}$  — концентрація молекул,  $N$  — загальне число

молекул у посудині,  $V$  — об'єм посудини,  $m_0$  — маса молекули,  $\overline{v^2}$  — середнє значення квадрата швидкостей молекул.

### Наслідки основного рівняння

1.  $p \sim nT$ ,  $p = knT$ , або  $p = nkT$ .

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — стала Больцмана.

$$2. \overline{W}_{\text{к.о}} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

звідси:  $T \sim \overline{W}_{\text{к.о}}$  — *температура* — кількісна міра середньої енергії руху однієї молекули речовини.

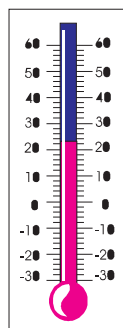
3. Середня квадратична швидкість молекули газу

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}},$$

Приклади цієї швидкості для різних газів при  $0^\circ\text{C}$ :

для кисню 475 м/с; для азоту 493 м/с;  
для водню 1840 м/с.

### Термометри



спирт



ртуть

### Рівняння стану ідеального газу

Тиск  $p$  і температура  $T$  газу, який міститься в посудині об'ємом  $V$ , — прояв руху безлічі молекул.

Величини  $p$ ,  $V$ ,  $T$  — параметри стану.

Математичний вираз, що містить усі параметри, — рівняння стану.

#### Рівняння Клапейрона:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad pV = \text{const} \cdot T, \quad pV \sim T.$$

Коефіцієнт пропорційності в ньому різний для різних газів.

### Моль

Одиниця кількості речовини, 1 моль, — така кількість речовини, яка містить стільки молекул (атомів, іонів), скільки міститься атомів в  $0,012$  кг вуглецю  $^{12}\text{C}$ .

$$\text{Число молів } \nu = \frac{m - \text{маса речовини}}{M - \text{маса моля}} = \frac{Nm_0}{N_A m_0} = \frac{N}{N_A}.$$



**Авогадро** встановив:

1) число молекул у молі  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> (*стала Авогадро*); 2) об'єм моля  $V_m$  будь-якого газу при нормальному тиску і температурі 0 °С:

$$V_m = 22,4 \frac{\text{л}}{\text{моль}} = 0,0224 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} .$$

**Рівняння Менделєєва — Клапейрона:**

Для різних газів в однакових кількостях коефіцієнт пропорційності у рівнянні стану той самий (універсальний):

а) для одного моля:

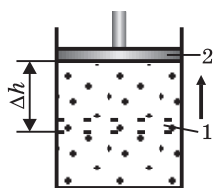
$$pV_m = RT ,$$

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  — універсальна (молярна) газова стала;

б) для  $\nu$  молів:  $pV = \nu RT$  .

### Ізопроеци в газах

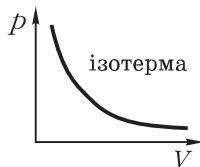
**1. Ізотермічний процес** (розширення або стиснення газу при  $T = \text{const}$ ).



Під поршнем міститься повітря, що спершу займало в циліндрі об'єм  $V_1$  при тиску  $p_1$  і температурі  $T_1$ .

**Повільним** підняттям поршня (щоб  $T = \text{const}$ ) на  $\Delta h$  збільшують об'єм до  $V_2$ .

При  $T_2 = T_1$  тиск  $p_2 < p_1$ .



За Клапейроном:  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_1}$ ,

$$pV = \text{const} \text{ —}$$

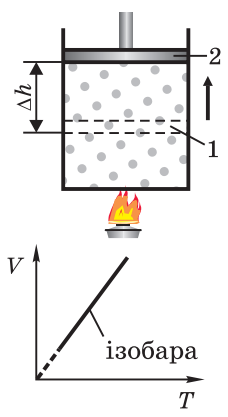
закон Бойля — Маріотта.

**2. Ізобарний процес** (розширення або стиснення газу при  $p = \text{const}$ ). Розширення газу від  $V_1$  до  $V_2$  — результат нагрівання. У скільки разів збільшиться  $V$ , у стільки разів зросте  $T$ , при цьому значення  $p$  збережеться.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}; \quad \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1},$$

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{—}$$

закон Гей-Люссака.



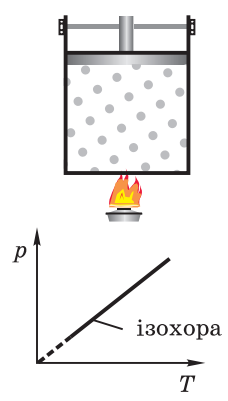
**3. Ізохорний процес** (грецьк. «chora» — простір) (нагрівання або охолодження газу при  $V = \text{const}$ ).

У скільки разів збільшиться  $T$ , у стільки разів зросте  $p$ :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1},$$

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{—}$$

закон Шарля.



Закон Шарля з використанням температури за Цельсієм

$$p = p_0(1 + \gamma t),$$

$$\gamma = \frac{1}{273} \text{K}^{-1} \quad \text{— температурний коефіцієнт тиску.}$$

### Адіабатний процес

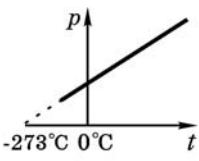
Це процес у системі без її теплообміну з оточенням. Аналогічно до того, як  $\Delta W_{\text{мех}} = A$  (робота),  $\Delta W_{\text{тепл}} = Q$  — кількість теплоти (міра зміни енергії системи шляхом теплообміну).  $Q$  не може «міститися» в тілі, не може «витрачатися»; система може отримати або віддати  $Q$ . Ознака адіабатного процесу:  $Q=0$ .

Забезпечити умову  $Q=0$  можна двома способами:

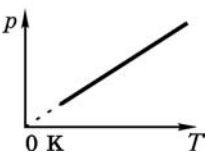
- а) теплоізолювавши систему (використовуючи вату, поролон, вакуум);
- б) зменшивши час протікання процесу (щоб навколишнє середовище не встигло вплинути на процес).

Адіабата подібна до ізотерми, але має більшу крутість.

### Температурна шкала Кельвіна (термодинамічна шкала)



Побудований за експериментальними даними графік закону Шарля (суцільна лінія) умовно продовжено до перетину з віссю температур. Тиск газу зник би при  $t \approx -273^\circ\text{C}$ .



Той самий графік у координатах  $p$  і  $T$ , де  $T = (t + 273)\text{K}$ , де  $0\text{K}$  — абсолютний нуль температур.

## Термодинаміка

Вивчає перетворення енергії в системах із багатьох частинок, нехтуючи при цьому механізмами теплових процесів.

### Робота в термодинаміці

Газ, що розширюється, рухає поршень, виконуючи роботу:

$$A = F_{\text{мол.давл}} \Delta h = pS\Delta h = p\Delta V \quad \boxed{A = p\Delta V}$$

### Внутрішня енергія речовини

Це сумарна енергія руху і взаємодії молекул речовини. Молекули ідеального газу не взаємодіють, тому для його моля внутрішня енергія:

$$U_M = \overline{W}_{к.о} N_A = \frac{3}{2} k T N_A = \frac{3}{2} R T.$$

### Закон збереження енергії

В ізольованій системі тіл при неминучій наявності сил тертя і опору зберігається не механічна енергія, а повна:

$$W = W_k + W_p + \Delta U = \text{const},$$

де  $\Delta U$  — зміна внутрішньої енергії.

### Перший закон термодинаміки

Два формулювання:

а) Результатом одержання системою теплоти  $Q$  є збільшення її внутрішньої енергії й виконання нею роботи проти зовнішніх сил.

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

б) Приріст внутрішньої енергії системи може бути результатом і теплопередачі, і виконання над системою роботи зовнішніми силами.

$$\Delta U = Q + A' \quad (A' = -A).$$

### Застосування першого закону до ізопроеесів і адіабатного процесу

1. При  $T = \text{const}$  не змінюється  $U$ , тобто  $\Delta U = 0$ , тому

$$Q = A, \text{ або } A = Q.$$

Таким чином, перший закон накладає заборону лише на можливість  $A > Q$  (неможливий «вічний двигун першого роду», який виконував би більшу роботу, ніж підведена до нього ззовні енергія, чи працював би без підведення енергії).

2. При  $V = \text{const}$   $A = 0$ ,  $Q = \Delta U$ .

3. При  $p = \text{const}$  вихідне рівняння першого закону є незмінним.

4. При  $Q = 0$   $A = -\Delta U$  (робота виконується за рахунок деякої кількості внутрішньої енергії, яка в результаті зменшується).

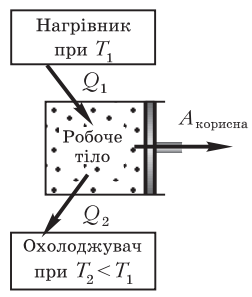
## Необоротність теплових процесів.

### Другий закон термодинаміки

Теплові процеси необоротні, при контакті гаряче тіло передає холодному деяку кількість теплоти, але зворотна теплопередача самочинно не відбувається. Це — спрощене формулювання другого закону термодинаміки. (Неможливе повне перетворення теплової енергії на механічну, неможливий «вічний двигун другого роду», який би виконував  $A = Q$ .)

### Теплові двигуни

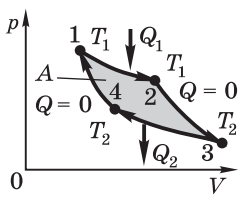
Це періодично діючі пристрої, що перетворюють теплову енергію на механічну. Робоче тіло двигуна (газ) у початковому стані — при великих  $p$  і  $T$ . При розширенні в контакт з нагрівником, одержуючи від нього  $Q_1$ , газ виконує роботу проти зовнішніх сил. Повертають газ до початкового стану зовнішньою дією, при цьому газ віддає охолоджувачу («холодильнику»)  $Q_2$ . Різниця  $Q_1 - Q_2$  дорівнює роботі  $A_{(1)}$  за один цикл (цикл — це замкнений, або круговий, процес).



ККД будь-якого теплового двигуна:

$$\eta = \frac{A_{(1)}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

### Цикл Карно



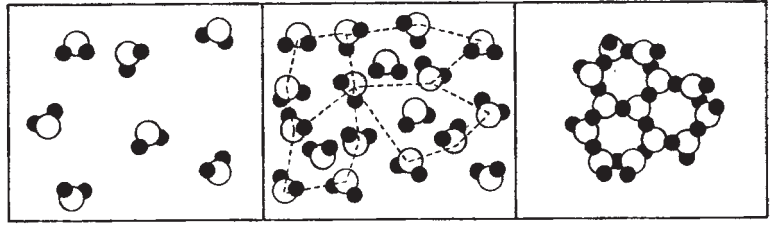
Розрахунки, виконані Карно, показали, що максимальний ККД ( $\eta_{\max}$ ) у циклу, що має чотири стадії: дві ізотерми ( $1 \rightarrow 2$ ,  $3 \rightarrow 4$ ) та дві адіабати ( $2 \rightarrow 3$ ,  $4 \rightarrow 1$ ). Стадії  $1 \rightarrow 2$  і  $2 \rightarrow 3$  — робочі, а  $3 \rightarrow 4$  і  $4 \rightarrow 1$  — допоміжні.

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Висновки: 1)  $\eta < 1$ ; 2)  $\eta$  тим більше, чим більше  $T_1$  і чим менше  $T_2$ .

## Агрегатні стани речовин

Різновиди впорядкованості  
(на прикладах води і льоду)



а) пара

б) вода

в) лід

У газі (парі) розташування молекул неупорядковане (а).

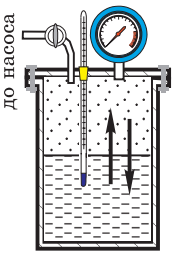
У рідині розташування молекул не безладне: у більшості рідин є ближній порядок, а в деяких — навіть дальній (с. 41).

Кожну молекулу води оточують 5—6 сусідніх, що розташовані в основному у вершинах неправильного п'ятикутника. Поблизу іншої молекули сусідні молекули також утворюють п'ятикутник, але іншої форми (б).

Порядок у розташуванні молекул речовини, який зберігається лише поблизу даної молекули, — ближній порядок.

У твердих тілах (монокристалах) спостерігається упорядкованість у межах усієї речовини, тобто є дальній порядок (в).

### Випаровування рідини і конденсація пари



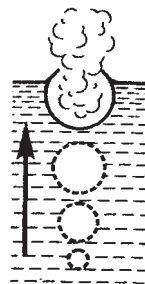
**Випаровування** — пароутворення з вільної поверхні рідини, **конденсація** — зворотний процес, тобто утворення рідини з пари. (Утворення інею можна також розглядати як конденсацію.) Якщо випаровування має перевагу перед конденсацією, пара **ненасичена**. При взаємному зрівноваженні цих процесів пара **насичена**.

Чим більше  $T$ , тим більше  $p_{\text{нас. пари}}$ .

Якщо рідина випаровується у замкнений безповітряний простір,  $p_{\text{пари}}$  можна вимірювати манометром. Тиск водяної пари, що міститься в повітрі, виміряти неможливо. Цей тиск (парціальний тиск, від «part») складає частину тиску, вимірюваного барометром.

## Кипіння

Це пароутворення зсередини рідини. У цьому процесі беруть участь газові бульбашки, що містяться в рідині. Кипіння кожної рідини при незмінному тиску відбувається при цілком певній незмінній температурі. Чим більший тиск над рідиною, тим вища температура кипіння.



## Вологість повітря. Точка роси

**Абсолютна вологість** — це парціальний тиск пари в повітрі або густина цієї пари.

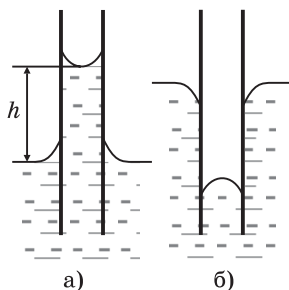
**Відносна вологість:**

$$\varphi = \frac{P_{\text{парц}}}{P_{\text{нас.парі}}} \cdot 100\% = \frac{\rho_{\text{пари в повітрі}}}{\rho_{\text{нас.парі}}} \cdot 100\% \quad \text{—}$$

це відношення парціального тиску пари (або густини пари) до тиску (або густини) насиченої пари при даній температурі.

**Точка роси** — це температура, при якій пара, що міститься в повітрі, стає насиченою.

## Змочування. Капілярні явища

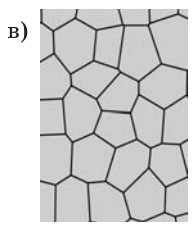
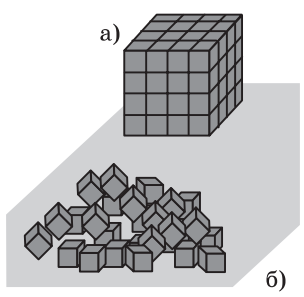


Рідина, що змочує стінки скляного капіляра, піднімається в ньому на висоту  $h$ , утворюючи увігнутий меніск, і дещо піднімається біля зовнішніх стінок (а). Рідина, що не змочує, опускається у капіляр і відходить від зовнішніх стінок, меніск при цьому опуклий (б). З умови:  $F_{\text{пов.нат}} = F_{\text{тяж}}$  висота підняття рідини в капілярі

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

де  $\sigma$  — поверхневий натяг рідини,  $\rho$  — її густина,  $r$  — радіус капіляра. Капілярність дуже важлива в живому світі (рух вологи в ґрунті, рух поживних соків у рослинах) і в техніці (підйом спирту чи гасу в ґноті, фарбування тканини й шкіри).

### Тверді тіла

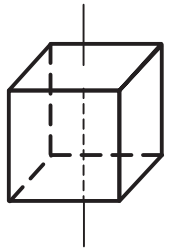


Кристаліти в сталі

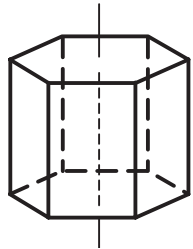
Істинно тверді тіла — кристали. У межах усього тіла дальній порядок зберігається лише в монокристалах (умовна модель монокристала — кубики, складені в один великий куб (а)). У природі монокристали рідкісні, частіше зустрічаються полікристали. Вони складаються з безлічі маленьких монокристалів (кристалітів, зерен), розташованих безладно один відносно одного (модель полікристала — не складені, а насипані кубики (б)). На рис. в — спостережені за допомогою мікроскопа кристаліти.

### Кристалічна ґратка. Елементарна комірка

Умове зображення дальнього порядку в монокристалі — ґратка, у вузлах якої — атоми. Найменше утворення, багаторазовим повторенням якого можна одержати монокристал, — елементарна комірка. Є сім основних типів комірок, найбільш розповсюджені в природі кубічна (у заліза, алюмінію, кам'яної солі) і гексагональна (у цинку, магнію, кадмію).

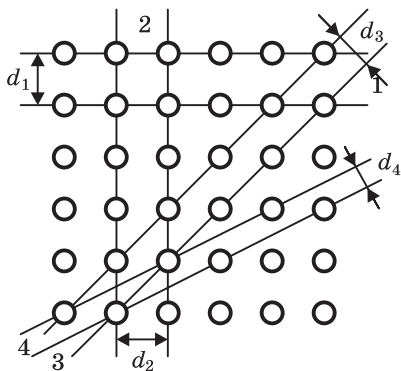


кубічна комірка



гексагональна комірка





### Анізотропія

Це неоднаковість більшості фізичних властивостей речовини (за винятком теплоємності й густини) в різних напрямках. Якщо провести по дві прямі через центри найближчих атомів у різних напрямках (1, 2, 3, 4), то відстані між кожною парою прямих (а отже, і між відповідними атомними площинами) виявляться різними:  $d_1$  і  $d_2$  — максимальні,  $d_4$  — мінімальна. Таким чином, сили зв'язку між молекулами (а отже, і міцність монокристала) мінімальні у напрямках 1 і 2. Полікристали, на відміну від монокристалів, ізотропні (кожний кристаліт анізотропний, але розташовуються кристаліти невпорядковано).

### Рідкі кристали

Це рідини з дальнім порядком у розташуванні молекул.

На відміну від твердих кристалів, у рідких кристалах дальній порядок спостерігається лише в одному напрямку.

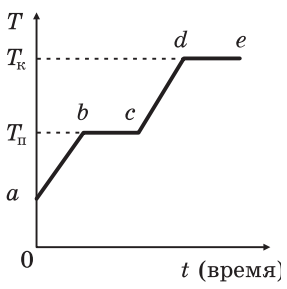
Відомо понад 3000 різних рідких кристалів, багато з них біологічного походження.

Застосування: цифрова індикація (у тому числі й в годинниках), перетворення інфрачервоного випромінювання на видиме; отримання плоских екранів моніторів; термоіндикація; ультразвукова медична діагностика замість рентгенівської.

### Аморфні тіла

Так називають багато речовин (різноманітні смоли, віск, скло, пластмаси), що мають лише ближній порядок. За структурою такі речовини — рідини (дуже в'язкі).

Плавлення



При нагріванні кристалічної речовини збільшується амплітуда коливань її молекул, зростає хаотичність їх руху, і при досить високій температурі зникає дальній порядок (речовина плавиться). Хімічно прості кристали плавляться при цілком визначеній температурі (точка плавлення). Зворотний процес — кристалізація.

Розглянемо нагрівання кристалічної речовини (див. рис.). Інтервал  $a-b$  — нагрівання тіла;  $b-c$  — плавлення тіла ( $T=T_n$ );  $c-d$  — нагрівання розплаву;  $d-e$  — кипіння розплаву ( $T=T_k$ ).

У сплавів існує інтервал температур, у якому відбувається плавлення. Аморфні тіла не плавляться, а розм'якшуються (зменшується їх в'язкість), вони не мають  $T_n$ .

Теплофізичні характеристики речовини

1. *Питома теплоємність*

Чим більша маса речовини, що нагрівається, і чим більшої зміни температури  $T_{\text{кінц}} - T_{\text{поч}} = \Delta T$  треба досягти, тим більше вимагається часу, і тим більше треба підвести тепла до речовини:

$$Q \sim m\Delta T.$$

Для різних речовин однакової маси  $m$  для досягнення однакових змін температур  $\Delta T$  потрібна різна кількість теплоти:

$$Q = cm\Delta T.$$

Коефіцієнт  $c$  (від «capacity» — ємність) — *питома теплоємність*.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Ця величина чисельно дорівнює кількості теплоти, яку одержує чи віддає 1 кг речовини при зміні її температури на 1 К.

**2. Питома теплота плавлення**

Чим більша маса  $m$  речовини, яку розплавляють, тим більше треба теплоти  $Q$ , щоб її розплавити:

$$Q \sim m, \quad Q = \lambda m, \quad \lambda = \frac{Q}{m}, \quad [\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота плавлення чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати одному кілограму кристалічної речовини, нагрітої до температури плавлення, щоб перетворити її на рідину тієї ж температури.

Для процесу кристалізації

$$Q = -\lambda m,$$

у цьому випадку  $\lambda$  — питома теплота кристалізації.

**3. Питома теплота пароутворення**

Як і в попередньому випадку,  $Q \sim m$  (чим рідини більше, тим довше її випаровувати, тим більше потрібно теплоти).

$$Q = Lm, \quad L = \frac{Q}{m}, \quad [L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота пароутворення чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідній, щоб при незмінній температурі 1 кг рідини перетворити на пару.

Для процесу конденсації

$$Q = -Lm,$$

у цьому випадку  $L$  — питома теплота конденсації.

**4. Питома теплота згоряння (теплотворна здатність)**

Чим більше згоряє палива, тим більше тепловиділення:  $Q \sim m$ . Різні речовини виділяють різну кількість теплоти  $Q$ :

$$Q = qm, \quad q = \frac{Q}{m}, \quad [q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота згоряння чисельно дорівнює кількості теплоти, що виділяється при згорянні 1 кг речовини.

**Рівняння теплового балансу**

Воно виражає закон збереження енергії у процесах теплообміну.

Для  $n$  тіл, між якими встановлений тепловий контакт,

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0.$$

( $Q > 0$  для тіл, що одержують тепло,  $Q < 0$  для тіл, що віддають тепло.)

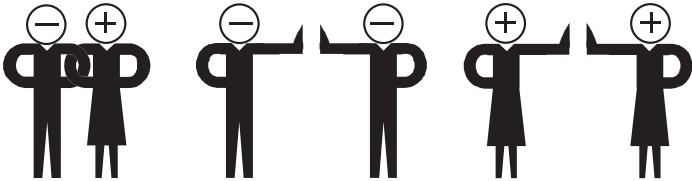
# Електростатика

Розділ фізики, що вивчає заряджені тіла (або частинки), які перебувають у спокої, і їхню взаємодію.

Електростатика

## Електрична взаємодія тіл та її особливості

Наелектризовані тертям шматок янтарю і шматок скла притягаються один до одного, але шматки янтарю *один від одного відштовхуються*, шматки скла — також.



Підкреслюючи різницю в наелектризованості янтарю і скла, умовно прийняли, що янтар заряджений негативно, а скло — позитивно (хоча можна було вчинити навпаки).

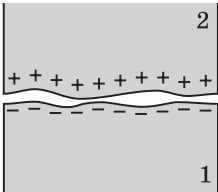
### Носії електрики

Усі тіла складаються з атомів, що мають негативно заряджені частинки (електрони) й позитивно заряджені частинки (протони). У нейтральному атомі число електронів і протонів однакове, у ненаелектризованому тілі — також.

**Електрон і протон** — носії елементарного (найменшого неподільного) заряду:

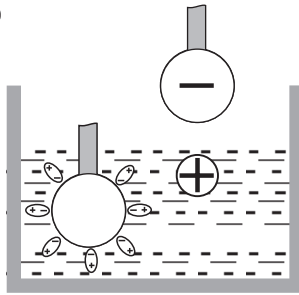
$$|q_e| = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad |q_p| = |q_e|.$$

### Роль тертя в електризації тіл

а) 

Експерименти показали, що не лише при терті (а), але й при тісному стиканні тіл спостерігається їх електризація.

б)



Кулька із незмочуваного водою діелектрика (наприклад, парафіну) після одноразового повільного занурення у дистильовану воду і витягнення з води виявлялася зарядженою негативно, а вода — позитивно (б).

### Закон Кулона

Кількісну міру наелектризованості тіл спочатку назвали кількістю електрики (ї позначили « $q$ » або « $Q$ » — від «*quantity*» — кількість). Тепер цю величину називають **зарядом** і розглядають як кількісну міру здатності тіл до електричної взаємодії.

Модуль сили, з якою один точковий заряд діє на інший у вакуумі, прямо пропорційний зарядам і обернено пропорційний квадрату відстані між ними:

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

Ця формула аналогічна формулі закону всесвітнього тяжіння. Іноді пишуть  $|q_1|$  і  $|q_2|$ , формально підкреслюючи розгляд модулів зарядів.

Коефіцієнт  $k$  в СІ:  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} .$

$[q] = \text{Кл}$  (кулон), це неосновна одиниця СІ, що вводиться через основну — ампер.

Часто  $k$  подають у вигляді:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} ,$$

звідси  $\epsilon_0$  (електрична стала):

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \text{ (або } \frac{\Phi}{\text{м}}, \text{ див. с. 52).}$$

### Закон збереження заряду

В електрично нейтрального тіла сумарний позитивний заряд чисельно дорівнює сумарному негативному. Електризація тіл (тертям чи дотиком) — результат переходу заряджених частинок від одного тіла до іншого. Якщо ці тіла утворюють замкнену систему, то *алгебраїчна сума зарядів не змінюється*:

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

тобто при будь-яких взаємодіях тіл електричні заряди не виникають і не знищуються, а лише передаються від одного тіла іншому — перерозподіляються між тілами, що утворюють систему.

## Електростатичне поле

### Напруженість електростатичного поля

Взаємодія тіл на відстані через «ніщо» неможлива, матеріальний посередник у такій взаємодії — *поле*.

*Електростатичне поле* — особливий вид матерії, що оточує заряджені тіла і є посередником у їх взаємодії.

Електричне поле в кожній його ділянці діє на заряджені тіла, що вносяться в нього. Цю силову дію досліджують за допомогою «пробного заряду»  $q_n$ .

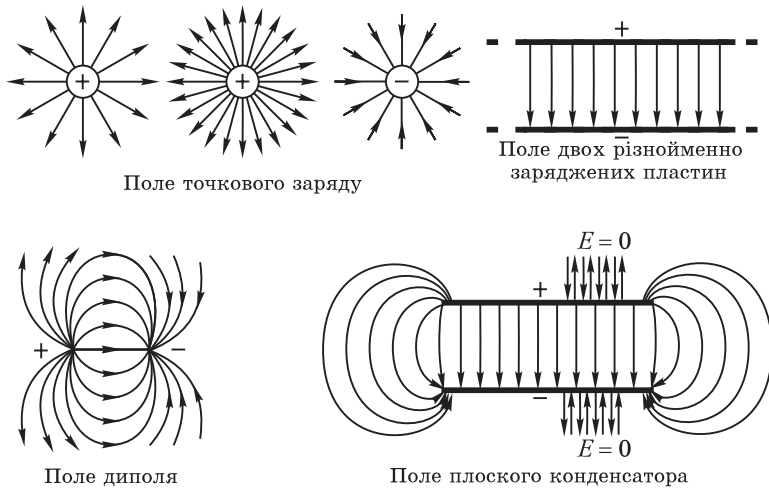
$q_n$  — це точковий позитивний заряд, набагато менший, ніж заряд, що створює досліджуване поле.

*Напруженість електричного поля* — його силова характеристика, що чисельно дорівнює силі, діючій на одиничний пробний заряд, внесений у досліджувану точку поля.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{ел}}}{q_n} \quad \text{— напруженість;}$$

$$\vec{E} \parallel \vec{F}, \quad [E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} (= \frac{\text{В}}{\text{м}}).$$

### Лінії напруженості (силові лінії)



Вносячи у різні точки досліджуваних полів точковий заряд, будують лінії напруженості (силові лінії). Якщо вони прямі, то вектор  $\vec{E}$  напрямлений уздовж них, якщо криві — уздовж дотичних до них. Густота сітки ліній чисельно дорівнює (або пропорційна) значенню напруженості.

Силкові лінії електростатичного поля незамкнені (починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних).

Електростатика

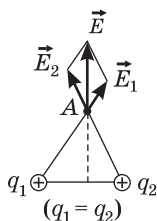
### Напруженість поля точкового заряду

Нехай у точку поля, утвореного точковим зарядом  $q$ , внесли заряд  $q_н$ . Тоді:

$$E_q = \frac{F_{эл}}{q_н} = \frac{kq q_н}{r^2 q_н}$$

$$E_q = \frac{kq}{r^2}$$

## Принцип суперпозиції полів



Нехай поблизу точки  $A$  перебувають два заряди  $q_1$  і  $q_2$ . Заряд  $q_1$  створює в точці  $A$  поле напруженістю  $\vec{E}_1$ , а заряд  $q_2$  — поле напруженістю  $\vec{E}_2$ . Ці поля накладаються, результуюча напруженість поля в точці  $A$ :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

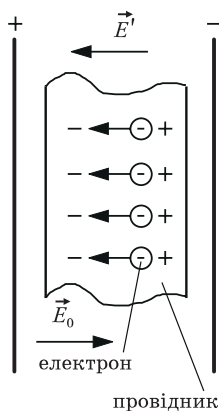
Узагальнення на випадок поля  $n$  зарядів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n,$$

тобто напруженість електричного поля системи точкових зарядів дорівнює векторній сумі напруг полів кожного з цих зарядів окремо.

Інакше кажучи, результуюче поле утворюється простим накладанням (суперпозицією) полів окремо кожного із зарядів системи; поля окремих зарядів, накладаючись, не впливають одне на одне.

## 1. Провідники (метали) в електричному полі



Усередині провідників завжди є «вільні» електрони, що рухаються довільно, при цьому концентрація їх у провіднику стала. Вони не належать до конкретного атома (колективізовані). При вміщенні провідника в електричне поле напруженістю  $\vec{E}_0$  частина вільних електронів зміщується до поверхні провідника. Це створює надлишок негативного заряду біля поверхні однієї частини провідника (лівої) і позитивного — біля другої (див. рис.)

Ці заряди створюють поле напруженістю  $\vec{E}'$ , що повністю компенсує зовнішнє поле (оскільки  $E' = -E_0$ , то всередині провідника:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ ,  $E = E_0 - E' = 0$ ). Цю властивість використовують для електростатичного захисту (електростатичного екранування).



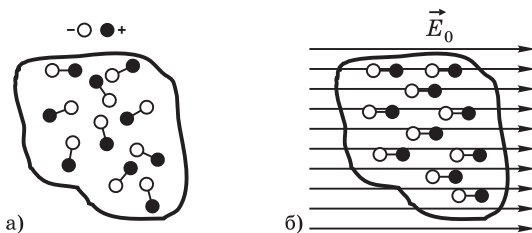
## 2. Діелектрики в електричному полі

У діелектриках немає колективізованих («вільних») електронів, тому діелектрики не проводять струм. Є два основні типи діелектриків.

1) Такі, що складаються з полярних молекул (диполів, тобто «здвоєних електричних полюсів»), які за відсутності зовнішнього поля розташовані хаотично (а).

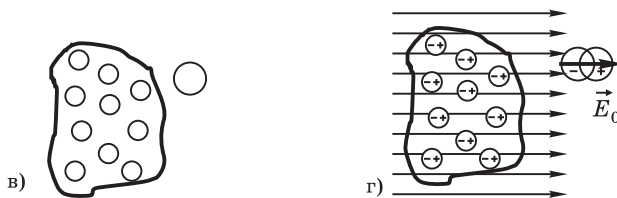
Приклади: дистильована вода, кам'яна сіль.

Зовнішнє поле чинить орієнтуючу дію на диполі в діелектрику (б).



2) Такі, що складаються з електрично нейтральних молекул (в).

Під дією зовнішнього поля ядра атомів у молекулах такої речовини зсуваються в один бік, електрони — в інший. Деформуюча дія поля перетворює молекули діелектрика на диполі (г).

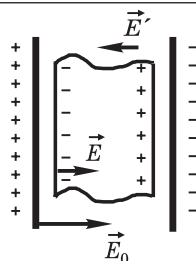


Процеси (1) і (2) реагування діелектриків на зовнішнє електричне поле називаються поляризацією діелектрика.

### Діелектрична проникність

Усередині діелектрика, вміщеного в електричне поле напруженістю  $\vec{E}_0$ , виявляється електричне поле. Його напруженість  $E < E_0$ .

$$\frac{E_0}{E} = \epsilon, \quad \epsilon > 1.$$



Фізична величина, що показує, у скільки разів напруженість поля, в якому перебуває діелектрик, більша, ніж напруженість поля в діелектрику, називається **діелектричною проникністю**  $\epsilon$ .

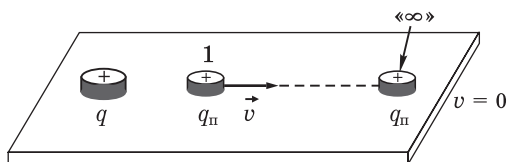
Приклади:  $\epsilon_{\text{янтюрю}} \approx 3$ ,  $\epsilon_{\text{слюди}} \approx 6$ ,  $\epsilon_{\text{скла}} \approx 4 \div 10$ ,  $\epsilon_{\text{води}} \approx 80$ .

Формула Кулона для випадку взаємодії зарядів, вміщених у діелектричне середовище:

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

Діелектрична проникність  $\epsilon$  показує, у скільки разів діелектрик послаблює взаємодію зарядів.

### Потенціал електростатичного поля



Умовно назвемо «нескінченністю» ділянку простору, яка настільки віддалена від заряду  $q$ , що в ній практично не виявляється його дія на  $q$ . На рисунку ця ділянка позначена як « $\infty$ ».

Фізична величина, що чисельно дорівнює роботі електростатичного поля при віддаленні одиничного пробного заряду з деякої точки поля на «нескінченність», називається потенціалом  $\phi$  даної точки поля.

$$\phi_1 = \frac{A_{1 \rightarrow \infty}}{q_{\text{п}}} = \frac{W_{p, \infty} - W_{p, e1}}{q_{\text{п}}} = \frac{|W_{p, e1}|}{q_{\text{п}}},$$

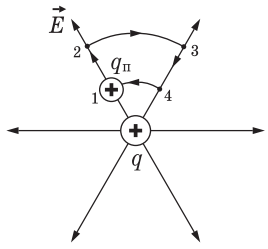
де  $W_{p, \infty}$  і  $W_{p, e1}$  — потенціальна енергія електричної взаємодії зарядів  $q_{\text{п}}$  і  $q$  на « $\infty$ » та в точці 1 відповідно.

Потенціал  $\varphi = \frac{|W_{p,e}|}{q_n}$  — величина, що чисельно дорівнює потенціальній енергії одиничного пробного заряду в деякій точці поля.

(Потенціал — скаляр, енергетична характеристика поля, характеристика його «працездатності».)

$[\varphi] = \text{В (вольт)}, \quad 1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}.$

**Потенціальність електростатичного поля**



При переміщенні заряду  $q$  в електричному полі заряду  $q$  по замкненому контуру 1, 2, 3, 4, 1 виконується робота:

$$A_{1,2,3,4,1} = A_{1,2} + A_{2,3} + A_{3,4} + A_{4,1}.$$

На ділянках  $2 \rightarrow 3$  і  $4 \rightarrow 1$  сили електричного поля внаслідок їх перпендикулярності до цих ділянок не виконують роботи, а на ділянці  $3 \rightarrow 4$  зовнішня сила виконує роботу проти сил електричного поля (їх робота негативна):

$$A_{3,4} = -A_{1,2}.$$

Таким чином, робота з переміщення заряду замкненим контуром:  $A_{1,2,3,4,1} = 0$ . Сили, робота яких на замкненому шляху дорівнює нулю, називаються потенціальними, отже, сили електростатичного поля потенціальні.

**Електрична ємність**

Нехай на металевій пластині міститься заряд  $q_1$ , при цьому потенціал будь-якої її точки  $\varphi_1$ . Привнесення додаткового заряду  $\Delta q$  на будь-яку частину пластини збільшить потенціал усіх точок пластини (завдяки розтіканню цього  $\Delta q$  по всій пластині), тобто  $\Delta\varphi \sim \Delta q$ ,  $\Delta\varphi = \frac{1}{C} \Delta q$ , звідки:

$C = \frac{\Delta q}{\Delta\varphi},$       або       $C = \frac{q}{\varphi}.$

Електростатика

Величина  $C$  (від «*capacity*» — ємність), що чисельно дорівнює заряду, надання якого провіднику збільшує потенціал будь-якої його точки на 1 вольт, називається **електричною ємністю**.

$$[C] = \Phi \text{ (фарад)}, \quad 1\Phi = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}.$$

1 фарад — дуже велика ємність (таку ємність мала б металева куля, радіус якої  $\approx$  у 1500 разів перевищував радіус Землі (!)). На практиці користуються зменшеними одиницями: мікрофарад ( $1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi$ ) і пікофарад ( $1 \text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi$ ).

## Конденсатори

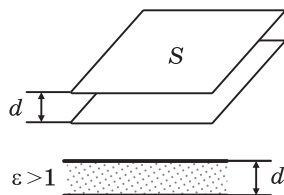
### Ємність плоского конденсатора

Конденсатор — пристрій, що дозволяє у малій ділянці простору накопичити великий заряд. Конденсатор складається з двох близько розташованих провідників (обкладок), розділених шаром діелектрика.

Для будь-яких двох провідників

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

де  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$  — різниця потенціалів цих провідників, або напруга між обкладками.

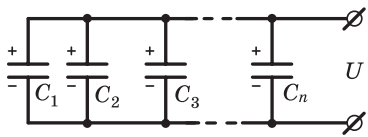


Найбільш розповсюджені плоскі конденсатори. Формула ємності плоского конденсатора

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

### З'єднання конденсаторів

а) *Паралельне з'єднання* конденсаторів дозволяє одержати великі ємності.

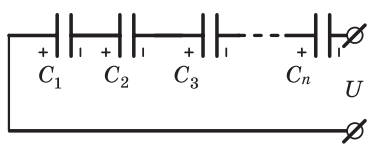


$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n,$$

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

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

б) *Послідовне з'єднання* конденсаторів



$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n,$$

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

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

Якщо в батарею послідовно з'єднано  $n$  конденсаторів однакової ємності, то ємність батареї у  $n$  разів менша від ємності кожного конденсатора, і напруга на кожному конденсаторі також у  $n$  разів менша.

Електростатика

### Енергія електростатичного поля

Як приклад розрахуємо енергію поля зарядженого конденсатора як роботу, що виконується полем конденсатора в процесі його розрядження.

$$W = A_{\text{розр}} = qU_{\text{серед}} = \frac{qU}{2}.$$

Виражаючи із формули  $C = \frac{q}{U}$  спочатку  $q$ , потім  $U$ , одержуємо:

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

# Електродинаміка

Розділ фізики, що вивчає явища, обумовлені рухом електричних зарядів.

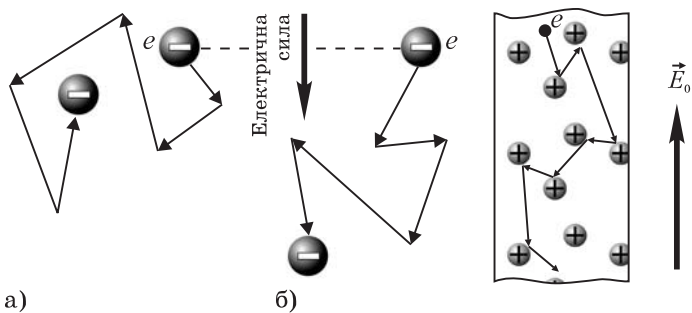
## Електричний струм

Це процес упорядкованого (напрявленого) руху заряджених частинок.

Найбільш відомі *струми в металах* зумовлені наявністю різниці потенціалів на кінцях деякого провідника. Ці струми являють собою упорядкований рух колективізованих електронів металу.

Колективізовані (або «вільні») електрони в металах з'являються завдяки щільній упаковці атомів у кристалі. «Успільнюються» при цьому найбільш периферійні (валентні) електрони атомів, що отримують можливість рухатись по кристалу.

Електродинаміка



а) Рух «вільних» електронів за відсутності зовнішнього електричного поля (за відсутності  $\phi_1 - \phi_2$ ) хаотичний.

б) Під дією зовнішнього поля електрони, продовжуючи хаотичний рух, напрямлено дрейфують.

$$v_{\text{серед. упор}} \ll v_{\text{серед. хаот}}$$

$$(v_{\text{серед. упор}} \approx 10^{-3} \div 10^{-5} \frac{\text{М}}{\text{с}}),$$

$$(v_{\text{серед. хаот}} \approx 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}).$$

## Сила струму

Напрямлений рух заряджених частинок може відбуватися з різними швидкостями. Бистроту руху заряджених частинок називають *силою струму*

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

Сила струму чисельно дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за секунду.

$$[I] = \text{А (ампер)}.$$

Ця одиниця, одна з основних в СІ, вводиться на підставі закону магнітної взаємодії провідників зі струмом (див. с. 67). Формула сили струму використовується для формулювання одиниці заряду: *кулон* — це заряд, проходження якого через переріз провідника за секунду створює в провіднику струм в один ампер.

Якщо ні бистрота, ні напрям руху зарядів із часом не змінюються, струм називають *постійним*.

У випадку *постійного* струму для будь-яких проміжків часу:

$$\frac{\Delta q_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta q_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{\Delta q_n}{\Delta t_n}.$$

$$I = \frac{q}{t}.$$

## Джерела струму. Електрорушійна сила

Для тривалого протікання струму через провідник (струму провідності) необхідне тривале підтримування різниці потенціалів на кінцях провідника. Для цього практично неможливе застосування електризації тертям.

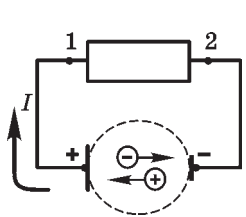
Було винайдено різного типу пристрої для відокремлення різнойменних зарядів атомів (чи молекул): магнітомеханічні, електрохімічні, термоелектричні, фотоелектричні. Такі пристрої можуть використовуватись як джерела струму.

Сили, що діють у джерелах струму і відокремлюють, усупереч кулонівським силам, різнойменні заряди, називаються *сторонніми силами*.

Прикладом джерела струму може бути акумулятор, у середині якого хімічні сили розділяють молекули на позитивні й негативні йони і переносять їх на клеми (затискачі) акумулятора.

Енергетичну характеристику джерела струму називають *електрорушійною силою* (ЕРС) і позначають  $\mathcal{E}$ .

ЕРС враховує лише другу функцію сторонніх сил — перенесення вже розділених різнойменних зарядів.



Найпростіше електричне коло — сукупність джерела струму, споживача й з'єднувальних провідників.

У металі струм утворюється рухом електронів від клеми «-», однак за напрям струму історично прийнятий рух позитивних зарядів (від «+» до «-»).

Хоча безпосередньо сторонні сили проявляються всередині джерела, роботу вони виконують у всьому колі.

$$A_{\text{у всьому колі}} = A_{\text{сторонніх сил}}$$

Формула *електрорушійної сили*:

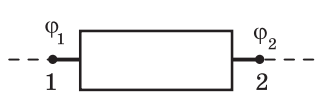
$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

Ця величина чисельно дорівнює роботі сторонніх сил з перенесення одиничного заряду в колі.

$$[\mathcal{E}] = \text{В (вольт)}$$

Закон Ома для однорідної ділянки кола.

Електрична провідність і опір



Уявно виділимо в електричному колі однорідну ділянку  $1 \rightarrow 2$ .  
На ній  $I \sim (\varphi_1 - \varphi_2)$ .

Залежність струму  $I$  від геометричних розмірів і матеріалу ділянки враховується коефіцієнтом  $G$  (*електропровідність*):

$$I = G(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$[G] = \text{См (сименс)}, \quad 1 \text{ См} = 1 \frac{\text{А}}{\text{В}}$$



Частіше користуються оберненою величиною — **опором**  $R$ .

Тоді:

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = \frac{U}{R}; \quad [R] = \text{Ом} = \text{См}^{-1}.$$

(Закон Ома: сила струму прямо пропорційна напрузі на ділянці й обернено пропорційна опору ділянки.)

Опір провідника (дроту):  $R = \rho \frac{l}{S},$

де  $l$  і  $S$  — довжина й площа поперечного перерізу провідника. Коефіцієнт  $\rho$ , що враховує властивості матеріалу, називається питомим опором,  $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$ .

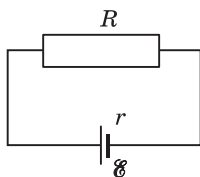
З використанням температури за Цельсієм залежність питомого опору від температури:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

Термічний коефіцієнт опору  $\alpha$  для чистих металів:

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{К}^{-1} \quad (\alpha = \gamma, \text{ с. 34}).$$

Закон Ома для повного кола



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

де  $\mathcal{E}$  — ЕРС джерела,  $R$  — зовнішній опір (опір зовнішніх стосовно джерела струму ділянок),  $r$  — внутрішній опір (опір джерела).

Робота і потужність струму. Закон Джоуля — Ленца

Оскільки робота електричного поля  $A = qU$ , то, виражаючи заряд через силу струму, одержимо  $A = IUt$ , або  $A = I^2Rt$ . У випадку постійного струму за рахунок роботи струму відбувається тепловиділення в металі:

$$Q = I^2Rt = U^2t / R.$$

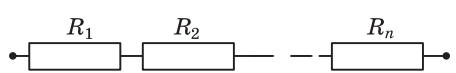
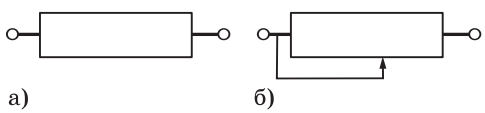
Кількість теплоти  $Q$ , що виділяється постійним струмом у провіднику, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму по провіднику (закон Джоуля — Ленца):  $Q = I^2 R t$ .

Потужність струму  $P = IU = I^2 R$ .  $[P] = \text{Вт} = \text{А} \cdot \text{В}$ .

Носії опору в колах.  
З'єднання резисторів

Нерегульовані пристрої, що вмикаються в коло для зміни його опору, називаються **резисторами** (а).

Пристрої, опір яких можна регулювати, називаються **реостатами** (б). Резистори виготовляються з металів; провідної кераміки, що містить карбон; спеціальних композитів.

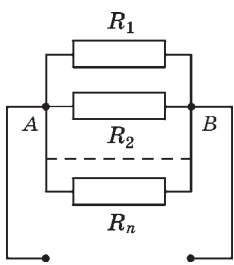


При послідовному з'єднанні резисторів усі електрони провідності (увесь струм) проходять через кожний із резисторів, унаслідок чого збільшується число зіткнень електронів з іонами, тобто збільшується опір ділянки:

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

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n; \quad U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

При паралельному з'єднанні резисторів струм розтікається: частина йде через  $R_1$ , частина — через  $R_2$  і т. д., що приводить до збільшення електричної провідності:



$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n,$$

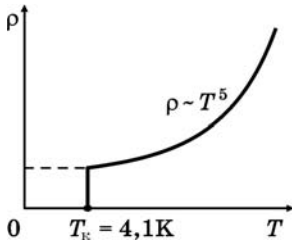
або

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

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n, \quad U = U_1 = U_2 = \dots = U_n.$$

# Електричний струм у різних середовищах

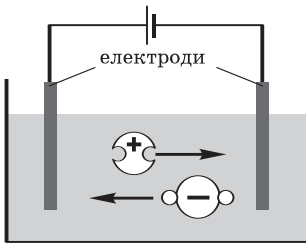
## Надпровідність



Так назвали відкрите Камерлінг-Оннесом у 1911 р. явище повного зникнення опору ртуті, охолодженої зрідженим гелієм. Потім надпровідність було виявлено і в інших металів: Al, Zn, Cd, Ti, Ni, Ta та ін.

У 1986 р. Мюллер і Беднорц виявили надпровідність «кераміки» (спресованих порошоків оксидів металів) при критичній температурі  $T_k = 35 \text{ K}$ . Пізніше було знайдено кераміки такого складу, що в них спостерігалась надпровідність при їх охолодженні зрідженим азотом (близько 77 K) і навіть при більш високих температурах.

## Струм в електролітах. Електроліз



Електроліти (кислоти, луги, солі) — речовини, які у водних розчинах і в розплавах проводять струм, маючи провідність іонного типу.

Окиснювально-відновні реакції на електродах, що містяться в електроліті, називають **електролізом**. При цьому з електроліту

виділяються йони й осаджуються на електродах.

Позитивно заряджений електрод (тут, а також у радіо-і в електротехнічних приладах) називають **анодом** (від грецького — *сходження*); негативно заряджений електрод — **катодом** (від грецького — *спуск*).

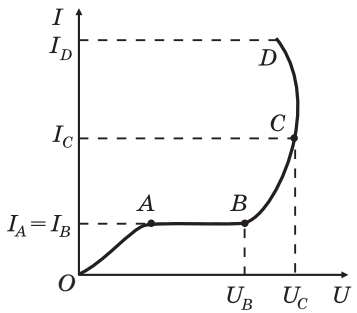
Формула Фарадея для визначення маси речовини, що осаджується на електродах:

$$m = \frac{MIt}{N_A e n} = \frac{MIt}{Fn} = kIt,$$

де  $M$  — маса моля,  $I$  — сила струму,  $t$  — час його проходження,  $N_A$  — стала Авогадро,  $e$  — заряд електрона,  $n$  — валентність,  $F$  — стала Фарадея (іноді  $F$  називають числом Фарадея),  $k$  — електрохімічний еквівалент.

## Струм у газі

Газ може стати провідником або при значному підвищенні температури, або при дії на нього ультрафіолетового, рентгенівського чи гамма-випромінювання. Усе це — зовнішні іонізатори, що перетворюють частину молекул газу на позитивні іони, відщеплюючи від молекул електрони.



Електричний струм у газі називають *газовим розрядом*.

Ділянка *OA вольт-амперної характеристики*: при збільшенні прикладеної напруги все більше заряджених частинок, утворених зовнішнім іонізатором, відводиться до електродів.

Ділянка *AB* відповідає струму насичення: усі електрони й іони, що утворюються за одиницю часу, відразу ж відводяться до електродів.

При деякій прискорювальній напрузі  $U > U_B$  набута електронами енергія достатня для ударної іонізації ними молекул газу, іде лавиноподібне збільшення числа електронів та іонів.

Незважаючи на великі значення струмів в інтервалі між  $\bar{V}_1$  і  $V$ , усунення зовнішнього іонізатора призводить до зникнення розряду.

Розряд, що відбувається лише в присутності зовнішнього іонізатора, називають *несамостійним*.

Розряд стає *самостійним* при подальшому посиленні електричного поля, прискорюючи електрони й іони. У достатньо сильних полях позитивні йони: а) вибивають електрони з катода; б) іонізують молекули газу, стикаючись з ними.

Виникнення самостійного розряду призводить до спаду напруги між електродами в газі (через суттєве зменшення опору газового проміжку), ділянка *CD*.

Залежно від тиску газу, форми електродів і прикладеної напруги можуть відбуватися самостійні розряди різних типів: тліючий, дуговий, коронний, іскровий.

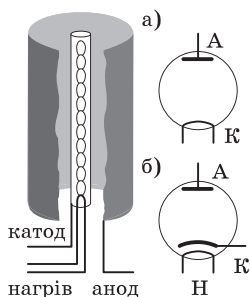
## Струм у вакуумі

### Емісія електронів

Вакуум у посудині — це настільки розріджений стан газу, що його молекули стикаються одна з одною рідше, ніж зі стінками посудини.

Вакуум — ізолятор, струм у ньому може виникнути лише за рахунок штучного введення заряджених частинок. Для цього використовують емісію (випускання) електронів. У вакуумних лампах із катодами, що нагріваються, відбувається *термоелектронна* емісія, а у фотодіоді — *фотоелектронна*.

### Вакуумні діод і триод

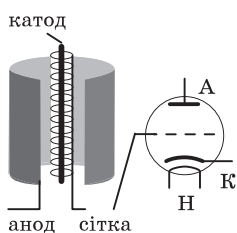


У перших конструкціях вакуумних двоелектродних ламп (*діодів*) використовувались катода прямого розжарення (вольфрамовий катод був одночасно й нагрівачем, і джерелом емісії (а)).

Потім почали виготовляти діоди з катодами непрямого нагрівання («підігрівальними»). При цьому джерела емісії — оксиди металів з малою роботою виходу з них електронів (див. с. 93), але з великим електроопором, тому

нагрівач у таких діодах відділений від катода (б).

Діоди служать для випрямлення змінного струму: протягом тих півперіодів, коли потенціал електрода, що є джерелом емісії, стає позитивним, струм через діод не йде. Отже, вакуумний *діод* має односторонню провідність, що дозволяє використовувати його як випрямляч.



У трьохелектродних вакуумних лампах (триодах) міститься ще один електрод (сітка, керуючий електрод). Зміна різниці потенціалів між сіткою і катодом змінює струм через лампу. Подаючи на «вхід» лампи (катод-сітка) слабкий змінний електричний сигнал, одержують «на виході» (катод—анод) підсилений сигнал такої ж форми, як і у вхідного сигналу.

Вакуумний *триод* завдяки наявності сітки може використовуватись як підсилювач.

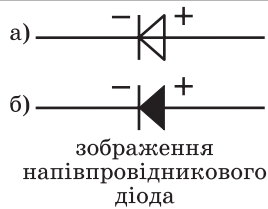
### Струм у напівпровідниках

Напівпровідники (Ge, Si та ін.) — речовини, що за провідністю посідають проміжне місце між провідниками й діелектриками. На відміну від провідників (металів), опір напівпровідників різко **зростає** при пониженні температури.

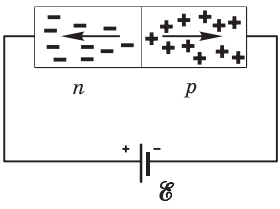
Чисті (без домішок) напівпровідники мають не лише електронну (як метали), але й діркову провідність. Провідності обох типів слабкі. Введення у напівпровідниковий кристал спеціальних домішок різко підсилює провідність того чи іншого типу. Кристал із підсиленою електронною провідністю — *n*-кристал, а з підсиленою дірковою провідністю — *p*-кристал.

### Напівпровідниковий діод

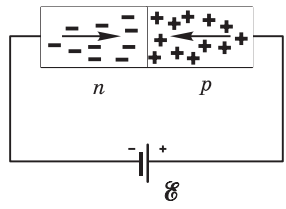
Якщо частина кристала має *n*-провідність, а частина — *p*-провідність, то це вже *n-p*-кристал. Межа контакту зон із різною провідністю — *n-p*-перехід. Він має односторонню провідність.



збіднення носіями заряду

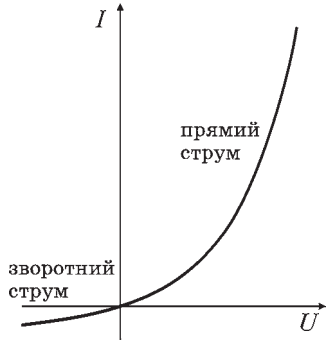


збагачення носіями заряду



Схемі а підключення *n-p*-кристала до джерела струму відповідає дуже слабкий струм через кристал, а схемі б — сильний. Інакше кажучи, схемі б відповідає увімкнення подвійного кристала в пропускну напрямку, а схемі а — у запираючому.

Слабкий (але відмінний від нуля) зворотний струм створюється рухом неосновних для кожного кристала носіїв заряду (електронів у *p*-кристалі й дірок у *n*-кристалі).

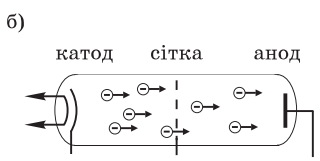
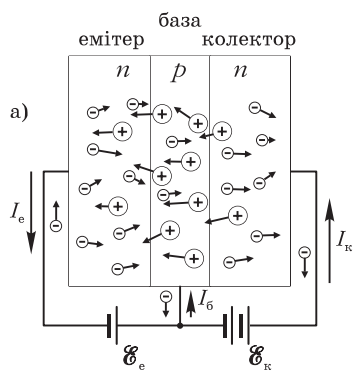


# Транзистор

Так називається пристрій із трьох напівпровідникових кристалів з домішковою провідністю. У транзисторах різного типу чергування кристалів різне:  $n-p-n$  або  $p-n-p$ .

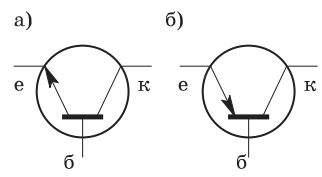
Транзистори в основному використовують для генерування та підсилення радіосигналів. Транзистор ( $n-p-n$ ) за принципом дії подібний до вакуумного триода (див. рис.) Транзистори ( $p-n-p$ ) також використовуються в багатьох схемах, але пояснення принципу їх дії складніше (доводиться говорити про емісію дірок, а не електронів).

Переваги напівпровідникових діода і триода: малі розміри, високі механічна міцність і довговічність, невисока робоча напруга. Недолік — різка залежність електричних характеристик від температури навколишнього середовища.



а) транзистор  
б) триод

Лівий  $n$ -кристал за своїм призначенням подібний до катода вакуумного триода і називається **емітером**; правий  $n$ -кристал подібний до анода і називається **колектором**;  $p$ -кристал подібний до сітки і називається **базою**. Змінюючи різницю потенціалів між емітером і базою (подаючи на них змінну  $U_{вх}$ ), можна керувати колекторним струмом.



Позначення  
а) ( $n-p-n$ )-транзистора  
б) ( $p-n-p$ )-транзистора

Електродинаміка

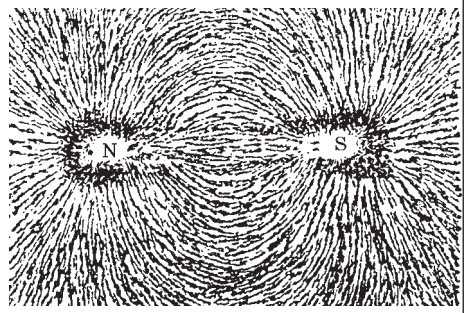
# МАГНЕТИЗМ

Розділ фізики, що вивчає взаємодію електричних зарядів, які рухаються, і явища, зумовлені магнітним полем таких зарядів (розділ «Магнетизм», як і розділ «Електричний струм», можна називати «Електродинаміка»).

МАГНЕТИЗМ

## Магнітне поле. Експериментальні факти

«Підстрибування» цвяхів до магніту (що нагадує «підстрибування» шматочків паперу до наелектризованого тіла), тобто далекодія магнітних сил, — підстава для введення поняття *магнітного поля* як виду матерії, що служить посередником у магнітній взаємодії.



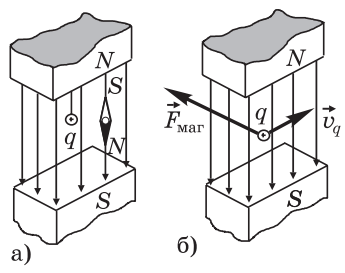
Уявлення щодо конфігурації магнітного поля отримали за допомогою залізних ошурок, які виявили картину ліній *магнітного поля*.

Встановлено:

- а) ці лінії замкнені;
- б) між різнойменними полюсами магніта ці лінії практично паралельні (тобто поле майже однорідне).

Напрямок ліній поля пов'язали із напрямком північного полюса магнітної стрілки, внесеної у поле (а).

За допомогою маленького зарядженого тіла (пробного заряду, рис. а, б) встановлено:



а) якщо  $v_q = 0$ , то і  $F_{\text{маг}} = 0$  (а);

б) якщо  $v_q \neq 0$ , то і  $F_{\text{маг}} \neq 0$  (б).

Чим більше  $q$ , тим більше  $F_{\text{маг}}$ .

Нехай вектор  $\vec{v}_q$  перпендикулярний до ліній магнітного поля. Тоді  $F_{\text{маг}} \sim v_{\perp}$ . Отже,  $F_{\text{маг}} \sim qv_{\perp}$ .



### Індукція магнітного поля. Сила Лоренца.

Чим сильніший магніт використовується в дослідах, тим сильніше діє його поле на той самий  $q_{\perp}$ . Коефіцієнт пропорційності, що враховує силові якості даного поля, назвали **індукцією  $B$  магнітного поля**. Тоді:

$$F_{\text{маг}} = Bqv_{\perp}, \quad \text{або} \quad F_{\text{маг}} = qv_{\perp}B$$

(останній варіант формули більш зручний при запису  $\vec{F}_{\text{маг}}$ ).

Силу, діючу на заряд, що рухається в магнітному полі, часто називають силою Лоренца  $\vec{F}_L$ .

Індукція магнітного поля чисельно дорівнює силі, діючій у магнітному полі на одиничний заряд, що влетів з одиничною швидкістю в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітного поля (ліній індукції):

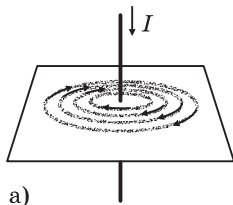
$$B = \frac{F_{\perp}}{qv_{\perp}}; \quad [B] = \text{Тл (тесла)}.$$

Якщо вектор  $\vec{v}$  не перпендикулярний до вектора  $\vec{B}$ , то  $F_L = qvB \sin \alpha$ , де  $\alpha$  — кут між  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ .

**Індукція магнітного поля  $\vec{B}$**  — вектор, напрям якого пов'язують із напрямом полюса  $N$  магнітної стрілки.

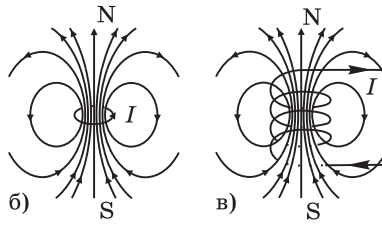
### Магнетизм струмів у провідниках різної форми

Навколо постійних магнітів, як і навколо провідників із струмом, виявляється магнітне поле. Результуюче поле магніту створюється безліччю мікромагнітів (атомарних мікрострумів), а поле провідника або котушки із струмом — безліччю рухомих електронів.



а)

Лінії вектора індукції поля прямолінійного провідника із струмом (а) — концентричні кола, що охоплюють провідник (тут лінії виявлено залізними ошурками).



Лінії вектора  $\vec{B}$  поля, створеного струмом в одному круговому провіднику (б) і в їх сукупності (в) (котушці або соленоїді), перпендикулярні до площини витків, проходять усередині них і замикаються ззовні.

### Сила Ампера

Розташуємо провідник із струмом у зовнішньому магнітному полі. На кожний із електронів, утворюючих струм, буде діяти сила Лоренца. Вона дуже мала, але таких електронів у провіднику безліч, і рухаються вони в одному напрямку. Тому результуюча всіх сил Лоренца (сила Ампера) виявляється здатною рухати весь провідник.

Одержимо формулу для обчислення сили Ампера:

$$F_A = \sum_{i=1}^n q_{e,i} v B \sin \alpha = v B \sin \alpha \sum_{i=1}^n q_{e,i} =$$

$$= Q v B \sin \alpha = \frac{Ql}{t} B \sin \alpha = Il B \sin \alpha .$$

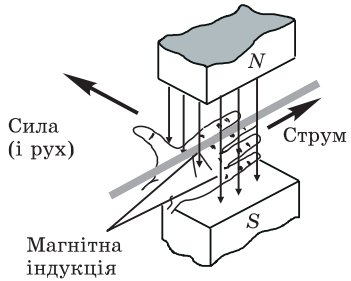
Отже:

$$F_A = Il B \sin \alpha .$$

Звідси — ще одна формула:

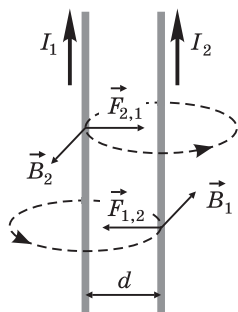
$$B = \frac{F_A}{Il \sin \alpha} .$$

Напрямок сили Ампера (і сили Лоренца) зручно визначати, користуючись «правилом лівої руки».



МАГНЕТИЗМ

## Закон взаємодії прямолінійних провідників із струмом (закон Ампера)



Нехай по двох «нескінченно довгих» (таких, довжина яких значно більша за діаметр) паралельних провідниках течуть струми  $I_1$  і  $I_2$ ; провідники — у повітрі. Кожний із провідників опиняється у магнітному полі другого провідника.

Так, магнітне поле струму  $I_1$  діє на ділянку завдовжки  $l$  провідника із струмом  $I_2$  силою Ампера  $F_{1 \rightarrow 2} = I_2 l B_1$  (у цьому випадку  $\sin \alpha = 1$ ).

Враховуючи, що модуль вектора  $\vec{B}$  прямо пропорційний струму  $I_1$  і обернено пропорційний довжині кола лінії індукції, запишемо:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}.$$

Тут  $\mu_0$  — *магнітна стала*, яка дорівнює  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ ,

(тобто  $\approx 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$  або  $\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ , див. с. 72).

Підставимо вираз  $B_1$  у формулу сили взаємодії провідників (враховуючи, що  $R = d$ ):

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d} \quad \text{— закон Ампера.}$$

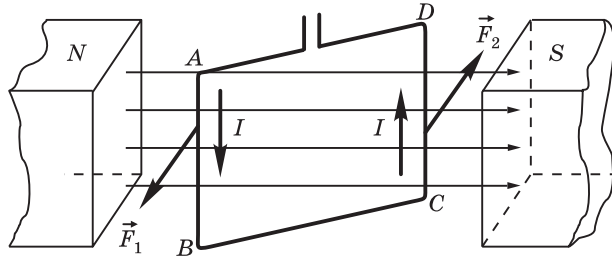
## Формулювання одиниці сили струму

Нехай  $I_1 = I_2 = 1\text{А}$ ,  $l = 1\text{м}$ ,  $d = 1\text{м}$ .

Тоді **1 ампер** — це сила такого незмінного струму, який, проходячи по двох прямолінійних нескінченно довгих і настільки тоненьких провідниках, що можна знехтувати їх товщиною, розташованих у вакуумі (або в повітрі) паралельно на відстані 1 м один від одного, викликає між ними сили взаємодії, кожна з яких чисельно дорівнює  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожний метр довжини провідників.

### Рамка зі струмом у магнітному полі

Найзручніше досліджувати силову характеристику магнітного поля (індукцію  $\vec{B}$ ) за допомогою прямокутної рамки із струмом.



На сторони  $AB$  і  $DC$  магнітне поле буде діяти силами Ампера, силами  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які утворюють пару сил. Момент цієї пари чинить на рамку обертаючу дію. Цей момент максимальний, коли площина рамки перпендикулярна до торцевих площин магніту (найнестійкіше положення рамки), і дорівнює нулю при паралельності площин рамки і магніту.

$$B = \frac{M_{\text{макс}}}{IS}$$

Добуток  $IS$  називають **магнітним моментом** рамки  $p_m$ . Іноді його вважають вектором, напрямленим уздовж нормалі до площини рамки за **правилом гвинта**.

Магнетизм

### Речовини в магнітному полі

При внесенні різних речовин у магнітне поле індукцією  $\vec{B}_0$  в них відбуваються різні процеси, що приводять до появи власного поля індукцією  $\vec{B}'$ .

1) Якщо напрям  $\vec{B}'$  протилежний напрямку  $\vec{B}_0$ , то результуюче поле в речовині трохи слабкіше за зовнішнє. Така речовина — **діамагнетик**.

2) Якщо  $\vec{B}' \parallel \vec{B}_0$ , але результуюче поле в речовині не набагато сильніше за зовнішнє, то така речовина — парамагнетик. В обох випадках  $B' \ll B_0$ .

3) Є речовини, в яких (як і у випадку 2)  $\vec{B}' \parallel \vec{B}_0$ , але  $B' \gg B_0$ . Такі речовини — **феромагнетики**.

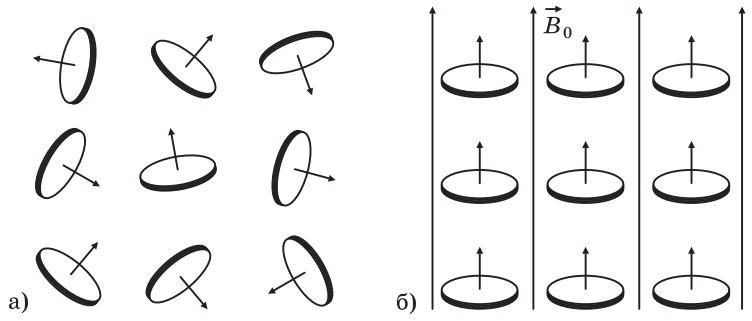
Величина, що показує, у скільки разів чисельне значення індукції результуючого поля в речовині відрізняється від значення індукції зовнішнього поля, називається *магнітною проникністю речовини*:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

**Діамагнетиками** ( $\mu < 1$ , наприклад  $\mu_{Cu} = 0,999987$ ) виваляються речовини, у валентних оболонках атомів яких міститься парне число електронів. При цьому магнітні моменти половини цих електронів мають один напрям, другої половини — протилежний, у результаті атом — не мікромагніт. Сили Лоренца зовнішнього поля прискорюють половину валентних електронів атома й уповільнюють другу половину, перетворюючи атом на мікромагніт, напрям індукції мікрополя якого протилежний напрямку  $\vec{B}_0$ . Тому в речовині  $B = B_0 - B'$ , де  $B'$  — модуль індукції власного поля речовини.

Приклади діамагнетиків: Cu, Pb, Zn, Ag, Au, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

**Парамагнетики** ( $\mu > 1$ , наприклад  $\mu_{Al} = 1,000023$ ) — речовини, валентні оболонки атомів яких мають непарне число електронів, так що і за відсутності зовнішнього поля кожний атом — мікромагніт, але різні мікромагніти орієнтовані в речовині довільно (а).



Зовнішнє поле орієнтує окремі мікромагніти в напрямку  $\vec{B}_0$ , створюючи в речовині власне поле індукцією  $\vec{B}'$  (б).

Тому в речовині  $B = B_0 + B'$ .

Приклади парамагнетиків: Al, Cr, Mn, Pt, U, O<sub>2</sub>.

МАГНЕТИЗМ

**Ферромагнетики**

Кожний окремий атом таких речовин — мікромагніт (як і у парамагнетиків), але в межах усього кристала є ділянки (домени), що об'єднують сотні тисяч таких мікромагнітів з однаковою орієнтацією. Однак орієнтація доменів у кристалі неупорядкована.

Зовнішнє поле індукцією  $\vec{B}_0$  викликає зростання більш близьких за орієнтацією до  $\vec{B}_0$  доменів і вишиковує їх уздовж  $\vec{B}_0$ :

$$B = B_0 + B'$$

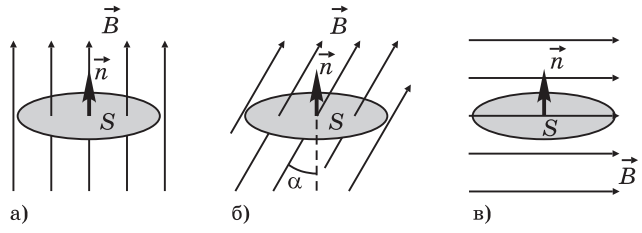
У ферромагнетиків (Fe, Co, Ni, Gd)  $\mu \gg 1$  (у деяких речовин  $\mu$  досягає значення сотень тисяч при досить великих  $B_0$ ), тому  $B' \gg B_0$ .

При нагріванні ферромагнетика до деякої достатньо високої температури (точки Кюрі) домени руйнуються, і речовина поводить себе як парамагнетик.

Застосування ферромагнетиків: виготовлення постійних магнітів і електромагнітів; виготовлення трансформаторів; магнітний запис звуку; запис інформації (дискети, вінчестери комп'ютерів).

**Магнітний потік**

Потік вектора  $\vec{B}$  через поверхню площею  $S$  чисельно дорівнює кількості ліній індукції  $N$ , що пронизують поверхню. Очевидно, що  $N$  залежить від  $|\vec{B}|$  (від густоти ліній індукції), від  $S$  і від орієнтації площадки відносно  $\vec{B}$  (від кута  $\alpha$  між  $\vec{B}$  і нормаллю  $\vec{n}$  до площадки).



У випадку *a* потік максимальний, а у випадку *в* — дорівнює нулю.

Отже, потік вектора  $\vec{B}$  (магнітний потік):

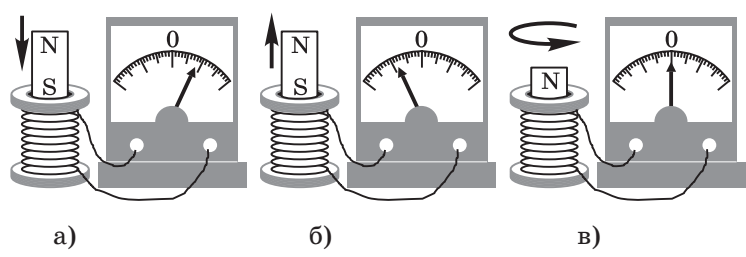
$$\Phi_{\text{«фі»}} = BS \cos \alpha.$$

$$[\Phi] = \text{Вб (вебер)}, \quad 1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

## Явище електромагнітної індукції

### Правило Ленца

Фарадей установив: будь-яка зміна магнітного потоку, що пронизує провідний замкнутий контур, викликає у ньому струм. Цей *індукційний* струм створює ЕРС індукції, яка виникає в контурі.



Наприклад, уведення магніту в котушку (а) або виведення його з котушки (б) наводить (індукує) у котушці струми (протилежного напрямку). Якщо магніт у котушці нерухомий або якщо його обертати в котушці (в), струму немає. Чим швидше поступально рухати магніт, тим більший струм у котушці. ЕРС у котушці ( $\mathcal{E}_i$ ) тим більша, чим більша швидкість зміни потоку, що пронизує витки котушки:

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{— формула Фарадея}$$

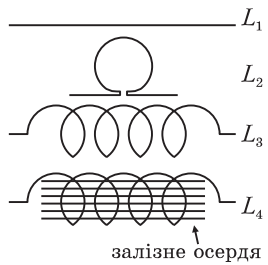
(«i» — від «induction»).

Знак «-» відображує **правило Ленца**: індукційний струм напрямлений так, що його магнітне поле протидіє зміні первинного (індукуючого) магнітного потоку.

### Самоіндукція

Якщо через дрітжану котушку пропускати струм, то будь-яка зміна струму змінює створюваний ним магнітний потік. Цей змінний потік індукуює ЕРС індукції. ЕРС, викликана зміною струму в котушці, називається ЕРС самоіндукції, а явище виникнення цієї ЕРС називається *самоіндукцією*.

Коефіцієнт пропорційності  $L$ , що враховує «геометрію» котушки і властивості її «оточення» — *індуктивність* (або коефіцієнт самоіндукції).



$$\mathcal{E}_S = -L \frac{\Delta I}{\Delta t};$$

$$[L] = \text{Гн (генрі)}.$$

$$L_4 > L_3 > L_2 > L_1.$$

### Енергія магнітного поля

У механіці кінетична енергія — це енергія тіла, що рухається, у магнетизмі енергія магнітного поля — це енергія зарядів, що рухаються («кінетична електрична» енергія).

Швидкість руху тіла  $v = \frac{ds}{dt}$ ,

бистрота руху заряду  $I = \frac{dq}{dt}$ .

Аналогія:  $v \rightarrow I, m \rightarrow L$ .

Отже:  $W_{\text{к. мех}} = \frac{mv^2}{2}$ ;

$$W_{\text{к. ел}} = W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2}.$$



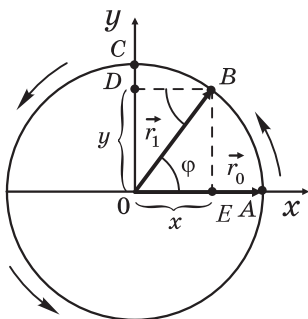
# Коливання і хвилі

Цей розділ фізики розглядає механічні й електромагнітні процеси, спільністю яких є багаторазова повторюваність.

## Поняття коливання (зокрема гармонічного)

**Механічне коливання** — такий вид руху тіла (матеріальної точки), під час якого воно багаторазово проходить ті самі положення. При цьому багаторазово змінюється напрям швидкості тіла.

Важливими й розповсюдженими є **гармонічні** коливання, під час яких деякі характеристики коливань (наприклад, зміщення тіла з положення рівноваги) змінюються у часі за законом синуса або косинуса.



Коливання матеріальної точки має багато спільного з рухом по колу. При цьому значення проєкцій  $(x, y)$  радіус-вектора матеріальної точки коливаються в діапазоні значень від 0 до  $\pm r_1$ .

Позначимо  $x_{\text{макс}} = y_{\text{макс}} = A$  (амплітуда).

Із трикутника  $BEO$ :

$$\frac{OE}{OB} = \frac{x}{x_{\text{макс}}} = \cos \varphi,$$

$$\frac{BE}{OB} = \frac{y}{y_{\text{макс}}} = \sin \varphi.$$

Оскільки  $\varphi = \omega t$ , то

$$x = A \cos \omega t,$$

або

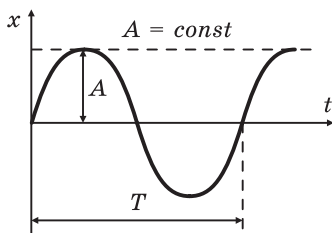
$$y = A \sin \omega t$$

рівняння гармонічного коливання.

### Характеристики гармонічного коливання

Аргумент синуса й косинуса називається **фазою** коливань. Вона показує, яка частина повного коливання здійснилася на даний момент.

Якщо відлік часу почався після початку коливання, говорять, що коливання відбувається з **початковою фазою**  $\varphi_0$ , тоді фаза  $\varphi = \varphi_0 + \omega t$ .



Величина  $\omega$  (аналог кутової швидкості обертання) називається **циклічною** (або **коловою**) частотою коливання, на відміну від «лінійної» частоти  $\nu$ :

$$\nu = \frac{N_{\text{КОЛИВ}}}{t} ;$$

$$[\nu] = \text{Гц (герц)}, 1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Обернена частоті коливань величина — **період коливань**  $T$ .

Зв'язок  $\omega$ ,  $\nu$  і  $T$ :

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

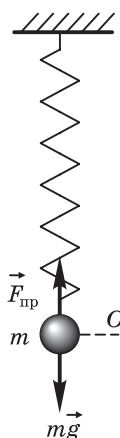
### Пружинний і математичний маятники. Формули періодів їх коливань

Візьмемо пружину жорсткістю  $k$  і прикріпимо до неї тягар масою  $m$ . Під дією ваги тягара пружина розтягнеться до положення рівноваги  $O$ .

Якщо зовнішньою силою вивести систему із положення рівноваги, вона може коливатися відносно положення  $O$ .

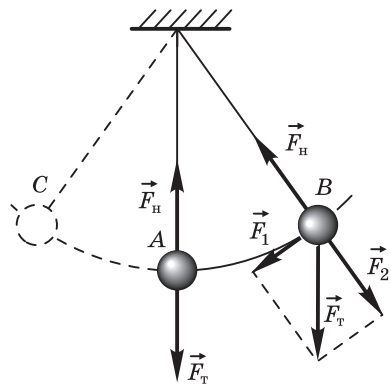
Період коливань пружинного маятника:

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



**Математичний маятник** — тіло типу матеріальної точки, підвішене на довгій невагомій нерозтяжній нитці.

При відхиленні нитки від вертикального положення система нитка—тягарець може здійснювати коливання у вертикальній площині.



Коливання відбуваються під дією повертаючої сили  $\vec{F}_1$  (складової сили тяжіння  $\vec{F}_T$ ).

а)  $T$  тим більше, чим більше  $l$  (тягарець на довгій нитці коливається «не поспішаючи»).

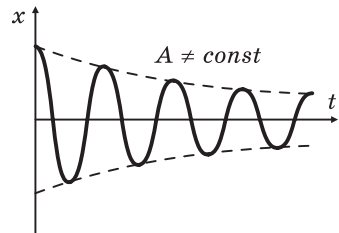
б)  $T$  тим більше, чим менша  $\vec{F}_T$  (на Місяці коливання маятника були б більш повільними, ніж на Землі).

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

**Перетворення енергії при гармонічних коливаннях**

- а) Якщо маятник утримувати в точці  $B$ , то:  $W_{p\max}, W_k = 0$ ;
- б) при русі від  $B$  до  $A$ :  $W_p$  зменшується,  $W_k$  зростає;
- в) у точці  $A$ :  $W_{k\max}, W_p = 0$ ;
- г) при русі від  $A$  до  $C$  (унаслідок інерції)  $W_k$  зменшується,  $W_p$  зростає;
- д) після досягнення точки  $C$  ( $W_{p\max}, W_k = 0$ ;) починається рух в інший бік.

**Затухаючі (згасаючі) коливання**



Графік **гармонічного** коливання являє собою синусоїду або косинусоїду. Однак у будь-якій коливальній системі, внаслідок неминучої наявності дії сил тертя й опору, власні коливання «затухають» із часом.

КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

### Вимушені коливання

У природі і в техніці розповсюджені коливання систем в умовах дії на них зовнішніх сил, що змінюються в часі. Такі коливання — *вимушені*.

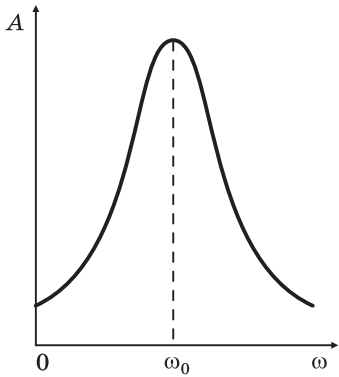
(Вимушені коливання здійснюють дерева і фрагменти споруд під натиском вітру; підлога машинного залу на заводі; міст під ногами людей; мембрана мікрофона.)

Вимушені коливання можуть стати незатухаючими, якщо зовнішня дія буде компенсувати спад енергії в системі в результаті дії сил тертя й опору.

### Резонанс

Нехай на коливальну систему безперервно діє зовнішня сила, що змінюється за гармонічним законом

$$F = F_{\text{макс}} \cos \omega t .$$



Якщо частота зміни змушуючої сили  $\omega$  збігається з власною частотою коливань системи  $\omega_0$ , **амплітуда** вимушених коливань різко зростає. У цьому суть резонансу (від латинського «*resonans*» — давати відгук).

Для послаблення шкідливої дії резонансу в техніці використовують гасителі коливань (демпфери), гумові та повстяні прокладки.

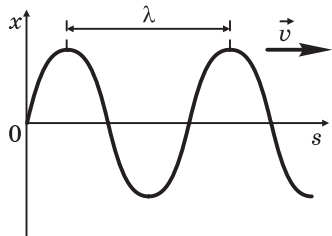
Корисні прояви резонансу: підсилення звуку музичними інструментами (корпус гітари, міхи баяна); настроювання радіоприймача на потрібну станцію, див. с. 81, 82.

Поняття механічних хвиль.

Поперечні та поздовжні хвилі

**Хвиля** — це процес поширення коливань у просторі.

**Механічні хвилі** — це поширення деформацій пружних середовищ.



У хвильового процесу, крім характеристик, аналогічних характеристикам коливань (період, частота, фаза, амплітуда), є специфічна характеристика — довжина хвилі  $\lambda$  («лямбда»). Це відстань, яку проходить хвиля за час, що дорівнює одному періоду. Інакше

кажучи:  $\lambda$  — це відстань між найближчими точками середовища, що коливаються в однакових фазах.

Швидкість хвилі

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu.$$

Хвиля **поперечна**, якщо напрями, в яких коливання відбуваються, і напрям, у якому вони поширюються, взаємно перпендикулярні.

Хвиля **поздовжня**, якщо ці напрями паралельні.

Поперечні хвилі бувають лише у твердих тілах, поздовжні (хвилі стиснення — розрідження) — у газах, рідинах, твердих тілах.

На поверхні рідин можуть утворюватися хвилі, що нагадують поперечні (наприклад, колові хвилі на воді від каменя, який кинули), але вони обумовлені в основному силою тяжіння.

Звук. Швидкість звуку

У широкому розумінні, звукові хвилі — це будь-які механічні хвилі (хвилі у пружних середовищах, або «пружні» хвилі). У вузькому значенні звукові хвилі (звук) — це такі пружні хвилі, дія яких створює у людини слухові відчуття.

Колівання і хвилі

Більшість людей чує звуки, яким відповідають частоти коливань від 16...20 Гц до 20 кГц.

Більш низькі частоти відповідають інфразвуку, а більш високі — ультразвуку.

Швидкість звуку в речовинах визначається їхніми пружністю і густиною

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — густина.

У газах швидкість звуку мінімальна (у повітрі  $v = 330 \pm 340 \frac{m}{s}$ , залежно від температури: чим більше  $T$ , тим більше  $v$ ); максимальна — у твердих тілах (у сталях  $v \approx 6000 \frac{m}{s}$ ); рідини займають проміжний стан (у воді  $v \approx 1500 \frac{m}{s}$ ).

Інтенсивність звуку.

Гучність звуку

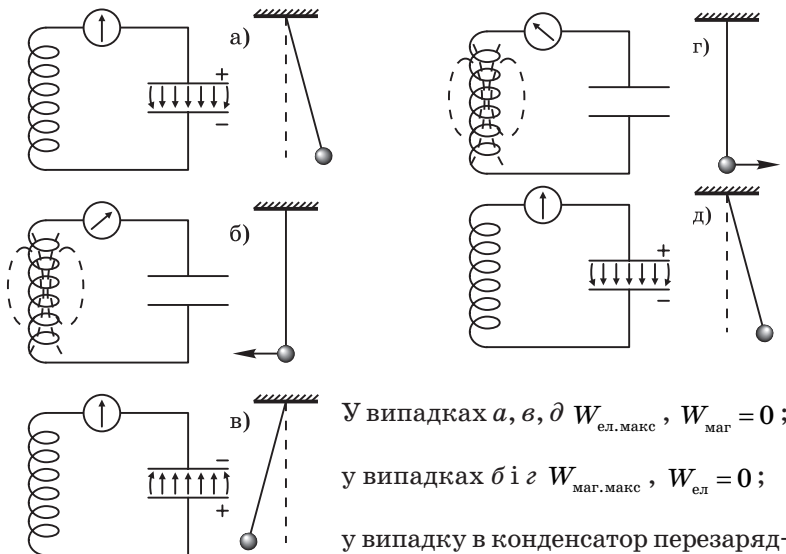
Є об'єктивні характеристики звукових хвиль, наприклад енергія хвилі  $W$  або інтенсивність хвилі  $I$  (чисельно дорівнює енергії, яку переносить хвиля за секунду через одиничну площадку в просторі).

**Гучність** — характеристика звуку, яка залежить не тільки від об'єктивних характеристик, але й від індивідуальних особливостей органів слуху людини.

### Електричні коливання

Пристрій, що накопичує електричну енергію, — **конденсатор**, а магнітну енергію — **котушка індуктивності**. З'єднані між собою провідниками, вони утворюють **коливальний контур** — систему, в якій можуть відбуватись **електричні коливання** — процес багаторазових взаємних перетворень електричного й магнітного полів.

## Процеси перетворення енергії у коливальному контурі



У випадках *a, в, д*  $W_{\text{ел. макс}}$ ,  $W_{\text{маг}} = 0$ ;

у випадках *б і г*  $W_{\text{маг. макс}}$ ,  $W_{\text{ел}} = 0$ ;

у випадку в конденсатор перезаряджений, тобто заряди його пластин протилежні за знаком випадку *a*.

## Період коливань у контурі

Очевидно: чим більше  $C$ , тим довше розряджається конденсатор; чим більше  $L$ , тим довше котушка втрачає магнітне поле. Отже:  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

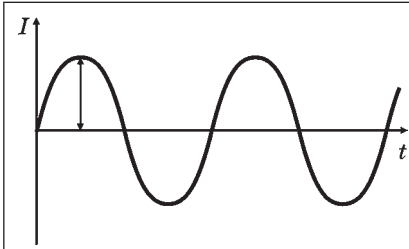
Це — формула Уільяма Томсона (лорда Кельвіна).

Вона аналогічна формулі періоду коливань пружинного маятника: адже  $m \rightarrow L$ , а величина, обернена жорсткості (піддатливість, м'якість), аналогічна ємності:  $\frac{1}{k} \rightarrow C$ .

## Вимушені електричні коливання.

### Змінний струм

Як і механічні, вільні електричні коливання швидко затухають через опір у системі. Практичне використання мають *вимушені* електричні коливання — *змінний струм*.



Для такого струму характерна зміна в часі швидкості і напрямку руху зарядів.

Амперметр і вольтметр у колі змінного струму вимірюють так звані діючі значення (вводяться за тепловою дією струму):

$$I_{\text{діюче}} = \frac{I_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} ; \quad U_{\text{діюче}} = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} .$$

Коло змінного струму, що містить котушку індуктивності й конденсатор, має опір:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} ,$$

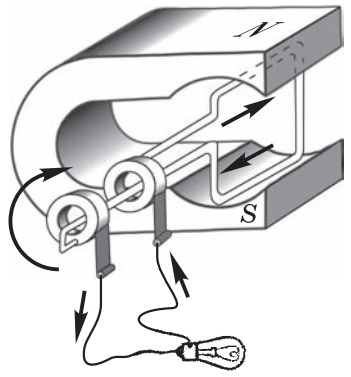
де  $R$  — активний опір,  $X$  — реактивний опір.

$$X = X_L - X_C ,$$

де  $X_L = \omega L$  — індуктивний опір,

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ — емнісний опір.}$$

### Генератор змінного струму

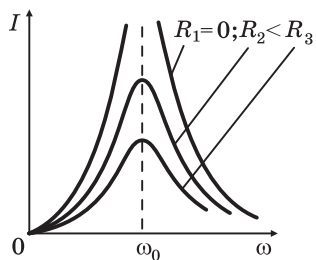


Найпростіший генератор складається із дротяної рамки (ротора), яку зовнішня сила приводить в обертання у полі нерухомого магніту (статора). При обертанні рамки змінюється магнітний потік через рамку, внаслідок чого в ній індукуються змінна електрорушійна сила. Кінці рамки підведені до кілець, які щільно притиснуті до контактних щіток, що знімають змінну напругу.

У процесі створення реальних генераторів змінного струму спочатку збільшували число витків, які обертаються в магнітному полі, але це призводило до пошкодження контактних ділянок унаслідок сильного іскріння. Тому в подальшому обмотку (витки) зробили статором (зникла необхідність у кільцях і щітках), а в ролі ротора опинився магніт (або електромагніт).



### Резонанс в електричному колі



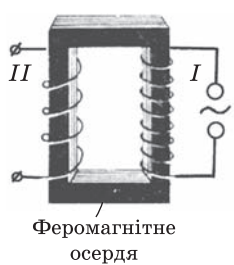
Резонанс у коливальному контурі — це різке зростання амплітуди вимушених електричних коливань при збігу частоти  $\omega$  зовнішньої змінної напруги  $U = U_{\text{макс}} \cos \omega t$  із частотою власних коливань у контурі  $\omega_0$ .

Чим менший опір контура, тим вища резонансна крива.  
Якщо  $R \rightarrow 0$ , то  $I_{\text{рез}} \rightarrow \infty$ .

### Трансформатори

Трансформатори напруги — це пристрої для зміни напруги: зменшення її (знижувальні трансформатори) або збільшення (підвищувальні трансформатори).

Дія трансформаторів заснована на *взаємній індукції* — окремому випадку електромагнітної індукції.

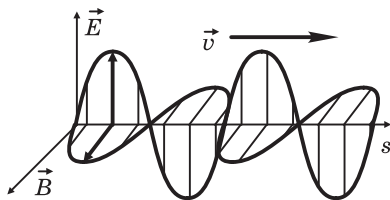


ЕРС індукції наводиться в кожному витку, тому чим більше витків у вторинній котушці, тим більша напруга наводиться в ній. Якщо число витків у первинній котушці ( $n_1$ ) більше, ніж у вторинній ( $n_2$ ), то трансформатор знижує напругу, і навпаки.

Відношення  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = K$  — коефіцієнт трансформації.  
При  $K > 1$  трансформатор *знижувальний*, а при  $K < 1$  — *підвищувальний*.

Коливання і ХВИЛІ

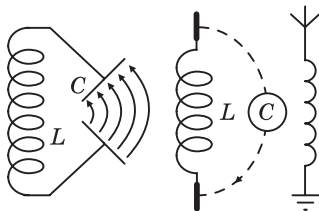
### Електромагнітні хвилі



Це — процес поширення у просторі електромагнітних коливань (або поширення нестаціонарного електромагнітного поля).

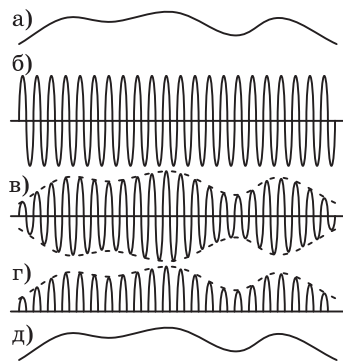
$$v_{\text{е-м хвилі у вакуумі}} = c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

### Випромінювання і приймання електромагнітних хвиль



Коливальний контур, що складається з котушки і плоского конденсатора, практично не випромінює електромагнітні хвилі у навколишній простір. Щоб дістати цю можливість, винайшли відкритий контур. Верхня пластина конденсатора замінена антеною, а нижня — заземлена. У приймачі радіохвиль також використовується відкритий контур, індуктивно пов'язаний з підсилювачем.

### Принципи радіозв'язку



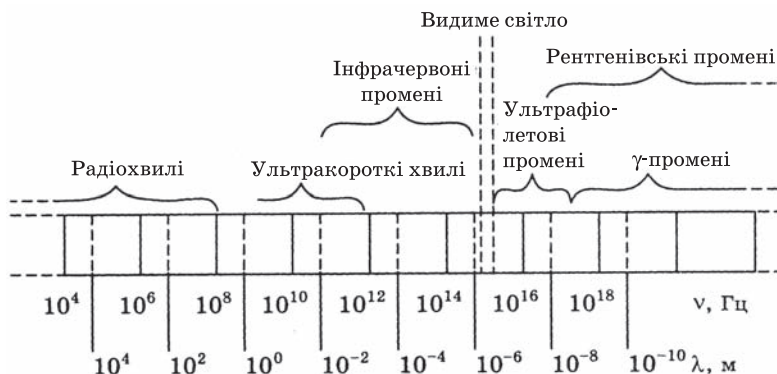
Для передачі по радіо («бездротово») звукових сигналів (а) їх перетворюють на високочастотні. Для цього на допоміжні (несучі) високочастотні коливання (б) накладають за допомогою мікрофона звукові коливання (а), у результаті амплітуда високо-частотного сигналу виявляється змінюваною у такт із (а) — модульованою (в). Такі коливання випромінюються у простір антеною.

У приймальному контурі коливання виду (в) випрямляють за допомогою діода, тобто детектують, (г). Потім конденсаторний фільтр відділяє від них високочастотну складову, а до мембрани телефону (або до динаміка) надходить низько-частотний сигнал (д), аналогічний (а).

# Оптика

Розділ фізики, що вивчає процеси і явища, пов'язані зі світлом.

## Шкала електромагнітних хвиль



Електромагнітним хвилям відповідає величезний діапазон довжин хвиль, від значень у десятки кілометрів до  $10^{-12}$  м і менше.

Залежно від властивостей електромагнітних хвиль і способів їх виникнення, увесь цей діапазон умовно поділено, мов шкалу, на окремі ділянки: радіохвилі; мікрохвилі (або ультракороткі хвилі); інфрачервоні промені; видиме світло; ультрафіолетові промені; рентгенівські промені; гамма-промені. Усі ці ділянки не мають чітких розмежувань, тобто хвилі однакових довжин можуть утворюватись різними способами.

## Світло

У широкому розумінні світлом називають оптичне випромінювання, до якого входять видимий, ультрафіолетовий та інфрачервоний діапазони спектра. У вузькому значенні світло — це електромагнітні хвилі, дія яких на сітківку ока утворює зорові відчуття.

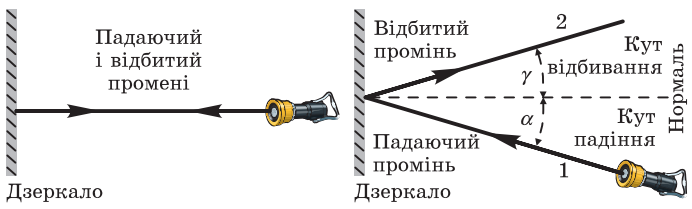
Видиме світло характеризується дуже вузьким діапазоном: між  $7,8 \cdot 10^{-7}$  м (довгохвильова межа червоного світла) і  $4 \cdot 10^{-7}$  м (короткохвильова межа фіолетового світла).

## Геометрична (променева) оптика

Це розділ оптики, що вивчає процеси поширення світла, виходячи з уявлення про світлові промені.

Деякий напрям у просторі, уздовж якого поширюється світло, — **світловий промінь**.

### Закони відбивання світла

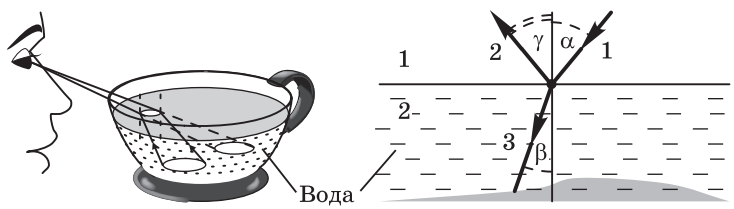


Кут між падаючим променем 1 і нормаллю до відбиваючої («дзеркальної») поверхні у точці падіння променя називається кутом падіння  $\alpha$ , а між відбитим променем 2 і нормаллю — кутом відбивання  $\gamma$ .

Два закони відбивання:

- а)  $\angle \gamma = \angle \alpha$  (кут відбивання дорівнює куту падіння.)
- б) Промені 1, 2 і нормаль лежать в одній площині.

### Закони заломлення світла



Переходячи з прозорого середовища (1) у прозоре середовище (2), промінь змінює напрям, тобто заломлюється (при переході з повітря у воду промінь наближається до нормалі).

Два закони заломлення:

а) Відношення  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  сталє для даних двох середовищ. Воно

називається *відносним показником заломлення* другого середовища відносно першого (наприклад, води відносно повітря):

$$n_{2,1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

б) Промені 1,3 і нормаль лежать в одній площині.

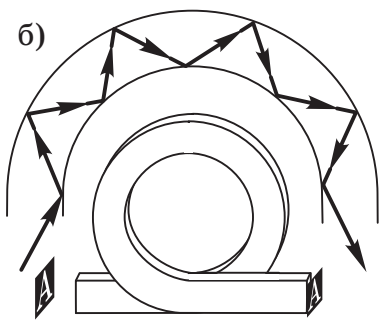
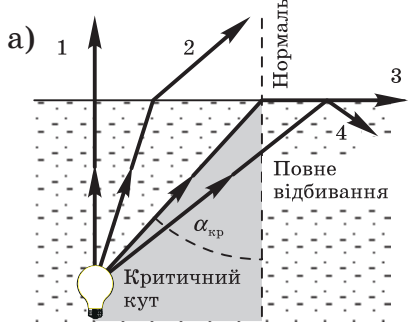
*Абсолютний* показник заломлення речовини — відношення швидкості світла у вакуумі (або повітрі) до швидкості світла в даній речовині:

$$n = \frac{c}{v}; \quad \text{тоді } n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{cv_1}{v_2c} = \frac{v_1}{v_2}.$$

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Із двох середовищ оптично більш густим називається те, показник заломлення якого є більшим.

### Повне відбивання світла

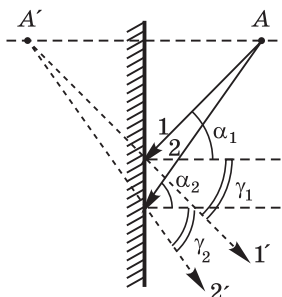


Якщо перше середовище оптично густіше за друге, то зі збільшенням  $\alpha$  заломлений промінь, «опускаючись», наближується до межі поділу середовищ. При деякому значенні  $\alpha$  (критичний або граничний кут  $\alpha_{кр}$ ) заломлення немає, промінь ковзає вздовж поверхні розділу середовищ (промінь 3). При  $\alpha > \alpha_{кр}$  світловий промінь повертається у перше середовище, тобто відбувається лише відбивання світла всередину першого середовища (без виходу в друге), (а).

На принципі повного відбивання світла ґрунтується дія волокнистих світловодів — пристроїв, що використовуються у волоконній оптиці (б), див. с. 85.

Пучок скляних гнучких волокон із спеціального «оптичного» скла медики можуть вводити людині як зонд для дослідження внутрішніх органів; світловоди знаходять застосування також для оптичного зв'язку.

### Побудова зображення предмета в плоскому дзеркалі



Для побудови зображення деякої точки  $A$  предмета проводять до площини дзеркала два довільні промені, будують кути відбивання  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ , які дорівнюють кутам падіння  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , і продовжують напрями відбитих променів «за дзеркало». Точка  $A'$ , у якій перетинаються ці уявні продовження — зображення точки  $A$ .

### Побудова зображень у лінзах

**Лінза** — це прозоре тіло, обмежене з двох боків (або з одного боку) ділянками сферичної поверхні. Лінзи бувають: подвійноопуклі, подвійноувігнуті, плоскоопуклі, плоскоувігнуті та ін. Точка, проходячи через яку промінь не змінює напрямку, — **оптичний центр** лінзи  $O$ . Оптичний центр подвійноопуклих і подвійноувігнутих лінз — їх геометричний центр (центр ваги). Будь-яка пряма, проведена через  $O$ , — **оптична вісь**. Та з них, яка проходить через центри кривизни обмежуючих лінзу поверхонь, — **головна**. Опуклі скляні лінзи, оточені повітрям або водою, — збиральні, а увігнуті — розсіювальні. Точка, в якій сходяться падаючі на опуклу лінзу світлові промені, паралельні головній оптичній осі, — **головний фокус**  $F$ . Відстань між  $F$  і  $O$  — **фокусна відстань** лінзи  $F$ .

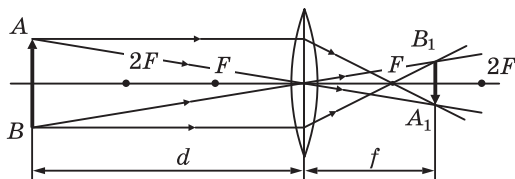
У випадку увігнутої лінзи головний фокус — точка перетину уявних продовжень розсіяних лінзою променів.

Рекомендовані прийоми побудови зображень у лінзах.

Від протилежних крайніх точок  $A$  і  $B$  предмета провести по два промені:

а) паралельно головній оптичній осі. Такі промені, заломлюючись, пройдуть через фокус;

б) через оптичний центр. Такі промені не змінюють напрямів. Точки перетину променів, що пройшли через лінзу (точки  $A_1$  і  $B_1$ ) — зображення точок  $A$  і  $B$  предмета.

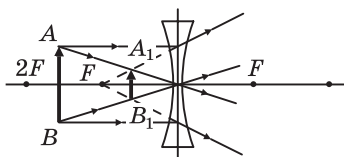


Якщо предмет далеко від *подвійноопуклої* лінзи ( $d > 2F$ , де  $2F$  — подвоєна фокусна відстань), зображення буде дійсне (з протилежного відносно предмета боку лінзи), зменшене й обернене (перевернуте).

Змінюючи відстань  $d$  відносно відстаней  $2F$  і  $F$ , можна варіювати зображення кількісно і якісно.

- 1)  $d > 2F$ ; 2)  $d = 2F$ ; 3)  $2F > d > F$ ; 4)  $d = F$ ; 5)  $d < F$ .

У випадку 4 зображення відсутнє (промені, що пройшли через лінзу, паралельні). Зображення може бути: дійсним (випадки 1, 2, 3) або уявним (випадок 5); збільшеним (3, 5) або зменшеним (1); прямим (1) або оберненим (1, 2, 3).



Зображення, яке дає *ввігнута* лінза, завжди уявне, зменшене, пряме.

Формула тонкої збиральної лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

(у випадку розсіювальної лінзи  $F$  і  $f$  від'ємні).

$$\frac{1}{F} = D \text{ — оптична сила лінзи.}$$

$[D] = \text{дптр (діоптрія), } 1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$

$$D_{\text{збир}} > 0; D_{\text{роз}} < 0.$$

## Хвильова оптика

Цей розділ оптики вивчає явища, які свідчать про якісну спільність багатьох властивостей *механічних хвиль* і *світла*, що є підтвердженням наявності у світла хвильових властивостей.

### Когерентність

В експериментах із спостереженням результатів накладання декількох світлових хвиль (інакше кажучи, світлових променів) необхідно, щоб хвилі були *когерентними* (тобто взаємопов'язаними).

Дві хвилі *когерентні*, якщо:

а)  $v_2 = v_1$ ;

б) їх фази або збігаються ( $\varphi_2 = \varphi_1$ ), або не збігаються ( $\varphi_2 \neq \varphi_1$ ), але  $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ .

Когерентні хвилі випромінюють лише лазери. Когерентні світлові хвилі від інших джерел можна одержати штучно, розділяючи хвилю (промінь) на дві частини і забезпечуючи проходження ними до точки зустрічі різних шляхів. Для цього використовують подвійні щілини, подвійні дзеркала, подвійні лінзи, подвійні призми, напівпрозорі дзеркала.

### Інтерференція

Неправильним є твердження, що інтерференція — це накладання хвиль... і що хвилі в одних ділянках простору підсилюють одна одну, а в других — послаблюють. Треба мати на увазі, що накладання — це процес, а інтерференція — результуюче явище, а також, що звичайні світлові хвилі при накладанні не взаємодіють (принцип суперпозиції).

*Інтерференція хвиль* — це явище, яке виникає в результаті процесу накладання декількох когерентних хвиль і полягає у збільшенні амплітуди коливань в одних ділянках простору і зменшенні — в інших.



Таке чергування інтерференційних максимумів і мінімумів утворюється шляхом перерозподілу в просторі енергії хвиль, що накладаються; для випадку світлових хвиль воно має вигляд світлих і темних ділянок.

Інтерференційні максимуми утворюються на ділянках, до яких хвилі, що додаються, прийшли з геометричною різницею ходу  $l_2 - l_1 = \delta$  (або  $\Delta$ ), яка визначається умовою:

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

де  $k$  — ціле число ( $\delta$  дорівнює парному числу половинок довжин хвиль або цілому числу довжин хвиль),  $l_2$  і  $l_1$  — шляхи хвиль.

Умова інтерференційного мінімуму:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

( $\delta$  дорівнює непарному числу половинок довжин хвиль).

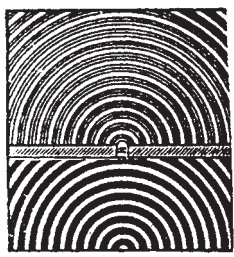
Якщо світлові промені проходять не в повітрі, а в іншій прозорій речовині (вода, скло), то замість  $l_2, l_1$  і  $\delta$  розглядають **оптичні шляхи**  $nl_2$  і  $nl_1$ , а також **оптичну різницю** ходу  $n\delta$ , де  $n$  — показник заломлення речовини.

### Дифракція

**Дифракція** — це явище огинання хвилями країв неоднорідностей.

Для світлових хвиль дифракція — це потрапляння світла в ділянки геометричної тіні.

Дифракція чітко виявляється у випадку, коли розміри неоднорідностей (наприклад, отвору) сумірні з довжиною хвилі (а). Якщо ж розміри неоднорідностей великі, дифракція спостерігається лише на великих відстанях від неоднорідності (б).



а)



б)

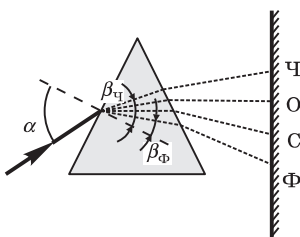
## Дисперсія.

### Розкладання білого світла у спектр

Показник заломлення світла речовиною залежить від довжини хвилі:  $n$  тим більший, чим менша  $\lambda$ .

Залежність показника заломлення світла речовиною від довжини хвилі світла називається **дисперсією**.

Якщо на скляну призму спрямувати промінь сонячного світла, то на виході з призми буде спостерігатись розширена смуга із забарвленням, що безперервно (плавно) змінюється. Ця смуга називається **спектром**.



Для запам'ятовування кольорів у спектрі можна користуватись мнемонічною умовною фразою: «**Ч**арівна **О**лена і **Ж**аба **З**елена **Б**агатьом **С**лужили **Ф**антастам» (початкові літери цих слів дозволяють пам'ятати чергування кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий).

Цей дослід доводить, що біле світло є сукупністю променів різного кольору, а не одиничним променем «білого кольору» (адже розкладання світла Сонця у спектр — наслідок дисперсії променів різної  $\lambda$ ).

## Види спектрів

Крім сонячного світла **суцільний** спектр характерний для світла, що випромінюється твердими тілами, рідинами й газами при високому тиску. Нагріті до високої температури гази в атомарному стані дають **лінійчастий** спектр (при цьому окремі кольорові лінії розділені темними широкими смугами).

**Смугастий** спектр (що складається з окремих кольорових смуг, розділених темними проміжками) дають дуже нагріті гази, що складаються з молекул. Одержання і вивчення спектрів — основа спектрального аналізу хімічного складу речовин.

# Сучасна фізика

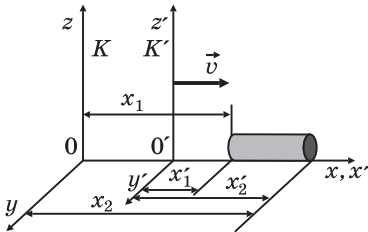
## Елементи спеціальної теорії відносності

Завершеності спеціальної теорії відносності (або релятивістській механіці, від «*relative*») надав Альберт Ейнштейн.

### Принцип відносності Ейнштейна

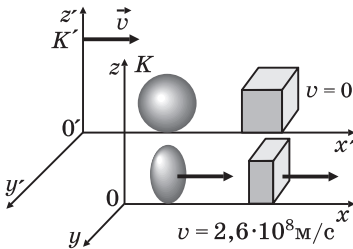
Перша частина цього принципу — розвиток принципу Галілея: замість слів «механічні досліди», «механічні процеси і явища» треба говорити «фізичні...». Ейнштейн доповнив узагальнене формулювання принципу таким постулатом (твердженням без доказу): швидкість світла у вакуумі не залежить від швидкості руху ні джерела світла, ні приймача, тобто є константою ( $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ).

### Відносність довжини і часу



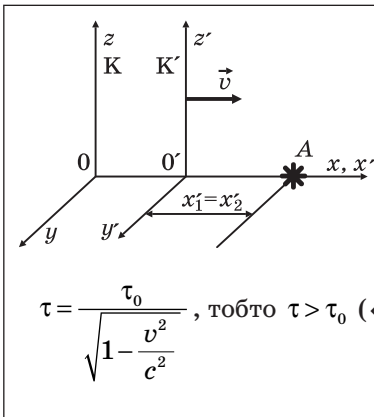
Нехай циліндр, що перебуває у спокої в системі  $K'$ , рухається з  $v \approx c$  відносно  $K$ . Тоді довжина циліндра  $l_0$ , виміряна відносно  $K'$  («власна» довжина), і довжина  $l$ , виміряна відносно  $K$ , не збігаються:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$



тобто  $l < l_0$  («власна» довжина максимальна).

Поздовжні розміри тіл, що рухаються, зменшуються — лоренцеве скорочення довжини.



Нехай у фіксованій точці А системи  $K'$  відбулася подія (наприклад, запалили й загасили сірник, лампу). Тривалості цієї події відносно  $K'$  ( $\Delta t' = \tau_0$  — «власний» час) і відносно  $K$  ( $\Delta t = \tau$ ) неоднакові:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ тобто } \tau > \tau_0 \text{ («власний» час мінімальний)}.$$

### Релятивістський закон додавання швидкостей

У класичній механіці все просто: вагон рухається зі швидкістю  $v_b$ , у ньому йде в напрямі руху вагона людина із швидкістю  $v_l$ . Відносно перону:

$$v = v_b + v_l \quad (\text{тобто } v = v_1 + v_2).$$

Якщо ж і  $v_1$ , і  $v_2$  близькі до  $c$ , то їх сума вийшла б за класичною формулою більшою, ніж  $c$ , що неможливо. У цьому випадку використовується формула:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

одержані за її допомогою значення  $v$  завжди менші, ніж  $c$ .

### Взаємозв'язок енергії й маси

Як показано в теорії відносності, навіть у стані відносного спокою тіло (або частинка) має енергію, яка називається енергією спокою:

$$E_0 = mc^2,$$

де  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

## Квантова оптика

Цей розділ оптики вивчає процеси і явища, обумовлені наявністю у світла квантових властивостей.

### Фотоефект і його закони

**Зовнішній фотоелектричний ефект** — це виліт електронів із речовин під дією світла (тобто це фотоелектронна емісія).

Відкрив його Генріх Герц, виявивши, що для виникнення іскрового розряду між яскраво освітленими цинковими кульками потрібна менша різниця потенціалів, ніж між неосвітленими.

Дослідники природи цього ефекту (Ф. Ленард, О.Г. Столетов, В. Гальвакс) виявили закономірності, що суперечили уявленням хвильової теорії світла, в межах якої виліт електрона з металу намагались пов'язати з вимушеними коливаннями електрона у змінному електричному полі світлової хвилі.

Суперечності були подолані застосуванням до світла нових (квантових) уявлень.

Ейнштейн, розвиваючи гіпотезу Планка, припустив, що світло не лише випромінюється, але й поширюється, і поглинається речовиною не суцільним потоком, а як сукупність **квантів світла** (що тепер називаються **фотонами**).

Рівняння, що виражає закон збереження енергії у випадку фотоефекту (рівняння Ейнштейна):

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2},$$

де  $h\nu$  — передбачений Планком вираз енергії фотона, в ньому  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — стала Планка;  $A_{\text{вих}}$  — робота виходу електрона з речовини, тобто робота подолання електронном утримуючих електричних сил;  $m$  — маса електрона,  $v_{\text{макс}}$  — максимальна швидкість фотоелектрона.

При розгляді світла як сукупності фотонів можна пояснити закономірності фотоефекту:

1) енергія пучка монохроматичного ( $\lambda = \text{const}$ ) світла:

$$W = N \frac{hc}{\lambda},$$

де  $N$  — число фотонів у пучку. Електрон взаємодіє з **одним** фотонем із пучка, тому збільшення  $N$  при незмінному  $\frac{hc}{\lambda}$  не впливає на  $v_{\text{макс}}$ ;

2) із збільшенням  $\nu$  **зростає**  $h\nu$ , а отже, і  $v_{\text{макс}}$ .

Експериментатори встановили ще дві закономірності.

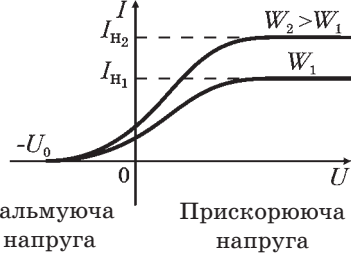
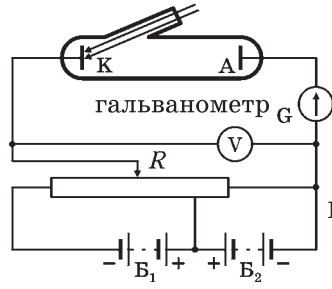
а) Кожній речовині відповідає деяке граничне значення довжини хвилі, перевищення якого приводить до зникнення фотоефекту. Це значення назвали «**червоною**» (найбільш довгохвильовою) **межею фотоефекту** ( $\lambda_{\text{макс}} = \lambda_{\text{чер. меж}}$ , або для частоти:  $\nu_{\text{мін}} = \nu_{\text{чер. меж}}$ ).

Рівняння Ейнштейна пояснює причину існування «червоної» межі: їй відповідає гранична енергія:

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{чер. меж}}} = A_{\text{вих.}}$$

При  $\lambda > \lambda_{\text{чер. меж}}$  енергія фотона виявляється меншою, ніж  $A_{\text{вих.}}$ .

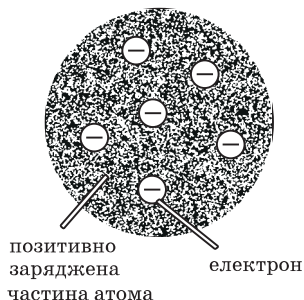
б) Столетов установив ще одну закономірність фотоефекту.



**Закон Столетова:** збільшення енергії світла незмінної  $\lambda$  збільшує силу фотоструму насичення. Цей факт також пояснюється теорією Ейнштейна: збільшення енергії пучка світла завдовжки  $\lambda$  відбувається за рахунок збільшення числа фотонів у пучку, що приводить до збільшення числа фотоелектронів.

## Атомна і ядерна фізика

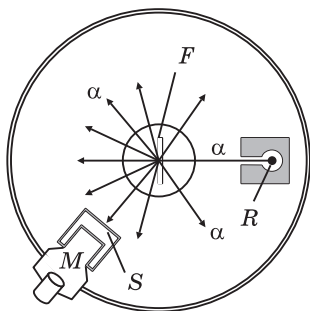
### Моделі атома



На початку ХХ століття визною була модель будови атома Томсонів (Уільяма і Джозефа), що образно називалася «пудинг із родзинками», або «кекс» (див. рис.).

Проте була й інша модель (автором її був японський учений Нагаока), що називалася «сатурніанський атом». У ній припускалось, що електрони рухаються по спільній орбіті (як по «кільцю Сатурна») навколо ядра із зосередженим у ньому позитивним зарядом.

### Досліди Резерфорда

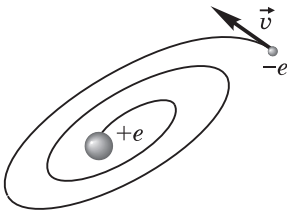


Таку назву отримали досліди, проведені в лабораторії Резерфорда його учнями Марсденом і Гейгером. На металеву фольгу  $F$  спрямували потік  $\alpha$ -частинок (ядер гелію) і через мікроскоп спостерігали їх розсіювання фольгою (за спалахами світла на екрані  $S$  із сірчистого цинку). Було виявлено, що більшість частинок проходить крізь фольгу практично без перешкод, але невелика кількість частинок відкидається майже назад (відхиляючись ядром).

Таким чином, експерименти довели:

- 1) недостовірність моделі Томсонів;
- 2) існування ядер в атомах.

### Постулати Бора



Нільс Бор запропонував «*планетарну*» модель атома. Недоліком моделі з електронами, що «обертуються» довкола ядра, є неминуха нестійкість такої системи: заряджена частинка, що рухається по колу (тобто має прискорення), повинна випромінювати, втрачаючи енергію; тому траєкторією електрона була б спіраль, а не коло (електрон давно «впав би» на ядро).

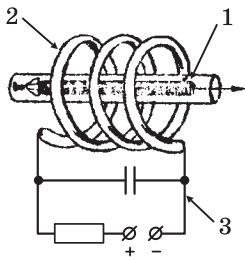
Для подолання суперечності Бор сформулював постулати:  
 а) в атомі існують стаціонарні орбіти (цілком певних радіусів для кожного атома), рух електронів по яких не супроводжується зміною енергії;  
 б) при переході електрона з однієї такої орбіти на іншу його енергія змінюється стрибком.

Переходи електронів з ближніх орбіт на *віддалені* — результат *поглинання* фотонів, а при зворотних переходах відбувається *випускання* фотонів. Енергія кожного з них:

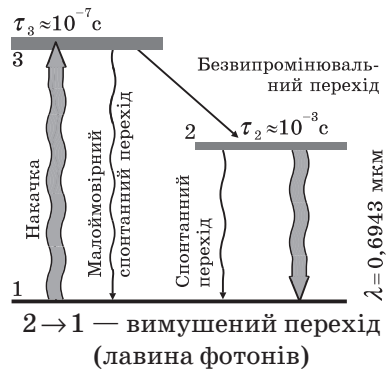
$$W_{\text{на віддаленій орбіті}} - W_{\text{на ближній орбіті}} = h\nu.$$

### Схеми будови і принципу дії рубінового лазера

(У першому лазері — синтетичний рубін:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,05\% \text{Cr}$ )



- 1 — рубін
- 2 — лампа-спалах
- 3 — система живлення



Особливості лазерного випромінювання: висока когерентність, мала розбіжність, велика інтенсивність.



### Склад ядер атомів. Ізотопи

Ядро Гідрогену являє собою один протон. Ядра атомів решти елементів містять декілька протонів і нейтронів. Нейтрон не має заряду (існують дані, що всередині нього, як і всередині протона, є заряджені частинки,  $\pi$ -мезони, або «піони», обох знаків; але їх сумарний заряд дорівнює нулю).

$$m_n > m_p, m_n \approx m_p + 2,5m_e$$

( $m_n, m_p$  і  $m_e$  — маси нейтрона, протона і електрона відповідно).

І протон, і нейтрон — **нуклони** (ядерні частинки, від «*nucleus*» — ядро). Більшість хімічних елементів може існувати у вигляді кількох **ізотопів** (речовин, у ядрах атомів яких міститься однакове число протонів  $N_p$ , але різне число нейтронів  $N_n$ ).

Символічно ядро позначають  ${}^A_Z X$ , де  $Z=N_p$  (зарядове число),  $A=N_p+N_n$  (масове число).

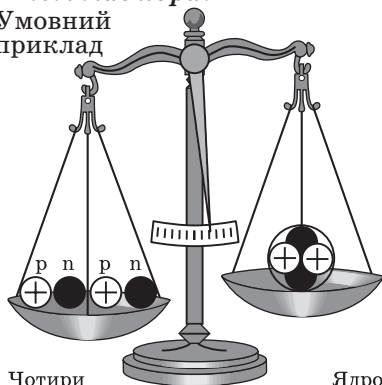
Приклади ізотопів: а) ізотопи Гідрогену  ${}^1_1\text{H}$  («звичайний» водень або протій),  ${}^2_1\text{H} = \text{D}$  (дейтерій),  ${}^3_1\text{H} = \text{T}$  (тритій); ізотопи Урану  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  ... (Замість терміна «ізотоп» іноді вживають термін «нуклід»).

### Дефект маси. Енергія зв'язку ядер

Маса ядра менша від суми мас його нуклонів.

Різницю  $\Delta m = m_{{}_Z^A X} - (N_p \cdot m_p + N_n \cdot m_n) < 0$  називають **дефектом мас ядра**.

Умовний приклад

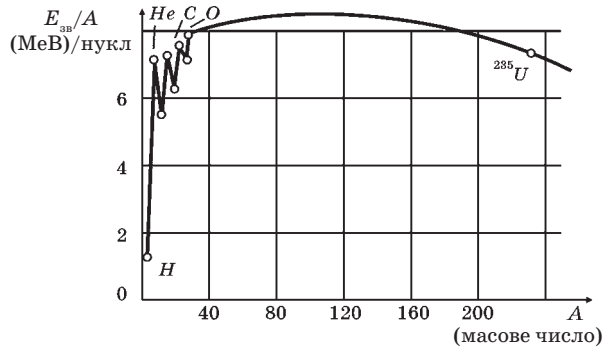


Цьому дефекту мас відповідає енергія зв'язку нуклонів у ядрі (енергія, з якою вони утримуються там, або яка потрібна для поділу всього ядра на окремі нуклони). Як правило, розглядають питому енергію зв'язку.

$$\left[ \frac{E}{A} \right] = \frac{\text{MeV}}{\text{нукл}},$$

де  $1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .

Різницю між масою атома і його масовим числом називають **дефектом мас атома**.



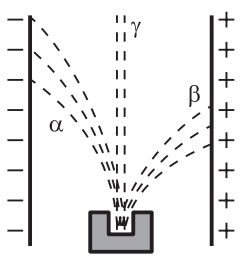
Із графіка *очевидні* два способи вивільнення внутрішньоядерної енергії:

- а) поділ важких ядер (наприклад  $^{235}_{92}\text{U}$ ) на більш легкі;
- б) злиття легких ядер, наприклад ізотопів водню, у більш важкі (синтез більш важких, наприклад гелію).

### Ядерні реакції

Це зміни ядер при взаємодії одне з одним або з іншими «елементарними» частинками (субатомними, тобто такими, з яких складаються атоми, або які утворюються при взаємодії субатомних частинок).

### Радіоактивність



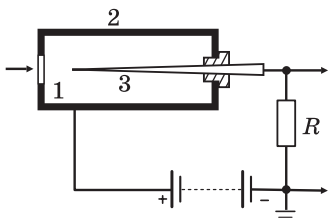
Це самочинні перетворення ядер одних атомів на ядра інших із виникненням трикомпонентного випромінювання: ядер гелію ( $\alpha$ -частинки), швидких електронів ( $\beta$ -частинки) і електромагнітних  $\gamma$ -променів типу рентгенівських.

## Закон радіоактивного розпаду

$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$ , де  $N_0$  — число радіоактивних атомів у момент  $t_0 = 0$ ,  $T$  — період піврозпаду (час, за який розпадається  $\frac{N_0}{2}$  ядер),  $N$  — число атомів, що не розпалися через деякий час  $t$ .

## Методи реєстрації іонізуючих випромінювань

### Лічильник Гейгера



У наповненій газом (аргоном) трубці 2 частинка, що пролітає через газ, іонізує атоми газу. Вони замикають коло між катодом (3) і анодом (1), створюючи імпульс напруги на резисторі  $R$ .

(У лічильнику Гейгера — Мюллера електрод із вістрям 3 замінений на тонкий дріт і змінено полярність електродів.)

### Камера Вільсона



Камера заповнена сумішшю газу (аргон або азот) із насиченою парою води або спирту. Розширюючи газ поршнем, пару переохолоджують. Пролітаюча досліджувана частинка іонізує атоми газу, на яких конденсується пара, утворюючи **краплинний трек** (слід).

### Бульбашкова камера

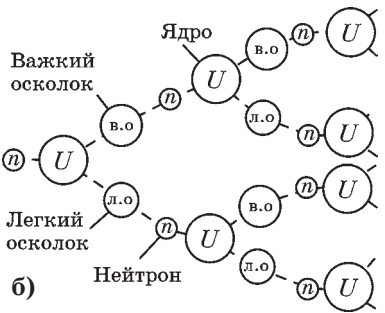
Глезер сконструював камеру, в якій можна досліджувати частинки значно більшої енергії, ніж у камері Вільсона, оскільки густина робочої речовини камери Глезера значно більша, ніж густина робочої речовини камери Вільсона. Бульбашкова камера містить **рідину**, яка легко кипить (наприклад, зріджений пропан або водень).

У перегрітій перед випробуванням рідині (шляхом різкого зменшення тиску) досліджувана частинка утворює **бульбашковий трек**.

## Поділ ядер Урану

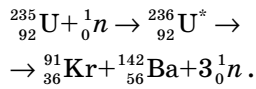


Поглинувши нейтрон, ядро Урану видовжується, розпадається на два фрагменти (осколки, дочірні ядра), які випромінюють по 2 або 3 нейтрони ( $a$ )\*. Деякі з них у свою чергу ділять інші ядра Урану і т. д. (розвивається **ланцюгова реакція поділу** (б)).



Приклади використання поділу ядер Урану широко відомі (атомні електростанції, двигуни криголамів і підводних човнів).

Приклад реакції поділу ядра:



\* Нейтрони вилітають з осколків, а не із збудженого ядра, як зображується у багатьох підручниках.

## Термоядерні реакції

Так називають реакції синтезу ядер із більш легких, оскільки для злиття ядер вихідні речовини треба нагріти настільки, щоб кінетична енергія ядер перевищувала енергію відштовхування їх протонів. Наприклад, для злиття ядер дейтерію і тритію потрібна температура близько  $10^8$  К. Поки що такими реакціями керувати не вдається. Вони здійснені у водневій бомбі, де вихідна речовина — літій дейтерид LiD, схеми реакцій:



Реакції синтезу — джерело енергії Сонця та інших зірок.

## Додаток

Основні й додаткові величини СІ та їх одиниці

В основу СІ покладено 7 основних одиниць та 2 додаткові.

Основні одиниці: м (одиниця довжини  $l$  або  $s$ ), кг (одиниця маси  $m$ ), с (одиниця часу  $t$ ), моль (одиниця кількості речовини  $\nu$ ), К (одиниця температури  $T$ ), А (одиниця сили струму  $I$ ), кд — кандела (одиниця сили світла  $I$ ); у двох останніх випадках можна писати індекси:  $I_{\text{ел}}$ ,  $I_{\text{св}}$ .

Додаткові одиниці: рад — радіан (одиниця плоского кута  $\alpha$  або  $\varphi$ ); ср — стерadian (одиниця тілесного кута  $\Omega$ ).

Одиниці всіх інших фізичних величин утворюються шляхом математичних дій над основними і додатковими одиницями з використанням визначальних формул величин. Багато з таких одиниць одержали спеціальні назви.

Основним величинам СІ присвоєно так звані розмірності (dimension), тобто буквені символи. Розмірності довжини, маси, часу, кількості речовини, температури, сили струму і сили світла відповідно такі:  $L$ ,  $M$ ,  $T$ ,  $N$ ,  $\theta$  (тета),  $I$ ,  $J$ .

Додаткові величини безрозмірні.

Розмірності другорядних величин утворюються математичним способом і виражаються добутком розмірностей відповідних величин. Приклади: розмірність швидкості

$\dim v = LT^{-1}$ , одиниці  $[v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ; розмірність кутової швидкості й циклічної частоти коливань  $\dim \omega = T^{-1}$ , одиниці  $[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Оптичні характеристики та їх одиниці

Уже із самої назви «основні одиниці СІ» впливає, що їх необхідно знати й розуміти як випускникам шкіл, так і абітурієнтам та студентам. Однак навчальні програми з фізики у старших класах не передбачають вивчення розділу оптики «Фотометрія», хоча сьомою з основних одиниць СІ є фотометрична. Розглянемо основні фотометричні характеристики.

Почнемо з розгляду загальних (енергетичних) характеристик світла.

Потік випромінювання:  $\Phi_e = \frac{W}{t}$  (де  $W$  — енергія випромінювання,  $t$  — час);  $[\Phi_e] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$ .

Енергетична освітленість поверхні:  $E_e = \frac{\Phi_e}{S}$ ;  $[E_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Енергетична сила випромінювання:  $I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$ ;  $[I_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ , де ср — стерadian.

Енергетична яскравість:  $B_e = \frac{I_e}{S}$ ;  $[B_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$ .

Проте частіше використовуються не енергетичні, а фотометричні характеристики світла. У фотометрії дія світла характеризується не за загальною енергією чи потужністю, а за його сприйняттям людським оком, яке залежить від довжини хвилі світла. Доведено, що максимуму сприйняття відповідає світло, довжина хвилі якого 555 нм.

Кожна з розглянутих нижче фотометричних характеристик є аналогом відповідної енергетичної характеристики, але тотожності між ними немає, хоча їх визначальні формули однакові.

Світловий потік:  $\Phi = \frac{W}{t}$ ;  $[\Phi] = \text{лм}$  (люмен). Ця величина, як і наступні, є фізіологічною характеристикою.

Освітленість:  $E = \frac{\Phi}{S}$ ;  $[E] = \text{лк}$  (люкс).

Сила світла:  $I = \frac{\Phi}{\Omega}$ ;  $[I] = \text{кд}$  (кандела, в минулому — свічка, згадайте: «канделябр»).

Яскравість:  $B = \frac{I}{S}$ ;  $[B] = \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$  (у минулому сб — стильб).

Спектральна видність:  $V_\lambda = \frac{\Phi}{\Phi_e}$ . Саме на  $\lambda = 555$  нм припадає максимум видності.

### Визначення кандели в СІ

Із визначальної формули сили світла випливає, що ця величина вимірюється відношенням світлового потоку до тілесного кута, в якому цей потік поширюється. Тілесний кут, як відомо, вимірюється відношенням поверхні  $\sigma$ , вирізаної на сфері конусом, до квадрата радіуса сфери.

Отже, сила світла дорівнює світловому потоку в одному стерadianі.

Еталон кандели зазнав еволюційних змін. Його пов'язували з випромінюванням платини під час затвердіння її розплаву, потім — з випромінюванням лампи розжарювання спеціальної конструкції. Зараз у поняття кандели не закладено спосіб збудження світла (кожна країна сама може створювати еталонне джерело).

Кандела — це сила світла в заданому напрямі від джерела, що випромінює монохроматичне ( $\lambda = const$ ) світло частотою  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, енергетична сила якого в цьому напрямі становить  $1,683 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ .

### Фундаментальні фізичні сталі

Величина	Позначення і числове значення
Гравітаційна стала	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Прискорення вільного падіння (нормальне)	$g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2 \approx 9,81 \text{ м/с}^2$
Нормальний атмосферний тиск	$p_0 = 101\,325 \text{ Па}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов	$V = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Універсальна газова стала	$R = 8,31441 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Лошмідта	$n_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} \left( n_0 = \frac{P_0}{kT_0} \right)$

*Закінчення таблиці*

Величина	Позначення і числове значення
Стала Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $= 1,25663706144 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Маса електрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг = $= 5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.о.м.
Маса протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,007276470$ а.о.м.
Маса нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,008665012$ а.о.м.
Атомна одиниця маси	1 а.о.м. = $1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг (відповідає енергії 931,3 МеВ)
Елементарний заряд	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Відношення заряду електрона до його маси	$e/m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Стала Фарадея	$F = 9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль
Стала Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж · с



## Шкала електромагнітних хвиль

Вид хвиль	Довжина хвиль, м	Частота хвиль, Гц	Джерело випромінювання
Низькочастотні хвилі	$> 10^4$	$< 3 \cdot 10^4$	Механічний генератор змінного струму
Радіохвилі	$10^4 \dots 10^{-1}$	$3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^{10}$	Коливальний контур і вібратор Герца
Ультрарадіохвилі	$10^{-1} \dots 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{12}$	Масовий випромінювач
Інфрачервоне випромінювання	$10^{-4} \dots 7,7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{12} \dots 4 \cdot 10^{14}$	Лампи
Світлове випромінювання	$7,7 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$	Лампи
Ультрафіолетове випромінювання	$4 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$	Лампи
Рентгенівське випромінювання	$10^{-8} \dots 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{19}$	Рентгенівська трубка
Гамма-випромінювання	$< 10^{-11}$	$> 3 \cdot 10^{19}$	Радіоактивний розпад

## Множники, префікси та їхні позначення для кратних і часткових одиниць СІ

Множник	Префікс	Позначення		Множник	Префікс	Позначення	
		укр.	міжнар.			укр.	міжнар.
$10^{24}$	йота	Й	Y	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^{21}$	зета	ЗТ	Z	$10^{-2}$	санти	с	c
$10^{18}$	екса	Е	E	$10^{-3}$	мілі	м	m

Закінчення таблиці

Множник	Префікс	Позначення		Множник	Префікс	Позначення	
		укр.	міжнар			укр.	міжнар
$10^{15}$	пета	П	P	$10^{-6}$	мікро	мк	μ
$10^{12}$	тера	T	T	$10^{-9}$	нано	н	n
$10^9$	гіга	G	G	$10^{-12}$	піко	п	p
$10^6$	мега	M	M	$10^{-15}$	фемто	ф	f
$10^3$	кіло	k	k	$10^{-18}$	атто	a	a
$10^2$	гекто	h	h	$10^{-21}$	зепто	зп	z
10	дека	da	da	$10^{-24}$	йокто	й	y

Грецький алфавіт

Буква	Назва букви	Буква	Назва букви
Αα	альфа	Νν	ні (ню)
Ββ	бета	Ξξ	ксі
Γγ	гамма	Οο	омікрон
Δδ	дельта	Ππ	пі
Εε	епсилон	Ρρ	ро
Ζζ	дзета	Σσ	сигма
Ηη	ета	Ττ	тау
Θθ	тета	Υυ	іпсилон
Ιι	йота	Φφ	фі
Κκ	каппа	Χχ	хі
Λλ	ламбда	Ψψ	псі
Μμ	мі (мю)	Ωω	омега

Внесок у розвиток фізики вчених, біографії яких пов'язані з Україною

1. **Юрій Васильович Кондратюк** — справжнє ім'я Олександр Гнатович Шаргей (1897—1941) народився в Полтаві, де перед Першою світовою війною закінчив гімназію. Під час війни був мобілізований до армії білих, а потім, щоб уникнути переслідувань за це з боку червоних, скористався чужими документами.

Захопившись проблемами майбутніх міжпланетних польотів, Ю. Кондратюк незалежно від К. Е. Ціолковського вивів основне рівняння руху ракети; обґрунтував переваги багатоступеневої ракети; розв'язав ряд проблем динаміки космічних ракет; розробив траєкторію майбутнього польоту до Місяця (з переходом космічного корабля у режим супутника Місяця та з відокремленням від нього спускного апарата).

Ухилившись від запрошення працювати з С. П. Корольовим у групі вивчення реактивного руху (бо цю групу «опікали» органи внутрішніх справ, перевірку яких Кондратюк не витримав би), перекваліфікувався і проектував зерносховища (працював деякий час у Харкові) та вітряні електростанції. Загинув у народному ополченні під час війни.

2. Академік **Сергій Павлович Корольов** (1907—1966) народився на Житомирщині, в Одесі одержав середню освіту, продовжив навчання в Києві та Москві. Захоплювався конструюванням планерів і літаків, а потім ракет.

Керував (на посаді Головного конструктора) створенням космічних кораблів та організацією їх польотів (автоматичні космічні кораблі «Луна», «Венера», «Марс», пілотовані кораблі систем «Восток» і «Восход»).

3. З Україною (а конкретно з Харковом) була пов'язана наукова і педагогічна діяльність майбутнього Нобелівського лауреата й академіка **Лева Давидовича Ландау** (1908—1968). Він мешкав у Харкові з 1932 до 1937 р., керував теоретичним відділом Фізико-технічного інституту, працював у Політехнічному інституті та університеті.

Л. Д. Ландау створив теорії надплинності зрідженого гелію, надпровідності матеріалів, доменної структури феромагнетиків, надпровідності нейтронних зірок та багато інших.

4. **Дмитро Дмитрович Іваненко** (1904—1994) народився в Полтаві, навчався в Полтаві й Ленінграді. З 1929 до 1931 р. керував

теоретичним відділом у Харківському фізико-технічному інституті.

Незалежно від німецького теоретика В. Гейзенберга Д. Іваненко розробив теорію нейтронно-протонної будови атомних ядер. У співавторстві з іншими вченими створив всесвітньо визнані теорії: обмінних сил, оболонкової структури ядер та інші.

5. **Георгій Антонович Гамов** — Джордж Гамов (1904—1968) народився в Одесі. Здобув там вищу освіту, вчився у Ленінграді, був членом-кореспондентом Академії Наук СРСР, а з 1934 р. до кінця життя працював у США. Він — один з «трьох мушкетерів» (Ландау — «Дау», Іваненко — «Дімус», Гамов — «Джоні»), які в 30-ті роки ХХ ст. вийшли на арену світової теоретичної фізики. Гамов розробив теорії нобелівського рівня: «тунельного ефекту» в ядрах (пояснення  $\alpha$ -розпаду), «великого вибуху» (початку виникнення Всесвіту); він також першим розшифрував генетичний код ДНК.

Знаходячись у США, Дж. Гамов завжди пам'ятав своє походження (його предки були запорізькими козаками) й активно спілкувався з радянськими вченими.

6. **Іван Пулюй** — Іван Павлович Пульгуй (1845—1918) народився на території Австрії, в Галичині (в Гримаїлові, поблизу Тарнополя, — саме так називався тоді нинішній Тернопіль). Навчався у Тарнополі в гімназії, потім у Віденському і Страсбурзькому університетах.

І. Пулюй плідно займався прикладною і теоретичною електротехнікою, керував створенням електростанцій в Австрії. Був одним із дослідників «катодних променів» (електронних пучків). Як й інші дослідники (Крукс, Ленард, Гудспід), створив трубку власної конструкції. (Усі згадані вчені в процесі дослідів фактично раніше В. Рентгена мали справу з  $X$ -променями, які потім було названо рентгенівськими, але не зрозуміли, що катодні трубки випромінюють додаткові до катодних промені. Рентген першим зумів «почути тихий шепіт природи».) Отже, Іван Пулюй (українець за походженням) був «біля витоків» відкриття рентгенівських променів.

Уже після відкриття Рентгена Пулюй досліджував властивості  $X$ -променів, сконструював власну «рентгенівську» трубку і робив знімки на замовлення медиків. Учений провадив також велику просвітницьку роботу, спрямовану на благо українського народу.

7. У роки незалежності України стало відомим також ім'я **Олександра Теодоровича Смакули** (1900—1983). Як і Пулюй, Смакула народився в межах Австрії (на той час — Австро-Угорщини), у селі Добриводи поблизу Тарнополя. Навчався спочатку в Тарнополі, потім у Німеччині (у Геттингемі). Із 1934 до 1945 р. очолював дослідницьку лабораторію у фірмі «Карл Цейс Єна», винайшов і запатентував спосіб просвітлення об'єктів оптичних приладів шляхом нанесення на скло плівки спеціального складу (ця плівка — «шар Смакули» — надає об'єктиву фіолетового відблиску).

У 1945 р. Смакула погодився переїхати до США. Там він працював у дослідницьких лабораторіях військово-промислового комплексу. Відомо, що Смакула розробив режими вироцтування монокристалів деяких речовин, серед них і напівпровідника силіцію (подібною діяльністю давно й успішно займаються в Харкові, в інституті монокристалів).

8. Академік **Абрам Федорович Йоффе** (1880—1960), уродженець України (міста Ромни на Сумщині), працював (не менш плідно, ніж Смакула) в галузі дослідження напівпровідників. За його ініціативою в СРСР було створено кілька наукових фізико-технічних інститутів (серед них Харківський і Дніпропетровський).

Протягом трьох років Йоффе працював у Німеччині, потім повернувся додому і багато зробив для розвитку вітчизняної науки.

9. Ще один уродженець України став відомим радянським академіком. Це **Володимир Павлович Лінник** (1889—1984). Народився він у Харкові, у сім'ї токаря Івана Темнова, який невдовзі після народження сина помер. Із дворічного віку хлопчика виховував брат матері Павло Лінник. Майбутній учений жив і навчався в Білій Церкві, потім у Києві. Працював у Київському політехнічному інституті, потім у Ленінградському державному оптичному інституті.

Лінник розробив методи інтерференційної мікроскопії для дослідження якості поверхонь деталей різних приладів (включаючи телескоп). Створені ним оптичні прилади були настільки якісними, що фірма «Карл Цейс Єна» скопіювала й випускала два з них (один — під чужим ім'ям, інший — як nach Linnik), обидва без дозволу автора.

# Алфавітний покажчик

## А

Агрегатні стани 38  
 Адіабатний процес 34  
 Аморфні тіла 41  
 Ампер 67  
 Анізотропія 41

## Б

Ближній порядок 38  
 Броунівський рух 31  
 Бульбашкова камера 99

## В

Вага 19  
 Важіль 26  
 Вакуум 61  
 Ват 24  
 Вебер 71  
 Вимушені коливання 75  
 Випаровування 38  
 Випромінювання хвиль 82  
 Відносність довжини 91  
 Відносність часу 92  
 Внутрішня енергія 35  
 Вологість повітря 39  
 Волокнисті світловоди 86  
 Вольт 51

## Г

Газовий розряд 60  
 Генератор змінного струму 80  
 Генрі 72  
 Герц 74  
 Гідравлічний прес 29  
 Гравітація 17  
 Густина 16  
 Гучність звуку 78

## Д

Дальній порядок 38  
 Джерела струму 55  
 Джоуль 23  
 Дисперсія світла 90  
 Дифракція 89  
 Дифузія 30  
 Діамагнетика 69  
 Діелектрики 49  
 Діелектрична проникність 49  
 Діод вакуумний 61  
 Діод напівпровідниковий 62  
 Діоптрія 88  
 Домени 70  
 Досліди:  
 — Резерфорда 95

— Вівіані — Торрічеллі 29  
 Другий закон термодинаміки 37

## Е

Електрична стала 45  
 Електричні коливання 78  
 Електромагнітні хвилі 81  
 Електронна емісія 61  
 Електрорушійна сила 56  
 Електростатичне поле 46  
 Елементарна комірка 40  
 Енергія 23  
 Енергія електричного поля 53  
 Енергія зв'язку 97  
 Енергія магнітного поля 72

## З

### Закони:

— Ампера 67  
 — Архімеда 28  
 — Бойля — Маріотта 33  
 — всесвітнього тяжіння 17  
 — Гей — Люссака 34  
 — Гука 21  
 — Кулона 45  
 — Ньютона 15, 16  
 — Ома 57  
 — відбивання світла 84  
 — Паскаля 27  
 — заломлення світла 84  
 — радіоактивного розпаду 99  
 — додавання швидкостей 10,92  
 — сполучених посудин 28  
 — збереження заряду 46  
 — збереження імпульсу 22  
 — збереження енергії 24,26  
 — Столетова 94  
 — Шарля 35  
 — електролізу (закон Фарадея) 59  
 — електромагнітної індукції 71  
 Заряд 45  
 Затухаючі коливання 75  
 Звук 77  
 Змінний струм 79  
 Змочування 39

## І

Ідеальний газ 31  
 Ізопроекти 33  
 Ізотопи 97  
 Імпульс сили 14  
 Імпульс тіла 14  
 Індуктивність 72  
 Індукція магнітного поля 65

Інертність, інерція 14  
 Інерціальна система відліку 14  
 Інтенсивність хвилі 78  
 Інтерференція 88

## К

Камера Вільсона 99  
 Капілярні явища 39  
 Кишіння 39  
 Кількість теплоти 34  
 Кінематичні графіки 11  
 Кінетична енергія 24  
 Когерентність 88  
 Коефіцієнт корисної дії 25, 37  
 Конденсатори 52  
 Конденсація 38  
 Кристаліти 40  
 Кристалічна решітка 40  
 Кутова швидкість 13

## Л

Лазери 96  
 Лінзи 86  
 Лічильник Гейгера 99

## М

Магнітна стала 67  
 Магнітна проникність 69  
 Магнітне поле 64  
 Магнітний потік 20  
 Меніск 39  
 Механічні властивості тіл 21  
 Моделі атома 95  
 Молекула 30  
 Моль 32  
 Момент сили 20

## Н

Надпровідність 59  
 Напруження механічне 21  
 Напруга електрична 52  
 Напруженість електричного поля 46  
 Нейтрон 97  
 Ньютон 15

## О

Обертання 20  
 Ом 56  
 Опір 57  
 Оптична сила 88

## П

Парамагнетика 69  
 Парціальний тиск 38  
 Паскаль 21  
 Перший закон термодинаміки 36  
 Переміщення 8

## Період коливань:

— у коливальному контурі 79  
 — визначення 74  
 — математичного маятника 75  
 — пружинного маятника 74  
 Питома теплосмність 42  
 Питома теплота пароутворення 43  
 Питома теплота плавлення 43  
 Питома теплота згоряння 43  
 Питомий опір 57  
 Побудова зображень 86, 87  
 Повне відбивання світла 85  
 Поздовжні хвилі 77  
 Полікристали 40  
 Поляризація діелектриків 49  
 Поперечні хвилі 77  
 Постулати Бора 96  
 Потенціал 50  
 Потенціальна енергія 23  
 Потенціальність поля 51  
 Потужність 24, 58  
 Правило Ленца 71  
 Принцип суперпозиції 48  
 Принципи відносності 17, 91  
 Принципи радіозв'язку 82  
 Прискорення 10  
 Протон 97

## Р

Радіоактивний рух 23  
 Реакція ланцюгова 100  
 Реакція термоядерна 100  
 Резистори 58  
 Резонанс 76, 81  
*Рівняння:*  
 — гармонічних коливань 73  
 — Клапейрона 32  
 — Менделєєва — Клапейрона 33  
 — основне МКТ газу 31  
 — теплового балансу 43  
 — Ейнштейна для фотоэффекту 93  
 Рідкі кристали 41  
 Робота 23, 35, 57  
 Рух супутників 19

## С

Самоіндукція 72  
 Світло 83  
*Сила:*  
 — Ампера 66  
 — визначення 14  
 — Лоренца 65  
 — пружності 20  
 — реакції опори 22  
 — стороння 55  
 — струму 55  
 — тертя 21

— тяжіння 18  
 Силові лінії 47  
 Сименс 56  
 Система відліку 8  
 Спектри 90  
*Сталі:*  
 — Авогадро 33  
 — Больцмана 31  
 — газова універсальна 33  
 — гравітаційна 17  
 — Планка 93  
 — Фарадея 59

**Т**  
 Теплові двигуни 37  
 Термодинамічна шкала температур 35  
 Термометри 32  
 Тесла 65  
*Тиск:*  
 — рідини й газу 27  
 — поняття 27  
 Тіло відліку 8  
 Точка матеріальна 8  
 Точка роси 39  
 Траєкторія 63  
 Транзистор 63  
 Трансформатори 81  
 Тріод 61

**Ф**  
 Фаза коливань 74  
 Фарад 52  
 Феромагнетика 70  
 Фокус лінзи 87  
 Фотони 93  
 Фотоэффект 93

**Х**  
 Хвиля 77

**Ц**  
 Центр ваги 19  
 Цикл Карно 37  
 Циклічна частота коливань 74

**Ч**  
 Частота обертання 12  
 Частота коливань 74

**Ш**  
*Швидкість*  
 — звуку 78  
 — визначення 9  
 — перша космічна 20  
 — світла 85, 91  
 Шкала електромагнітних хвиль 83

## Література

1. *Гончаренко С. У.* Фізика. 10 клас: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. — К.: Освіта, 1996.
2. *Гончаренко С. У.* Фізика. 11 клас: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. — К.: Освіта, 1998.
3. *Гурский И. П.* Элементарная физика с примерами решения задач. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
4. *Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В. В.* Фізика, 7: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. — К.; Ірпінь: ВТФ «Перун», 2002.
5. *Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В. В.* Фізика, 8: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. — К.; Ірпінь: ВТФ «Перун», 2003.
6. *Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В. В.* Фізика, 9: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. — К.; Ірпінь: ВТФ «Перун», 2000.
7. *М'якишев Г. Я., Буховцев Б. Б.* Фізика. 11 клас. — К.: Рад. шк., 1991.
8. *Мясников С. П., Осанова Т. Н.* Пособие по физике. — М.: Высш. шк., 1976.
9. *Фізика-10 / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин, С. Я. Шамаш, Э. Е. Эвенчик.* — М.: Просвещение, 1992.



ВИДАВНИЦТВО  
**РАНОК**

## Серія «РЯТІВНИК»

Вирушаючи у плавання океаном знань, згадай про довідки цієї серії. Посібники користуються постійним підвищеним попитом і витримали вже три видання. Вони розроблені таким чином, щоб можна було повторити вивчене, система-тизувати й узагальнити знання з будь-якого предмета шкільного курсу. «Рятівники», як досвідчений людина, підтримає вас протягом навчального року.



- Алгебра та початки аналізу в означеннях, таблицях і схемах
- Англійська мова у таблицях і схемах
- Біологія у визначеннях, таблицях і схемах
- Всесвітня історія у визначеннях, таблицях і схемах
- Географія України у визначеннях, таблицях і схемах
- Геометрія в означеннях, таблицях і схемах
- Історія України у визначеннях, таблицях і схемах
- Німецька мова у таблицях і схемах
- Основи економіки у визначеннях, таблицях і схемах
- Інформатика в означеннях, таблицях і схемах
- Основи правознавства у визначеннях, таблицях і схемах
- Російська мова у визначеннях, таблицях і схемах
- Українська мова у визначеннях, таблицях і схемах
- Фізика в означеннях, таблицях і схемах
- Французька мова у таблицях і схемах
- Хімія у визначеннях, таблицях і схемах

Книга • поштою

Книжковий клуб видавництва «Ранок»  
**«ЗОЛОТА СЕРЕДИНА»**  
 а/с 3355, Харків, 61045  
 тел.: (057) 717-74-55  
 pochta@ranok.kharkov.ua  
 www.zlatka.com.ua

ISBN 978-966-08-2303-7



9 789660 823037 >