

# ФІЗИКА

## в таблицях

## і схемах

• ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

• закони

• графіки

• визначення

• формули

• одиниці вимірювання

# МЕХАНІКА

**Основне завдання механіки** — визначити положення тіла в заздалегідь обраній у просторі системі координат, пов'язаній з умовно нерухомими тілами, у будь-який момент часу  $t$

**Основним поняттям механіки** є поняття руху, тобто зміна положення тіла відносно інших тіл

$v \ll c$	$v < c$
<b>Класична (Ньютонівська) механіка</b> вивчає рух макроскопічних тіл зі швидкостями, малими в порівнянні зі швидкістю світла	<b>Релятивістська механіка</b> вивчає рух макроскопічних тіл при більших швидкостях, порівняних зі швидкістю світла

Квантова механіка вивчає поведінку частинок мікросвіту.

## Основні розділи класичної механіки

Кінематика	Динаміка	Статика
Вивчає рух тіл, не розглядаючи причини руху	Вивчає причини, що зумовлюють або змінюють рух тіла	Вивчає умови рівноваги тіл
<b>Основне завдання кінематики</b>	<b>Основне завдання динаміки</b>	<b>Основне завдання статички</b>
Описати за допомогою математичних формул, графіків або таблиць рух тіла	З'ясувати, як впливає взаємодія тіл на характер руху	Визначити умови рівноваги тіл під дією прикладених сил

Зазвичай окремо виділяються питання, пов'язані з вивченням *механічних коливань і хвиль*.

# КІНЕМАТИКА

## Основні поняття

**Матеріальна точка** — тіло, що має масу, розмірами й формою якого в умовах даного завдання можна знехтувати.

Землю можна вважати матеріальною точкою, якщо необхідно обчислити період обігу Землі навколо Сонця.

Землю не можна вважати матеріальною точкою, якщо необхідно обчислити відстань від Львова до Торонто

**Механічний рух** — зміна в часі положення тіла (або його частини) відносно інших тіл

Система відліку складається з:

- 1) тіла відліку;
- 2) системи координат;
- 3) годинника.

Система відліку — сукупність тіл, які умовно вважаються нерухомими і відносно яких розглядається рух інших тіл. За допомогою цих тіл задається система координат, яка як єдине ціле може переміщатися відносно інших тіл.

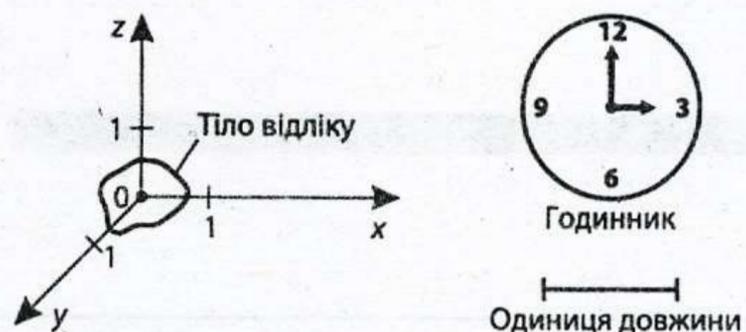
Систему відліку можна вибрати довільно. Якщо тіло відліку збігається з розглянутим тілом, то в такій системі відліку тіло буде у стані спокою, а в іншій рухатиметься, причому в різних системах по різних траєкторіях.

Різні системи відліку є рівноправними й однаково припустимими при дослідженні руху будь-якого тіла. При розв'язуванні конкретної задачі тіло відліку можна вибрати так, щоб задача розв'язувалась максимально просто.

Наприклад: траєкторія вільного руху важкої кулі, розташованої на рівномірно обертовому диску, виявляється прямою в системі координат, що пов'язана з диском, і складною кривою в нерухомій системі координат.

Як система координат найчастіше використовується прямокутна декартова система координат, що на площині задається двома взаємно перпендикулярними прямими — осями координат, на кожній з яких обраний додатний напрям і заданий відрізок одиничної довжини. Площини, що проходять через осі координат, називають координатними площинами.

Зазвичай використовується система відліку, яку називають лабораторною, що пов'язана із землею кулею

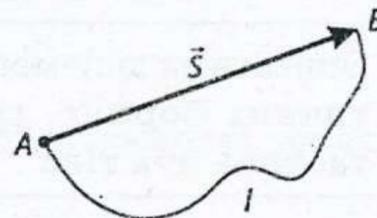


**Переміщення  $\vec{S}$**  — вектор, що з'єднує початкове й кінцеве положення матеріальної точки в просторі

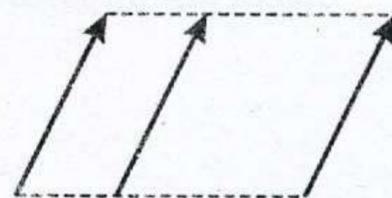
**Траєкторія** — лінія, яку описує в просторі матеріальна точка

**Шлях  $l$**  — довжина траєкторії, тобто лінії, яку описує матеріальна точка в просторі.

*Приклад:* у таксі ми платимо за шлях, у літаку — за переміщення



**Поступальний рух** — рух, при якому швидкості всіх точок тіла однакові за величиною й напрямом (у геометрії — паралельне перенесення)



## Векторні й скалярні величини у фізиці

**Скалярні величини** — фізичні величини, що характеризуються тільки числовими значеннями й можуть бути визначені додатними або від'ємними числами.

*Приклад:* маса  $m$ , час  $t$ , енергія  $E$ , робота  $A$

**Векторні величини** — фізичні величини, що характеризуються напрямом і числовим значенням (модулем).

*Приклад:* швидкість  $\vec{v}$ , прискорення  $\vec{a}$ , сила  $\vec{F}$

## Сума й різниця векторів

**Вектор** — відрізок, що має певну довжину й напрям, — позначається звичайно  $\overline{AB}$ , де  $A$  — початок вектора, а  $B$  — його кінець, або  $\vec{a}$ . Модуль, або абсолютна величина (довжина вектора) позначається  $|\vec{a}|$

Сумою двох векторів  $\overline{AB} = \vec{a}$  й  $\overline{AD} = \vec{b}$  є вектор  $\overline{AC} = \vec{c}$ , що є діагоналлю паралелограма  $ADCB$ .

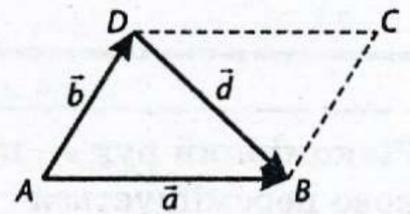
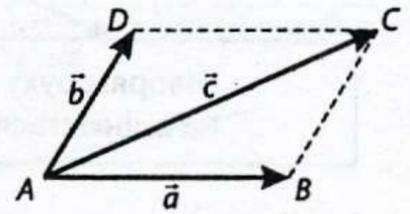
Основні властивості суми:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}, \quad |\vec{a} + \vec{b}| \leq |\vec{b}| + |\vec{a}|.$$

Різницею векторів  $\vec{a} - \vec{b}$  називається діагональ  $DB$ :

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}) = \vec{a}.$$

Вектор  $\vec{a} - \vec{a} = 0$  — нульовий вектор, що має нульову довжину й невизначений напрям



Будь-який вектор може бути представлений сумою трьох взаємно перпендикулярних векторів, напрямлених уздовж прямокутних осей координат:

$$\vec{a} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z,$$

де  $|\vec{a}|^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$ .

Зміну будь-якої фізичної величини з часом звичайно називають швидкістю зміни цієї величини. Швидкість зміни векторної величини залишається сталою тільки у випадку, коли її модуль і напрям не змінюються

## Швидкість

**Швидкість** тіла  $\vec{v}$  при його переміщенні в просторі визначається як збільшення величини  $\vec{S}$  переміщення за одиницю часу:

$$\vec{v} = \frac{\vec{S}_1 - \vec{S}_2}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t}, \quad [v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

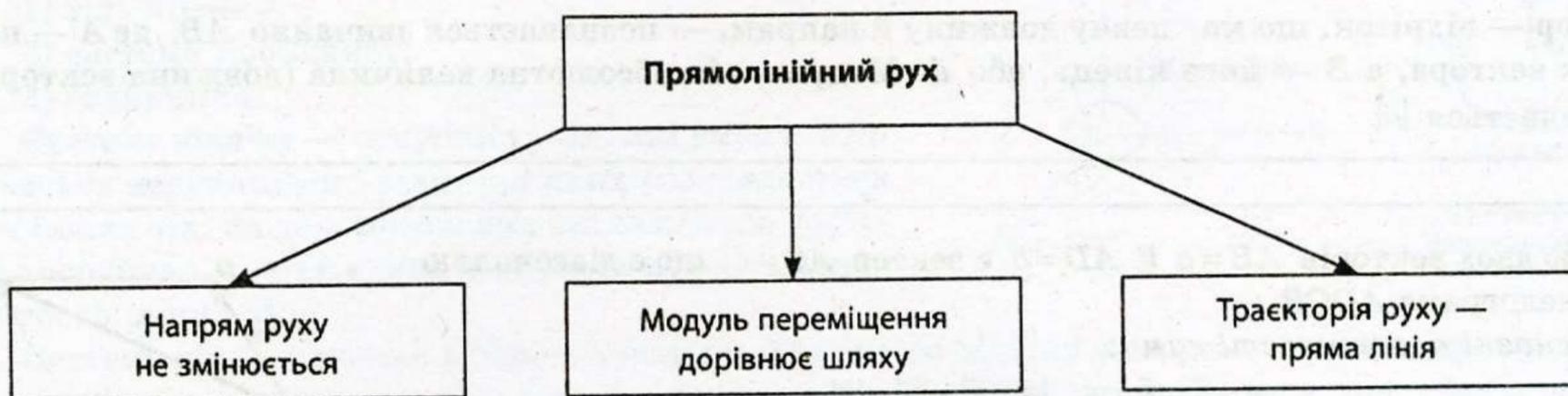
**Миттєве значення швидкості** — малий інтервал часу виміру швидкості, тобто той, що наближається до нуля.

$$\vec{v}_{\text{мит}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} \quad \text{— миттєва швидкість, тобто швидкість у заданій точці траєкторії}$$

**Миттєва швидкість** при переміщенні тіла залишається сталою лише у випадку, коли її модуль (довжина вектора) і напрям не змінюються. Рух із сталою швидкістю може бути тільки уздовж прямої у заданому напрямі. Часто вживаний термін «рівномірний рух тіла по колу» означає, що змінюється тільки напрям руху, а модуль швидкості на колі залишається сталим.

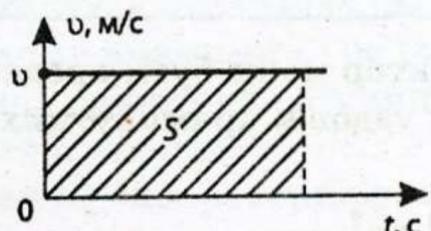
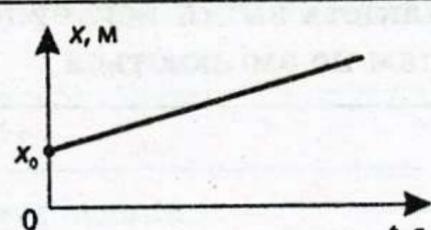
В окремому випадку швидкість тіла може дорівнювати нулю. Це означає, що модуль швидкості дорівнює нулю, а напрям переміщення не визначений. Тіло перебуває в стані спокою

## ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ



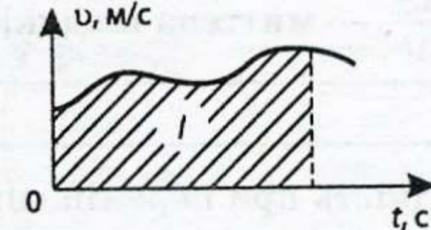
## Рівномірний прямолінійний рух

**Рівномірний рух** — прямолінійний рух, при якому тіло за будь-які рівні проміжки часу однаково переміщується

<p><b>Швидкість:</b></p> $\vec{v} = \frac{\vec{S}}{t}, [v] = \frac{m}{c}$ <p>Шлях чисельно дорівнює площі під графіком залежності швидкості від часу: <math>S = v \cdot t</math></p>	 <p style="text-align: center;">Графік залежності швидкості від часу</p>
<p><b>Координата</b> <math>x = x_0 + S, [x], [S] = m</math>.</p> $x = x_0 + v \cdot t,$ <p><math>x</math> — координата в момент часу <math>t</math>;  <math>x_0</math> — початкова координата, тобто координата в момент часу <math>t = 0</math></p>	 <p style="text-align: center;">Графік залежності координати від часу</p>

## Нерівномірний прямолінійний рух

**Нерівномірний рух** — рух, при якому тіло за будь-які рівні проміжки часу робить різні переміщення

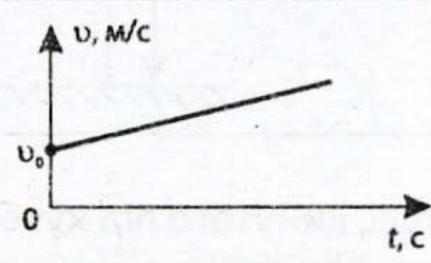
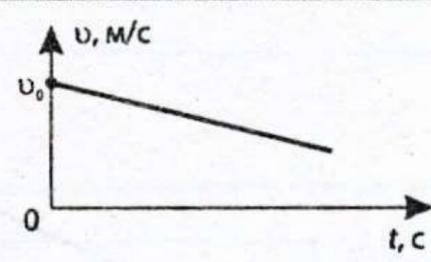
<p><b>Середня швидкість:</b></p> $v_{сер} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, [v_{сер}] = \frac{m}{c}$ <p><math>S</math> — переміщення</p>	 <p style="text-align: center;">Графік залежності модуля швидкості від часу</p>
<p><b>Середня шляхова швидкість:</b></p> $v_{сер} = \frac{l}{t}, [v_{сер}] = \frac{m}{c}$ <p><math>l</math> — шлях</p>	<p>Шлях чисельно дорівнює площі під графіком залежності модуля швидкості від часу</p>

## Рівноприскорений прямолінійний рух

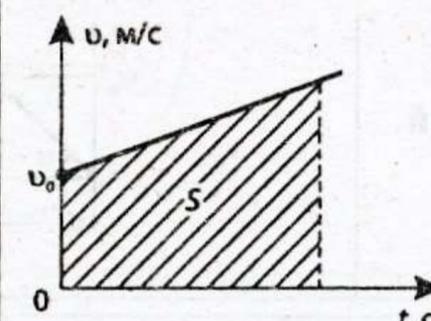
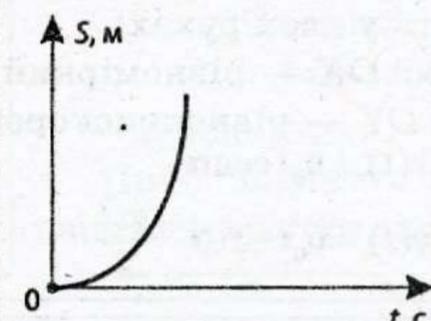
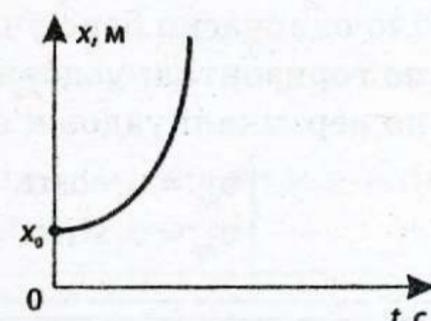
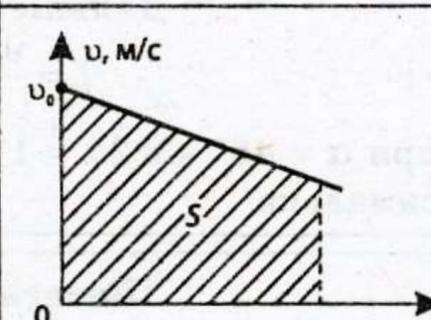
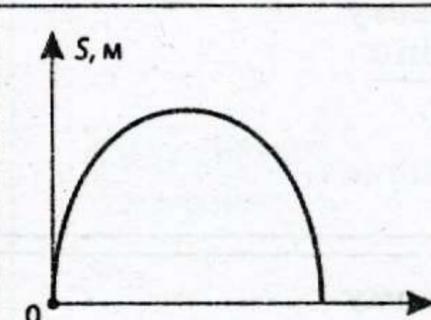
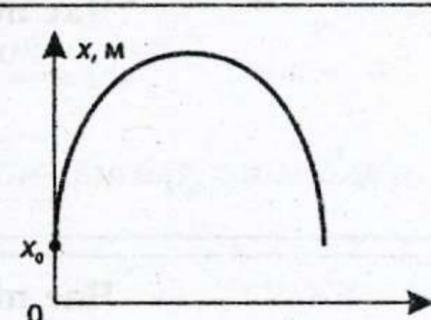
**Рівноприскорений рух** — рух, при якому швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на ту саму величину

Прискорення:  $\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$ ,  $[a] = \frac{M}{c^2}$ ,

$v_0$  — початкова швидкість.

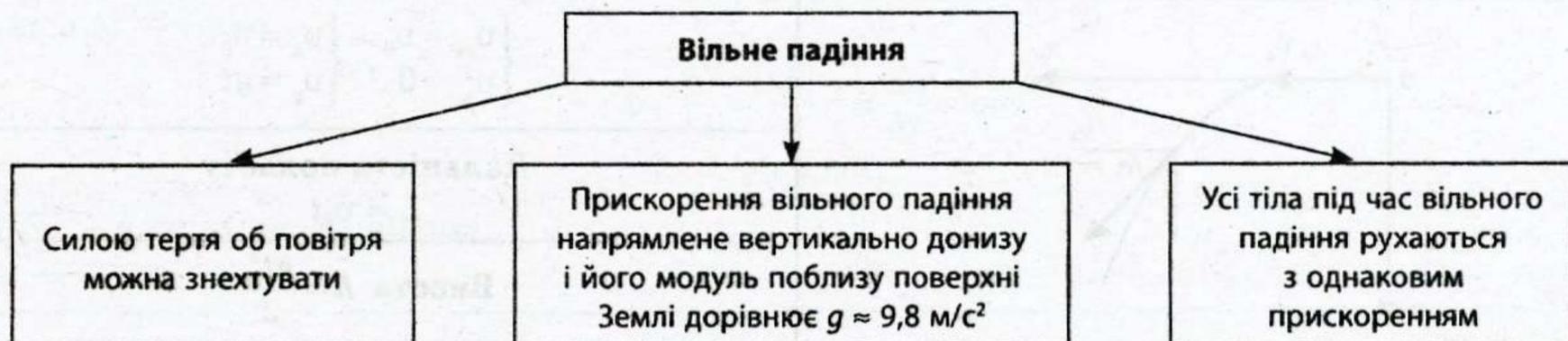
$a > 0$ $v > v_0$	Рух рівноприскорений (швидкість напрямлена уздовж осі $OX$ )	Швидкість $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t$ $v = v_0 + at$	
$a < 0$ $v < v_0$	Рух рівносповільнений (швидкість напрямлена протилежно додатному напрямку осі $OX$ )	Швидкість $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t$ $v = v_0 - at$	

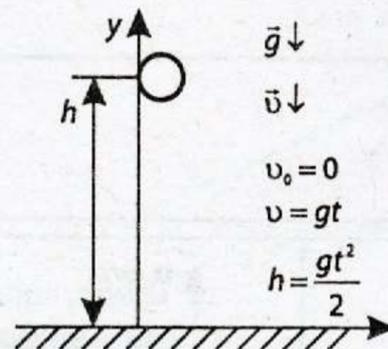
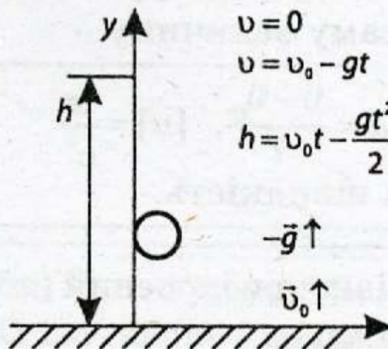
Переміщення чисельно дорівнює площі під графіком залежності швидкості від часу

	Залежність швидкості від часу	Залежність переміщення від часу	Залежність координати від часу
$S = v_0t + \frac{at^2}{2}$ , при $a < 0$ $x = x_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}$			
$S = v_0t - \frac{at^2}{2}$ , при $a < 0$ $x = x_0 + v_0t - \frac{at^2}{2}$			

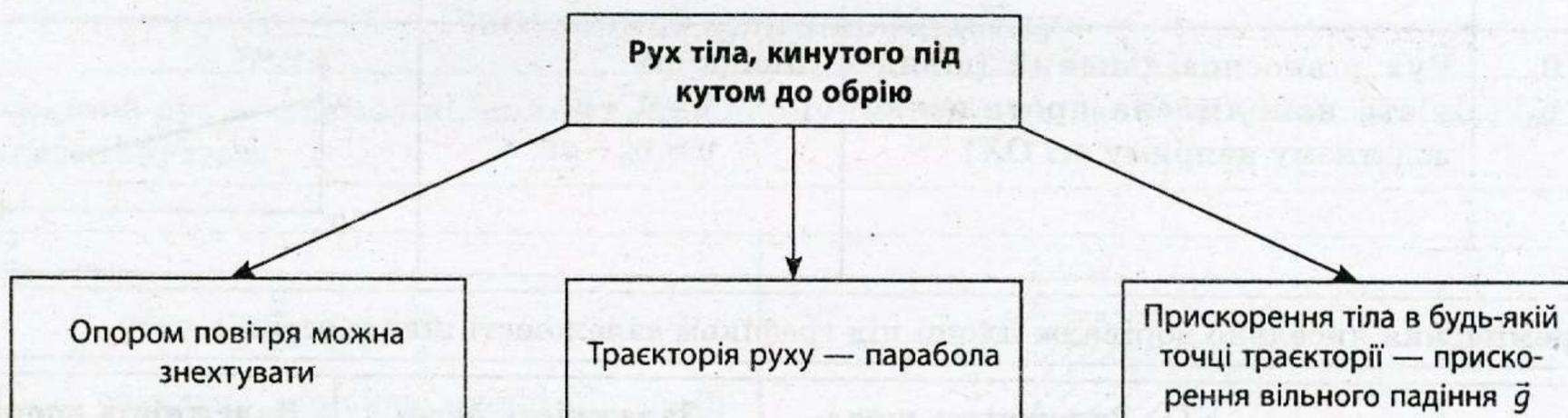
### Вільне падіння

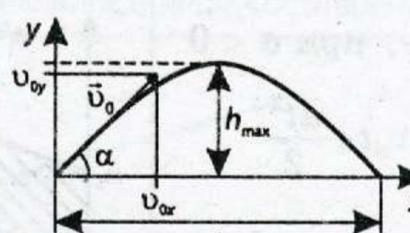
**Вільне падіння** — рух тіла тільки під впливом тяжіння Землі.



Вільне падіння без початкової швидкості	Рух по вертикалі з ненульовою початковою швидкістю
	

### Рух тіла, кинутого під кутом до обрію

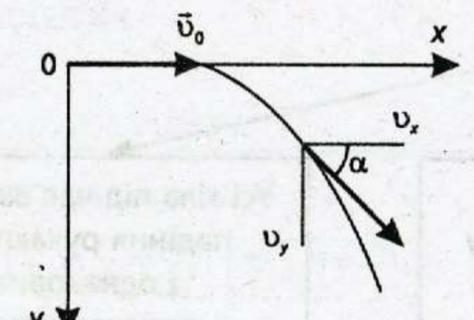


<p>Тіло одночасно бере участь у двох рухах: по горизонталі уздовж осі <math>OX</math> — рівномірний; по вертикалі уздовж осі <math>OY</math> — рівноприскорений.</p> $\begin{cases} v_{ox} = v_0 \cos \alpha \\ v_{oy} = v_0 \sin \alpha \end{cases} \begin{cases} x(t) = v_0 t \cos \alpha \\ y(t) = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} \end{cases}$	
---	---

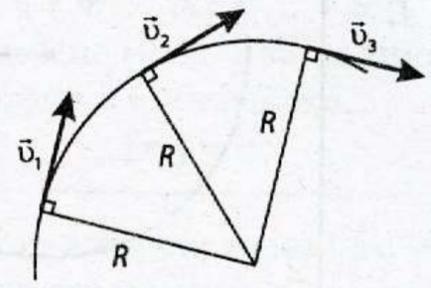
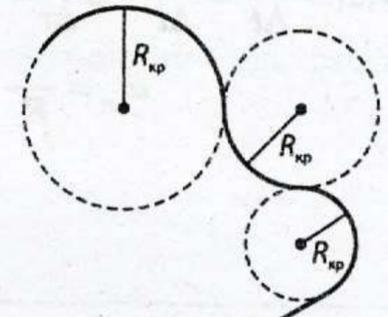
<p><b>Час польоту</b> <math>t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}</math></p>	<p><b>Дальність польоту</b> <math>L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}</math> при <math>\alpha = 45^\circ \sin 2\alpha = 1</math> дальність польоту максимальна</p>
---	---

<p><b>Час підйому</b> <math>t_{\text{підйому}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}</math></p>	<p><b>Висота підйому</b> <math>h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}</math></p>
---	---

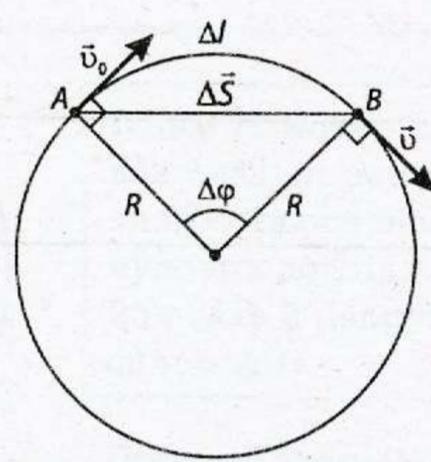
### Рух тіла, кинутого горизонтально

	$\begin{cases} v_{ox} = v_0 \\ v_{oy} = 0 \end{cases}, \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = gt \end{cases}$ <p><b>Дальність польоту</b> <math>L = v_0 t</math></p> <p><b>Висота</b> <math>h = \frac{gt^2}{2}</math></p>
---	---

## КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ

<p>Вектор початкової швидкості <math>\vec{v}_0</math> й вектор постійного прискорення <math>\vec{a}</math> не лежать на одній прямій</p>	<p>Завжди рух із прискоренням, тому що вектор швидкості змінюється з часом</p>  <p><math>\vec{v}</math> спрямована по дотичній до траєкторії</p>	<p>Завжди можна представити як послідовність рухів, що відбуваються по дугах кіл</p>  <p><math>R_{кр}</math> — радіус кривизни</p>
--	--	---

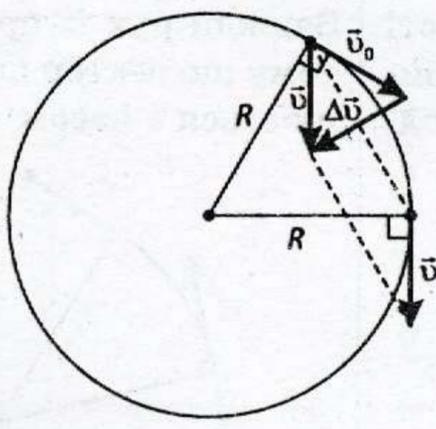
## Рівномірний рух по колу

	<p>Траєкторія руху — коло радіуса <math>R</math>.</p> <p><math>\Delta l</math> — шлях, пройдений з положення <math>A</math> у положення <math>B</math> за час <math>\Delta t</math>.</p> <p><math>\Delta \varphi</math> — кутове переміщення, тобто кут повороту радіуса за час <math>\Delta t</math> — мале.</p> $\left. \begin{array}{l}  \vec{v}  = \text{const} \\ \vec{v} \text{ змінюється з часом} \end{array} \right\} \Rightarrow \vec{a},$ <p><math>\vec{a}</math> — прискорення.</p> <p>Прискорення <math>\vec{a}</math> виникає внаслідок зміни напрямку вектора швидкості <math>\vec{v}</math></p>
---	---

<p><b>Лінійна швидкість</b></p> $v =  \vec{v}  = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad [v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}$ <p><b>Кутова швидкість</b></p> $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}, \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\left. \begin{array}{l}  \vec{v}_0  =  \vec{v}  = v \\ a = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{рівномірний рух по колу}$
--	---

<p><b>Зв'язок між кутовою і лінійною швидкістю</b></p> $ \Delta \vec{S}  \approx \Delta l = R \cdot \Delta \varphi,$ <p>якщо <math>\Delta t</math> — мале</p> $v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \approx \frac{ \Delta \vec{S} }{\Delta t} = R \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \omega R;$ $v = \omega R,$ <p><math> \Delta \vec{S} </math> — модуль переміщення;  <math>\Delta l</math> — шлях</p>
--

## Доцентрове прискорення

$\Delta v = v \cdot \Delta\varphi,$ <p>якщо <math>\Delta t</math> — мале,</p> $a =  \vec{a}  = \frac{ \Delta\vec{v} }{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = v \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = v \cdot \omega = v \cdot \frac{v}{R} = \frac{v^2}{R}$ $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$	 $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ <p><math>\Delta\vec{v}</math> — напрямлений до центра кола</p>
--	--

Вектор  $\vec{a}_{\text{дц}}$  в будь-якій точці траєкторії перпендикулярний швидкості руху  $\vec{v}$  та напрямлений до центра кола

Частота обертання  $\nu$  — число повних обертів за одиницю часу.  
Період обертання  $T$  — час одного повного оберту.

$$T = \frac{1}{\nu}; [T] = \text{с}; [\nu] = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1}$$

## Співвідношення між величинами

Лінійна швидкість:  $v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \cdot \nu.$

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

Доцентрове прискорення:  $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2 R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$

# ДИНАМІКА

## Основні поняття

**Вільна матеріальна точка (тіло)** — тіло, на яке не діють інші тіла

**Інерційна система відліку (ІСВ)** — система відліку, відносно якої вільна матеріальна точка, не піддана впливу інших тіл, рухається рівномірно й прямолінійно

**Неінерційна система відліку** — система відліку, яка рухається із прискоренням відносно інерційної системи відліку

**Інертність** — властивість усякого тіла чинити опір зміні їх швидкості

**Інерція** — явище збереження швидкості тіла, якщо на нього не діють інші тіла (вільна матеріальна точка) або дія на нього з боку інших тіл скомпенсована

Маса (інертна) — скалярна фізична величина, що є мірою інертності матеріальної точки або мірою інертності тіла в поступальному русі.

У класичній механіці Ньютона:

- маса тіла не залежить від швидкості руху цього тіла:  $m \neq m(v)$ ;
- маса адитивна, тобто маса тіла дорівнює масі всіх частинок, з яких складається тіло:  

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$$
- виконується закон збереження маси: маса тіла залишається незмінною за будь-яких механічних процесів, що відбуваються в системі тіл.

$$[m] = \text{кг}$$

Сила — векторна фізична величина, що є мірою взаємодії тіл, частин тіл або фізичних полів, тобто причиною зміни швидкості тіла або його частин.

$$[F] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Сила  $\vec{F}$  має напрям, модуль, точку прикладання й лінію дії.  
 Прилад для вимірювання сили — динамометр



## Закони Ньютона



Ісаак Ньютон  
(1643-1727)

Ісаак Ньютон — один з найвеличніших фізиків і математиків — сформулював спільні закони механічного руху, відкрив закон всесвітнього тяжіння, визначив основи диференціального та інтегрального зчислення, провів низку чудових досліджень з оптики. Основні роботи були виконані Ньютоном у віці 25 років й надруковані у грандіозній праці «Математичні начала натуральної філософії»

### Перший закон Ньютона (закон інерції)

В інерціальних системах відліку (ІСВ) тіла, що поступально рухаються, зберігають свою швидкість сталою, якщо на них не діють інші тіла або дія інших тіл скомпенсована

### Другий закон Ньютона

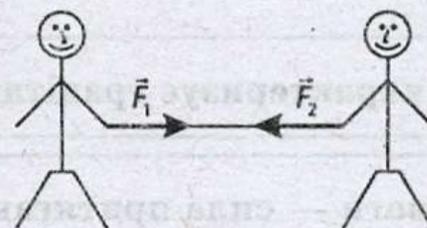
Прискорення матеріальної точки (тіла) пропорційне силі, що його спричиняє, й обернено пропорційне масі матеріальної точки (тіла)

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad \vec{F} = m\vec{a}, \quad 1 \text{ Н} = \frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ с}^2}$$

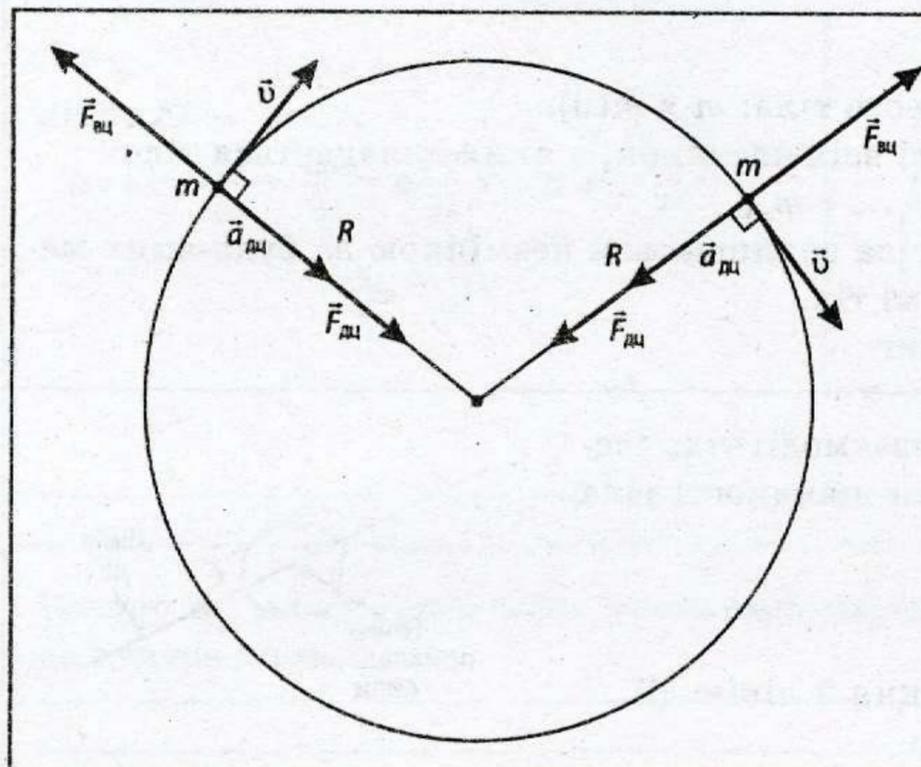
### Третій закон Ньютона

Два тіла діють одне на одне із силами, спрямованими уздовж однієї прямої, рівними за модулем й протилежними за напрямом

Сили, прикладені до різних тіл, завжди діють парами й мають однакову фізичну природу:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$



## Динаміка тіла, що рухається по колу



На тіло масою  $m$ , що рухається рівномірно по колу, діє доцентрова сила, що за II законом Ньютона дорівнює:

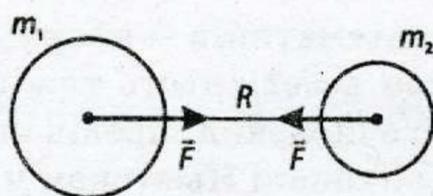
$$\vec{F}_{dc} = m\vec{a}_{dc}, \quad F_{dc} = m\frac{v^2}{R},$$

де  $m$  — маса тіла;  
 $v$  — лінійна швидкість тіла;  
 $R$  — радіус кола

Відцентрова сила  $\vec{F}_{vc}$  протидіє доцентровій силі  $\vec{F}_{dc}$  і за III законом Ньютона  $\vec{F}_{vc}$  дорівнює за модулем та протилежна за напрямом  $\vec{F}_{dc}$ :

$$\vec{F}_{vc} = -\vec{F}_{dc}$$

## Сила тяжіння



**Закон Всесвітнього тяжіння, відкритий Ісааком Ньютоном у 1682 році:**

матеріальні точки притягаються одна до одної із силою, модуль якої прямо пропорційний добутку їхніх мас і обернено пропорційний квадрату відстаней між ними

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

де  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  (експериментально довів Генрі Кавендиш у 1788 році),  $G$  — коефіцієнт пропорційності — гравітаційна стала;

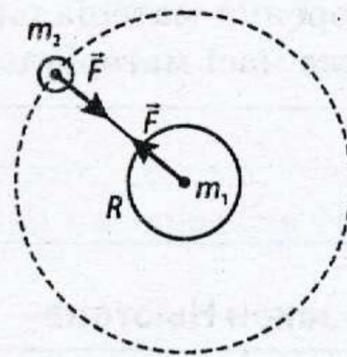
$F$  — величина сили притягання,  $[F] = \text{Н}$ ;

$m_1, m_2$  — маси матеріальних точок,  $[m] = \text{кг}$ ;

$R$  — відстань між матеріальними точками,  $[R] = \text{м}$

**Границі застосування закону Всесвітнього тяжіння:**

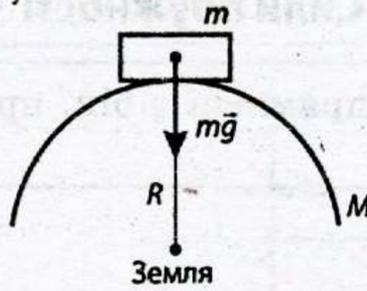
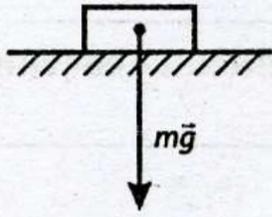
- 1) для матеріальних точок;
- 2) для однорідних куль;
- 3) для сферично-симетричних тіл (планети, зірки)



**Маса характеризує гравітаційні властивості тіл**

**Сила ваги — сила притягання тіла до Землі:**

$$F = mg$$



$$\left. \begin{aligned} F &= mg \\ F &= G \frac{m \cdot M}{R^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow mg = G \frac{m \cdot M}{R^2}$$

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2}$$

$M$  — маса Землі  
 $R$  — радіус Землі

$\vec{g}$  — прискорення вільного падіння, тобто прискорення, з яким тіло масою  $m$  рухається до поля тяжіння Землі.

$\vec{g}$  залежить від

висоти тіла  $h$  над Землею:

$$g' = G \frac{M}{(R+h)^2};$$

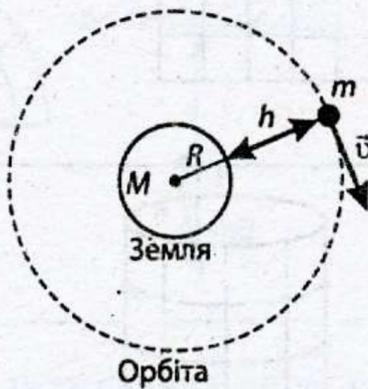
$R$  — радіус Землі

географічної широти:

$$g = 9,83 \frac{M}{c^2} \text{ — поблизу полюсів;}$$

$$g = 9,78 \frac{M}{c^2} \text{ — на екваторі}$$

**I (перша) космічна швидкість** — мінімальна швидкість, яку необхідно надати тілу, щоб воно стало штучним супутником Землі, що рухається по круговій орбіті

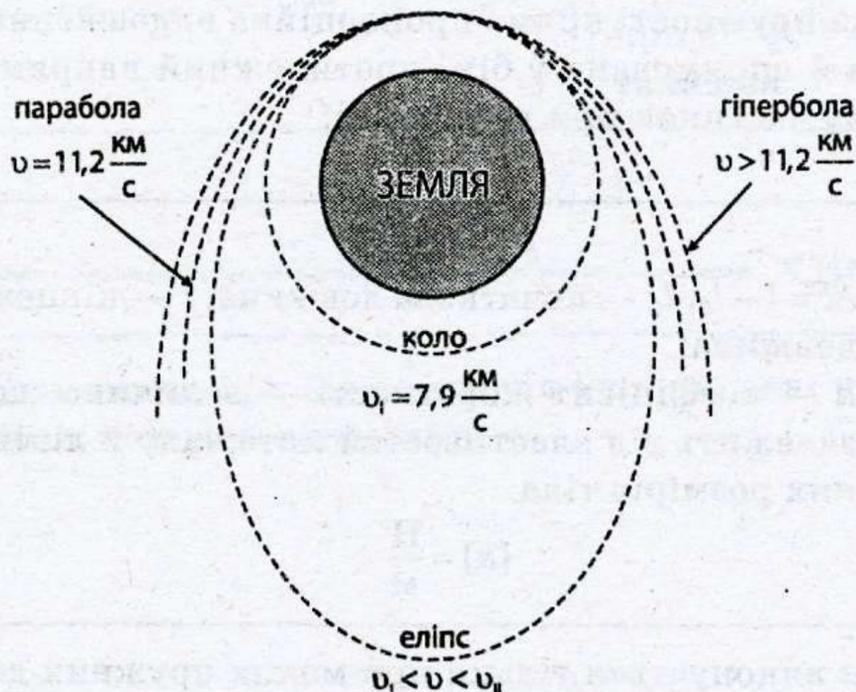


$$\left. \begin{aligned} F &= G \frac{m \cdot M}{(R+h)^2} \\ F_{\text{ц}} &= ma_{\text{ц}} = m \frac{v^2}{R+h} \end{aligned} \right\} \Rightarrow G \frac{m \cdot M}{(R+h)^2} = m \frac{v^2}{R+h},$$

при  $h \ll R$

$$v_1 = \sqrt{gR} \approx 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

**II (друга) космічна швидкість** — мінімальна швидкість, яку необхідно надати тілу, щоб воно змогло перебороти притягання Землі й стати супутником Сонця, що рухається по параболічній орбіті в полі тяжіння Землі

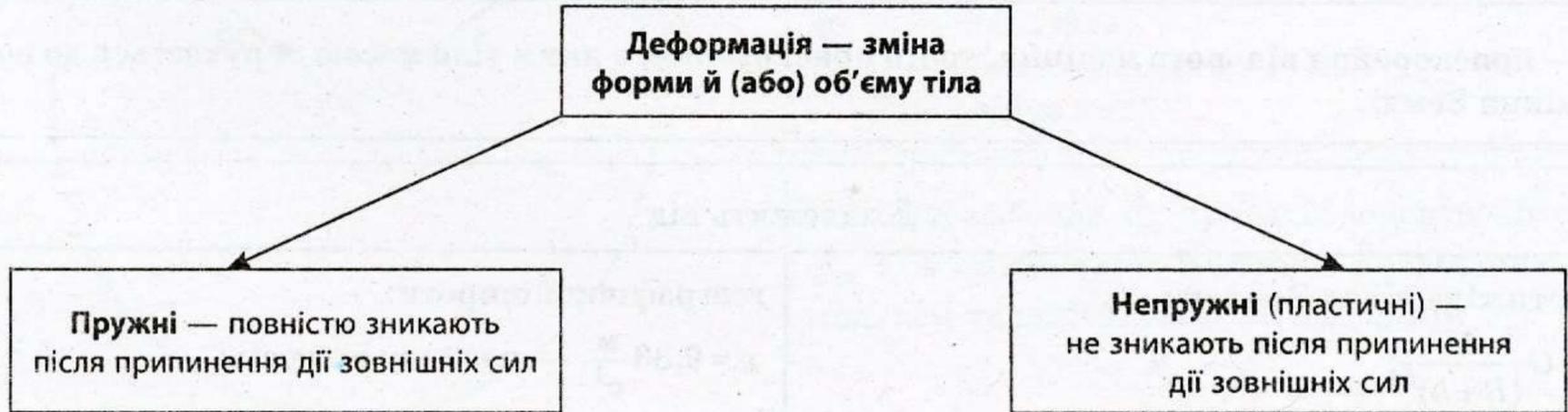


$$v_{II} = \sqrt{2gR} \approx 11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

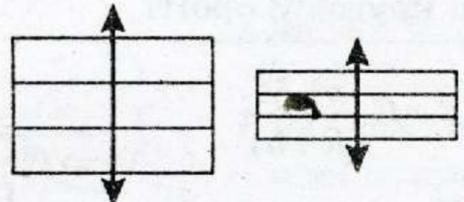
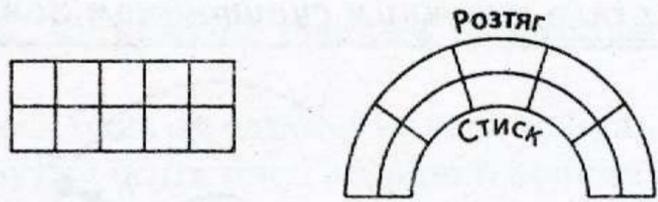
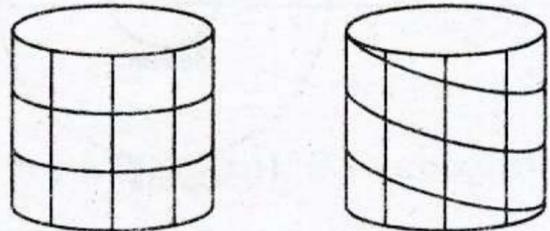
## Сили пружності

Виникають при деформації тіла й напрямлені у бік, протилежний зміщенню частинок тіла з положення рівноваги

### Деформація



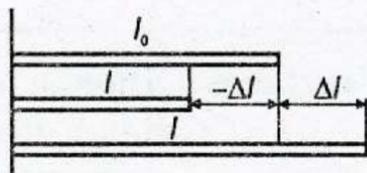
### Типи деформацій

Розтяг (стиск)		Згин	
Зсув		Кручення	

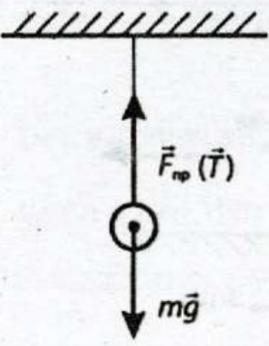
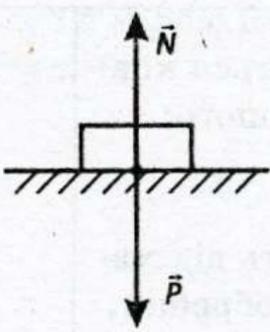
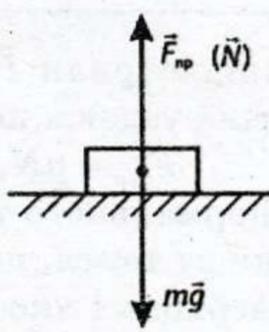
### Закон Гука



Роберт Гук  
(1635-1703)

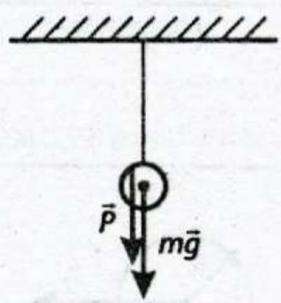
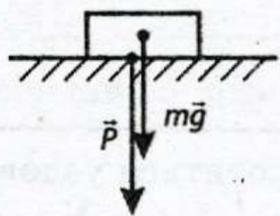
	<p>Сила пружності прямо пропорційна видовженню тіла й спрямована у бік, протилежний напрямку зсуву частинок при деформації</p>
<p>Розтяг: <math>l &gt; l_0 \Rightarrow \Delta l &gt; 0</math>                  Стиск: <math>l &lt; l_0 \Rightarrow \Delta l &lt; 0</math>  <math>[\Delta l] = \text{м}</math></p>	$F_{\text{пр}} = k \Delta l ,$ <p>де <math>\Delta l = l - l_0</math>, <math>l_0</math> — початкова довжина, <math>l</math> — кінцева довжина;  <math>k</math> — коефіцієнт жорсткості — величина, що залежить від властивостей матеріалу й лінійних розмірів тіла.</p> $[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
<p>Межа застосування закону Гука: виконується тільки при малих пружних деформаціях</p>	

## Приклади сили пружності

		
<p><math>\vec{T}</math> — сила натягу</p>	<p><math>\vec{N}</math> — сила реакції опори, <math>\vec{P}</math> — сила нормального тиску — вага</p>	

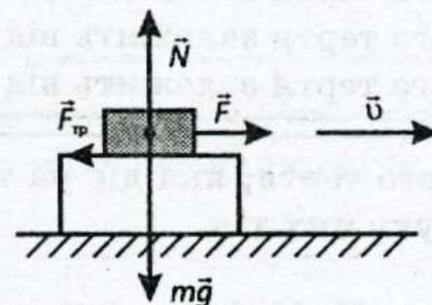
## Вага тіла

Вага тіла — сила, з якою тіло внаслідок притягання до Землі діє на горизонтальну опору або підвіс

		
<p>Вага тіла <math>\vec{P}</math> прикладена не до розглянутого тіла, а до опори або підвісу</p>		
<p>Тіло рухається рівномірно або у стані спокою</p> $\vec{P} = m\vec{g}$ $P = mg$	<p>Тіло рухається із прискоренням вертикально вгору</p> $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ $P = m(g + a)$ <p>при <math>a = g</math>, <math>P = 2mg</math> — перевантаження</p>	<p>Тіло рухається із прискоренням вертикально вниз</p> $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ $P = m(g - a)$ <p>при <math>a = g</math>, <math>P = 0</math> — невагомість</p>

## Сили тертя

Виникають при зіткненні тіл і спрямовані уздовж поверхні зіткнення



## Сила тертя ковзання

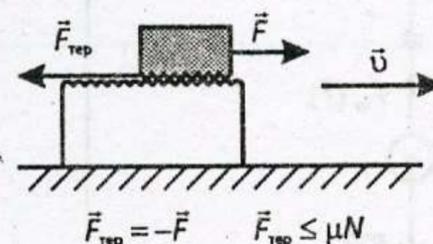
Під дією зовнішньої сили  $\vec{F}$  відбувається ковзання одного тіла уздовж поверхні іншого:

$$F_{\text{тер}} = \mu N,$$

де  $N$  — сила нормального тиску;

$\mu$  — коефіцієнт тертя, що залежить від матеріалу поверхонь і якості їхньої обробки.

Як правило,  $\mu < 1$



## Сила тертя спокою

Зовнішня сила  $\vec{F}$  недостатня для відносного переміщення тіл, тобто сила тертя спокою перешкоджає можливому руху



## Тертя кочення

Якщо одне тіло котиться уздовж іншого.

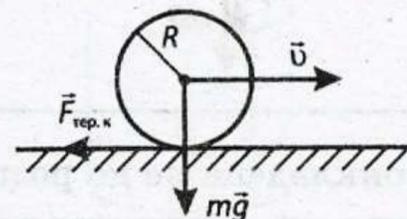
$$F_{\text{тер.к}} = \mu_k \frac{N}{R},$$

де  $F_{\text{тер.к}}$  — сила тертя кочення;

$N$  — сила нормального тиску;

$R$  — радіус циліндра, що котиться;

$\mu_k$  — коефіцієнт тертя кочення,  $[\mu_k] = \text{м}$



Тертя кочення значно менше тертя ковзання, тому для зменшення тертя в техніці замінюють ковзання коченням, використовуючи кулькові й роликові підшипники

## Сила рідкого тертя

Сила рідкого тертя — сила опору середовища, тобто тертя між твердим тілом і рідиною (або газом)

**Особливості рідкого тертя:**

- сила тертя спокою відсутня;
- сила рідкого тертя залежить від розмірів, форми і якості поверхні, що рухається;
- сила рідкого тертя залежить від властивостей рідини (або газу), у якій рухається тіло;
- сила рідкого тертя залежить від відносної швидкості руху тіла й середовища.

Сила рідинного тертя, яка діє на тіла, що рухаються в рідині чи газі, пропорційна швидкості відносного руху цих тіл.

$$F_{\text{тер}} = -\alpha v,$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт рідинного тертя, який залежить від розміру і форми тіла, що рухається, і властивостей рідини або газу

## Імпульс

Імпульс тіла — векторна фізична величина, що є мірою механічного руху.

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

де  $\vec{p}$  — імпульс тіла,  $[p] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ;

$m$  — маса тіла,  $[m] = \text{кг}$ ;

$\vec{v}$  — швидкість руху тіла,  $[v] = \frac{\text{м}}{\text{с}}$

II закон Ньютона в імпульсній формі:

$$\vec{F} = m\vec{a} \xrightarrow{a = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}} \vec{F} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} \Rightarrow \vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0 \xleftrightarrow{\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{v}} \vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

Імпульс сили — векторна величина, що є мірою дії сили.

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot t,$$

де  $\vec{I}$  — імпульс сили,  $[I] = \text{Н} \cdot \text{с}$ ;

$\vec{F}$  — сила,  $[F] = \text{Н}$ ;

$t$  — час дії сили,  $[t] = \text{с}$

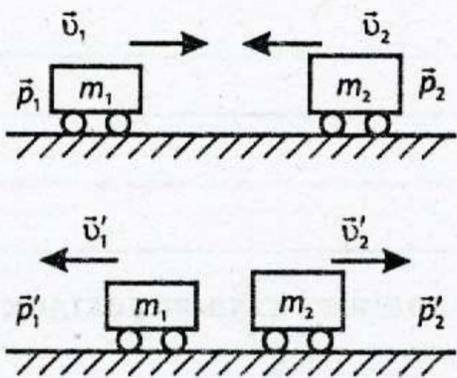
### Закон збереження імпульсу

Векторна сума імпульсів замкненої системи тіл залишається незмінною в інерційній системі відліку:

$$\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = 0, \quad \vec{p} = \text{const}$$

$\vec{p}$  — повний імпульс замкненої системи тіл

**Замкнена система** — система тіл, що не взаємодіють з іншими тілами, які не входять до усієї системи



$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$

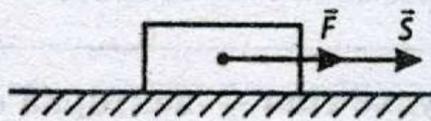
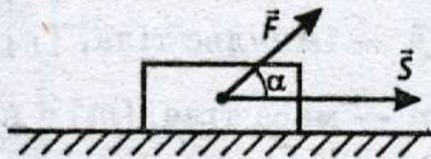
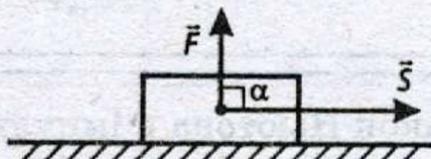
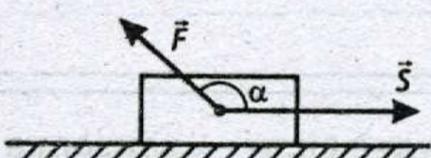
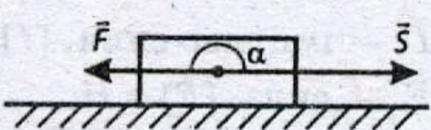
## Робота

Механічна робота постійної сили — фізична величина, що дорівнює скалярному добутку векторів сили й переміщення

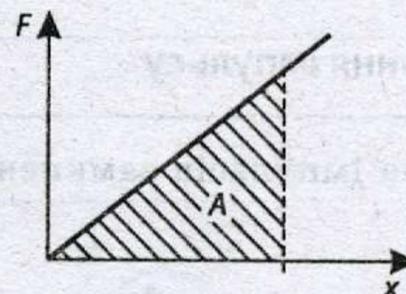
$$A = \vec{F} \cdot \vec{S}$$

$$A = F \cdot S \cos \alpha$$

$$[A] = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$

$\alpha = 0^\circ$	$\cos \alpha = 1$	$A = F \cdot S$	$A > 0$	
$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	$\cos \alpha > 0$	$A = F \cdot S \cos \alpha$	$A > 0$	
$\alpha = 90^\circ$	$\cos \alpha = 0$	$A = 0$	$A = 0$	
$90^\circ < \alpha < 180^\circ$	$\cos \alpha < 0$	$A = -F \cdot S \cos \alpha$	$A < 0$	
$\alpha = 180^\circ$	$\cos \alpha = -1$	$A = -F \cdot S$	$A < 0$	

Якщо  $F = F(x)$ , тобто сила є змінною й залежить від координати  $x$ , то робота чисельно дорівнює площі під графіком функції  $F(x)$



## Енергія

Енергія — скалярна фізична величина, що є мірою здатності тіла (або системи тіл) здійснити роботу внаслідок зміни свого стану

Механічна енергія характеризує рух і взаємодію тіл.

$$E = E_k + E_p; [E] = \text{Дж}$$

### Кінетична енергія

Кінетична енергія  $E_k$  — частина механічної енергії, якою володіють тіла внаслідок свого руху.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

у стані спокою  $v = 0 \Rightarrow E = 0$  — нульовий рівень

### Теорема про кінетичну енергію

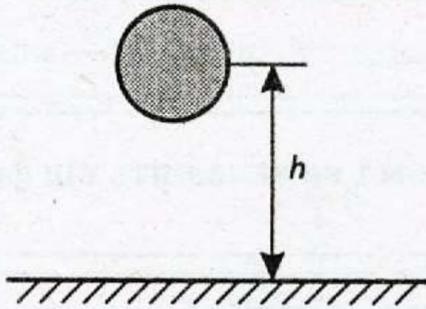
Зміна кінетичної енергії тіла при переході з одного положення в інше дорівнює роботі всіх сил, що діють на тіло:

$$A = E_{k_2} - E_{k_1} = \Delta E_k$$

## Потенціальна енергія

Потенціальна енергія  $E_p$  — частина механічної енергії, обумовлена взаємодією різних тіл або частин тіла

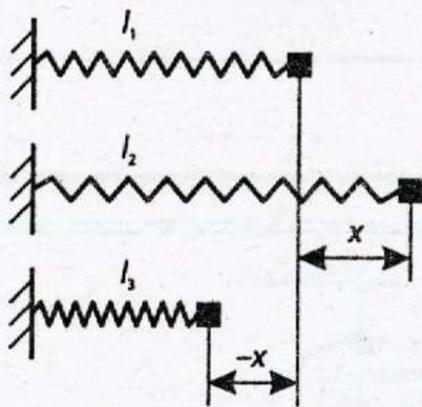
### Потенціальна енергія тіла, піднятого над рівнем землі



Нульовий рівень:  
 $E_p = 0$  і  $h = 0$

$E_p = mgh$ ,  
де  $m$  — маса тіла;  
 $g$  — прискорення вільного падіння;  
 $h$  — висота тіла над Землею  
( $h \ll R_{\text{Землі}}$ )

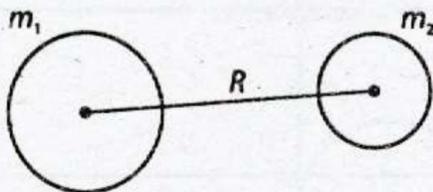
### Потенціальна енергія пружно деформованої пружини



$x = l_2 - l_1 > 0$  — розтяг;  
 $x = l_3 - l_1 < 0$  — стиск;  
нульовий рівень:  $x = 0$

$E_p = \frac{kx^2}{2}$   
де  $x$  — величина деформації,  
 $x = l_2 - l_1$ ;  $x = l_3 - l_1$ ;  
 $k$  — коефіцієнт жорсткості пружини;  
 $l_1$  — довжина недеформованої пружини ( $x = 0$ )

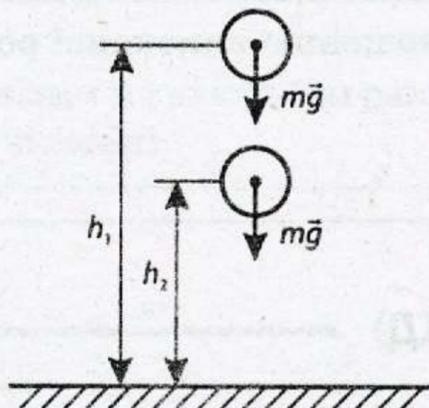
### Потенціальна енергія гравітаційної взаємодії матеріальних точок



Нульовий рівень:  
 $R \rightarrow \infty$

$E_p = -G \frac{m_1 \cdot m_2}{R}$ ,  
де  $m_1, m_2$  — маси матеріальних точок;  
 $R$  — відстань між ними;  
 $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравітаційна стала

## Робота сили тяжіння



$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha \xrightarrow[\alpha=0]{\substack{F=mg \\ S=h_1-h_2}} A = mg(h_1 - h_2)$$

$$A = mgh_1 - mgh_2 = E_{p_1} - E_{p_2}$$

$$A = -\Delta E_p$$

Робота сили тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії із протилежним знаком і не залежить від траєкторії руху

## Робота сили пружності

$F_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}(x)$ , тобто залежить від координати і є змінною силою

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha \xrightarrow[\alpha=0]{\substack{F_{\text{спр}} = k \frac{x_1 + x_2}{2} \\ S = x_1 - x_2}} A = k \frac{x_1 + x_2}{2} (x_1 - x_2) = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}$$

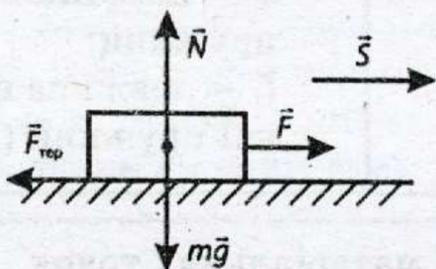
$$A = E_{p_1} - E_{p_2}; \quad A = -\Delta E_p.$$

Робота  $\vec{F}_{\text{пр}}$  дорівнює зміні потенціальної енергії із протилежним знаком і не залежить від форми траєкторії

Потенціальні сили ( $\vec{F}_{\text{ваги}}$ ,  $\vec{F}_{\text{пр}}$ ) — сили, робота яких не залежить від форми траєкторії й визначається тільки початковим і кінцевим положенням тіла

Робота потенціальної сили по замкнутому контуру дорівнює нулю

## Робота сили тертя



$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha \xrightarrow[\substack{N = mg \\ F_{\text{тер}} = \mu N}]{\substack{\alpha = 180^\circ \\ \cos \alpha = -1}} A = -\mu mg S$$

Робота  $\vec{F}_{\text{тер}}$  завжди від'ємна

## Закон збереження механічної енергії

Якщо між тілами замкнутої системи діють тільки потенціальні сили, повна механічна енергія зберігається:

$$E = E_k + E_p = \text{const}; \quad E_{k_1} + E_{p_1} = E_{k_2} + E_{p_2}$$

## Потужність

Потужність — скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню виконаної роботи до проміжку часу, за який вона виконана:

$$N = \frac{A}{t}; \quad [N] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$$

## Коефіцієнт корисної дії (ККД)

ККД — фізична величина, що дорівнює відношенню корисної роботи до всієї витраченої роботи (у відсотках):

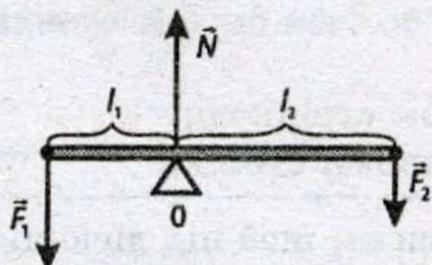
$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\%; \quad \eta < 100\%$$

## Прості механізми

Прості механізми — механічні пристрої, що служать для перетворення сил

### Важіль

Важіль — жорсткий стрижень, що має вісь обертання



Плече сили ( $l_1; l_2$ ) — найкоротша відстань від осі обертання (т.  $O$ ) до лінії дії сили ( $\vec{F}_1; \vec{F}_2$ ).

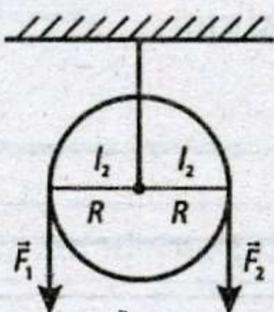
Момент сили:

$$M_1 = F_1 \cdot l_1$$

Умова рівноваги важеля:

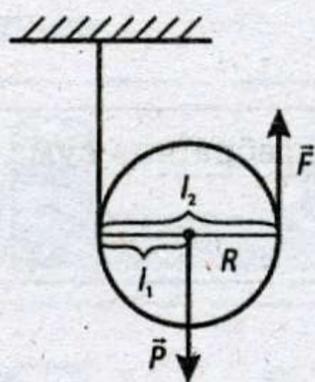
$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{F_2}{F_1}; M_1 = M_2$$

### Блоки



Нерухомий блок змінює напрям дії сили і є рівноплечовим важелем:

$$l_1 = l_2 = R; F_1 = F_2$$



Рухомий блок не міняє напрям дії сили і є важелем зі співвідношенням  $l_1 : l_2 = 1 : 2$ , він дає вигравш у силі у два рази:

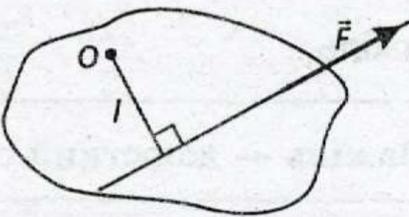
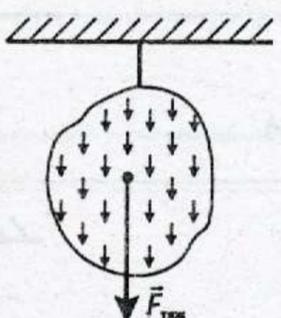
$$\frac{P}{F} = 2$$

### «Золоте правило» механіки

Прості механізми не дають вигравшу в роботі: у скільки разів виграємо в силі, у стільки ж разів програємо у відстані

# СТАТИКА

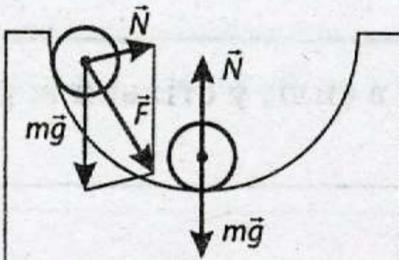
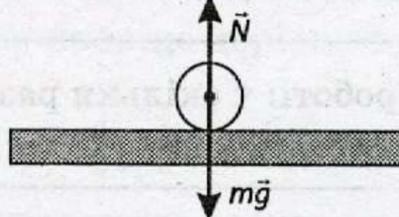
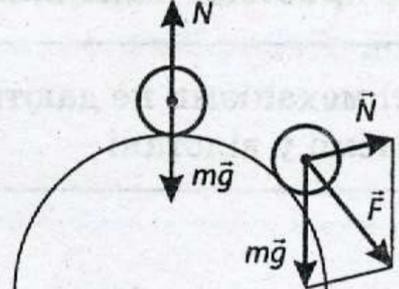
## Основні поняття

<p><b>Плече сили <math>l</math></b> — найкоротша відстань від осі обертання тіла до лінії дії сили.</p> <p>т. <math>O</math> — вісь обертання</p>	
<p><b>Момент сили <math>M</math></b> — добуток модуля сили на плече сили.</p> $M = F \cdot l; [M] = \text{Н} \cdot \text{м}$ <p><math>M</math> додатний, якщо сила спричиняє обертання за годинниковою стрілкою;  <math>M</math> від'ємний, якщо сила спричиняє обертання проти годинникової стрілки</p>	
<p><b>Центр мас</b> — точка, через яку повинна проходити лінія дії сили, щоб під дією цієї сили тіло рухалося поступально</p>	
<p><b>Центр ваги</b> — точка, через яку проходить рівнодійна сили тяжіння при будь-якому розташуванні тіла</p>	<p>Центр ваги й центр мас співпадають в однорідному полі тяжіння</p> <div style="text-align: center;">  </div>

## Умови рівноваги тіл

<p>Тіло залишається у стані спокою відносно інерційної системи відліку, якщо векторна сума всіх прикладених до тіла сил дорівнює нулю:</p> $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0$
<p>Тіло, закріплене на нерухомій осі, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до тіла сил відносно даної осі дорівнює нулю:</p> $M_1 + M_2 + \dots = 0$

## Види рівноваги

Сстійка	Байдужа	Нестійка
		
<p>При відхиленні від положення рівноваги рівнодійна сила <math>\vec{F}</math> повертає тіло в положення рівноваги</p>	<p>При відхиленні рівнодійна сила залишається рівною нулю</p>	<p>При відхиленні від положення рівноваги рівнодійна сила <math>\vec{F}</math> відхиляє тіло від положення рівноваги</p>
$E_p$ — min	$E_p = 0$	$E_p$ — max

# ГІДРОСТАТИКА Й АЕРОСТАТИКА

## Основні поняття

**Тиск** — фізична величина, яка дорівнює відношенню модуля сили, що діє перпендикулярно поверхні, до площі цієї поверхні.

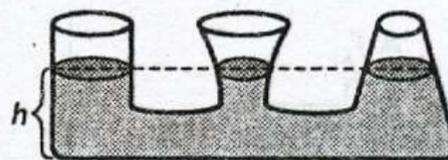
$$P = \frac{F}{S}; [P] = \frac{H}{M^2} = \text{Па}$$

**Густина** — фізична величина, що характеризує стан речовини й кількісно дорівнює відношенню маси однорідного тіла до його об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}; [\rho] = \frac{KГ}{M^3}$$

## Тиск рідини на дно посудини

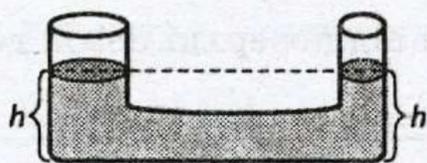
$$P = \frac{F}{S} \xrightarrow[m - \text{маса рідини}]{F = mg} P = \frac{mg}{S} \xrightarrow[V = \rho \cdot V]{\rho = \frac{m}{V}} P = \frac{\rho \cdot Vg}{S} \xrightarrow[h - \text{висота}]{V = S \cdot h} P = \frac{\rho S h g}{S} \rightarrow P = \rho g h$$



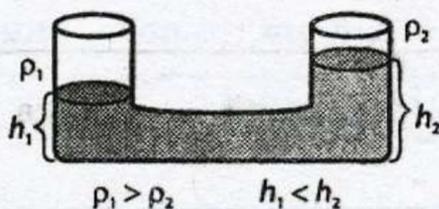
## Закон Паскаля

Зовнішній тиск, що діє на рідину або газ, передається без змін у кожному точку рідини або газу

## Сполучені посудини



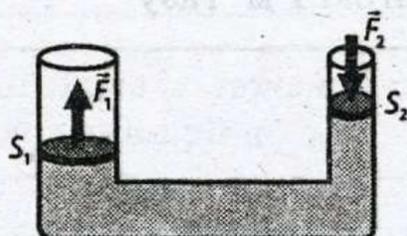
У сполучених посудинах однорідна рідина встановлюється на одному рівні незалежно від форми посудини, якщо зовнішній тиск для всіх посудин однаковий



Висота стовпа рідини з більшою щільністю буде менше висоти стовпа рідини з меншою щільністю, якщо зовнішній тиск для всіх посудин однаковий:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

## Гідравлічний прес (машина)



Згідно із законом Паскаля:

$$P_1 = P_2; \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}; \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

Гідравлічна машина дає вигравш в силі у стільки разів, у скільки площа більшого поршня більше площі малого поршня

## Закон Архімеда

На тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, що дорівнює вазі витисненої рідини або газу в об'ємі цього тіла (або зануреної його частини)

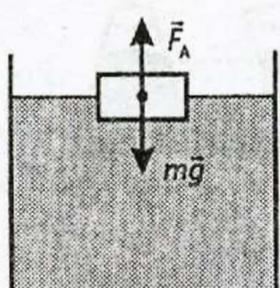
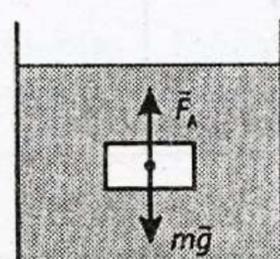
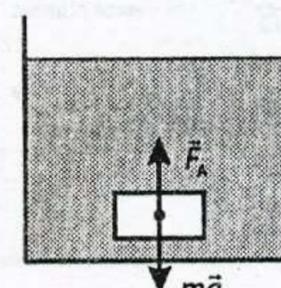
$$F_A = \rho_p g V_T,$$

де  $\rho_p$  — густина рідини або газу;  
 $V_T$  — об'єм зануреного тіла.

$$V_T = V_p,$$

де  $V_p$  — об'єм витисненої рідини

### Умова плавання тіл

$F_A > mg$	$F_A = mg$	$F_A < mg$
		

## Атмосферний тиск

Атмосферний тиск обумовлений вагою усього стовпа повітря від поверхні Землі до межі атмосфери

Нормальний атмосферний тиск:

$$P_A = 101 \text{ кПа} \approx 10^5 \text{ Па}$$

Прилад для вимірювання атмосферного тиску — барометр (рідинний — трубка Торрічеллі; металевий — барометр-анероїд)

## Повітроплавання

Піднімальна сила  $1 \text{ м}^3$  — різниця між вагою  $1 \text{ м}^3$  повітря й вагою  $1 \text{ м}^3$  газу

Піднімальна сила повітряної кулі:

$$F_{\text{під}} = F_A - m_{\text{к}}g,$$

де  $F_A$  — сила Архімеда;  
 $m_{\text{к}}g$  — сила ваги, що діє на кулю

## Рівняння Бернуллі

$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const},$$

де  $P$  — тиск;

$\rho$  — густина рідини;

$v$  — швидкість течії рідини;

$h$  — висота;

$\rho gh$  — гідростатичний тиск;

$\frac{\rho v^2}{2}$  — гідродинамічний тиск

### Фізичний зміст рівняння Бернуллі

У тих частинах потоку, де швидкість руху більша, тиск менший, а там, де швидкість менша — тиск більший

## МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ Й ХВИЛІ

### КОЛИВАННЯ

#### Основні поняття

**Коливання** — рухи або процеси, точно або приблизно повторювані через певні проміжки часу

**Механічні коливання** — коливання механічних величин (швидкості, координати прискорення й т. ін.)

**Вільні коливання** — коливання, що виникають під дією внутрішніх сил

**Внутрішні сили** — сили, що діють між тілами усередині розглянутої системи тіл

**Вимушені коливання** — коливання, що виникають під дією зовнішніх сил, які періодично змінюються

**Зовнішні сили** — сили, що діють на систему з боку інших тіл, які не входять до системи

#### Умови виникнення вільних коливань

При виведенні тіла з положення рівноваги (рівнодійна сила  $\vec{F}_{\text{рд}} = 0$ ) виникає сила ( $\vec{F}_{\text{рд}} \neq 0$ ), спрямована до положення рівноваги

Сили тертя в системі повинні бути досить малі

## Характеристики коливань

Амплітуда $A$ — модуль максимального відхилення від положення рівноваги
Частота коливань $\nu$ — кількість повних коливань, здійснених за одиницю часу: $[\nu] = \frac{1}{c} = \text{Гц}$
Період коливань $T$ — час одного повного коливання: $T = \frac{1}{\nu}; [T] = c$
Циклічна частота $\omega$ — кількість повних коливань, здійснених за час $2\pi$ с: $\omega = 2\pi\nu$

## Гармонічні коливання

Гармонічні коливання — коливання, при яких величина, що коливається, змінюється з часом за законом $\sin$ і $\cos$	
<p><b>Рівняння гармонічних коливань</b></p> $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0),$ <p>де <math>x</math> — зміщення від положення рівноваги в момент часу <math>t</math>;  <math>x_m = A</math> — амплітуда;  <math>\omega</math> — циклічна частота;  <math>(\omega t + \varphi_0)</math> — фаза коливань;  <math>\varphi_0</math> — початкова фаза коливань, тобто фаза коливань у початковий момент часу <math>t = 0</math>.</p> $\omega = 2\pi\nu; T = \frac{2\pi}{\omega}$	<p><b>Графік гармонічних коливань</b></p>
<p>Якщо тіло робить гармонічні коливання уздовж осі <math>OX</math> за законом <math>x = x_m \cos \omega t</math>, то проекція швидкості поступального руху на вісь <math>OX</math>:</p> $v_x = x'(t) = -x_m \omega \sin \omega t = -x_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$ <p>проекція прискорення:</p> $a_x = v'_x(t) = -x_m \omega^2 \cos \omega t = -x_m \omega^2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$	

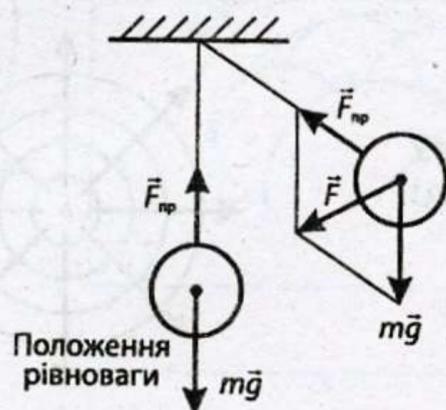
## Пружинний маятник (вантаж на пружині)

Коливання під дією сили пружності: $F_{\text{пр}} = -kx$	
	<p>Період вільних коливань</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$ <p>де <math>m</math> — маса вантажу, <math>[m] = \text{кг}</math>;  <math>k</math> — жорсткість пружини, <math>[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}</math></p>

## Математичний маятник

(матеріальна точка, підвішена на довгій невагомій нерозтяжній нитці)

Коливання під дією сили ваги:  $F_{\text{ваги}} = mg$



Період вільних коливань:

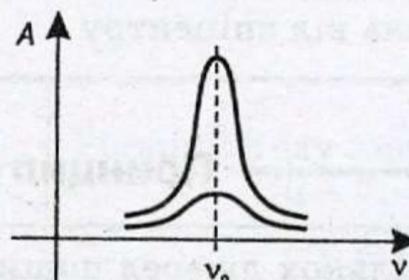
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

де  $l$  — довжина нитки;

$g$  — прискорення вільного падіння

## Резонанс

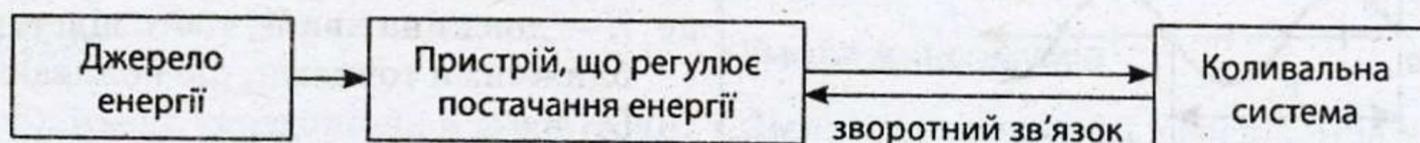
**Резонанс** — різке збільшення амплітуди коливань при збігу частоти  $\nu$  зовнішньої сили й частоти  $\nu_0$  вільних коливань системи



Графік залежності амплітуди вимушених коливань від частоти сили, що змушує

## Автоколивальна система

**Автоколивання** — незатухаючі коливання в системі, підтримувані внутрішнім джерелом енергії за відсутності впливу зовнішньої змінної сили.



*Приклад:* маятник у годиннику

## ХВИЛІ

### Основні поняття

**Хвиля** — процес поширення коливань у просторі з часом

**Механічні хвилі** — поширення коливань у пружних середовищах із часом

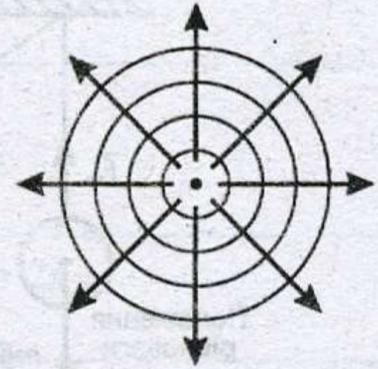
**Поздовжні хвилі** — частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі

**Поперечні хвилі** — частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі

**Хвильовий фронт** — поверхня, на якій усі точки коливаються в однаковій фазі

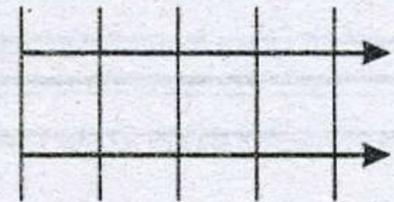
**Промінь** — лінія, перпендикулярна хвильовій поверхні. Поширення хвиль відбувається за напрямом променя

**Сферичні хвилі** — хвилі, у яких хвильові поверхні мають форму концентричних сфер. Поширюються в однорідному середовищі від точкового джерела.  
Амплітуда зменшується при віддаленні від епіцентру



**Плоскі хвилі** — хвилі, у яких хвильові поверхні мають форму паралельних площин.

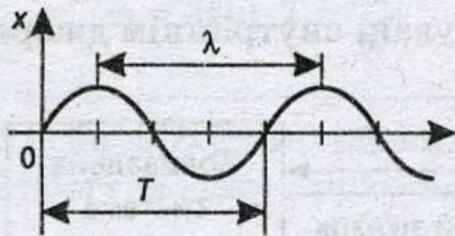
Плоскі хвилі — окремий випадок сферичних хвиль при  $R \rightarrow \infty$ , де  $R$  — відстань від епіцентру



### Принцип суперпозиції (накладання) хвиль

Хвилі від декількох джерел поширюються незалежно одна від одної

### Характеристики хвиль



**Швидкість хвилі** — швидкість поширення коливань у просторі:

$$v = \frac{\lambda}{T}; \quad v = \lambda \nu,$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі, тобто відстань між найближчими точками, що коливаються у фазі,

$[\lambda] = \text{м};$

$T$  — період коливань;

$\nu$  — частота коливань

Частота хвилі визначається частотою коливань джерела, а швидкість хвилі — властивостями середовища

### Рівняння плоскої хвилі

$$x = x_m \sin \omega \left( t - \frac{l}{v} \right),$$

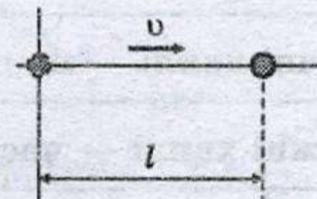
де  $x$  — координата в момент часу  $t$ ;

$x_m = A$  — амплітуда коливань, тобто максимальний зсув від положення рівноваги;

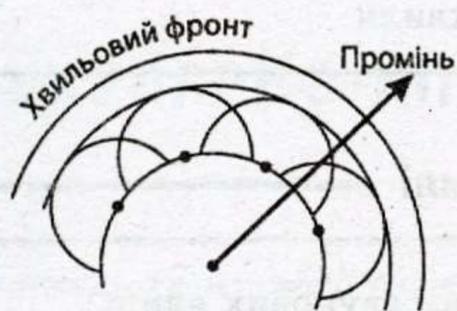
$\omega$  — циклічна частота;

$l$  — відстань від джерела;

$v$  — швидкість поширення хвилі



## Принцип Гюйгенса

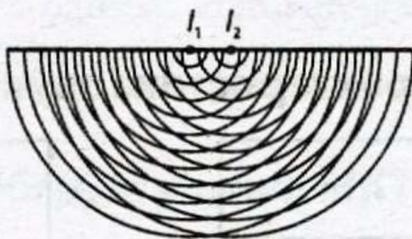


Кожна точка поверхні, якої досягла в даний момент хвиля, є точковим джерелом вторинних хвиль. Поверхня, дотична до всіх вторинних хвиль, являє собою хвильову поверхню в наступний момент часу

**Когерентні джерела хвиль** — джерела хвиль, що мають однакову частоту й постійну різницю фаз:

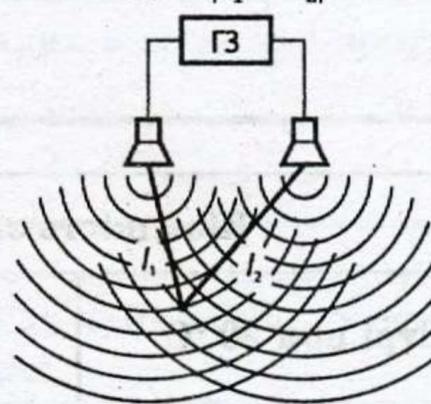
$$v_1 = v_2 \Delta\varphi = \text{const}$$

**Інтерференція хвиль** — накладання двох або декількох когерентних хвиль, за якого відбувається збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі



**Різниця ходу хвиль:**

$$\Delta l = |l_1 - l_2|$$



### Умова мінімумів

Амплітуда коливань середовища в даній точці мінімальна, якщо різниця ходу двох хвиль дорівнює непарному числу півхвиль:

$$\Delta l = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

де  $k \in Z$

### Умова максимумів

Амплітуда коливань середовища в даній точці максимальна, якщо різниця ходу двох хвиль дорівнює цілому числу довжин хвиль при збігу фаз коливань:

$$\Delta l = k\lambda, \text{ де } k \in Z$$

## Дифракція

**Дифракція хвиль** — відхилення напрямку поширення хвиль від прямолінійного біля межі перешкоди.

Умови виникнення дифракції:

$$d \approx \lambda,$$

де  $d$  — розмір перешкоди;

$\lambda$  — довжина хвилі

## Принцип Гюйгенса — Френеля

Дифракція обумовлена інтерференцією вторинних хвиль

## Звукові хвилі

Акустика — розділ фізики, що займається вивченням звукових явищ

Звукові (акустичні) хвилі — поширення механічних коливань у пружних середовищах:

у частотному діапазоні:  
 $20 \text{ Гц} \leq \nu \leq 20\,000 \text{ Гц}$

у хвильовому діапазоні  
 $17 \text{ мм} \leq \lambda \leq 19 \text{ мм}$

При  $\nu < 20 \text{ Гц}$  — інфразвук  
При  $\nu > 20\,000 \text{ Гц}$  — ультразвук } людиною не чується

## Характеристика звуку

### Швидкість звуку:

у повітрі при $20 \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
у повітрі при $0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
у металі	$\nu = 5850 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
у воді	$\nu = 1435 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Гучність звуку визначається амплітудою й частотою коливань

Висота звуку визначається частотою коливань

# МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

## МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ (МКТ)

### Основні поняття

**Атом** — частинка речовини (хімічного елемента), що не ділиться під час хімічних реакцій і є найменшим носієм хімічних властивостей елемента

**Молекула** — найменша стійка частинка речовини, що складається з атомів одного або декількох хімічних елементів та зберігає їх основні хімічні властивості

Атоми можна розглядати як одноатомні молекули

### Основні положення МКТ

Усі тіла складаються з атомів і молекул

Атоми й молекули перебувають у безперервному хаотичному русі

Атоми й молекули взаємодіють один з одним: відштовхуються на малих відстанях і притягаються — на більших (у порівнянні з розмірами молекул)

### Обґрунтування МКТ

**Закон кратних відносин Дж. Дальтона (1766–1844).** При утворенні будь-яких хімічних сполук маси реагуючих речовин перебувають у строго певних співвідношеннях

**Закон Авогадро (1776–1856).** У рівних об'ємах при однаковій температурі й тиску всі гази містять однакову кількість молекул

**Явище переносу** — дифузія, внутрішнє тертя в рідинах і газах, теплопровідність

**Броунівський рух** — рух дрібних твердих частинок, зважених у рідині, що пояснюється поштовхами (ударами), яких зазнає броунівська частинка з боку молекул

**Тиск газу на стінки посудини,** пояснюється ударами молекул газу по стінках

**Відносна молекулярна маса:**

$$M_r = \frac{m_0}{m_{\text{OC}}/12}$$

де  $m_0$  — маса молекули даної речовини;

$m_{\text{OC}}$  — маса молекули вуглецю

**Кількість речовини** — відношення кількості атомів або молекул, або інших структурних одиниць у даному тілі до кількості атомів у 12 г вуглецю:

$$\nu = \frac{N}{N_A}; [\nu] = \text{моль}$$

**Моль** — кількість речовини, що містить стільки атомів або молекул, або інших структурних одиниць скільки атомів міститься у вуглеці масою 12 г

Число Авогадро (const) — число молекул або атомів в 1 молі речовини:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Молярна маса — маса речовини, узяті в кількості 1 моля.

$$M = m_0 \cdot N_A; [M] = \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

Концентрація — кількість молекул в одиниці об'єму.

$$n = \frac{N}{V}; [n] = \frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}$$

### Зв'язки між величинами

Маса речовини:

$$m = m_0 \cdot N \xrightarrow{v = \frac{N}{N_A} \Rightarrow N = v \cdot N_A} m = m_0 N_A \cdot v \xrightarrow{M = m_0 N_A} m = Mv$$

Число молекул:

$$N = N_A \cdot v \xrightarrow{v = \frac{m}{M}} N = \frac{m}{M} N_A$$

Відносна молекулярна маса й молярна маса:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

### Ідеальний газ

Ідеальний газ — модель, відповідно до якої:

- розміри молекул газу нехтувано малі в порівнянні з відстанню між ними;
- між молекулами відсутні сили взаємодії

### Основне рівняння МКТ

$$P = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \bar{v}^2,$$

де  $P$  — тиск газу,  $[P] = \text{Па}$ ;

$n$  — концентрація молекул,  $[n] = \text{м}^{-3}$ ;

$m_0$  — маса однієї молекули,  $[m_0] = \text{кг}$ ;

$\bar{v}^2$  — середнє значення квадрата швидкості руху молекул,  $[\bar{v}^2] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$

$$P = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \bar{v}^2 \xrightarrow{\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}} P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k,$$

де  $\bar{E}_k$  — середня кінетична енергія поступального руху молекул.

$$P = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \bar{v}^2 \xrightarrow[\substack{n = \frac{N}{V} \\ n - \text{концентрація} \\ N - \text{число молекул} \\ V - \text{об'єм}}]{\substack{n = \frac{N}{V}}} P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \bar{v}^2 \xrightarrow[\substack{m = m_0 \cdot N \\ m - \text{маса} \\ N - \text{число молекул}}]{\substack{m = m_0 \cdot N}} P = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \bar{v}^2 \xrightarrow[\substack{\rho = \frac{m}{V} \\ \rho - \text{густина}}]{\substack{\rho = \frac{m}{V}}} P = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$$

Температура — міра середньої кінетичної енергії руху молекул

**Теплова рівновага** — стан, при якому макроскопічні параметри (тиск  $P$ , об'єм  $V$ , температура  $T$ ) залишаються незмінними, тобто між тілами системи не відбувається теплообмін

**Температура** — фізичний параметр, однаковий у всіх частинах системи тіл, що перебувають у стані теплової рівноваги

Експериментально доведено, що для будь-яких газів, що перебувають у стані теплової рівноваги,

$$\frac{P_1 V_1}{N_1} = \frac{P_2 V_2}{N_2} = \dots = \text{const}$$

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \xrightarrow{n = \frac{N}{V}} P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k \rightarrow \frac{PV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}_k \rightarrow \frac{PV}{N} = \frac{2}{3} E_k = kT$$

Середня кінетична енергія молекул будь-яких газів, що перебувають у стані теплової рівноваги, однакова

$n$  — концентрація молекул, тобто число молекул в одиниці об'єму;

$T$  — абсолютна температура за шкалою Кельвіна (К)

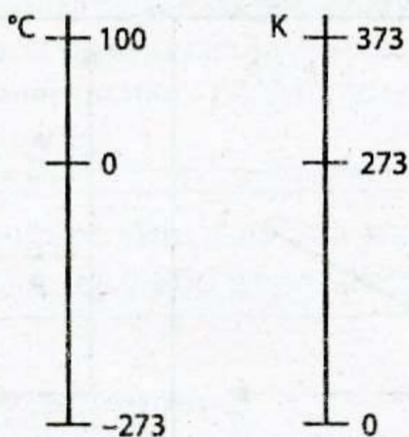
$$T(\text{К}) = t(\text{°C}) + 273; \Delta t(\text{°C}) = \Delta T(\text{К})$$

$k$  — стала Больцмана.

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \xrightarrow{E_k = \frac{3}{2} kT} P = \frac{2}{3} n \cdot \frac{3}{2} kT \rightarrow P = nkT \rightarrow$$

При однакових значеннях температури і концентрації молекул тиск будь-яких газів однаковий, незалежно від от того, з яких молекул складається газ



#### Шкала Цельсія

0 °C — температура танення льоду;  
100 °C — температура кипіння води

#### Шкала Кельвіна

0 °K — температура, за якої припиняється рух молекул;  
273 °K — температура танення льоду;  
373 °K — температура кипіння води

### Рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва—Клапейрона)

$$P = nkT \xrightarrow{n = \frac{N}{V}} P = \frac{N}{V} kT \xrightarrow{\frac{v = \frac{N}{N_A}}{N = v \cdot N_A}} P = \frac{v \cdot N_A}{V} kT \rightarrow$$

$$\rightarrow PV = v N_A \cdot kT \xrightarrow{R = N_A \cdot k} PV = v RT \xrightarrow{v = \frac{m}{M}} PV = \frac{m}{M} RT$$

$$R = N_A \cdot k = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \text{ — універсальна газова стала.}$$

Для 1 моля газу рівняння Менделєєва—Клапейрона

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

набуває вигляду  $\frac{PV}{T} = \text{const}$  — рівняння Клапейрона

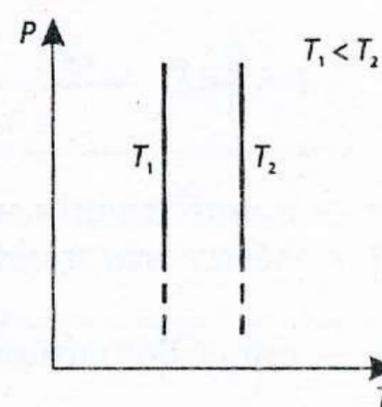
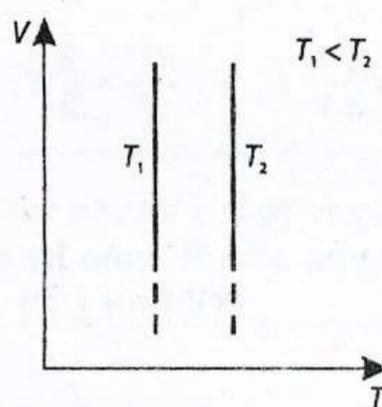
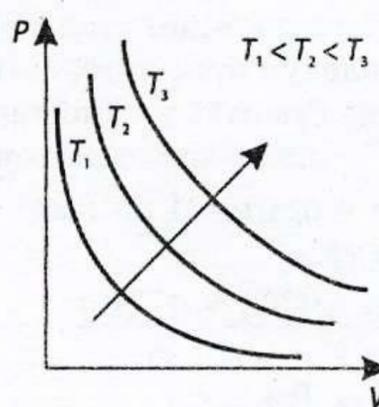
## Ізопроееси

**Ізопроееси** — проееси, що відбуваються при сталому значенні одного з параметрів стану ( $T, P, V$ ) при фіксованій масі газу

### Ізотермічний процес [ $T = \text{const}$ ]

Рівняння Клапейрона:  $\frac{PV}{T} = \text{const} \xrightarrow{T = \text{const}} PV = \text{const}$  — **закон Бойля-Маріотта**: для даної маси газу за сталої температури добуток тиску газу на його об'єм є величиною сталою

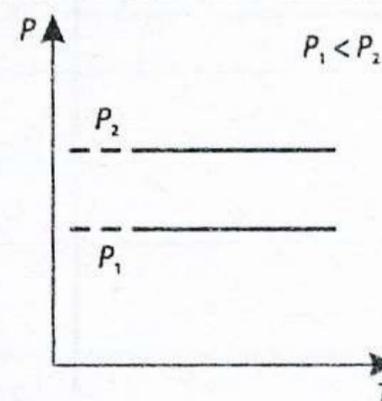
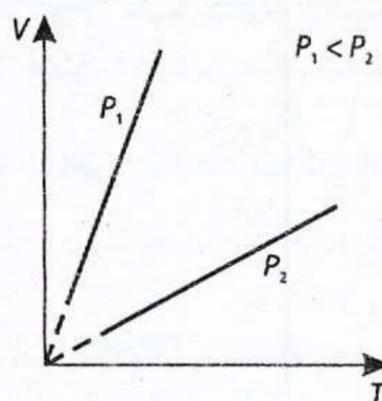
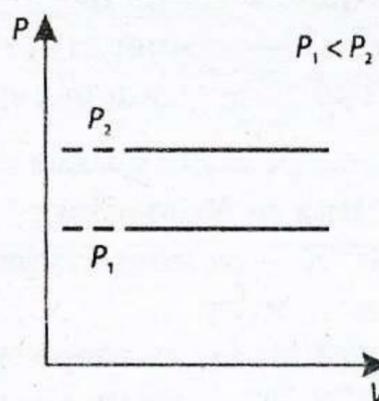
Графік — ізотерма  
 $T_1 < T_2$



### Ізобарний або ізобаричний процес [ $P = \text{const}$ ]

Рівняння Клапейрона:  $\frac{PV}{T} = \text{const} \xrightarrow{P = \text{const}} \frac{V}{T} = \text{const}$  — **закон Гей-Люссака**: для даної маси газу за сталого тиску відношення об'єму газу до його температури є величиною сталою

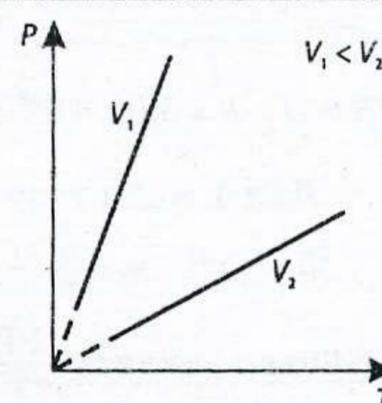
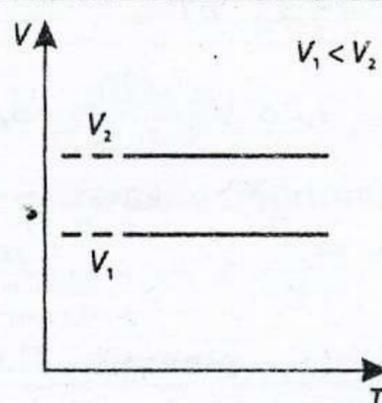
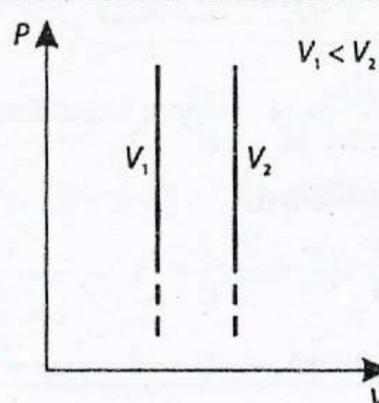
Графік — ізобара  
 $P_1 < P_2$



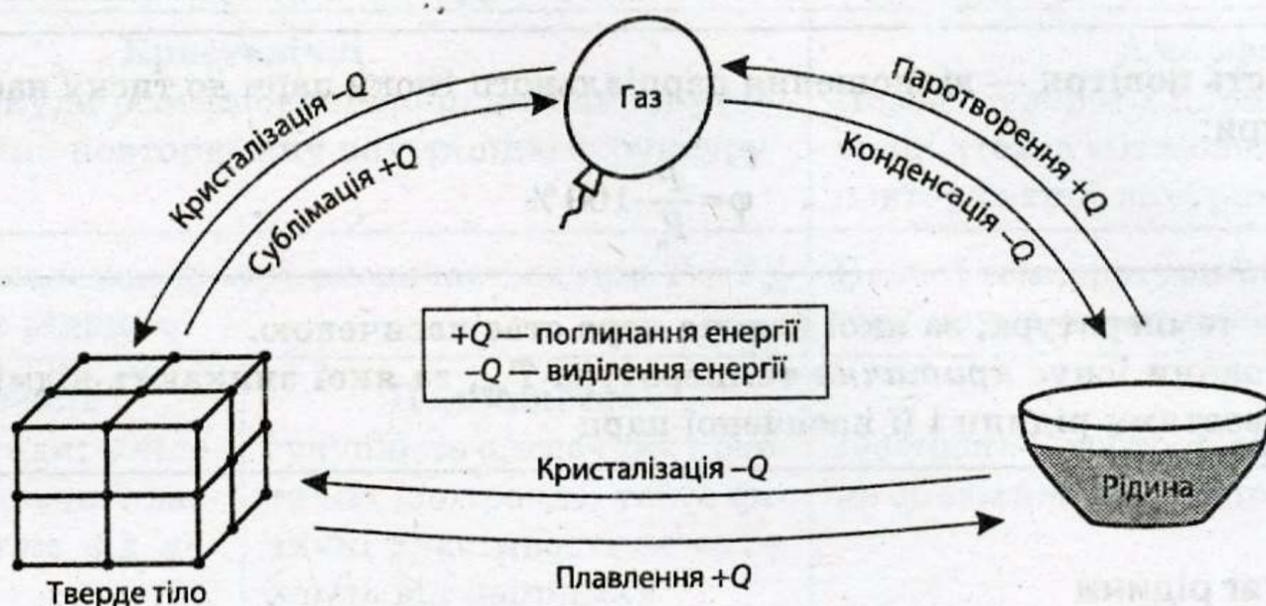
### Ізохорний або ізохоричний процес [ $V = \text{const}$ ]

Рівняння Клапейрона:  $\frac{PV}{T} = \text{const} \xrightarrow{V = \text{const}} \frac{P}{T} = \text{const}$  — **закон Шарля**: для даної маси газу за сталого об'єму відношення тиску газу до його температури є величиною сталою

Графік — ізохора  
 $V_1 < V_2$



# ЗМІНА АГРЕГАТНИХ СТАНІВ РЕЧОВИНИ



## Рідини

### РІДИНА ⇌ ПАРА

#### Пароутворення

##### Випаровування

відбувається за будь-якої температури; з вільної поверхні рідини вилітають молекули, кінетична енергія яких більше потенціальної енергії взаємодії

##### Кипіння

відбувається при температурі кипіння  $T_k$  по всьому об'єму рідини й наявності вогнищ кипіння — домішок, навколо яких відбувається утворення нового агрегатного стану

$T_k$  — температура кипіння, за якої тиск насиченої пари в пухирцях усередині рідини дорівнює зовнішньому тиску або перевищує його;  $T_k$  залежить від зовнішнього тиску

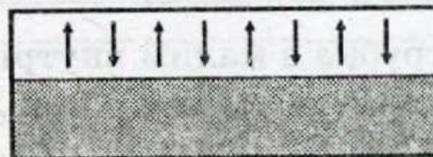
### Теплота пароутворення

Питома теплота пароутворення  $L(r)$  — фізична величина, що дорівнює кількості теплоти, необхідної для перетворення 1 кг рідини на пару (або пари на рідину) за постійної температури, що дорівнює температурі кипіння.

Пароутворення:  $Q_{\text{п}} = Lm.$

Конденсація:  $Q_{\text{к}} = -Lm$

**Динамічна рівновага** — стан, при якому число молекул, що залишають рідину в одиницю часу (пароутворення), дорівнює числу молекул, що повертаються у рідину за той самий час (конденсація)



**Насичена пара** — пара, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною. Тиск  $P_{\text{н}}$  насиченої пари залежить тільки від температури

**Ненасичена пара** — пара, що перебуває при тиску нижче тиску насиченої пари:  $P < P_{\text{н}}$

**Парціальний тиск** — тиск, що створював би водяну пару, якби не було інших газів

**Відносна вологість повітря** — відношення парціального тиску пари до тиску насиченої пари за даної температури:

$$\varphi = \frac{P}{P_n} \cdot 100\%$$

**Точка роси  $T_p$**  — температура, за якої водяна пара стає насиченою.

Для кожної речовини існує *критична* температура  $T_{кр}$ , за якої зникають відмінності між фізичними властивостями рідини і її насиченої пари

### Поверхневий натяг рідини

**Сила поверхневого натягу  $F_n$**  — сила, що діє уздовж поверхні рідини перпендикулярно до лінії, що обмежує площу цієї поверхні, і прагне скоротити її до мінімуму

**Коефіцієнт поверхневого натягу**

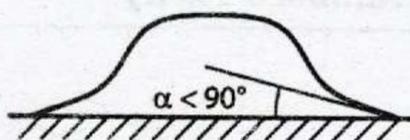
$$\sigma = \frac{F_n}{l}; [\sigma] = \frac{H}{M},$$

де  $F_n$  — сила поверхневого натягу;  
 $l$  — довжина межі

У різних рідин поверхневий натяг різний

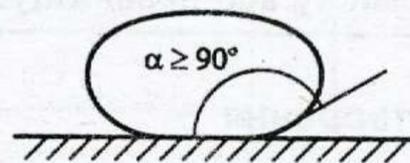
### Форма меніска

$\alpha < 90^\circ$  — змочування



(вода й скло)

$\alpha \geq 90^\circ$  — незмочування



(вода й парафін)

$\alpha$  — крайовий кут (або кут змочування)

### Капілярні явища

**Капіляр** — трубка з малим внутрішнім діаметром.

Висота підняття рідини в капілярі:

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

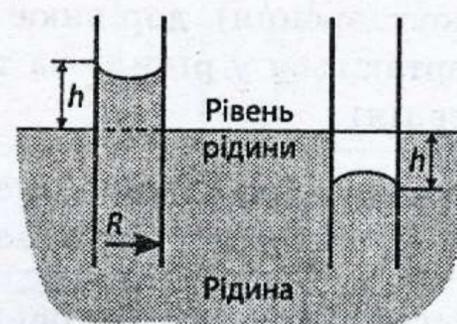
де  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу;

$\rho$  — густина рідини;

$R$  — радіус капілярної трубки;

$g$  — прискорення вільного падіння

Змочування      Незмочування



## Тверді тіла

<b>Кристалічні</b>		<b>Аморфні</b>
Атоми або молекули розташовані впорядковано й утворюють періодично повторювану внутрішню структуру		Немає суворого порядку в розташуванні атомів або молекул і періодично повторюваної внутрішньої структури
Температура плавлення суворо визначається при $T = T_{пл}$ , тверде тіло стає рідиною		Певної температури плавлення немає, тіла мають властивість текучості
<b>Монокристали</b>	<b>Полікристали</b>	<i>Ізотропні</i> , тобто фізичні властивості <i>не залежать</i> від напрямку
одиначні кристали: <i>анізотропні</i> , тобто фізичні властивості <i>залежать</i> від напрямку	сукупність одиначних кристалів: <i>ізотропні</i> , тобто фізичні властивості <i>не залежать</i> від напрямку	

### Механічні властивості твердих тіл

**Механічна напруга** — фізична величина, що дорівнює відношенню модуля сили пружності до площі поперечного перерізу тіла:  $\sigma = \frac{F_{пр}}{S}$ ;  $[\sigma] = \frac{Н}{м^2} = Па$

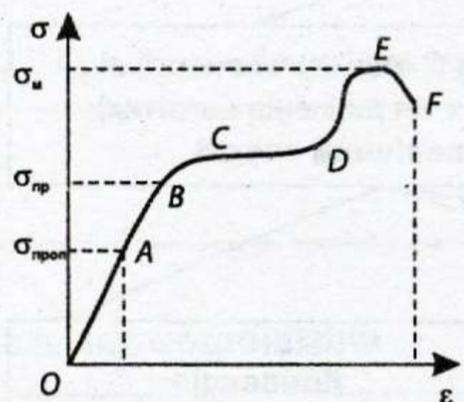


**Міра деформації** — відносне подовження:

$$\varepsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}$$

**Абсолютне подовження:**

$$|\Delta l| = l - l_0$$



Діаграма розтягу твердого тіла

OA — малі пружні деформації; AB — пружні деформації (закон Гука не виконується); BC — пластичні деформації; CD — область текучості; EK — руйнування тіла.

$\sigma_{проп}$  — **границя пропорційності**, тобто максимальне значення напруги, при якому виконується закон Гука: при малих деформаціях механічна напруга прямо пропорційна відносному подовженню:  $\sigma = E \cdot |\varepsilon|$ , де E — модуль Юнга;

$\sigma_{пр}$  — **границя пружності**, тобто максимальне значення напруги, при якому не виникає залишкової деформації;

$\sigma_m$  — **границя міцності**, тобто механічна напруга, за якої тіло починає руйнуватися

**Запас міцності (або коефіцієнт безпеки):**  $k = \frac{\sigma_m}{\sigma_{max}}$

### Теплота плавлення

**Питома теплота плавлення  $\lambda$**  — фізична величина, що дорівнює кількості теплоти, необхідній для перетворення 1 кг твердої речовини на рідину (або рідини на тверду речовину) за постійної температури, що дорівнює температурі плавлення  $T_{пл}$ .

**Плавлення:**  $Q_{пл} = \lambda m$ .

**Кристалізація:**  $Q_{кр} = -\lambda m$

# ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

## Основні поняття

**Термодинаміка** — теорія теплових явищ, у якій не враховується атомно-молекулярна будова тіл

**Термодинамічна система** — сукупність фізичних тіл, ізольованих від взаємодії з іншими тілами

**Термодинамічний процес** — будь-яка зміна, що відбувається в термодинамічній системі

**Внутрішня енергія** — сума кінетичних енергій хаотичного руху молекул і потенціальних енергій їхньої взаємодії

Внутрішня енергія для ідеального одноатомного газу:

$$U = N \cdot \bar{E}_k \xrightarrow{\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT} U = \frac{3}{2}NkT \xrightarrow[\nu = \frac{m}{M}]{N = \nu \cdot N_A} U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} N_A kT \xrightarrow{R = N_A \cdot k} U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \xrightarrow{PV = \frac{m}{M} RT} U = \frac{3}{2} PV.$$

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



## Робота,

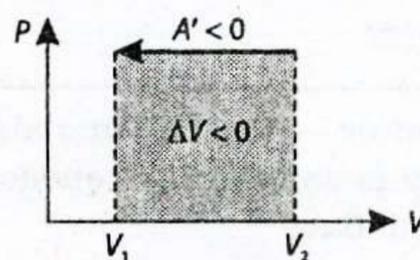
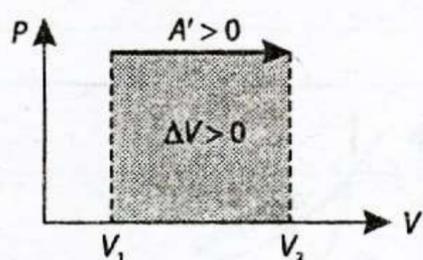
Робота зовнішньої сили, що змінює об'єм газу на  $\Delta V$ , дорівнює

$$A = -P\Delta V,$$

де  $P$  — тиск газу

Робота газу проти зовнішніх сил:

$$A' = -A = P\Delta V$$



Робота чисельно дорівнює площі під графіком термодинамічного процесу в координатах  $PV$

## Кількість теплоти

**Кількість теплоти  $Q$**  — кількісна міра зміни внутрішньої енергії тіла при теплообміні (енергія, яку тіло віддає або одержує в процесі теплообміну):

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t, [Q] = \text{Дж};$$

де  $t_2$  — кінцева температура тіла;

$t_1$  — початкова температура тіла;

$m$  — маса тіла;

$c$  — питома теплоємність речовини, тобто кількість теплоти, що віддає або одержує 1 кг речовини при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$  (або 1 К),  $[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,

$c \cdot m = C$  — теплоємність речовини масою  $m$

Якщо  $t_2 > t_1$ ,  $\Delta t > 0$ , то  $Q > 0$  — нагрівання.

Якщо  $t_2 < t_1$ ,  $\Delta t < 0$ , то  $Q < 0$  — охолодження

## Рівняння теплового балансу

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

де  $Q_1, Q_2, Q_n$  — кількість теплоти, отримана або віддана кожним тілом

## Закони термодинаміки

### I начало термодинаміки

Зміна внутрішньої енергії системи при переході її з одного стану в інший дорівнює сумі роботи зовнішніх сил і кількості теплоти, переданої системі:  $\Delta U = A + Q$

Внутрішня енергія ізольованої ( $A = 0$ ,  $Q = 0$ ) системи залишається незмінною ( $\Delta U = 0$ )

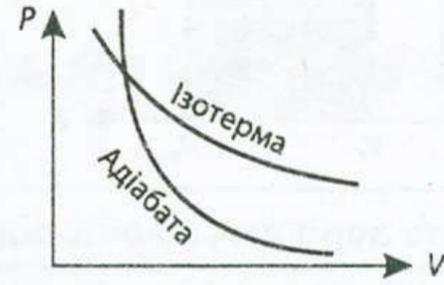
З огляду на те, що  $A' = -A$ , кількість теплоти, передана системі, йде на зміну її внутрішньої енергії та на здійснення системою роботи над зовнішніми тілами:  $Q = \Delta U + A'$

### II начало термодинаміки

Теплота не може мимовільно переходити від тіла з більш низькою температурою до тіла з більш високою температурою (формулювання Клаузіуса)

## Адіабатний процес

Адіабатний процес — процес, що відбувається без теплообміну із зовнішнім середовищем.  
Графік — адіабата



$$\Delta U = A + Q \xrightarrow[\text{адіабатний процес}]{Q=0} \Delta U = A$$

Адіабатне стискання

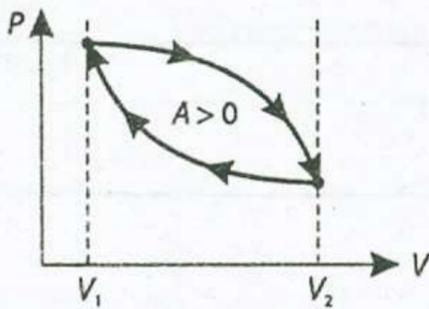
Газ нагрівається

Адіабатне розширення

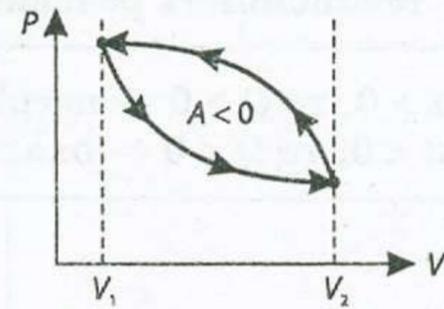
Газ охолоджується

## Круговий процес, або цикл

Круговий процес, або цикл — це процес, при якому система, пройшовши через ряд станів, повертається у вихідний стан



Цикл протікає за годинниковою стрілкою:  $A > 0$



Цикл протікає проти годинникової стрілки:  $A < 0$

## Теплові двигуни

Теплові двигуни — періодично діючі двигуни, що виконують механічну роботу за рахунок отриманої ззовні теплоти

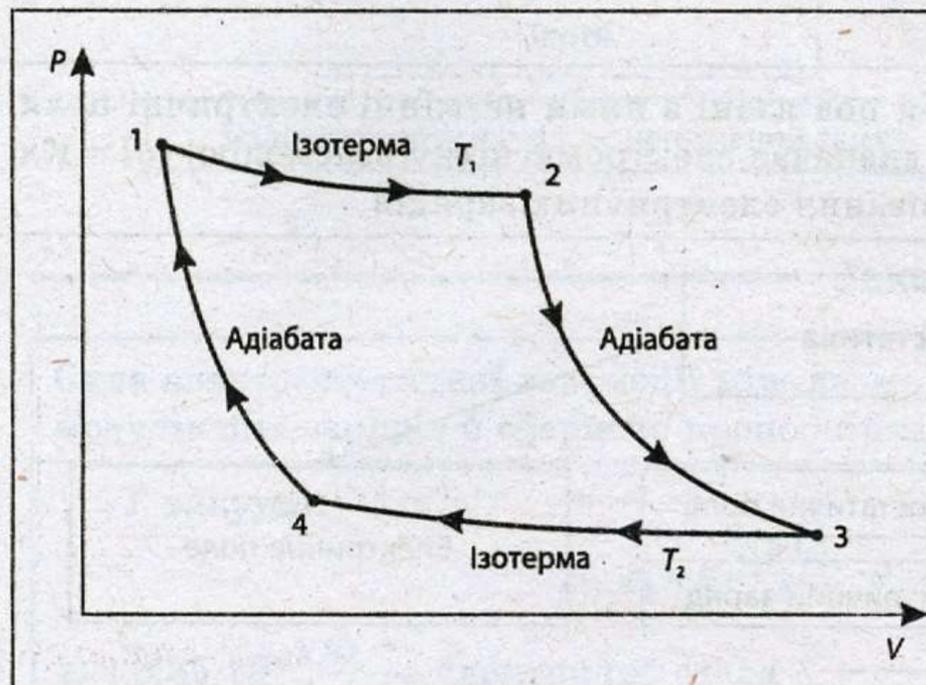
### Принцип дії теплового двигуна



## Коефіцієнт корисної дії (ККД) теплового двигуна

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{Q_1}$$

## Цикл Карно



Максимально високий ККД досягається в рівноважному циклі Карно.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Будь-яка реальна теплова машина, що працює з нагрівником, який має температуру  $T_1$  і холодильником з температурою  $T_2$ , не може мати ККД, котрий перевищує ККД ідеальної теплової машини

# ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

## ЕЛЕКТРОСТАТИКА

### Основні поняття

**Електростатика** — наука про нерухомі заряди й пов'язані з ними незмінні електричні поля.  
**Електричний заряд  $q$**  — фізична величина, що визначає електромагнітну взаємодію,  $[q] = \text{Кл}$ .  
**Електрометр** — прилад для виявлення й вимірювання електричних зарядів



Одноіменні заряди відштовхуються	Різноіменні заряди притягаються

Носії електричного заряду — *елементарні частинки*:  
протон — позитивний заряд,  
електрон — негативний заряд

Елементарний заряд  $e$  — модуль значення заряду або протона:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Точковий заряд — фізична модель, згідно з якою заряд тіла зосереджений в одній точці

Заряд тіла — число, кратне величині елементарного заряду:

$$q = e(N_p - N_e),$$

де  $N_e$  — число електронів;

$N_p$  — число протонів

### Закон збереження електричного заряду

У замкненій системі при будь-яких взаємодіях тіл алгебраїчна сума електричних зарядів усіх тіл з часом не змінюється, тобто заряд замкненої системи зберігається:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

**Електризація** — передавання (перенесення) на тіло електричного заряду



## Закон Кулона

Сила електростатичної взаємодії між двома точковими зарядами прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів й обернено пропорційна квадрату відстаней між ними

У вакуумі:

$$F_k = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}; \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}; \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \text{ — електрична стала}$$

В однорідному діелектрику:

$$F_k = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2\epsilon} = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon \cdot \epsilon_0},$$

$\epsilon$  — діелектрична проникність середовища — величина, що показує, у скільки разів зменшується сила електростатичної взаємодії в даному середовищі порівняно з вакуумом.

Діелектрична проникність середовища завжди більше одиниці:  $\epsilon > 1$

## Електричне поле

**Електричне поле** — силове поле, у якому заряджені частинки взаємодіють одна з одною

**Електростатичне поле (ЕСП)** — поле, що створюється нерухомим електричним зарядом

## Напруженість

**Напруженість  $\vec{E}$**  — силова характеристика ЕСП — фізична векторна величина, що дорівнює відношенню сили, з якою ЕСП діє на внесений у нього одиничний заряд до значення цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad [E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

Модуль напруженості:

$$E = \frac{k|q|}{r^2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ — у вакуумі}; \quad E = \frac{k|q|}{r^2\epsilon} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \text{ — у речовині}$$

$$q > 0 \quad \oplus \rightarrow \vec{E}$$

$$q < 0 \quad \ominus \leftarrow \vec{E}$$

Вектор  $\vec{E}$  спрямований по радіусу від заряду, якщо  $q > 0$ , й до заряду, якщо  $q < 0$

## Принцип суперпозиції полів

Напруженість ЕСП системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей ЕСП, створюваних кожним зарядом:

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

## Лінії напруженості (силові лінії)

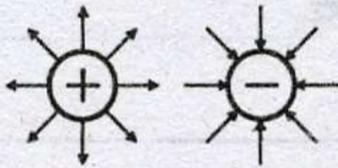
Лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з вектором напруженості  $\vec{E}$

Лінії не перетинаються

Лінії починаються на додатних електричних зарядах і закінчуються на від'ємних або йдуть у нескінченність

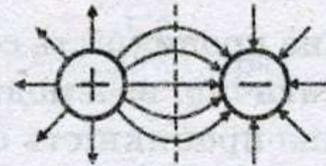
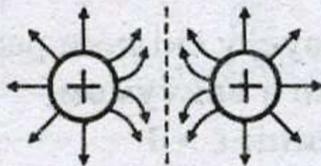
Густина ліній пропорційна напруженості ЕСП

### Поле точкового заряду

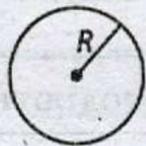


$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2}$$

### Поле двох точкових зарядів

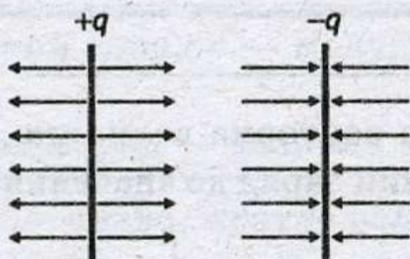


### Поле провідної сфери



$$E = \begin{cases} 0 & \text{при } r < R \\ \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} & \text{при } r \geq R \end{cases}$$

### Поле рівномірно зарядженої нескінченної площини



Поверхнева густина заряду:

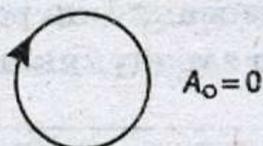
$$\sigma = \frac{|q|}{S}$$

де  $S$  — площа поверхні.

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0\epsilon}$$

## Робота сил електростатичного поля

Електростатичне поле (ЕСП) — потенціальне, тобто робота кулонівських сил з переміщення заряду не залежить від траєкторії



Робота кулонівських сил по замкненому контуру дорівнює нулю:

$$A_{\text{зам}} = 0$$

Для однорідного ЕСП:

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha \xrightarrow[\substack{E = \frac{F}{q} \\ F = Eq}]{\phantom{A = F \cdot S \cdot \cos \alpha}} A = EqS \cdot \cos \alpha \rightarrow A = Eqd,$$

$$A = -\Delta W_p,$$

де  $W_p$  — потенціальна енергія заряду.

При взаємодії двох точкових зарядів:

$$W_p = k \frac{|q_1| |q_2|}{r}$$

## Потенціал

Потенціал  $\varphi$  — енергетична характеристика ЕСП — фізична скалярна величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії даного заряду, розміщеного в даній точці, до величини самого заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}; [\varphi] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}$$

### Принцип суперпозицій потенціалів

Потенціал ЕСП системи зарядів дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створюваних кожним із зарядів окремо:

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

### Різниця потенціалів

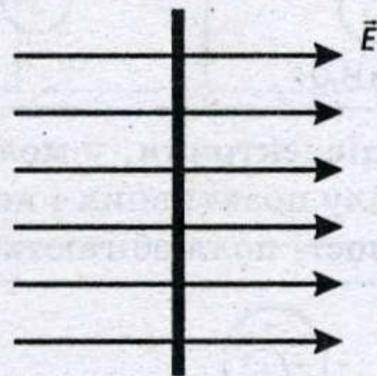
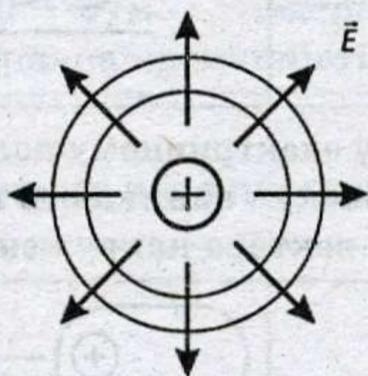
$$A = -\Delta W_p = W_{p_1} - W_{p_2} \xrightarrow[\substack{\varphi = \frac{W_p}{q} \\ W_p = \varphi q}]{\phantom{A = -\Delta W_p}} A = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$  — різниця потенціалів;

$\Delta\varphi$  чисельно дорівнює роботі кулонівських сил з переміщення заряду з т. 1 у т. 2.

Якщо т. 2 перебуває на нескінченності, де потенціал приймається рівним 0,  $A = q\varphi_1$ , тобто потенціал чисельно дорівнює роботі кулонівських сил з переміщення заряду з т. 1 на нескінченність.

Еквіпотенціальна поверхня — поверхня з рівною кількістю потенціалів, тобто  $\Delta\varphi = 0 \Rightarrow$  при переміщенні заряду  $A = 0$ .  $\vec{E}$  перпендикулярний поверхні в кожній точці



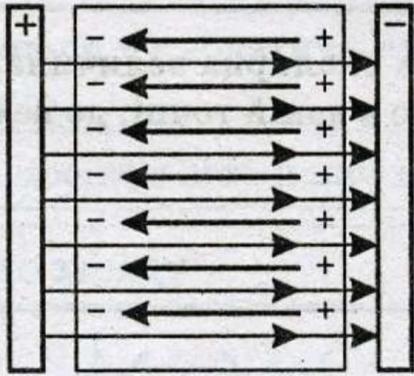
## Провідники й діелектрики в електричному полі

### Провідники

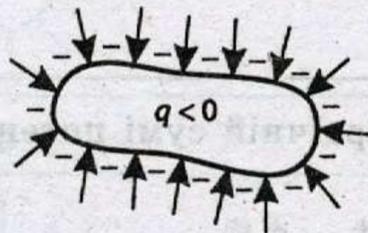
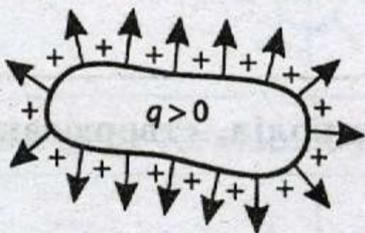
**Провідники** — речовини, в яких наявні вільні заряджені частинки, завдяки яким вони добре проводять електричний струм

**Вільні заряди** — заряджені частинки, які наявні у провідниках (у металах — електрони, в електролітах — іони) і які здатні переміщатися під дією електричного поля

**Електростатична індукція** — перерозподіл зарядів усередині провідника, поміщений в електростатичне поле який відбувається доти, поки напруженість усередині провідника не дорівнюватиме нулю



Поверхня провідника — екіпотенціальна поверхня

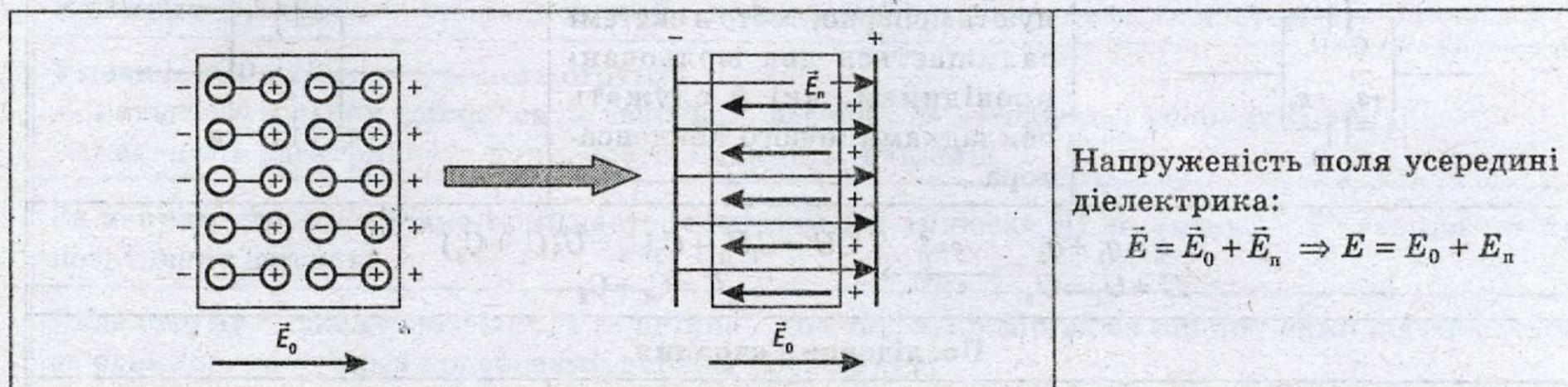
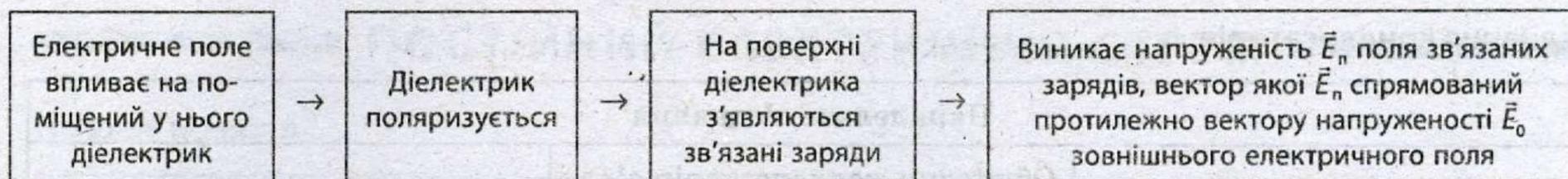


Заряд провідника завжди накопичується на його поверхні,  $\vec{E}$  спрямований перпендикулярно до цієї поверхні

### Діелектрики

**Діелектрики** — речовини, що не мають вільних заряджених частинок, тобто які практично не проводять електричний струм

Види діелектриків		Поляризація	
<p><b>Полярні</b> — діелектрики, у молекулах яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів розділені навіть під час відсутності поля, тобто молекула є диполем.</p> <p><b>Диполь</b> — струменево нейтральна система, що складається із двох точкових різнойменних зарядів</p>		<p>У зовнішньому електричному полі молекули орієнтуються уздовж вектора напруженості <math>\vec{E}_0</math></p>	
<p>Молекула води <math>H_2O</math></p>		<p><math>\vec{E}_0 = 0</math></p>	<p><math>\vec{E}_0</math></p>
<p><b>Неполярні</b> — діелектрики, у молекулах яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів у відсутності поля збігаються</p>		<p>У зовнішньому електричному полі в результаті деформації молекул виникають диполі, орієнтовані уздовж вектора напруженості <math>\vec{E}_0</math></p>	
<p>атом He</p>	<p><math>\vec{E}_0 = 0</math></p>	<p><math>\vec{E}_0</math></p>	



**Діелектрична проникність** — фізична величина, яка дорівнює відношенню модуля напруженості електричного поля у вакуумі до модуля напруженості електричного поля всередині однорідного діелектрика:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

## Конденсатори

**Конденсатор** — система, що складається з двох провідників, розділених шаром діелектрика, товщина якого мала в порівнянні з розмірами провідників.  
 При зарядці обкладкам конденсатора надають рівні за модулем різнойменні заряди

**Електрична ємність конденсатора** — фізична величина, обумовлена відношенням заряду однієї з обкладок конденсатора до різниці потенціалів між обкладками:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U}; [C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф.}$$

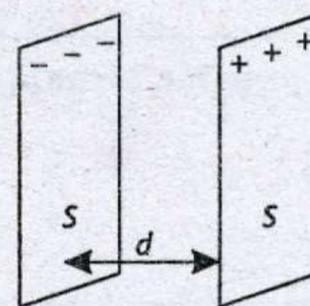
Ємність характеризує не окрему пластину, а систему пластин у їхньому взаємному розташуванні одна до одної, оскільки фізичний зміст має тільки різниця потенціалів

**Плоский конденсатор** — система, що складається з двох плоских паралельних пластин, заряджених рівними за модулем зарядами протилежного знака, розділених шаром діелектрика

Ємність плоского конденсатора:

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

де  $S$  — площа пластини;  
 $d$  — відстань між пластинами;  
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — електрична стала;  
 $\epsilon$  — діелектрична проникність



### Енергія електричного поля плоского конденсатора

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

де  $W_p$  — потенціальна енергія конденсатора

## З'єднання конденсаторів

Паралельне з'єднання		
	<p>Обкладки конденсаторів з'єднуються попарно, тобто в системі залишається два ізольовані провідники, які й служать обкладками нового конденсатора</p>	
$q = q_1 + q_2 \quad \begin{matrix} c = \frac{q}{U} \\ q = cU \end{matrix} \rightarrow \quad CU = C_1U_1 + C_2U_2 = U(C_1 + C_2)$ $U = U_1 = U_2 \quad \rightarrow \quad C = C_1 + C_2$		
Послідовне з'єднання		
	<p>Роблять тільки одне з'єднання, а дві обкладки, що залишилися, служать обкладками нового конденсатора</p>	
$U = U_1 = U_2 \quad \begin{matrix} c = \frac{q}{U} \\ U = \frac{q}{c} \end{matrix} \rightarrow \quad \frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$ $q = q_1 + q_2 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$		

# ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

## Основні поняття

**Електричний струм** — упорядкований (спрямований) рух заряджених частинок

Умови існування електричного струму:

- наявність вільних заряджених частинок, здатних переміщатися упорядковано;
- наявність електричного поля, тобто різниці потенціалів

За напрям струму умовно приймається напрям від «плюса»  $\oplus$  до «мінуса»  $\ominus$  (напряму руху позитивних зарядів)

**Сила струму** — скалярна фізична величина  $I$ , що чисельно дорівнює заряду, який переноситься за одиницю часу через поперечний переріз провідника:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}; [I] = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А.}$$

Якщо сила струму з часом не змінюється, електричний струм називають **постійним струмом**

$$I = |q_0| \cdot n \cdot \bar{v} \cdot S,$$

- де  $q_0$  — заряд вільної зарядженої частинки;  
 $n$  — концентрація носіїв заряду;  
 $\bar{v}$  — середня швидкість їхнього упорядкованого руху;  
 $S$  — площа перерізу провідника

**Густина тону** — характеристика розподілення струму у провіднику

$$j = \frac{I}{S}; [j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2},$$

- де  $I$  — сила струму;  
 $S$  — площа поздовжнього перерізу провідника

**Сторонні сили** — сили неелектричного походження, що діють на заряди з боку джерел струму (гальванічних елементів, акумуляторів, генераторів)

**Електрорушійна сила (ЕРС)** — фізична величина, обумовлена роботою ( $A_{\text{ст}}$ ), здійснюваною сторонніми силами при переміщенні одиничного позитивного заряду:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}; [\varepsilon] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}$$

**Напруга ( $U$ ) на ділянці ланцюга** — фізична величина, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду.

$$U = \frac{A}{q}; [U] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В.}$$

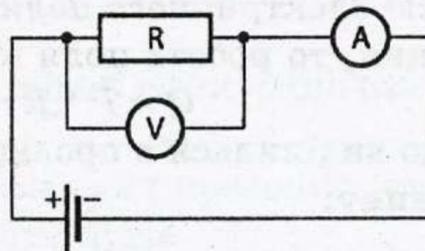
Для потенціальних полів  $U = \Delta\phi$

## Закони постійного струму

**Закон Ома для ділянки кола:** сила струму прямо пропорційна напрузі й обернено пропорційна опору ділянки кола:

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

де  $R$  — опір ділянки кола



$\text{A}$  — амперметр — прилад для вимірювання сили струму;

$\text{V}$  — вольтметр — прилад для вимірювання напруги

Опір однорідного лінійного провідника:

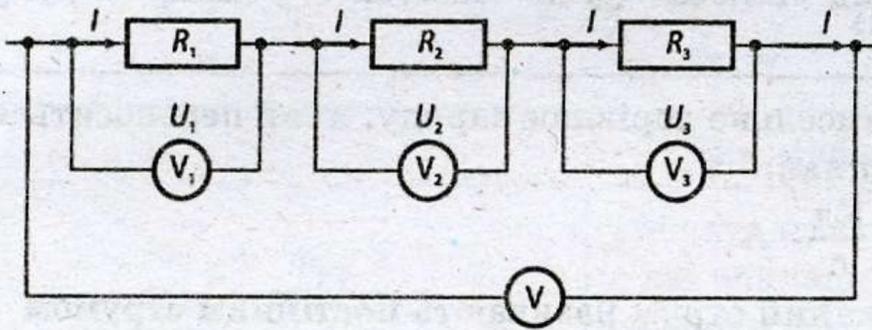
$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де  $\rho$  — питомий електричний опір, чисельно рівний опору провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>;

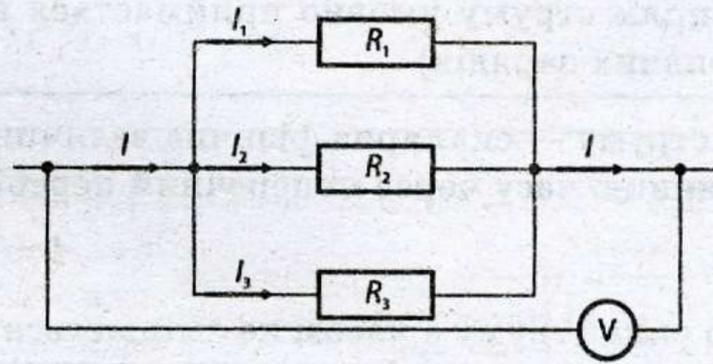
$S$  — площа поперечного перерізу провідника;

$l$  — його довжина

Послідовне з'єднання провідників



Паралельне з'єднання провідників



$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = U \quad \xrightarrow[U=R \cdot I]{I = \frac{U}{R}}$$

$$U = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$I = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = U \quad \xrightarrow[U=R \cdot I]{I = \frac{U}{R}}$$

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

### Робота струму

Робота струму — робота сил електричного поля, що утворюють електричний струм:

$$A = I \cdot U \cdot \Delta t; [A] = \text{Дж},$$

де  $A$  — робота електричного струму на ділянці кола за час  $\Delta t$ ;

$U$  — напруга

### Потужність струму

Потужність струму дорівнює відношенню роботи струму до часу, за який ця робота виконана:

$$P = \frac{A}{t} = I \cdot U; [P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт},$$

де  $P$  — потужність електричного струму;

$I$  — сила струму;

$U$  — напруга

### Закон Джоуля-Ленца

Якщо на ділянці кола під дією електричного поля не здійснюється механічна робота й не відбуваються хімічні перетворення, то робота поля приводить тільки до нагрівання провідника:

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

де  $Q$  — кількість теплоти, що виділилася в провіднику за час  $\Delta t$  при проходженні струму;

$I$  — сила струму в провіднику;

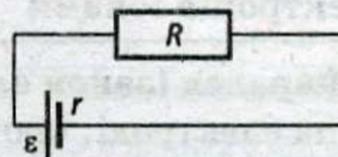
$R$  — опір провідника

## Закон Ома для повного кола

Сила струму в електричному колі прямо пропорційна електрорушійній силі (ЕРС) джерела струму й обернено пропорційна сумі електричних опорів зовнішньої й внутрішньої ділянок кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r},$$

де  $r$  — внутрішній опір джерела струму



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Назва середовища	Носії заряду
Метали	Вільні електрони
Електроліти	Позитивні й негативні іони
Гази, плазма	Електрони й іони
Вакуум	Електрони, що вилетіли з поверхні електрода внаслідок емісії
Напівпровідники	Електрони і дірки

## Електричний струм у металах

Усі метали у твердому й рідкому станах є провідниками електричного струму. Поза електричним полем вільні електрони переміщуються в кристалі металу хаотично, а під дією електричного поля, крім хаотичного руху, набувають упорядкованого руху в одному напрямку — у провіднику виникає електричний струм

Опір металів зумовлений дефектами кристалічної ґратки й теплових коливань іонів у вузлах ґратки, що перешкоджає спрямованому руху вільних електронів, тому при нагріванні опір збільшується

### Надпровідність

**Надпровідність** — явище зменшення питомого опору до нуля при температурі, відмінній від абсолютного нуля. Електричний опір стрибком падає до нуля при охолодженні нижче критичної температури  $T_k$ , характерної для даного провідника, тобто метал стає абсолютним провідником

Критична температура для металів становить 1–20 К. Для деяких керамічних матеріалів температура  $T_k \geq 100$  К — високотемпературна надпровідність

## Електричний струм в електролітах

**Електроліти** — речовини, розчини або розплави яких проводять електричний струм. До електролітів належать водянні розчини солей, кислот і лугів

<b>Електролітична дисоціація</b> — розпад молекул електроліту на позитивні й негативні іони в розчині	
<b>Електроліз</b> — зміна хімічного складу розчину або розплаву, обумовлена втратою або приєднанням електронів іонами	
<p><b>Закон Фарадея (закон електролізу):</b> маса <math>m</math> речовини, що виділилась на електроді, пропорційна заряду <math>q</math>, який пройшов через електроліт:</p> $m = k \cdot q \text{ або } m = k \cdot I \cdot t,$ <p>де <math>k</math> — електрохімічний еквівалент,</p> $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} = \frac{M}{e \cdot N_A \cdot n},$ <p>де <math>M</math> — молярна маса;  <math>n</math> — валентність;  <math>F</math> — стала Фарадея,  <math>F = e \cdot N_A = 9,65 \cdot 10^4</math> Кл/моль;  <math>e</math> — елементарний заряд;  <math>N_A</math> — стала Авогадро</p>	

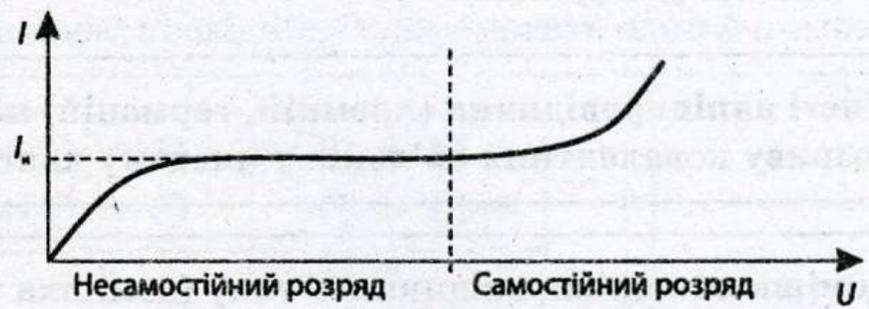
### Залежність питомого опору металів і електролітів від температури

$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t),$ <p>де <math>\rho_0</math> — питомий опір при <math>0^\circ\text{C}</math>;  <math>t</math> — температура за шкалою Цельсія;  <math>\alpha</math> — температурний коефіцієнт опору.          Для металів: <math>\alpha &gt; 0</math> (опір при нагріванні збільшується), для електролітів: <math>\alpha &lt; 0</math> (опір при нагріванні зменшується)</p>	<p>Графік залежності питомого опору металів від температури</p>
--	---

### Електричний струм у газах

Гази в нормальних умовах є діелектриками. Носії електричного струму в газах виникають тільки в результаті іонізації	
<b>Газовий розряд</b> — проходження електричного струму через гази	
<b>Несамостійний газовий розряд</b> — явище проходження електричного струму через газ за умови зовнішнього іонізуючого впливу (ультрафіолетове, рентгенівське і радіоактивне випромінювання, сильне нагрівання)	
<p><b>Самостійний газовий розряд</b> — явище проходження через газ електричного струму, що не залежить від дії зовнішніх іонізаторів.          Іонізація при самостійному розряді здійснюється електронним ударом. Вона можлива за умови</p> $\frac{m v^2}{2} \geq A_i,$ <p>де <math>m</math> — маса електрона;  <math>v</math> — швидкість електрона;  <math>A_i</math> — робота іонізації.</p> <p>Самостійний газовий розряд виникає тільки при великій напрузі поля (<math>E = 3 \cdot 10^6</math> В/м) або за умови високої температури</p>	

**Напруга пробою** — напруга, при якій виникає самостійний розряд



Графік залежності сили струму в ланцюгу від напруги між електродами — вольт-амперна характеристика

### Типи самостійного розряду

1. **Тліючий розряд** — виникає при низьких тисках.  $P \sim 0,01-1$  мм рт. ст., застосовується в газосвітних трубках і газових лазерах.
2. **Іскровий розряд** — виникає при значній напруженості електричного поля в газі, що перебуває під тиском порядку атмосферного (блискавка, пробій діелектрика).
3. **Дуговий розряд** — виникає, якщо:
  - а) після запалювання іскрового розряду від потужного джерела поступово зменшувати відстань між електродами;
  - б) електроди зблизити до зіткнення (минаючи стадію іскри), а потім їх розвести.
4. **Коронний розряд** — виникає при високому тиску в різко неоднорідному полі поблизу електродів з великою кривизною поверхні (наприклад, вістря)

### Поняття про плазму

**Плазма** — четвертий стан речовини — газ, у якому значна частина молекул або атомів іонізована. У плазмі концентрація позитивних і негативних зарядів практично однакова, тобто плазма струменево нейтральна.

**Газорозрядна плазма** виникає при газових розрядах.

**Високотемпературна плазма** виникає при надвисоких температурах ( $T > 10^6$  К).

**Низькотемпературна плазма** виникає при температурах  $T \leq 10^5$  К

### Електричний струм у вакуумі

**Вакуум** — дуже розріджений газ, молекули якого зіштовхуються одна з одною рідше, ніж зі стінками посудини.

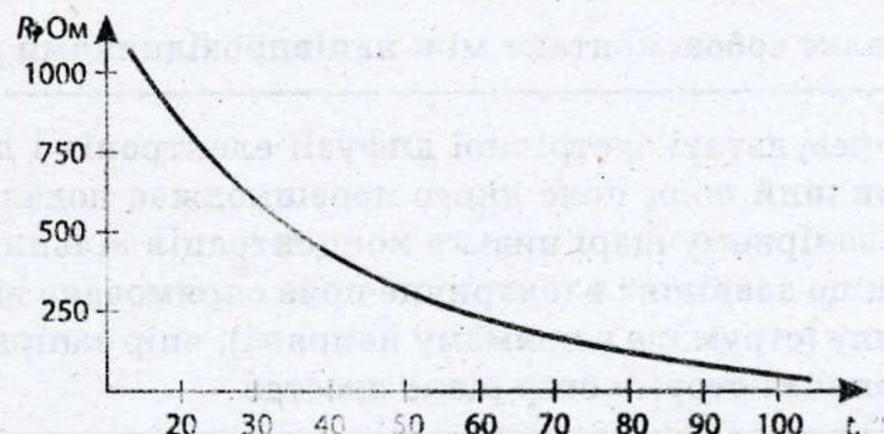
**Термоелектронна емісія** — явище випромінювання вільних електронів з поверхні нагрітих тіл

### Напівпровідники

**Напівпровідники** — речовини, у яких кількість вільних зарядів залежить від температури.

Напівпровідник є діелектриком за низьких температур, але вже за кімнатної температури напівпровідник проводить струм.

На відміну від металів, питомий опір напівпровідників з підвищенням температури зменшується

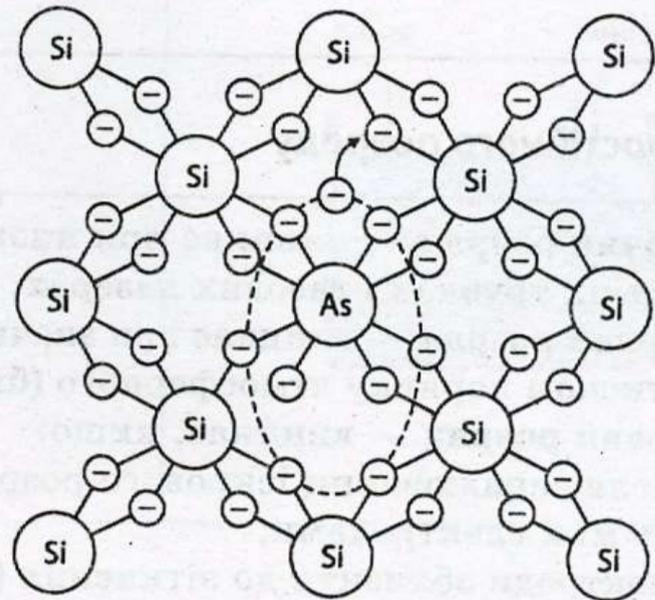


## Типи напівпровідників

Чисті напівпровідники (кремній, германій) мають власну провідність, що виникає в результаті розриву ковалентних зв'язків у чистому напівпровіднику

Домішкові напівпровідники *n*-типу (домішка миш'яку в кремнії) мають електронну провідність

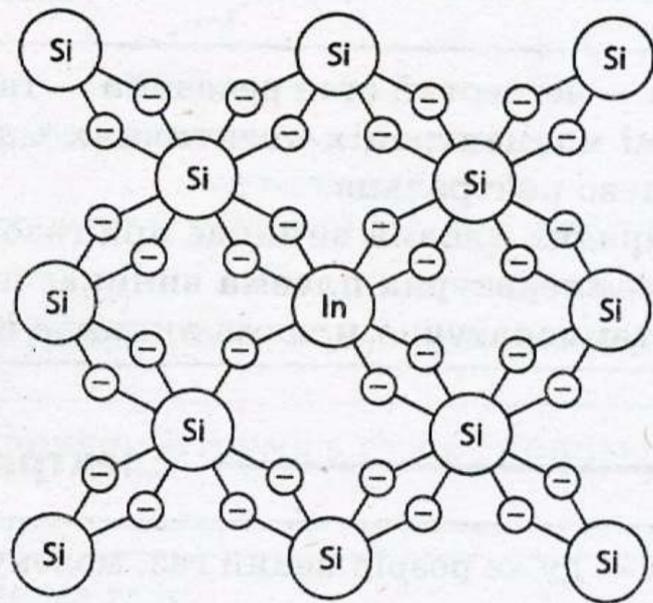
Домішкові атоми мають більшу валентність, ніж основні атоми, тобто містять один зайвий електрон. При підвищенні температури ці зайві електрони стають вільними



5-Валентні атоми миш'яку (As) у кристалі кремнію (Si)

Домішкові напівпровідники *p*-типу (домішка індію в кремнії) володіють дірковою провідністю

Валентність домішкових атомів менша за валентність основних атомів. З'являються «дірки», що «рухаються» під дією електричного поля як позитивно заряджені частинки



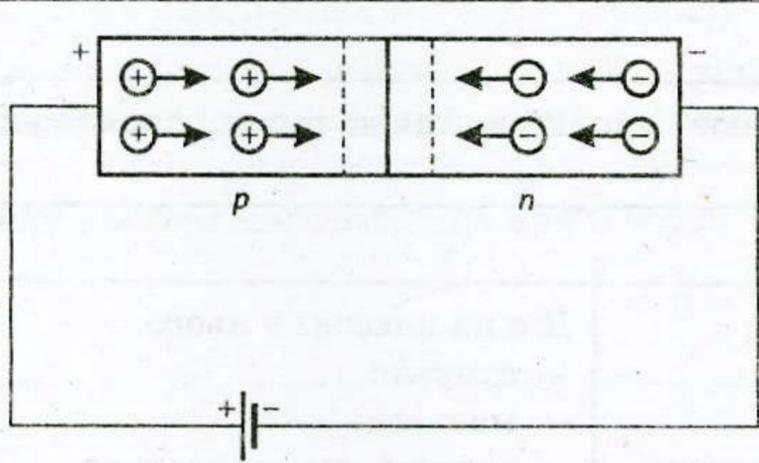
3-Валентні атоми індію (In) у кристалі кремнію (Si)

## Електронно-дірковий перехід (*p-n*-перехід)

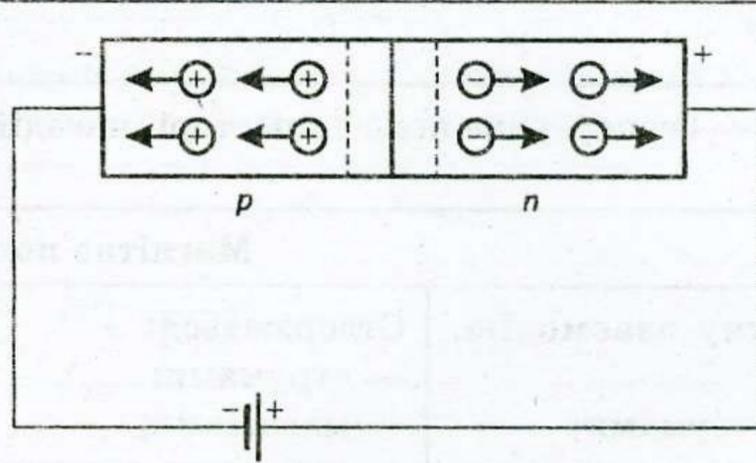
Являє собою контакт між напівпровідниками *p*- і *n*-типу

У результаті зустрічної дифузії електронів і дірок у *p-n*-переході утворюється запертий електричний шар, поле якого перешкоджає подальшому переходу електронів і дірок через межу. У запертому шарі низька концентрація вільних носіїв заряду, що спричиняє підвищений опір. Якщо зовнішнє електричне поле спрямоване від напівпровідника *p*-типу до напівпровідника *n*-типу (струм іде в прямому напрямі), опір запертого шару різко зменшується; при протилежному напрямі струму опір різко зростає

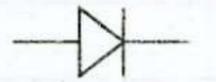
**Напівпровідниковий діод** — елемент з односторонньою провідністю, що містить один *p-n*-перехід



Вільні носії заряду рухаються до *p-n*-переходу, що призводить до збільшення сили струму



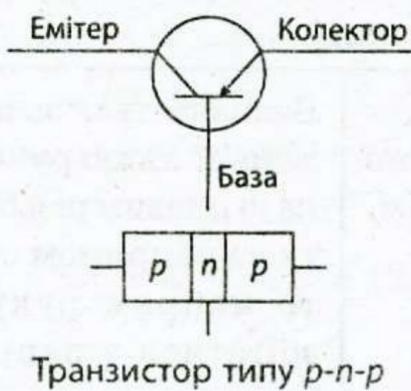
Вільні носії заряду рухаються від *p-n*-переходу, що призводить до зменшення сили струму



Позначення діода на схемі

**Транзистор** — напівпровідниковий пристрій, що містить два *p-n*-переходи.

Транзистор дозволяє підсилювати слабкі електричні сигнали



Транзистор типу *p-n-p*



Транзистор типу *n-p-n*

База  
Емітер  
Колектор } Електроди транзистора

**Емітерний перехід** (від. лат. *emitto* — випускати) — перехід у напрямку провідності (опір переходу невеликий).

**Колекторний перехід** (від лат. *collektor* — зберігач) — перехід у напрямку зворотньому провідності (опірність переходу суттєве)

# МАГНІТНЕ ПОЛЕ

## Основні поняття

**Магнітне поле** — безперервне поле в просторі, що здійснює силовий вплив на рухомі заряджені частинки

### Магнітне поле

Описує магнітну взаємодію, що виникає:  
 — між двома струмами;  
 — між струмом і зарядом, що рухається;  
 — між двома зарядами, що рухаються

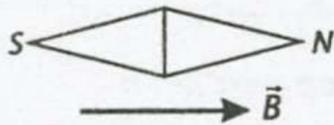
Створюється:  
 — струмами;  
 — магнітами;  
 — зарядами, що рухаються

Діє на внесені в нього:  
 — струми;  
 — магніти;  
 — заряди, що рухаються

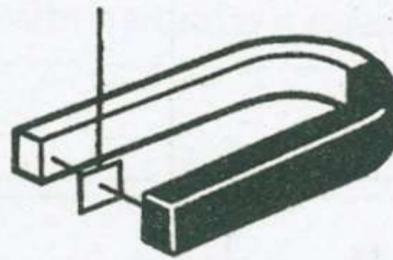
**Вектор магнітної індукції ( $\vec{B}$ )** — силова характеристика магнітного поля

### Напрямок вектора магнітної індукції

Збігається з напрямом осі магнітної стрілки в магнітному полі від південного полюса до північного.

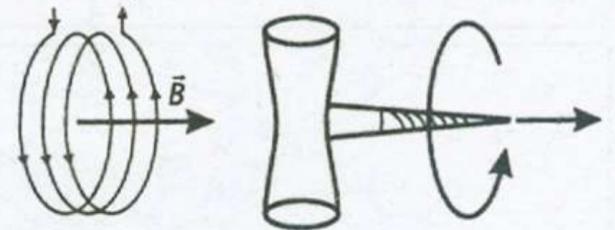


Збігається з напрямом вектора додатної нормалі до вільно підвішеної рамки зі струмом.



Додатний напрям нормалі — напрям поступального руху гвинта, голівка якого обертається в напрямі струму, що тече в рамці

Визначається за правилом свердлика: якщо рукоятку свердлика із правим різьбленням обернути за напрямом струму в рамці, то напрям руху вістря буде збігатися з напрямом руху  $\vec{n}$ .



## Сила Ампера

**Сила Ампера** — сила, що діє з боку магнітного поля на ділянку провідника зі струмом:

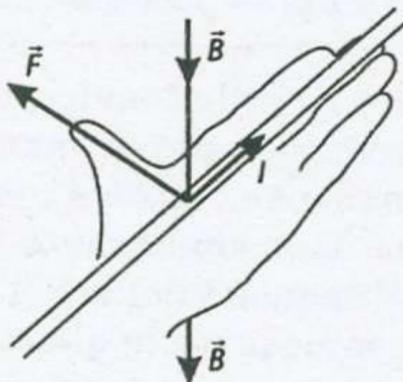
$$F_A = I \cdot \Delta l \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

де  $I$  — сила струму;

$\Delta l$  — довжина ділянки;

$B$  — модуль вектора магнітної індукції;

$\alpha$  — кут між вектором  $\vec{B}$  і напрямом струму в провіднику



• Вектор  $\vec{F}_A$  перпендикулярний до провідника зі струмом і до вектора  $\vec{B}$ .

Напрямок  $\vec{F}_A$  визначається за правилом лівої руки: якщо долоню лівої руки розташувати так, щоб у неї входив  $\vec{B}$ , а чотири витягнуті пальці розташувати за напрямом струму в провіднику, то відставлений під прямим кутом великий палець покаже напрям сили Ампера

## Модуль вектора магнітної індукції

Модуль вектора магнітної індукції — відношення максимального значення модуля сили Ампера, що діє на прямолінійний провідник зі струмом, до сили струму в провіднику і його довжини

Сила Ампера максимальна при  $\alpha = 90^\circ$ .

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot \Delta l}; \quad [B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}$$

## Сила Лоренца

Сила Лоренца — сила, що діє з боку магнітного поля на заряд, що рухається:

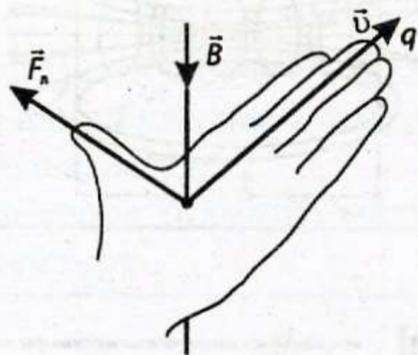
$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

де  $v$  — швидкість заряду;

$B$  — модуль вектора магнітної індукції;

$\alpha$  — кут між векторами  $\vec{B}$  і  $\vec{v}$ .

Вектор  $\vec{F}_L$  перпендикулярний векторам  $\vec{B}$  і  $\vec{v}$



Напрямок  $\vec{F}_L$  визначається за правилом лівої руки. Для позитивного заряду треба чотири витягнуті пальці розташувати уздовж  $\vec{v}$ , для негативного заряду — протилежно  $\vec{v}$

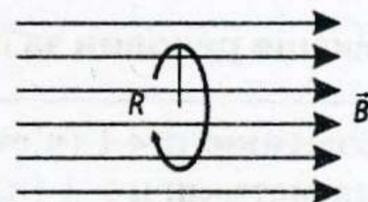
## Рух заряджених частинок у магнітному полі

Заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле:

зі швидкістю  $\vec{v}$  перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля  $\vec{B}$ :

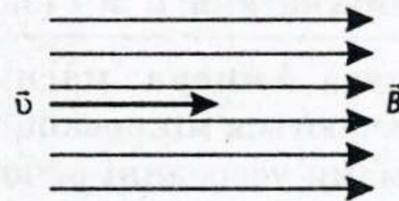
$\vec{v} \perp \vec{B}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ , траєкторія руху — коло радіуса

$$R = \frac{mv}{qB}$$



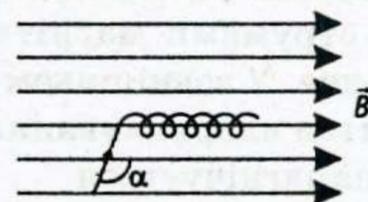
зі швидкістю  $\vec{v}$  паралельно лініям індукції магнітного поля  $\vec{B}$ :

$\vec{v} \parallel \vec{B}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\vec{F}_L = 0$ , траєкторія руху — пряма



зі швидкістю  $\vec{v}$  під деяким кутом до ліній індукції магнітного поля  $\vec{B}$ :

$0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , траєкторія руху — гвинтова лінія

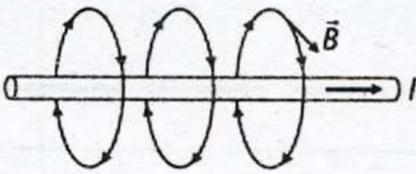
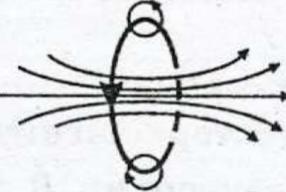
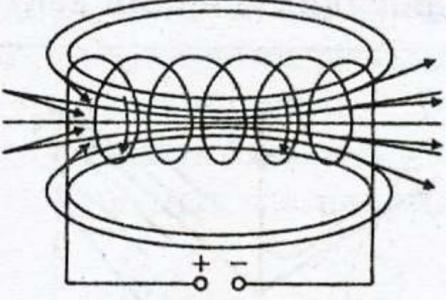


## Лінії магнітної індукції

### Лінії магнітної індукції

Лінія магнітної індукції — лінія в будь-якій точці якої, вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  напрямлений по дотичній до цієї лінії

Лінії магнітної індукції завжди утворюють замкнені криві — магнітне поле є **вихровим**

<p><b>Нескінченно довгий провідник зі струмом</b> — лінії являють собою концентричні кола</p>	
<p><b>Виток зі струмом</b> — лінії замикаються зовні, проходячи через площину витка</p>	
<p><b>Котушка зі струмом (соленоїд)</b> — лінії замикаються зовні, проходячи через площини витків, поле усередині котушки однорідне</p>	

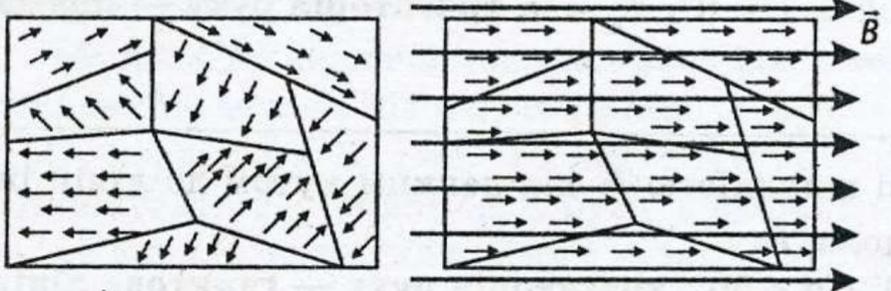
## Речовина в магнітному полі

**Магнітна проникність** — фізична величина, що показує, у скільки разів індукція  $\vec{B}$  магнітного поля в однорідному середовищі відрізняється за модулем від індукції  $\vec{B}_0$  магнітного поля у вакуумі:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0,$$

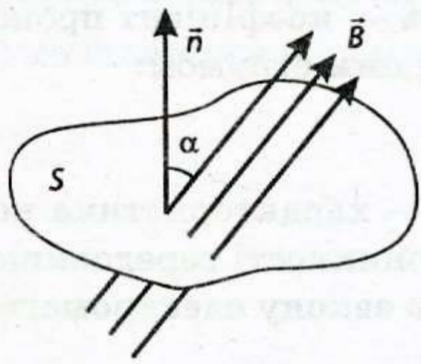
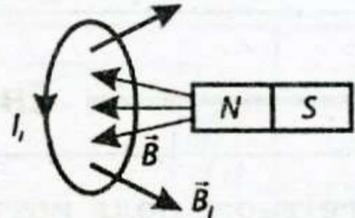
де  $\mu$  — коефіцієнт, що характеризує магнітні властивості середовища

### Класифікація речовин за їхніми магнітними властивостями

<p><b>Діамагнетики:</b> <math>\mu &lt; 1</math> (вісмут: <math>\mu = 0,999824</math>)  <b>Парамагнетики:</b> <math>\mu &gt; 1</math> (платина: <math>\mu = 1,00036</math>)</p>	<p>Слабوماгнітні речовини</p>
<p><b>Феромагнетики:</b> <math>\mu \gg 1</math> (залізо, нікель, кобальт)</p>	<p>Сильномагнітні речовини</p>
<p><b>Гіпотеза Ампера:</b> магнітні властивості тіла визначаються мікроскопічними електричними струмами усередині речовини. Якщо напрями цих струмів різнонапрямлені, то породжувані цими струмами магнітні поля компенсують одне одне. У зовнішньому магнітному полі відбувається впорядкування цих струмів — речовина намагнічується</p>	

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

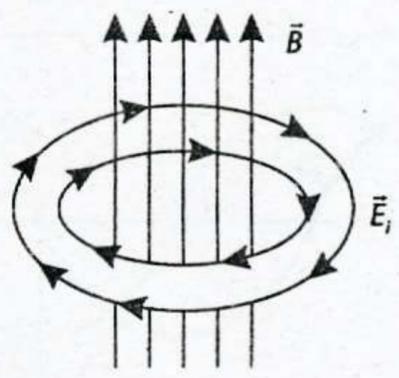
## Основні поняття

<p><b>Електромагнітна індукція</b> — явище виникнення електричного струму в замкненому контурі при змінах магнітного поля, що пронизує контур</p>	
<p><b>Індукційний струм</b> — електричний струм, що виникає в результаті електромагнітної індукції. Індукційний струм виникає, якщо рухати котушку або магніт так, щоб змінювалося число ліній магнітної індукції, що пронизують замкнений контур</p>	
<p><b>Магнітний потік</b> (потік магнітної індукції) через поверхню площею <math>S</math> визначається як:</p> $\Phi = B_n \cdot S \cdot \cos \alpha; [\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб},$ <p>де <math>B_n</math> — проекція вектора <math>\vec{B}</math> на нормаль <math>\vec{n}</math> до площини поверхні;  <math>\alpha</math> — кут між <math>\vec{B}</math> і <math>\vec{n}</math>.</p> <p>Магнітний потік пропорційний числу ліній магнітної індукції, що пронизують контур</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Правило Ленца</b></p> <p>Індукційний струм своїм магнітним полем протидіє зміні магнітного потоку, яким він викликаний.</p> <p>Напрямок індукційного струму залежить від:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• зростання або убування магнітного потоку, що пронизує контур;</li> <li>• напрямку вектора індукції магнітного поля відносно контуру</li> </ul>	 <p>При зближенні магніту й контуру у контурі виникає індукційний струм <math>I_i</math> такого напрямку, що контур і магніт відштовхуються один від одного</p>

## Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея)

<p>ЕРС індукції <math>\epsilon_i</math> в замкненому контурі дорівнює модулю швидкості зміни магнітного потоку через площу поверхні, обмеженої контуром:</p> $\epsilon_i = \left  \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right , \text{ з огляду на правило Ленца, } \epsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
---

## Вихрове електричне поле

<p><b>Вихрове електричне поле</b> — електричне поле, що виникає при змінах магнітного поля</p>	
<p>Вихрове електричне поле не пов'язане з електричними зарядами, його лінії напруженості являють собою замкнені лінії</p>	
<p>Вихрове електричне поле не потенціальне, тобто робота сил вихрового електричного поля при переміщенні електричного заряду по замкненому контуру не дорівнює нулю</p>	

## Самоіндукція

Самоіндукція — явище виникнення ЕРС індукції в електричному ланцюзі в результаті зміни сили струму в цьому ланцюзі

Відповідно до правила Ленца, ЕРС самоіндукції перешкоджає наростанню сили струму при вмиканні й убаванню сили струму при вимиканні ланцюга

## Індуктивність

Індуктивність — коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі і магнітним потоком, створюваним цим струмом:

$$\Phi = L \cdot I; [L] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \text{Гн.}$$

Величина  $L$  — характеристика контуру, що залежить від його розмірів і форми, а також від магнітної проникності середовища.

Відповідно до закону електромагнітної індукції,

$$\varepsilon_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

## Енергія магнітного поля струму

Енергія магнітного поля котушки зі струмом:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}; [W_m] = \text{Дж},$$

де  $L$  — індуктивність;

$I$  — сила струму

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

## Основні поняття

**Коливальний контур** — система, що складається з конденсатора й котушки індуктивності, які утворюють замкнене електричне коло

**Вільні електромагнітні коливання** — періодично повторювані зміни сили струму в котушці й напруги між провідниками конденсатора без споживання енергії від зовнішніх джерел

У коливальному контурі відбуваються вільні електромагнітні коливання з періодом відповідно до формули Томсона.

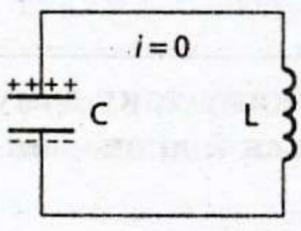
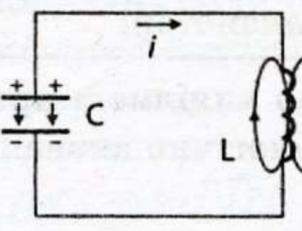
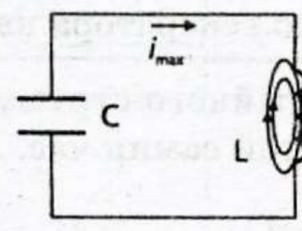
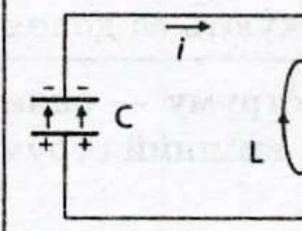
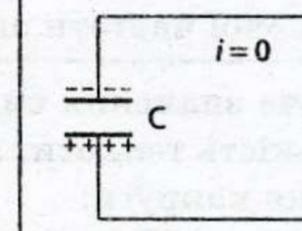
**Формула Томсона:**

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

де  $T$  — період вільних коливань;

$L$  — індуктивність котушки;

$C$  — ємність конденсатора

				
При замиканні обкладок зарядженого конденсатора в котушці виникає струм	За рахунок самоіндукції сила струму поступово збільшується	До моменту повної розрядки конденсатора сила струму досягає максимальної величини	Сила струму починає поступово спадати, але струм тече в той самий бік, перезаряджаючи конденсатор	Стан системи через $T/2$

У коливальному контурі відбуваються періодичні перетворення енергії електричного поля конденсатора на енергію магнітного поля котушки індуктивності, і навпаки. При відсутності втрат на нагрівання й випромінювання енергія в контурі зберігається

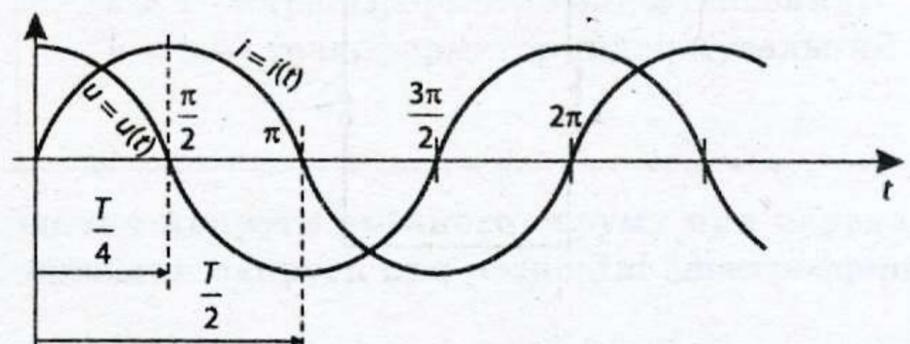
$$\frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$$

Електромагнітні коливання в коливальному контурі характеризують періодичні зміни електричного заряду, сили струму й напруги

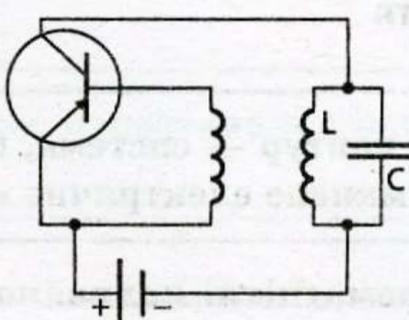
$$q = q_{\max} \cos \omega t,$$

$$i = -\omega q_{\max} \sin \omega t = -I_{\max} \sin \omega t,$$

$$u = \frac{q_{\max}}{C} \cos \omega t = U_{\max} \cos \omega t$$



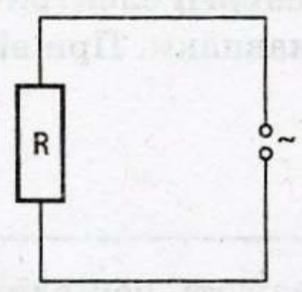
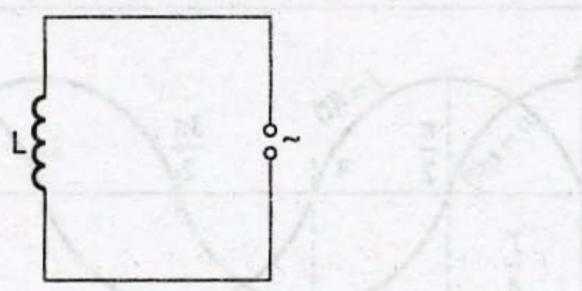
## Генератор електромагнітних коливань

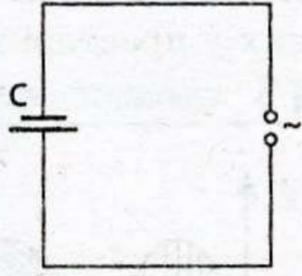
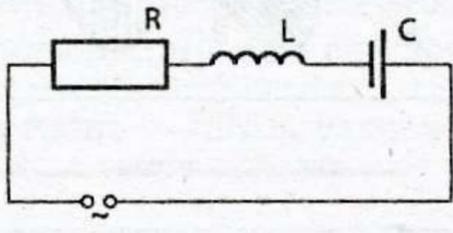
<p>Для створення незагасаючих коливань використовується генератор електромагнітних коливань — автоколивальна система</p>	
<p><b>Транзистор</b> — пристрій, що регулює надходження енергії від джерела</p>	
<p><b>Зворотний зв'язок</b> — індуктивний зв'язок котушки коливального контуру з котушкою в колі емітер—база транзистора</p>	

## Змінний електричний струм

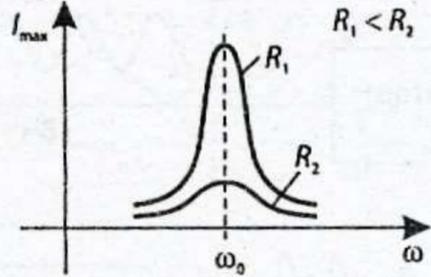
<p><b>Змінний електричний струм <math>i</math></b> — електричний струм, що залежить від часу.  <b>Змінний електричний струм</b> — приклад вимушених електричних коливань</p>
<p><math>i</math> низької частоти одержують за допомогою індукційного генератора, принцип дії якого — рамка, що обертається в однорідному магнітному полі</p>
<p><math>i</math> високої частоти одержують за допомогою генератора на транзисторі</p>
<p><b>Діюче значення сили струму</b> — сила постійного струму, що виділяє в провіднику таку саму кількість теплоти, як і змінний струм за той самий час. Аналогічно визначається й діюче значення напруги:</p> $I_{\text{д}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}; \quad U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$

## Кола змінного струму

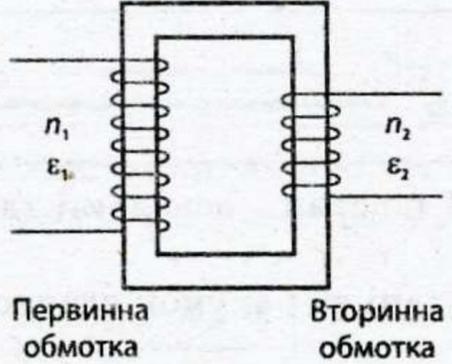
<p><b>Закон Ома справедливий для миттєвих значень змінного струму</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Активний опір</b></p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>Коливання напруги й сили струму збігаються за фазою.                  Якщо <math>u = U_{\text{max}} \cos \omega t</math>, то <math>i = I_{\text{max}} \cos \omega t</math>.                  Потужність змінного струму (середня за період), що виділяється на активному опорі:  <math display="block">P = 1/2 I_{\text{max}} U_{\text{max}} = IU = I^2 R</math></p>
<p style="text-align: center;"><b>Індуктивний опір</b></p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>Коливання напруги випереджають за фазою коливання сили струму на чверть періоду.                  Якщо <math>i = I_{\text{max}} \cos \omega t</math>, то  <math display="block">u = U_{\text{max}} \cos(\omega t + \pi/2) = -U_{\text{max}} \sin \omega t</math>.                  Величина <math>X_L = \omega L</math> називається індуктивним опором:  <math display="block">I_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{X_L}, \quad I = \frac{U}{X_L}</math>.                  Середня за період потужність <math>P = 0</math></p>

<p style="text-align: center;"><b>Ємнісний опір</b></p> 	<p>Коливання напруги відстають за фазою від коливань сили струму на чверть періоду.  Якщо <math>i = I_{\max} \cos \omega t</math>, то  <math>u = U_{\max} \cos(\omega t - \pi/2) = U_{\max} \sin \omega t</math>.  Величина <math>X_C = 1/\omega C</math> — ємнісний опір.  Середня за період потужність <math>P = 0</math></p>
<p style="text-align: center;"><b>Повний опір</b></p> 	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$ <p>де <math>R</math> — активний опір;  <math>X_L = \omega L</math>, <math>X_C = 1/\omega C</math> — реактивний опір</p>

### Резонанс у колі змінного струму

<p><b>Резонанс у колі змінного струму</b> — різке зростання амплітуди коливань сили струму</p>	 <p style="text-align: center;">Графіки залежності амплітуди / змінного струму від частоти <math>\omega</math></p>
<p><b>Умова резонансу:</b> індуктивний опір дорівнює за величиною ємнісному:  <math>\omega_L = 1/\omega C</math>, <math>\omega = 1/\sqrt{LC}</math></p>	

### Трансформатор

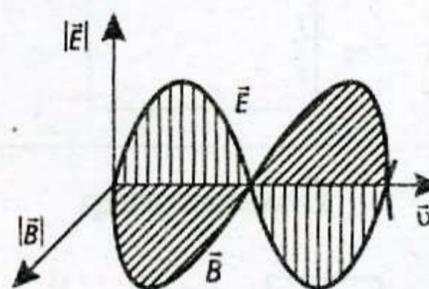
<p><b>Трансформатор</b> — пристрій для перетворення напруги змінного струму, що складається з двох котушок (обмотки) на спільному феромагнітному осерді</p>	
<p>Осердя концентрує магнітне поле так, що всі витки первинної і вторинної обмоток пронизуються практично однаковим змінним магнітним потоком, відповідно в кожному витку наводиться однакова ЕРС індукції</p>	
	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k,$ <p>де <math>k</math> — коефіцієнт трансформації:  <math>k &gt; 1</math> — трансформатор знижувальний;  <math>k &lt; 1</math> — трансформатор підвищувальний</p>
<p>Трансформатори використовуються для підвищення напруги змінного струму при передачі електроенергії по лініях електропередач і для зниження напруги при розподілі електроенергії споживачам</p>	

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

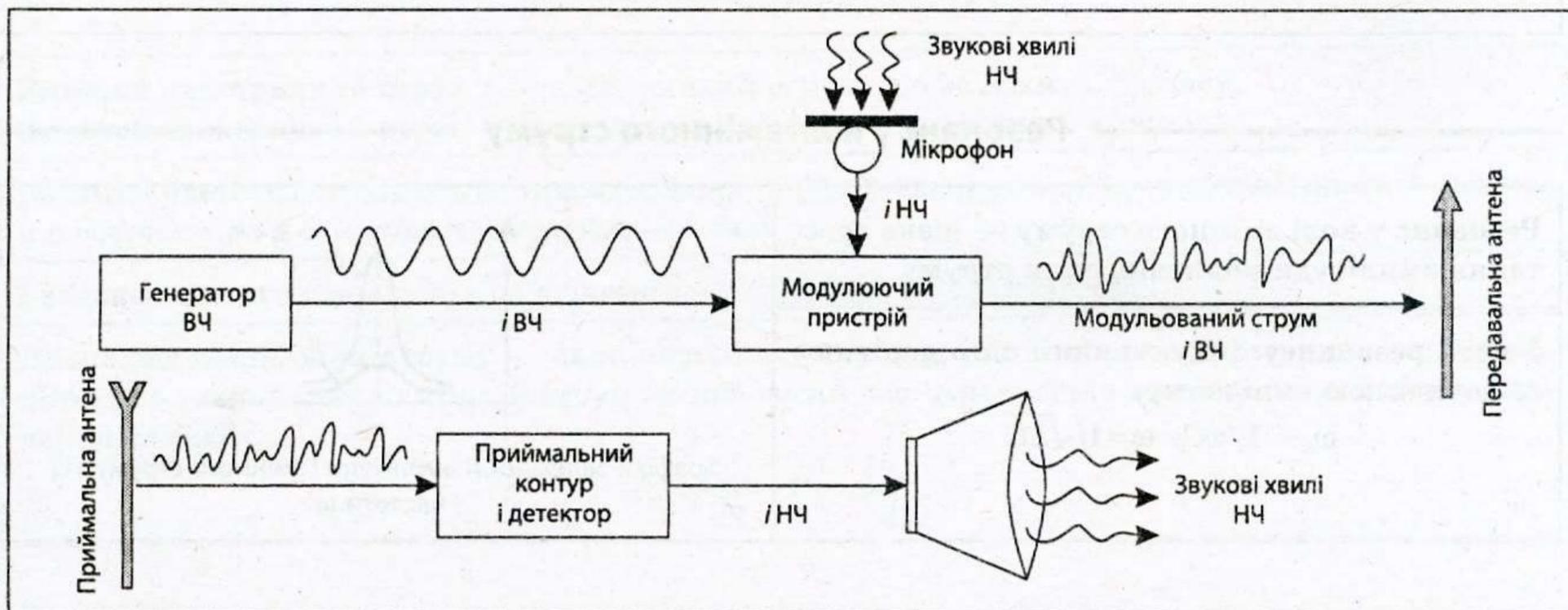
**Електромагнітна хвиля** — процес поширення періодично змінних у просторі і часі магнітного й електричного полів

**Властивості електромагнітних хвиль:**

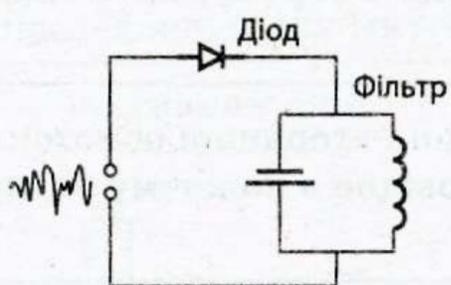
- випромінюються електричними зарядами, що рухаються з прискоренням;
- є поперечними:  $\vec{B} \perp \vec{E} \perp x$ ;
- поглинаються;
- зареломлюються;
- відбиваються



### Принцип радіозв'язку



**Детектор** — пристрій, що перетворює модульовані високочастотні (ВЧ) коливання на низькочастотні (НЧ)



### Поширення радіохвиль

**Довгі й середні хвилі** ( $\lambda > 100$  м) поширюються на великі відстані, оскільки здатні огинати опуклу поверхню Землі за рахунок дифракції й рефракції.

**Короткі хвилі** ( $10 < \lambda < 100$  м) поширюються на великі відстані за рахунок здатності багаторазово відбиватися від іоносфери.

**Ультракороткі хвилі** ( $\lambda < 100$  м) поширюються в межах прямої видимості антени передавача

**Радіолокація** — виявлення й точне визначення предмета за допомогою радіохвиль при частоті  $\nu = 10^8 - 10^{11}$  Гц — надвисокі частоти.

**Відстань до об'єкта:**  $l = ct/2$ , де  $c$  — швидкість поширення електромагнітної хвилі

# ОПТИКА

## ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

### Основні поняття

**Геометрична оптика** — розділ фізики, що вивчає закони поширення світла на основі уявлення про світлові промені:

- прямолінійність поширення в однорідному середовищі;
- незалежність поширення світлових пучків

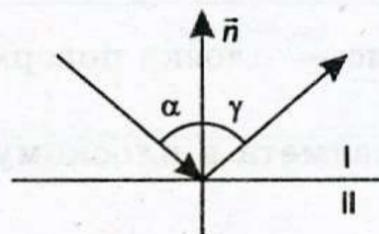
**Світловий промінь** — лінія, уздовж якої поширюється енергія світлових електромагнітних хвиль

### Закони геометричної оптики

**Закон прямолінійного поширення світла:** в однорідному середовищі або вакуумі світло поширюється прямолінійно

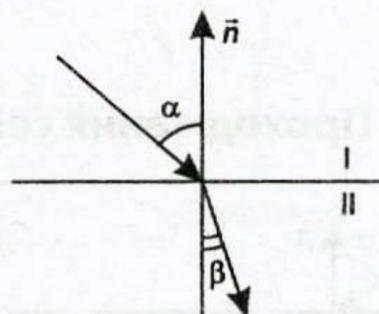
**Закон відбивання.** Промінь падаючий, відбитий і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ лежать в одній площині, кут відбивання дорівнює куту падіння:

$$\alpha = \gamma$$



**Закон заломлення.** Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ лежать в одній площині, причому відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною сталою для даних середовищ (відносний показник заломлення):

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$



**Відносний показник заломлення** дорівнює відношенню швидкостей світла в даних середовищах:

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

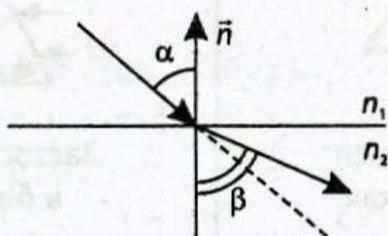
**Абсолютний показник заломлення** — показник заломлення відносно вакууму, що показує, у скільки разів швидкість світла в даному середовищі менша від швидкості світла у вакуумі:

$$n = \frac{c}{v}$$

### Оптична густина середовища

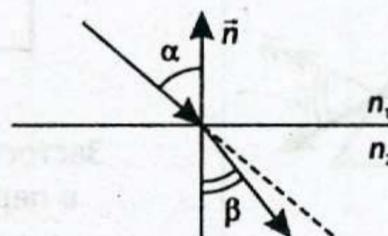
Промінь із більшою оптичною густиною середовища переходить в оптично менш щільне середовище:

$$n_1 > n_2, \alpha < \beta$$



Промінь із меншою оптичною густиною середовища переходить в оптично більш щільне середовище:

$$n_1 < n_2, \alpha > \beta$$

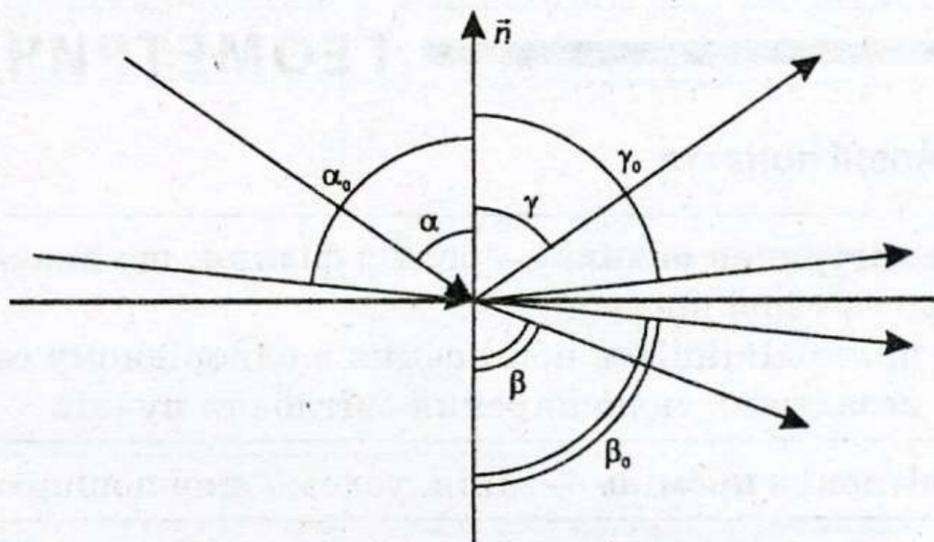


## Повне відбивання

Граничний кут повного відбивання  $\alpha_0$  — кут падіння, при якому відбувається повне відбивання світла:

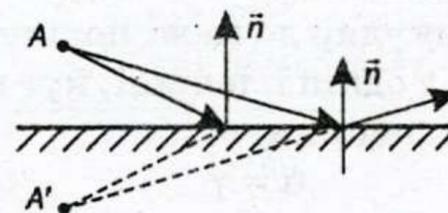
$$\alpha_0 = \arcsin n_2/n_1, \text{ де } n_1 > n_2.$$

При кутах падіння  $\alpha > \alpha_0$  все падаюче світло повністю відбивається у середину середовища

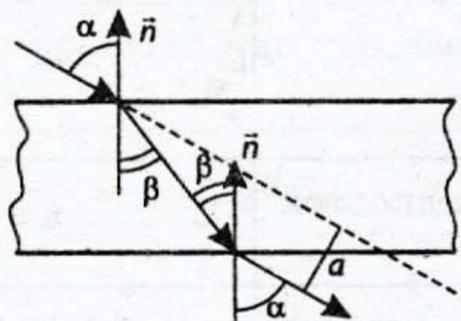


## Побудова зображення в плоскому дзеркалі

Плоске дзеркало — плоска поверхня, що відбиває промені.  
Зображення предмета в плоскому дзеркалі є уявним.



## Проходження світла через плоскопаралельну пластинку

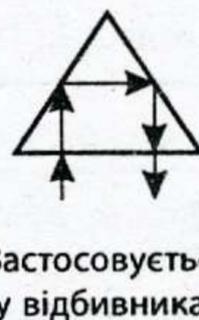
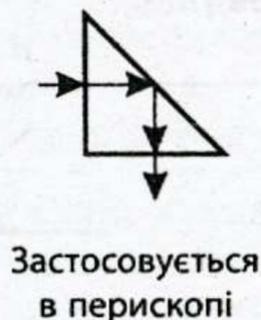
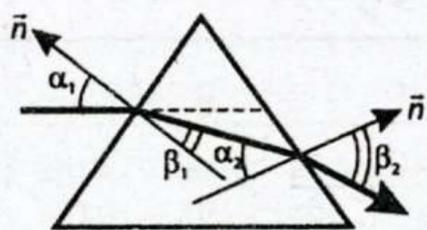


$a$  — зміщення променя

## Проходження світла через тригранну призму

Якщо немає повного відбивання

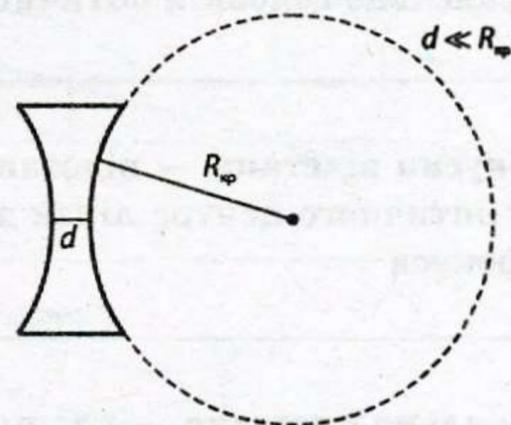
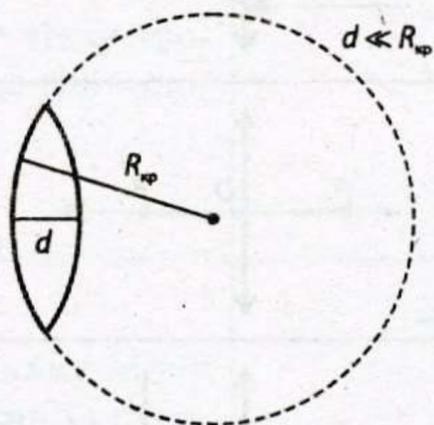
При повному відбиванні



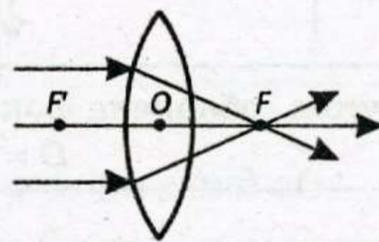
## Лінза

**Лінза** — прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями

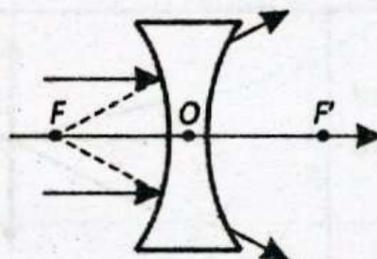
**Лінза** називається **тонкою**, якщо її товщина мала в порівнянні з радіусами кривизни поверхні



**Збиральна лінза** (оптичний центр розташований в найбільш товстому місці лінзи). Промені, що падають на лінзу паралельно головній оптичній осі, після проходження лінзи збираються в її фокусі (дійсний фокус збиральної лінзи)

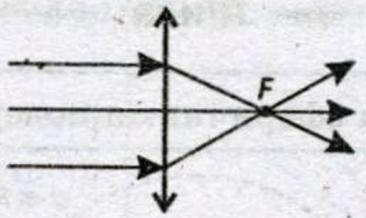
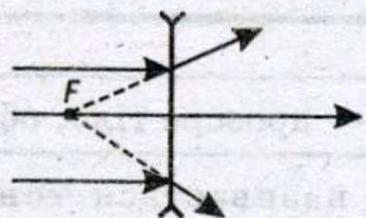
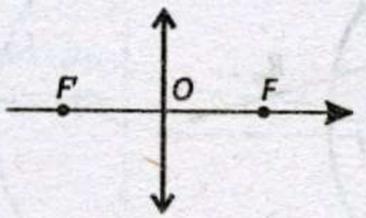
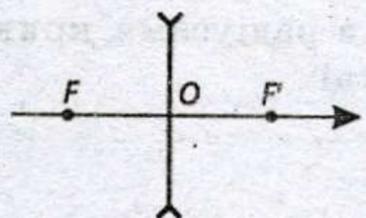
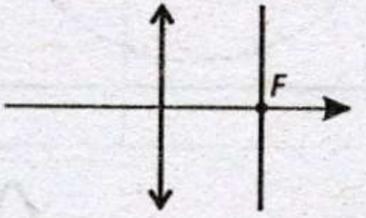
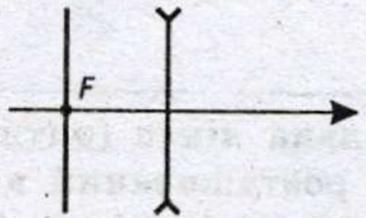


**Розсіювальна лінза** (оптичний центр розташований в найбільш тонкому місці лінзи). Промені, що падають на лінзу паралельно головній оптичній осі, після проходження лінзи йдуть так, що їх продовження проходять через фокус, розташований з тієї сторони лінзи, звідки падають промені (уявний фокус розсіювальної лінзи)

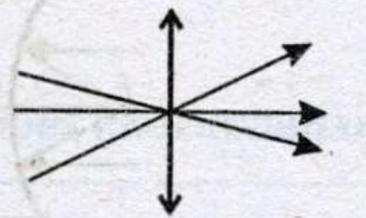
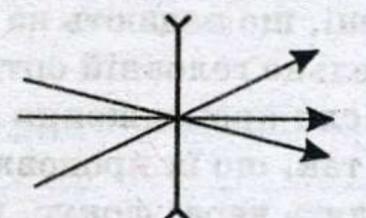
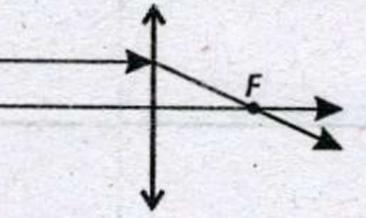
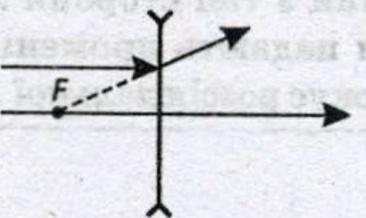
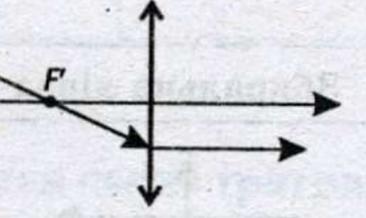
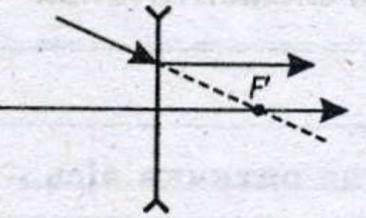


### Основні елементи лінзи

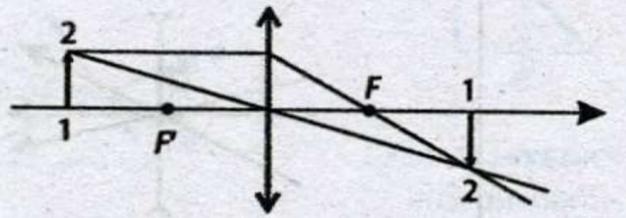
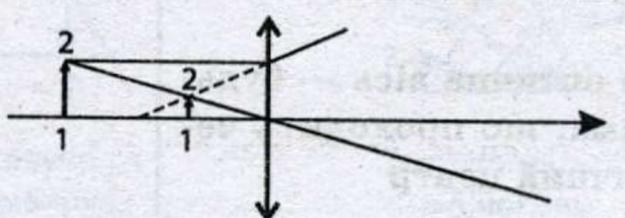
	Збиральна лінза	Розсіювальна лінза
<b>Головна оптична вісь</b> — пряма, що проходить через центри сферичних поверхонь лінзи		
<b>Оптичний центр</b> — перетинання головної оптичної осі з лінзою		
<b>Побічна оптична вісь</b> — будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр		

<p><b>Фокус</b> — точка, у якій після заломлення збираються всі промені, що падають на лінзу, паралельно головній оптичній осі</p>		
<p><b>Фокусна відстань</b> — відстань від оптичного центра лінзи до її фокуса</p>		
<p><b>Фокальна площина</b> — площина, проведена через фокус перпендикулярно до головної осі</p>		
<p><b>Оптична сила лінзи</b> — величина, обернена фокусній відстані: <math>D = 1/F</math></p>		

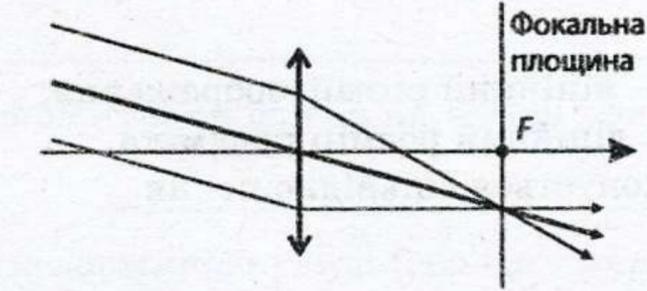
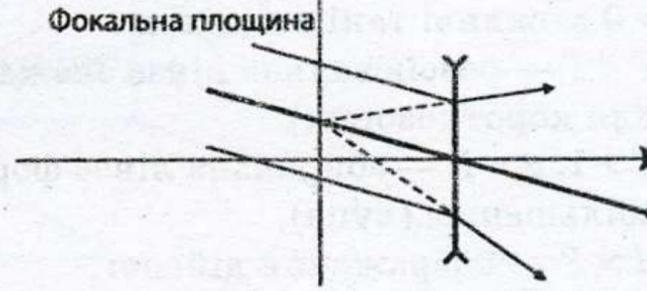
### Побудова зображень у лінзі

<p>Для побудови зображень зазвичай використовують промені, хід яких після проходження через лінзи відомий</p>		
<p>Промінь, що проходить через оптичний центр, не змінює свого напрямку</p>		
<p>Промінь, паралельний головній оптичній осі</p>		
<p>Промінь, що проходить через фокус</p>		

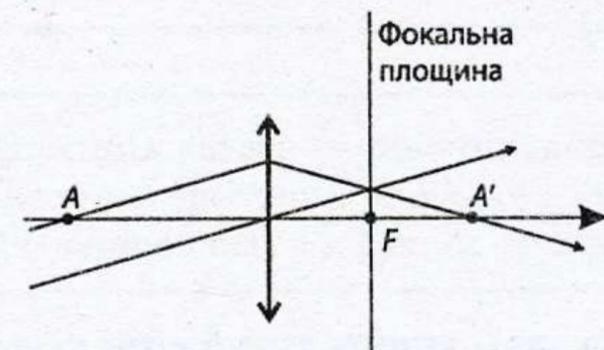
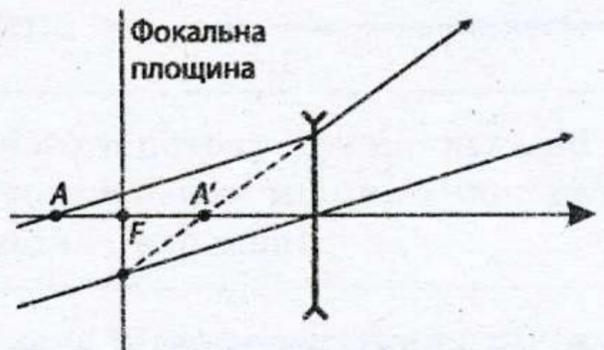
### Зображення точки, що не лежить на головній оптичній осі

<p><b>Збиральна лінза</b></p>	<p><b>Розсіювальна лінза</b></p>
	

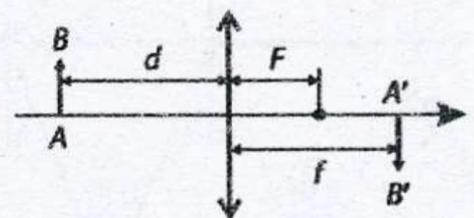
### Хід пучка паралельних променів, що йдуть уздовж побічної оптичної осі

<p>Після проходження через збиральну лінзу промені перетинаються в одній точці, що розташована у фокальній площині лінзи</p>	 <p>Фокальна площина F</p>
<p>Після проходження через розсіювальну лінзу промені йдуть так, що їхні продовження перетинаються в одній точці «ближньої» фокальної площини</p>	 <p>Фокальна площина</p>

### Побудова зображення точки, що лежить на головній оптичній осі

 <p>Фокальна площина F</p> <p>A' — дійсне зображення</p>	 <p>Фокальна площина F</p> <p>A' — уявне зображення</p>
<p>Дійсне зображення — промені утворюють збіжний пучок і перетинаються в одній точці (дійсне зображення може бути отримане на екрані)</p>	<p>Уявне зображення — промені утворюють розбіжний пучок — перебуває в точці перетину продовжень променів, що пройшли крізь лінзу (уявне зображення не може бути отримане на екрані)</p>
<p>Найважливішою властивістю всіх оптичних систем є оборотність ходу променів: джерело і його зображення завжди можна поміняти місцями</p>	

### Формула лінзи

$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ <p>де <math>d</math> — відстань від лінзи до джерела;  <math>f</math> — відстань від лінзи до зображення;  <math>F</math> — фокусна відстань</p>	
<p><math>F &gt; 0</math> для збиральної лінзи; <math>F &lt; 0</math> для розсіювальної лінзи.  <math>f &gt; 0</math> для дійсного зображення; <math>f &lt; 0</math> — для уявного.  <math>d &gt; 0</math>, якщо на лінзу падає розбіжний пучок променів; <math>d &lt; 0</math>, якщо пучок збіжний</p>	

## Збільшення лінзи

$$\Gamma = \frac{H}{h},$$

де  $H$  — лінійний розмір зображення;

$h$  — лінійний розмір предмета.

Виконується співвідношення

$$\Gamma = \left| \frac{f}{d} \right|$$

При  $d > 0$  можливі такі випадки:

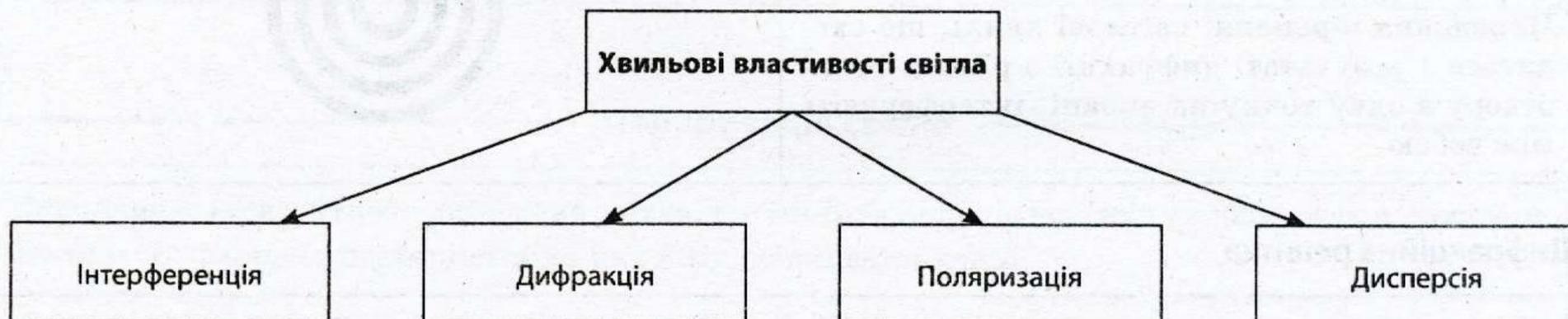
1.  $\Gamma < 1$  — розсіювальна лінза завжди дає уявне й зменшене зображення предмета (окуляри для короткозорих).
2.  $\Gamma > 1, d < F$  — збиральна лінза формує уявне зображення предмета, зображення виходить збільшеним (лупа).
3.  $d > F$  — зображення дійсне:  
 $d < 2F$  — зображення збільшене (проекційний апарат);  
 $d > 2F$  — зображення зменшене (фотоапарат)

# ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИЧНОЇ ОПТИКИ

## Основні поняття

**Фізична оптика** — розділ фізики, що вивчає закони поширення світла на основі уявлень про хвильову природу світлових променів

**Монохроматичне світло** — світло із суворо визначеною довжиною хвилі (або частотою)



## Інтерференція світла

**Інтерференція світла** — просторовий перерозподіл світлового потоку при накладанні двох (або декількох) когерентних світлових хвиль, у результаті чого в одних місцях виникають максимуми інтенсивності, а в інших — мінімуми (інтерференційна картина).

**Умова інтерференційних максимумів**

$$\Delta l = \pm k\lambda$$

**Умова інтерференційних мінімумів**

$$\Delta l = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

де  $\Delta l$  — різниця ходу двох хвиль, що збуджують коливання в даній точці;

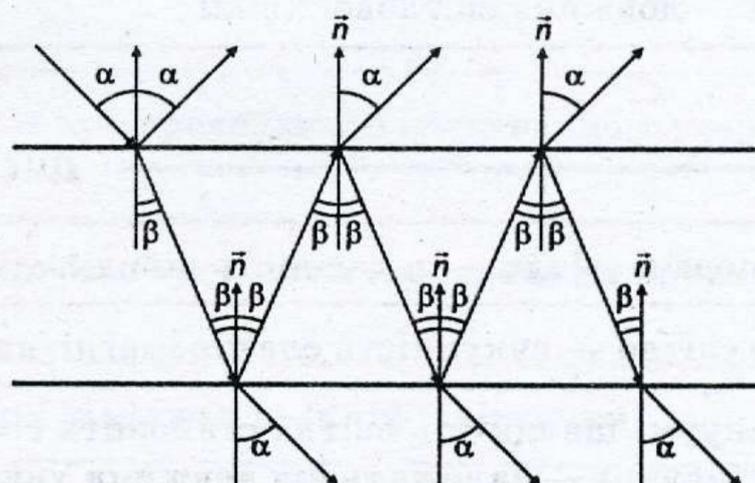
$\lambda$  — довжина хвилі;

$k = 0, 1, 2, \dots$

**Когерентні хвилі** — хвилі, які мають однакову частоту й сталу різницю фаз

## Інтерференція в тонких плівках

Світлові хвилі, відбиті двома поверхнями тонкої плівки, проходять різні шляхи, тобто виникає різниця ходу  $\Delta l$



## Дифракція світла

**Дифракція світла** — явище відхилення світла від прямолінійного поширення. Спостерігається при проходженні світла крізь малі отвори або при обгинанні світлом перешкод, розміри яких порівняні з довжиною світлової хвилі

**Приклад:** при проходженні світла через малий круглий отвір на екрані навколо центральної світлої плями спостерігаються темні й світлі кільця, що чергуються.

**Пояснення Френеля:** світлові хвилі, що сходяться у результаті дифракції з різних точок отвору в одну точку на екрані, інтерферують між собою



### Дифракційна решітка

Являє собою прозору пластинку з нанесеною системою паралельних непрозорих смуг (щілин), розташованих на однаковій відстані одна від одної

Стала (період) решітки:

$$d = a + b,$$

де  $a$  — ширина щілини;  
 $b$  — ширина проміжку



На решітку падає монохроматична хвиля із плоским хвильовим фронтом.

$\Delta l$  — різниця ходу.  
 $\Delta l = d \sin \varphi$



Інтерференційний максимум спостерігається під кутом  $\varphi$ , обумовленим умовою:

$$d \sin \varphi = k\lambda \text{ (формула дифракційної решітки),}$$

де  $k$  — порядок максимуму:  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  
 $\lambda$  — довжина світлової хвилі

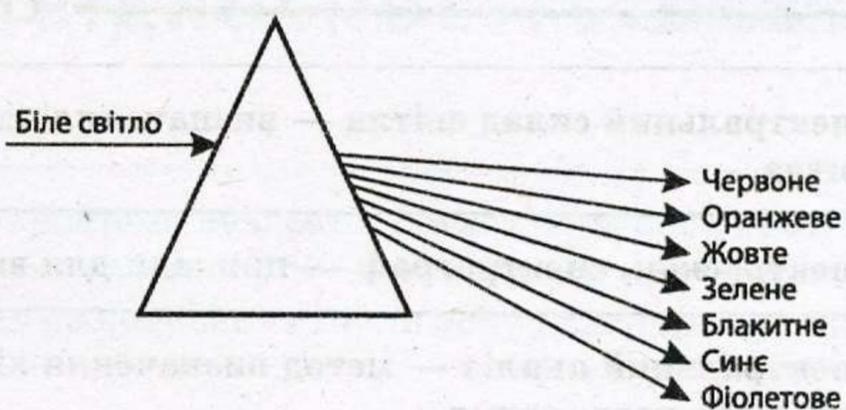
## Дисперсія світла

**Дисперсія світла** — залежність швидкості світла від довжини хвилі

**Біле світло** — сукупність електромагнітних монохроматичних хвиль

У вакуумі швидкість світла становить  $c = 299\,792\,458$  м/с і не залежить від довжини хвилі, а в речовині — залежить від довжини хвилі

У результаті дисперсії пучок білого світла при проходженні його через призму розкладається на спектр

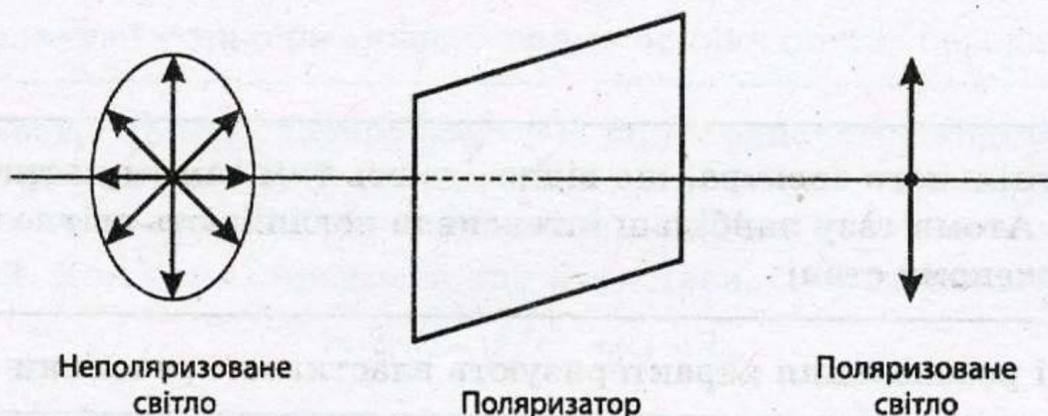


## Поляризація світла

**Неполяризоване світло** — природне світло, що містить хвилі із усілякими напрямками коливань вектора  $\vec{E}$ , перпендикулярними до напрямку поширення хвилі

**Поляризоване світло** — світло, яке містить світлові хвилі з коливаннями вектора  $\vec{E}$ , що лежать тільки в одній площині

**Поляризатори** — поляроїди (кристали турмаліну). Вони мають здатність пропускати світлові хвилі з коливаннями вектора  $\vec{E}$ , що лежать тільки в одній площині. Пучок поляризованого світла випускає лазер



## Види випромінювань

**Теплове випромінювання** — випромінювання, яке випускає атоми за рахунок енергії теплового руху (лампи накаливання)

**Електролюмінесценція** — випромінювання, що виникає при проходженні електричного розряду в газі (Північне сяйво)

**Катодолюмінесценція** — світіння твердих тіл внаслідок бомбардування електронними пучками (екран телевізора)

**Хемілюмінесценція** — світіння холодних тіл внаслідок хімічних реакцій (світлячки)

**Фотолюмінесценція** — світіння тіл під дією світла, що падає на них

## Спектри

**Спектральний склад світла** — визначення частот випромінювань, що входять до складу даного світла

**Спектроскоп, спектрограф** — прилади для визначення спектрального складу світла

**Спектральний аналіз** — метод визначення хімічного складу речовини за спектром випромінювання або поглинання

### Спектри випромінювання

Вид	Джерело
Суцільний (неперервний) — суцільна кольорова смуга, що переходить від червоного до фіолетових кольорів	Розжарені тверді та рідкі тіла, гаряча плазма
Лінійчастий — окремі світлі лінії різних кольорів на темному фоні	Розжарені одноатомні гази
Смугастий — окремі світлі смуги, розділені темними проміжками	Розжарені багатоатомні гази

### Спектр поглинання

Темні лінії на фоні суцільного спектра, що відповідають тим самим частотам, що і лінії спектра випромінювання. Атоми газу найбільш інтенсивно поглинають світло тих частот, які вони випромінюють у збудженому стані

Спектри поглинання і розсіювання характеризують властивості речовини

Кожний хімічний елемент має свій власний набір спектральних ліній

# ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

## Основні поняття

Спеціальна теорія відносності Ейнштейна (СТВ) — система сучасних поглядів на часо-простір
Релятивістські явища — явища, описувані СТВ, але не пояснені з точки зору класичної фізики
Класична (ньютонівська) механіка розглядає $v \ll c$
Релятивістська механіка розглядає $v < c$

## Постулати СТВ

Принцип відносності Ейнштейна: будь-які фізичні процеси протікають однаково в різних інерціальних системах відліку (ІСВ) за однакових початкових умов
Принцип сталості швидкості світла: швидкість світла у вакуумі однакова у всіх ІСВ і не залежить ні від швидкості джерела, ні від швидкості приймача світлового сигналу

## Наслідки постулатів СТВ

Швидкість світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю передачі взаємодій
Відносність одночасності. Дві просторово розділені події, одночасні в одній ІСВ, можуть не бути одночасними в іншій ІСВ
Відносність відстаней. Довжина $l$ предмета, що рухається, скорочується в напрямі руху: $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \Rightarrow l < l_0,$ де $l_0$ — довжина нерухомого предмета; $v$ — швидкість його руху в даній ІСВ. Розміри предметів у напрямі, перпендикулярному до напрямку руху, не змінюються
Відносність інтервалів часу. Хід рухомого годинника сповільнюється: $\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \Rightarrow \tau > \tau_0,$ де $\tau_0$ — інтервал часу, вимірюваний годинником, що перебуває у спокої в тій системі відліку, де обидві події відбулися в одній і тій самій точці простору; $\tau$ — інтервал часу між двома подіями, вимірюваний рухомим годинником
Релятивістський закон додавання швидкостей, напрямлених уздовж однієї прямої: $v_2 = \frac{v + v_1}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}},$ де $v_1$ — швидкість тіла в першій системі відліку; $v_2$ — швидкість того самого тіла в другій системі відліку; $v$ — швидкість руху першої системи відліку відносно другої

## Релятивістська динаміка

Залежність маси від швидкості	Імпульс тіла, що рухається	Закон взаємозв'язку маси й енергії
$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$ <p>де <math>m_0</math> — маса тіла, що не рухається;  <math>m</math> — маса того самого тіла, яке рухається зі швидкістю <math>v</math></p>	$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ <p>Рівняння руху:  <math display="block">\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F},</math>                     де <math>\vec{F}</math> — сила, що діє на тіло</p>	$\Delta E = \Delta m c^2,$ <p>де <math>\Delta E</math> — зміна енергії,  <math>\Delta m</math> — зміна маси</p>

### Гіпотеза Ейнштейна

Будь-яке тіло, що має масу спокою, має власну енергію спокою:  $E_0 = m_0 c^2$ .

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

При збільшенні енергії будь-якої системи спокою на  $\Delta E$  її маса зростає на  $\Delta m = \Delta E / c^2$ .

**Приклади:**

- при нагріванні тіла його маса зростає;
- маса ядра менше суми мас утворюючих його нуклонів на величину дефекту маси

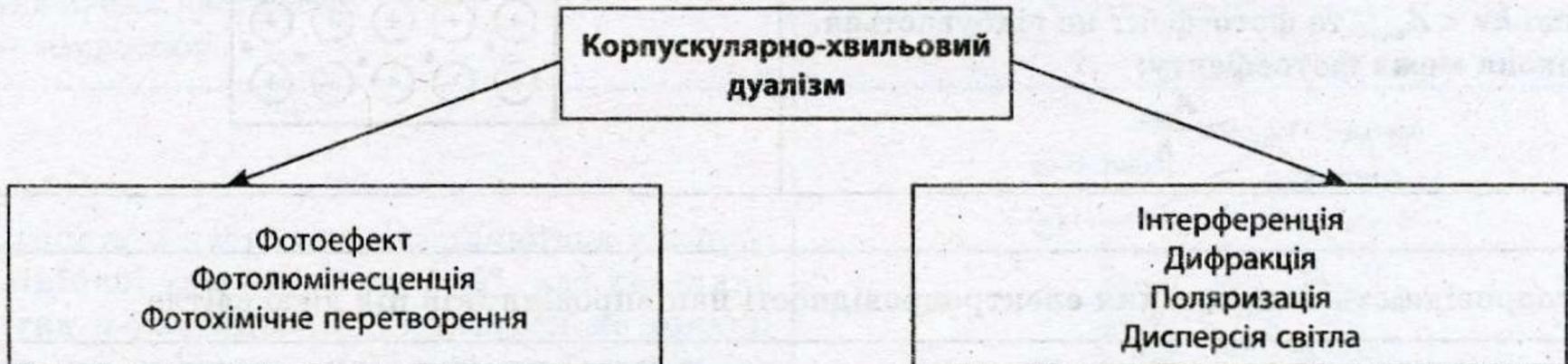
# КВАНТОВА ФІЗИКА

## СВІТЛОВІ КВАНТИ

### Основні поняття

Природа світла дуже складна: в одних умовах світло виявляє властивості електромагнітної хвилі, а в інших — корпускул (частинок).

Корпускулярно-хвильовий дуалізм — прояв світлом як хвильових, так і корпускулярних властивостей



Гіпотеза Планка: світло випромінюється й поглинається окремими «порціями» — квантами (фотонами). Енергія кожного кванта визначається за формулою

$$E = h\nu,$$

де  $\nu$  — частота світла;

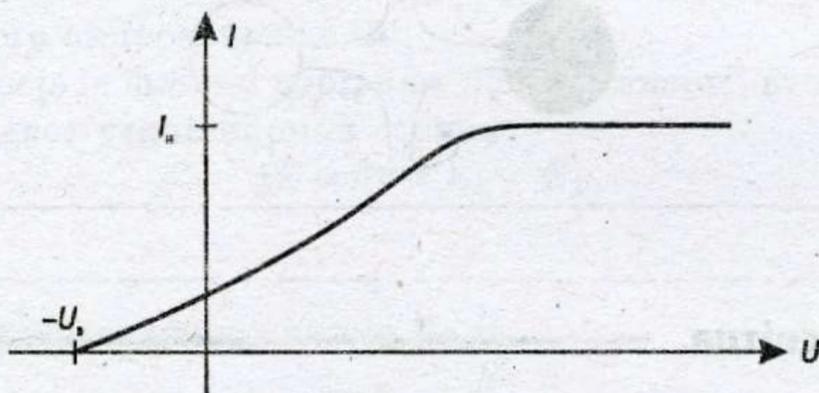
$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — стала Планка

Квант енергії — мінімальна кількість енергії, яку може поглинути або випромінити система

Фотоефект — явище виривання електронів із речовини під дією електромагнітного випромінювання

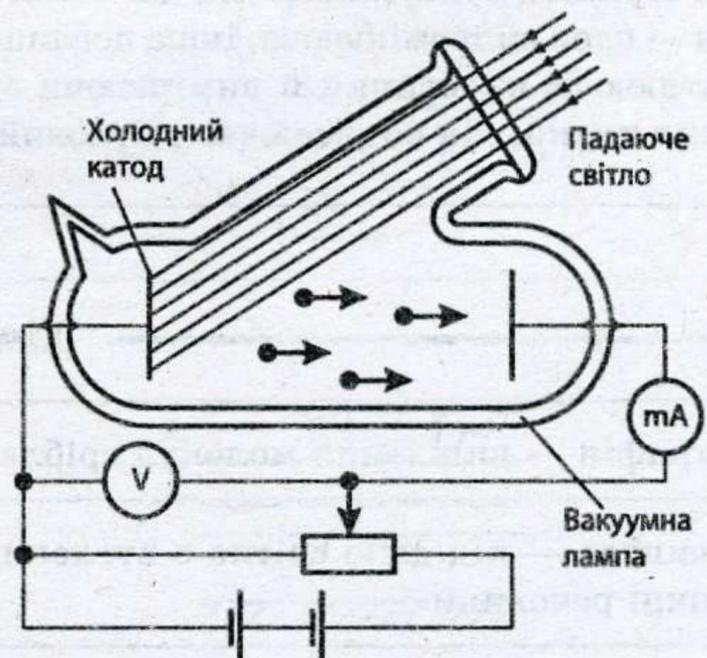
### Закони фотоефекту:

1. Сила струму насичення прямо пропорційна інтенсивності світлового випромінювання, що падає на поверхню тіла.
2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає із частотою світла і не залежить від його інтенсивності.
3. Якщо частота світла менше деякої певної для даної речовини мінімальної частоти, то фотоефект не відбувається (червона межа фотоефекту)



$I_n$  — струм насичення

$U_s$  — затримуюча напруга



## Рівняння Ейнштейна для фотоефекту

**Квантова теорія:** світло — потік особливих частинок — фотонів з енергією  $E = h\nu$ , масою  $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$ , імпульсом  $p = mc = \frac{h\nu}{c}$ . Фотони поглинаються як єдине ціле

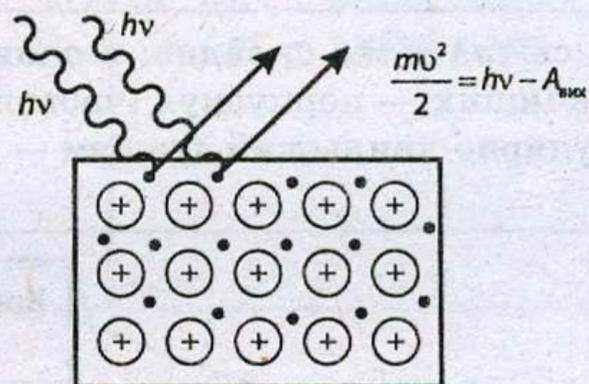
Поглинаючи фотон, електрон збільшує енергію на  $h\nu$ , що йде на здійснення роботи виходу електрона з металу  $A_{\text{вих}}$  і на збільшення кінетичної енергії фотоелектрона.

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}} \quad \text{— рівняння Ейнштейна.}$$

Якщо  $h\nu < A_{\text{вих}}$ , то фотоефект не відбувається.

**Червона межа фотоефекту:**

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$$



**Фотопровідність** — зростання електропровідності напівпровідників під дією світла

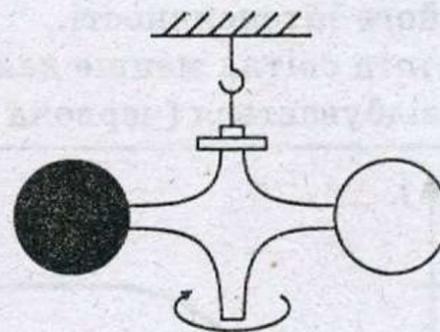
**Фотохімічні закони Ейнштейна (з урахуванням квантової гіпотези світла):**

1. Фотон, який поглинається речовиною, спричиняє перетворення лише однієї молекули.
2. Фотохімічна реакція відбувається тільки тоді, якщо енергія фотона достатня для розриву міжмолекулярних зв'язків, тобто енергія фотона має бути більшою або дорівнювати енергії дисоціації

## Тиск світла. Досвід Лебедева

**Світло** — потік частинок (фотонів), що мають імпульс ( $p = E/c$ , де  $c$  — швидкість світла) і передають його тілу при випромінюванні або поглинанні. При випромінюванні фотона переданий імпульс у два рази більший, ніж при поглинанні

**Установка Лебедева** складалася з легкого стрижня, підвішеного у вакуумі на тонкій нитці. По краях стрижня були закріплені дві тонкі пластинки — одна випромінююча, інша поглинаюча. Висвітлюючи пластинки й вимірюючи закручування нитки, він обчислював світловий тиск



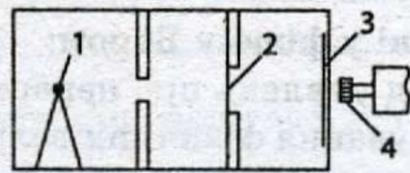
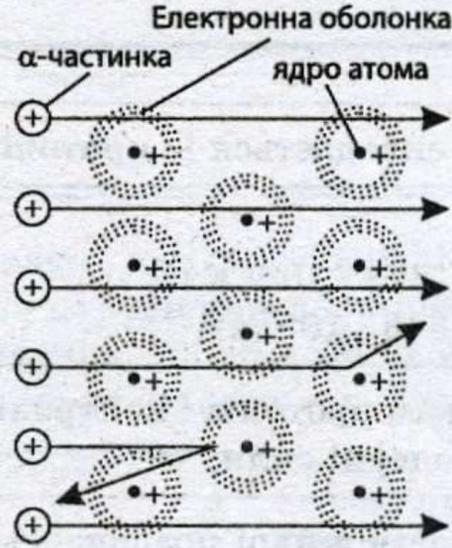
## Хімічна дія світла

**Фотографія** — виділення молекул срібла при падінні світла на кристали бромистого срібла

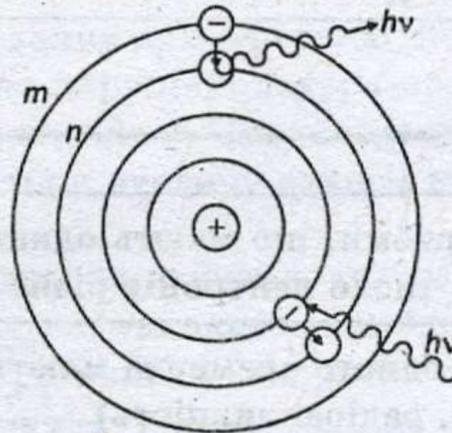
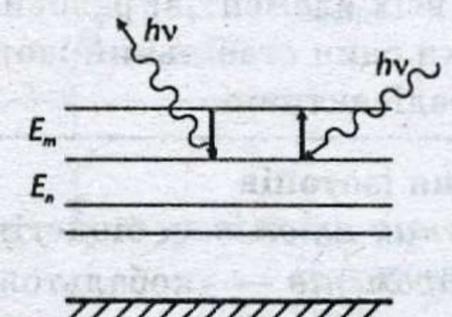
**Фотосинтез** — під дією світла з вуглекислого газу й води в хлорофілі утворюються кисень й органічні речовини

# АТОМНА ФІЗИКА

## Атомне ядро

<b>Досліди Резерфорда з розсіювання <math>\alpha</math>-частинок — відкриття атомного ядра</b>	
<p>1 — радіоактивна речовина;                  2 — тонка металева пластинка;                  3 — екран, покритий шаром кристалів сульфід цинку, здатних світитися під ударами швидких заряджених частинок;                  4 — мікроскоп</p>	
<p>Більшість <math>\alpha</math>-частинок відхиляються від прямолінійної траєкторії на <math>1-2^\circ</math>, але невелика частка <math>\alpha</math>-частинок відхиляється на більші кути, що свідчить про існування масивного атомного ядра, розмір якого в <math>10^4-10^5</math> разів менше розміру атома (розмір атома — <math>10^{-10}</math> м, розмір ядра — <math>10^{-14}-10^{-15}</math> м)</p>	

## Квантові постулати Бора

<p><b>1. Атомна система може перебувати в особливих квантових стаціонарних станах, кожному з яких відповідає певна енергія <math>E_n</math>; у стаціонарному стані атом не випромінює і не поглинає енергію</b></p>	
<p><b>2. При переході атома з одного стаціонарного стану в інший стаціонарний стан випромінюються або поглинаються кванти електромагнітного випромінювання.</b>                  Енергія фотона дорівнює різниці енергії атома у двох стаціонарних станах:  <math display="block">\Delta E = h\nu = E_m - E_n</math></p>	
<p><b>Правило квантування Бора.</b>  <math display="block">m\nu R = n \frac{h}{2\pi},</math>                  де <math>m</math> — маса електрона;  <math>\nu</math> — швидкість електрона;  <math>R</math> — радіус кругової орбіти;  <math>n</math> — номер енергетичного стану (ціле число)</p>	

Усі стаціонарні стани атома, крім одного, є стаціонарними умовно. Нескінченно довго атом може перебувати в стаціонарному стані з мінімальним запасом енергії
<b>Основний стан атома</b> — стаціонарний стан з мінімальною енергією
<b>Збуджений стан атома</b> — стаціонарний стан атома з будь-якими значеннями енергії, крім мінімального
Час життя атома в збудженому стані — $10^{-8}$ – $10^{-7}$ с
<b>Зміни, внесені у фізику Бором:</b> 1. Відмова від уявлень про неперервність фізичних величин. 2. Ідея квантування фізичних величин: існує дискретний ряд значень — радіуса кругової орбіти, енергії й швидкості

### Будова ядра

Ядро атома складається із протонів і нейтронів	
Протон $p$ : заряд $+e = 1,673 \cdot 10^{-19}$ Кл; маса $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг	Нейтрон $n$ : заряд дорівнює нулю; маса $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Загальна назва протонів і нейтронів — нуклони. Між нуклонами діють короткодійчі сили притягання — ядерні сили	
Число протонів у ядрі позначається $Z$ і збігається з порядковим номером елемента в таблиці Д. І. Менделєєва	
Заряд ядра дорівнює $Z$	Число нейтронів у ядрі атома позначається $N$
Загальне число нейтронів і протонів у ядрі позначається $A$ — масове число: $A = Z + N$	
Позначення: ${}^A_ZX$ , де $X$ — позначення хімічного елемента. Наприклад: ${}^{235}_{92}U$ — ядро урану, у якому міститься 92 протони і $235 - 92 = 143$ нейтрони	

### Ізотопи

Ізотопи — атоми, що мають однаковий заряд ядра $Z$ , але різну масу $A$ , тобто число протонів однакове, а число нейтронів різне
Усі ізотопи одного елемента мають однакові хімічні властивості, але різні фізичні властивості (наприклад, радіоактивність)
Ізотопи є у всіх елементів: речовина являє собою суміш ізотопів у певній пропорції. У деяких ядер є тільки один стабільний ізотоп, а решта — радіоактивні; починаючи з $Z = 84$ , усі ізотопи елементів радіоактивні
<b>Застосування ізотопів</b> <b>Метод мічених атомів</b> — біологія, фізіологія, медицина, промисловість, археологія. <b>Джерела <math>\gamma</math>-променів</b> — «кобальтова гармата» з ізотопом ${}^{60}_{27}Co$ . <b>Прискорення мутацій</b> для штучного відбору в сільському господарстві

**Радіоактивність** — випускання ядрами деяких елементів різних частинок ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -квантів), що супроводжується переходом їх в інші стани й зміною їхніх параметрів.

Момент часу, коли відбувається таке перетворення, непередбачуваний; однак щосекунди розпадається певна частка ядер

**Активність** — число розпадів за одиницю часу

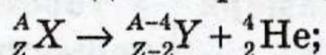
**Радіоактивний розпад** — природне радіоактивне перетворення ядер, що відбувається мимовільно

**Ядерні реакції** — це перетворення ядер при взаємодії з елементарними частинками або друг з другом

Види радіоактивного розпаду

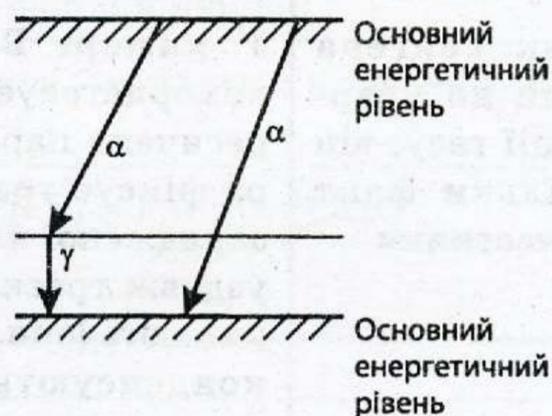
**$\alpha$ -Розпад:** мимовільний розпад атомного ядра на  $\alpha$ -частинку (ядер гелію  ${}^4_2\text{He}$ ) і ядро-продукт. Маса ядра зменшується на 4 одиниці, а заряд — на 2 одиниці.

Правило зміщення для  $\alpha$ -розпаду:



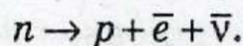
$\alpha$ -радіоактивні ядра важких елементів  $Z > 82$

**$\gamma$ -Випромінювання при  $\alpha$ -розпаді:** іноді частина енергії йде на порушення ядра-продукту, що випускає  $\gamma$ -кванти, після чого переходить до нормального стану (наприклад, для  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ).

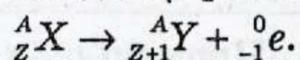


**$\beta$ -Розпад (електронний):** мимовільне перетворення атомного ядра шляхом випускання електрона.

В основі  $\beta$ -розпаду лежить здатність протонів і нейтронів до взаємного перетворення:

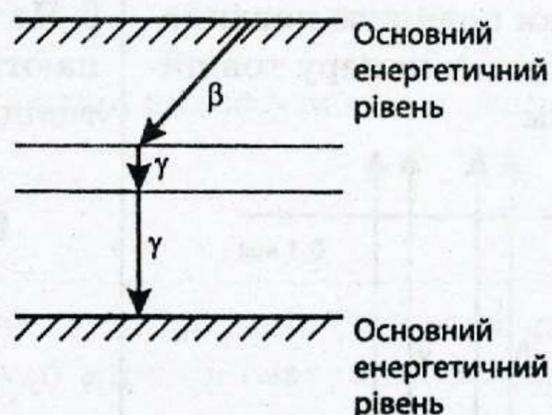


Правило зміщення для  $\beta$ -розпаду:



**$\gamma$ -Випромінювання при  $\beta$ -розпаді:** іноді частина енергії йде на порушення ядра-продукту, що випускає  $\gamma$ -кванти.  $\beta$ -Частинки мають різні енергії, оскільки частину енергії несе частинка нейтрино.

Ядро, що розпалося, звичайно теж радіоактивне, тобто відбувається ланцюжок послідовних радіоактивних перетворень (наприклад, для  ${}^{60}_{27}\text{Co}$ )



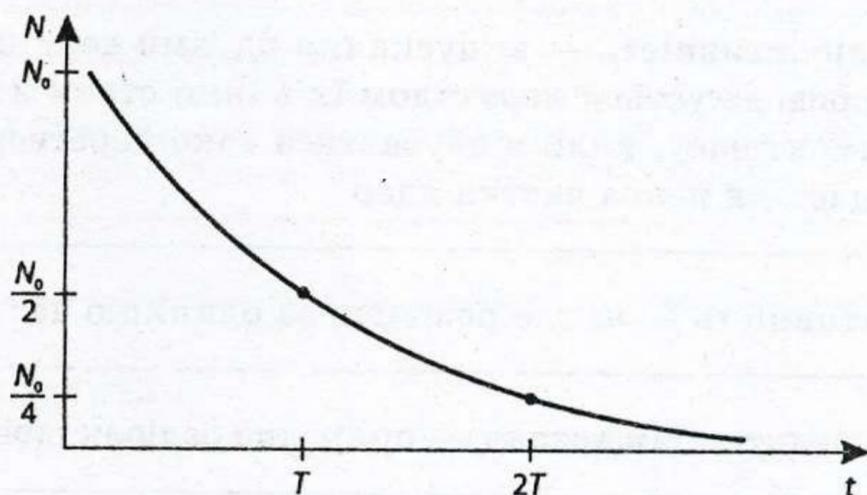
## Закон радіоактивного розпаду

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

де  $N$  — кількість атомів, що не розпалися, у момент часу  $t$ ;

$N_0$  — кількість таких атомів у початковий момент часу;

$T$  — період напіврозпаду — проміжок часу, протягом якого число радіоактивних атомів зменшується вдвічі, тобто константа залежна від типу радіоактивного ізотопу



Закон радіоактивного розпаду є статистичним законом: він справедливий тільки при  $N \gg 1$ . Пророчити момент розпаду даного конкретного ядра неможливо: ця подія — випадкова

## Експериментальні методи реєстрації заряджених частинок

Методи засновані на використанні систем у нестійкому стані, у яких під дією зарядженої частинки, що пролітає, відбувається перехід до стійкого стану

**Лічильник Гейгера** заснований на ударній іонізації газу; він фіксує тільки факт прольоту частинки

У камері Вільсона використовується пересичена пара. Камера фіксує траєкторію зарядженої частинки; уздовж траєкторії виникають іони, на яких конденсуються крапельки рідини

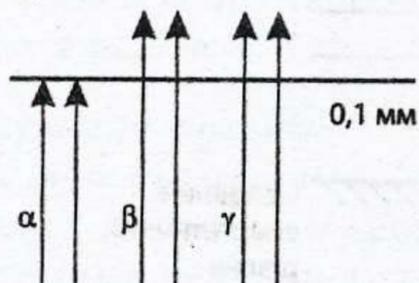
Бульбашкова камера містить перегріту рідину. Частинки добре гальмуються рідиною, що дозволяє спостерігати кілька послідовних реакцій

У товстошарових фотоемульсіях частинки, що пролітають, утворюють приховане зображення. Після прояву видно всі події, що відбулися за час спостереження

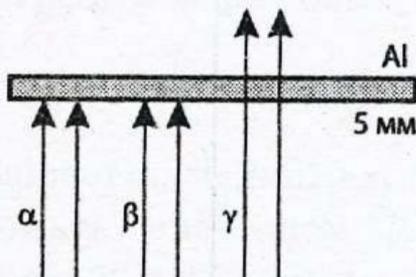
## Біологічна дія радіоактивних випромінювань

Проходячи через речовину, заряджені частинки зіштовхуються з атомними електронами й залишають за собою ланцюжок іонів — відбувається руйнування або ушкодження молекул живої тканини

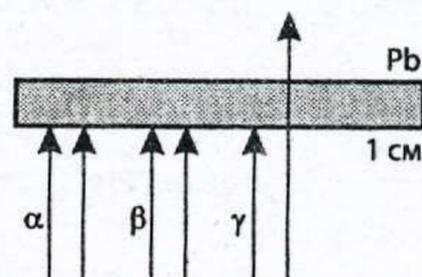
$\alpha$ -Частинки повністю поглинаються аркушем паперу товщиною 0,1 мм



$\beta$ -Частинки повністю поглинаються алюмінієвим екраном товщиною 4–5 мм



$\gamma$ -Промені шар свинцю товщиною 1 см послабляє у 2 рази



Поглинута доза випромінювання:

$$D = \frac{E}{m},$$

де  $[D] = \text{Гр (грей)} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;

$E$  — поглинена енергія випромінювання;

$m$  — маса опроміненої речовини

Природний фон радіації відповідає річній дозі  $2 \cdot 10^{-3}$  Гр

Гранично допустима доза — 0,05 Гр за рік. Разова доза в 3–10 Гр є смертельною.

На практиці широко застосовується позасистемна одиниця рентген (Р). Можна приблизно вважати  $1 \text{ Р} = 0,01 \text{ Гр}$

## Енергія зв'язку атомних ядер

Енергія зв'язку — мінімальна енергія, яку необхідно витратити для поділу атомного ядра на його складові — нуклони, і яка витрачається на здійснення роботи проти дії ядерних сил притягання між нуклонами

Енергія зв'язку

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

де  $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{ядра}}$  — дефект маси ядра

Питома енергія зв'язку — енергія зв'язку, що припадає на один нуклон

Найбільшу питому енергію зв'язку (8,6 МеВ/нуклон) мають елементи з номерами від 50 до 60, тому ядра цих елементів найбільш стійкі

Позасистемна одиниця виміру енергії — електрон-вольт (еВ) =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж

## Ядерні реакції

Ядерні реакції — перетворення атомних ядер при взаємодії з елементарними частинками, у тому числі з  $\gamma$ -квантами або одне з одним.

Для здійснення таких реакцій необхідне зближення ядер і частинок на відстань порядку  $10^{-15}$  м (розміри ядра). У випадку реакції між ядрами потрібна більша енергія для подолання їх кулонівського відштовхування.

Цю енергію можна надати ядрам за допомогою прискорювачів або нагрівання до дуже високих температур.

При бомбардуванні нейтронами висока енергія не потрібна, оскільки що кулонівське відштовхування відсутнє

Енергетичний вихід ядерної реакції:

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

де  $\Delta m$  — різниця між сумарною масою спокою частинок і ядер, що вступають у реакцію, і продуктів реакції;

$\Delta E < 0$  — енергія поглинається;

$\Delta E > 0$  — енергія виділяється

Закони збереження електричних зарядів і масових чисел: сума зарядів (масових чисел) ядер і частинок, що вступають у ядерну реакцію, дорівнює сумі зарядів (масових чисел) кінцевих продуктів (ядер і частинок) реакції

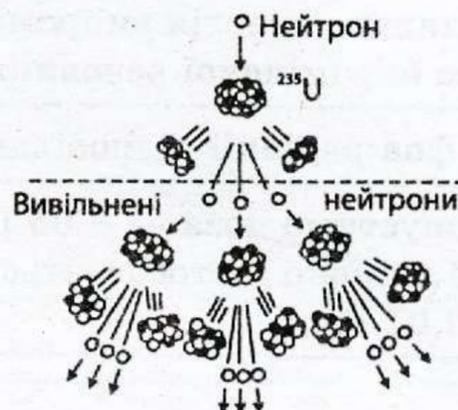
**Реакція розподілу ядра** — реакція, при якій важке ( $Z > 82$ ) ядро під дією нейтронів (або інших частинок) ділиться на більш легкі ядра, близькі за масою

**Ланцюгова реакція** — ядерна реакція, у якій частинки, що здійснюють реакцію, утворюються як продукти цієї реакції

**Необхідна умова ланцюгової реакції:**

$$K \geq 1,$$

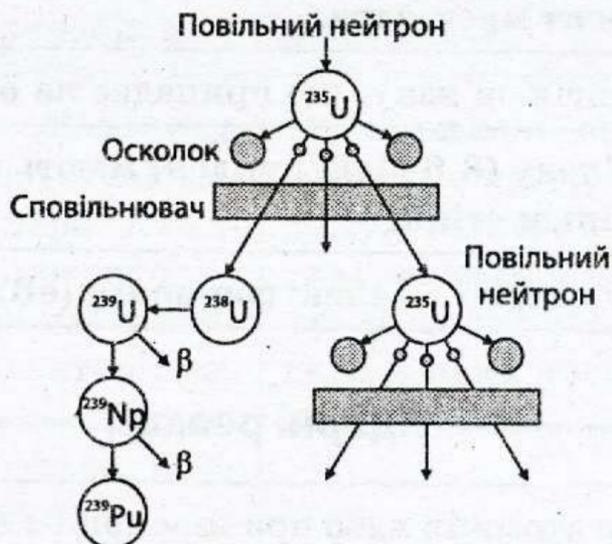
де  $K$  — коефіцієнт розмноження нейтронів, тобто відношення числа нейтронів у даному поколінні до числа нейтронів у попередньому поколінні



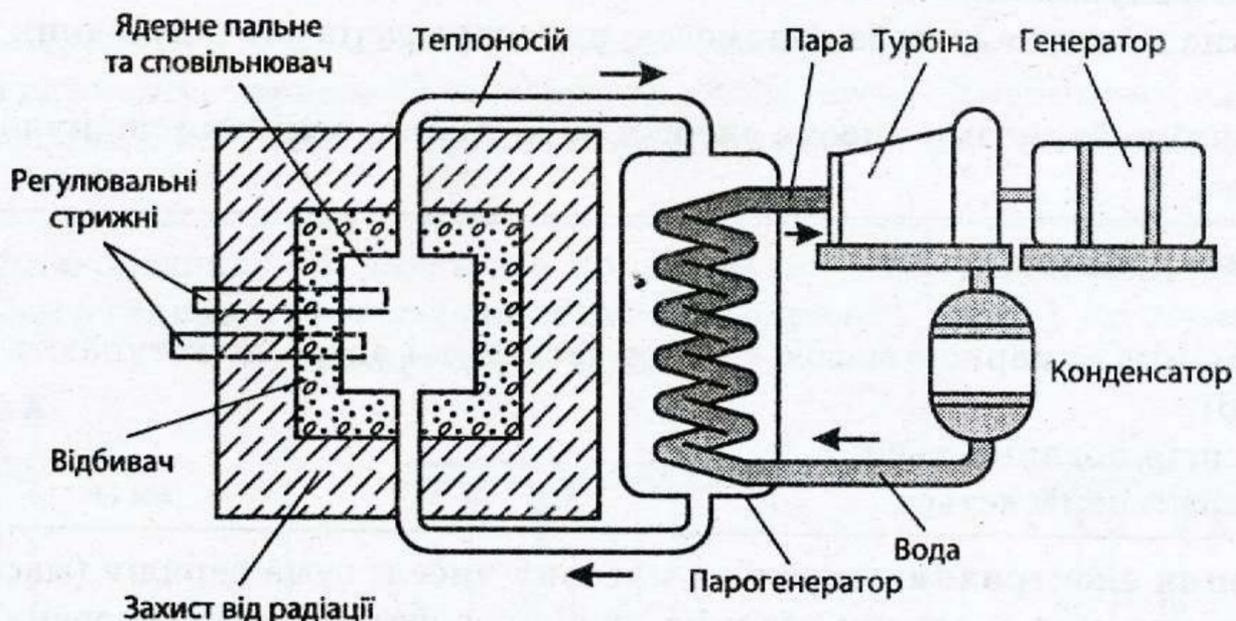
**Критична маса** — мінімальна маса урану, у якій може відбуватися ланцюгова реакція. При поділі 1 г урану виділяється така ж енергія, як при згорянні 3 т вугілля.

**Термоядерна реакція** — реакція синтезу легких атомних ядер, що здійснюється при надвисокій температурі (близько  $10^7$  К)

### Схема процесів, що відбуваються у ядерному реакторі



### Схема енергетичної установки з ядерним реактором



## ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ

**Елементарні частинки** — частинки, що при зіткненні одна з одною не розпадаються, а зазнають взаємних перетворень

**Античастинки** — частинки з такою самою масою, але з протилежною за знаком величиною заряду. Для кожної частинки існує античастинка:

електрон — позитрон;

нейтрон — антинейтрон.

При зіткненні частинки з її античастинкою відбувається анігіляція — перетворення частинок на випромінювання

### Класифікація елементарних частинок

Найменування частинок		Символ	Маса (в електронних масах)	Електричний заряд	Час життя, с	
Фотон		$\gamma$	0	0	Стабільний	
Лептони	Нейтрино електронне	$\nu_e$	0	0	Стабільний	
	Нейтрино мюонне	$\nu_\mu$	0	0	Стабільний	
	Тау-нейтрино	$\nu_\tau$	0	0	Стабільний	
	Електрон	$e^-$	1	-1	Стабільний	
	Мюон	$\mu^-$	207	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
	Тау-лептон	$\tau$	3492	-1	$1,46 \cdot 10^{-12}$	
Мезони	Пі-мезони (піони)	$\pi^0$	264,1	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$	
		$\pi^+$	273,1	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	
	Ка-мезони (каони)	$K^+$	966,4	1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	
		$K^0$	974,1	0	$8,9 \cdot 10^{-11} - 5,2 \cdot 10^{-8}$	
	Ета-нуль-мезон	$\eta^0$	1074	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$	
Баріони	Нуклони	Протони	$p$	1836,1	1	Стабільний (?)
		Нейтрони	$n$	1838,6	0	$10^3$
	Гіперони	Гіперон-лямбда	$\Lambda^0$	2183,1	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Гіперон-сигма	$\Sigma^+$	2327,6	1	$8 \cdot 10^{-11}$
			$\Sigma^0$	2333,6	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$
			$\Sigma^-$	2343,1	-1	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Гіперон-кси	$\Xi^0$	2572,8	0	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			$\Xi^+$	2585,6	-1	$1,64 \cdot 10^{-10}$
		Омега-мінус-гіперон	$\Omega^-$	3273	-1	$8,2 \cdot 10^{-11}$

# ДОВІДКОВИЙ МАТЕРІАЛ

## Фізичні сталі

Стала	Позначення	Значення
Гравітаційна стала	$G$	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Швидкість світла у вакуумі	$c$	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Магнітна стала	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1} = 1,25663706144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Електрична стала	$\epsilon_0$	$8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Стала Планка	$h$ $\hbar = h/2\pi$	$6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $5,4858026 \cdot 10^{-4} \text{ а. о. м.}$
Маса спокою протона	$m_p$	$1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $1,007276470 \text{ а. о. м.}$
Маса спокою нейтрона	$m_n$	$1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $1,008665012 \text{ а. о. м.}$
Заряд електрона (абс. значення)	$e$	$1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомна одиниця маси		$1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Стала Авогадро	$N_A$	$6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Фарадея	$F$	$96484,56 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Молекулярна газова стала	$R$	$8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	$k$	$1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Нормальний (молярний) об'єм ідеального газу при нормальних умовах ( $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , $p = 101,325 \text{ кПа}$ )	$V_0$	$2,241 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{моль}$
Нормальний атмосферний тиск	$P_{\text{атм.}}$	$101\,325 \text{ Па}$
Прискорення вільного падіння (нормальне)	$g_n$	$9,80665 \text{ м/с}^2$
Енергія спокою електрона	$m_e c^2$	$0,5110034 \text{ MeV}$
Енергія спокою протона	$m_p c^2$	$938,2796 \text{ MeV}$
Енергія спокою нейтрона	$m_n c^2$	$939,5731 \text{ MeV}$
Маса атома водню	${}^1\text{H}$	$1,07825036 \text{ а. о. м.}$
Маса атома дейтерію	${}^2\text{H}$	$2,014101795 \text{ а. о. м.}$
Маса атома гелію-4	${}^4\text{He}$	$4,002603267 \text{ а. о. м.}$
Радіус першої боровської орбіти	$a_0$	$5,2917706 \cdot 10^{-11} \text{ м}$

## Шкала електромагнітних випромінювань

Частота, Гц	Довжина хвилі, м	Назва діапазону	Основні джерела збудження
$10^3-10^3$	$3 \cdot 10^{11}-3 \cdot 10^5$	Низькочастотні хвилі	Генератори спеціальних конструкцій, промислові частоти 50-60 Гц, генератори звукових частот до 20 кГц
$10^3-10^{12}$	$3 \cdot 10^5-3 \cdot 10^4$	Радіохвилі	Генератори радіохвиль, генератори надвисоких частот (радіопередавачі, телепередавачі, мобільні телефони)
$10^{12}-4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^4-8 \cdot 10^{-7}$	Інфрачервоне випромінювання	Нагріті тіла, випромінювання молекул
$4 \cdot 10^{14}-8 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^7-4 \cdot 10^{-7}$	Видиме випромінювання із довжинами хвиль від 800 нм до 400 нм	Випромінювання молекул і атомів при теплових і електричних явищах
$3 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7}-10^{-9}$	Ультрафіолетове випромінювання; рентгенівське випромінювання	Випромінювання атомів при опромінюванні речовини електронами з енергіями до 15 кеВ
$3 \cdot 10^{17}-3 \cdot 10^{20}$	$10^{-9}-10^{-12}$	Рентгенівське випромінювання; гамма-випромінювання	Атомні процеси, які збуджуються електронами з енергіями від 20 кеВ до кількохсот МеВ
$3 \cdot 10^{20}-10^{23}$	$10^{-12}-3 \cdot 10^{-15}$	Гамма-випромінювання	Ядерні процеси, радіоактивні перетворення

## Густина твердих речовин

Речовина	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Речовина	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Алмаз	3,5	Нікель	8,8
Алюміній	2,7	Олово	7,3
Береза (суха)	0,7	Парафін	0,9
Бетон (середнє значення)	2,2	Пісок (сухий)	1,5
Вольфрам	19,0	Платина	21,5
Графіт	2,1	Кухонна сіль	2,1
Граніт	2,6	Корок	0,2
Дуб (сухий)	0,8	Свинець	11,4
Ялина (суха)	0,6	Срібло	10,5
Залізо	7,8	Сосна суха	0,5
Золото	19,3	Сталь	7,9
Кам'яне вугілля	1,3	Скло (пляшкове)	2,7
Цегла	1,8	Скло (віконне)	2,5
Латунь	8,5	Парцеляна	2,3
Лід	0,9	Цемент	1,4
Мідь	8,9	Цинк	7,1
Мед	2,4	Чавун	7,0
Мармур	2,7	Ебоніт	1,8

### Густина рідин

Речовина	$10^3 \text{ кг/м}^3$	Речовина	$10^3 \text{ кг/м}^3$
Бензин	0,70	Насичений розчин мідного купоросу	1,15
Вода (4 °С)	1,00	Ртуть (0 °С)	13,60
Вода морська	1,03	Сірчана кислота (міцна)	1,84
Гліцерин	1,26	Спирт	0,80
Гас	0,80	Ефір	0,72
Нафта	0,76		

### Густина газів при 0 °С і тиску 760 мм рт. ст.

Речовина	$\text{кг/м}^3$	Речовина	$\text{кг/м}^3$
Азот	1,25	Гелій	0,18
Амоніак	0,77	Кисень	1,43
Ацетилен	1,17	Неон	0,90
Повітря	1,29	Вуглекислий газ	1,98
Водень	0,09	Хлор	3,21

### Гази

Речовина	Питома теплоємність $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ (за нормального тиску)	Температура конденсації, °С
Азот	1,05	-196
Водень	14,3	-253
Повітря	1,01	—
Гелій	5,29	-269
Кисень	0,913	-183

### Коефіцієнт поверхневого натягу рідин, $\text{мН/м}$ (при 20 °С)

Вода	73	Молоко	46
Бензин	2	Нафта	30
Гас	24	Ртуть	510
Мильний розчин	40	Спирт	22

**Питома теплота згорання палива, МДж/кг**

Бензин	46	Порох	3,8
Дерево	10	Спирт	29
Дизельне топливо	42	Топливо для реактивних літаків	43
Кам'яне вугілля	29	Умовне паливо	29
Гас	46		

**Залежність тиску  $P$  і густини  $\rho$  насиченої водяної пари від температури  $t$**

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-5	0,40	3,2	11	1,33	10,0
0	0,61	4,8	12	1,10	10,7
1	0,65	5,2	13	1,19	11,4
2	0,71	5,6	14	1,60	12,1
3	0,76	6,0	15	1,71	12,8
4	0,81	6,4	16	1,81	13,6
5	0,88	6,8	17	1,93	14,5
6	0,93	7,3	18	2,07	15,4
7	1,0	7,8	19	2,20	16,3
8	1,06	8,3	20	2,33	17,3
9	1,14	8,8	25	3,17	23,0
10	1,23	9,4	50	12,3	83,0

**Межа міцності на розтяг  $\sigma_{п.ч}$  і модуль пружності  $E$**

Речовина	$\sigma_{п.ч}$ МПа	$E$ , ГПа
Алюміній	100	70
Латунь	50	100
Свинець	15	17
Срібло	140	80
Сталь	500	210

### Психрометрична таблиця

Температура сухого термометра, °C	Різниця температур сухого і вологого термометра, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	57	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

### Діелектричні проникності речовини

Вініпласт	3,5	Парафінований папір	2,2
Вода	81	Слюда	6
Гас	2,1	Скло	7
Масло	2,5	Текстоліт	7
Парафін	2		

# ЗМІСТ

## МЕХАНІКА

<b>КІНЕМАТИКА</b> .....	3
Векторні й скалярні величини у фізиці .....	4
<b>ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ</b> .....	6
Рівномірний прямолінійний рух .....	6
Нерівномірний прямолінійний рух .....	6
Рівноприскорений прямолінійний рух .....	7
<b>КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ</b> .....	9
Рівномірний рух по колу .....	9
<b>ДИНАМІКА</b> .....	10
Закони Ньютона .....	11
Динаміка тіла, що рухається по колу .....	12
Сила тяжіння .....	12
Сили пружності .....	14
Вага тіла .....	15
Сили тертя .....	15
Імпульс .....	17
Робота .....	17
Енергія .....	18
Робота сили тяжіння .....	19
Робота сили пружності .....	20
Робота сили тертя .....	20
Потужність .....	20
Коефіцієнт корисної дії (ККД) .....	20
Прості механізми .....	21
<b>СТАТИКА</b> .....	22
Умови рівноваги тіл .....	22
<b>ГІДРОСТАТИКА Й АЕРОСТАТИКА</b> .....	23
Тиск рідини на дно посудини .....	23
Закон Паскаля .....	23
Закон Архімеда .....	24
Атмосферний тиск .....	24
Повітроплавання .....	24
Рівняння Бернуллі .....	25
<b>МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ Й ХВИЛІ</b> .....	25
<b>КОЛИВАННЯ</b> .....	25
Умови виникнення вільних коливань .....	25
Характеристики коливань .....	26
Гармонічні коливання .....	26
Пружинний маятник (вантаж на пружині) .....	26
Математичний маятник .....	27
(матеріальна точка, підвішена на довгій невагомій нерозтяжній нитці) .....	27

Резонанс .....	27
Автоколивальна система .....	27
<b>ХВИЛІ</b> .....	27
Принцип суперпозицій (накладання) хвиль .....	28
Характеристики хвиль .....	28
Принцип Гюйгенса .....	29
Дифракція .....	29
Принцип Гюйгенса — Френеля .....	30
Звукові хвилі .....	30
Характеристика звуку .....	30

## МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

<b>МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ (МКТ)</b> .....	31
Основні положення МКТ .....	31
Обґрунтування МКТ .....	31
Ідеальний газ .....	32
Основне рівняння МКТ .....	32
Рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва—Клапейрона) .....	33
Ізопроееси .....	34
<b>ЗМІНА АГРЕГАТНИХ СТАНІВ РЕЧОВИНИ</b> .....	35
Рідини .....	35
Тверді тіла .....	37

## ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Робота .....	38
Кількість теплоти .....	39
Рівняння теплового балансу .....	39
Закони термодинаміки .....	39
Круговий процес, або цикл .....	40
Теплові двигуни .....	40

## ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

<b>ЕЛЕКТРОСТАТИКА</b> .....	42
Закон збереження електричного заряду .....	42
Закон Кулона .....	43
Електричне поле .....	43
Напруженість .....	43
Принцип суперпозицій полів .....	44
Лінії напруженості (силові лінії) .....	44
Робота сил електростатичного поля .....	44
Потенціал .....	45
Провідники й діелектрики в електричному полі .....	46
Конденсатори .....	47
<b>ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ</b> .....	49
Закони постійного струму .....	49
Робота струму .....	50

Потужність струму .....	50
Закон Джоуля-Ленца .....	50
Закон Ома для повного кола .....	51
<b>ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ</b> .....	51
Електричний струм у металах .....	51
Електричний струм в електролітах .....	51
Електричний струм у газах .....	52
Поняття про плазму .....	53
Електричний струм у вакуумі .....	53
Напівпровідники .....	53
<b>МАГНІТНЕ ПОЛЕ</b> .....	56
Сила Ампера .....	56
Модуль вектора магнітної індукції .....	57
Сила Лоренца .....	57
Лінії магнітної індукції .....	58
Речовина в магнітному полі .....	58
<b>ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ</b> .....	59
Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея) .....	59
Вихрове електричне поле .....	59
Самоіндукція .....	60
Індуктивність .....	60
Енергія магнітного поля струму .....	60
<b>ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ</b> .....	61
Генератор електромагнітних коливань .....	62
Змінний електричний струм .....	62
Кола змінного струму .....	62
Резонанс у колі змінного струму .....	63
Трансформатор .....	63
<b>ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ</b> .....	64
Принцип радіозв'язку .....	64
Поширення радіохвиль .....	64

## ОПТИКА

<b>ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА</b> .....	65
Закони геометричної оптики .....	65
Оптична густина середовища .....	65
Повне відбивання .....	66
Побудова зображення в плоскому дзеркалі .....	66
Проходження світла через плоскопаралельну пластинку .....	66
Проходження світла через тригранну призму .....	66
Лінза .....	67
<b>ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИЧНОЇ ОПТИКИ</b> .....	71
Інтерференція світла .....	71
Дифракція світла .....	72
Дисперсія світла .....	72

Поляризація світла .....	73
Види випромінювань .....	73
Спектри .....	73

### ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Постулати СТВ .....	75
Релятивістська динаміка .....	76

### КВАНТОВА ФІЗИКА

<b>СВІТЛОВІ КВАНТИ</b> .....	77
Рівняння Ейнштейна для фотоефекту .....	78
Тиск світла. Досвід Лебедева .....	78
Хімічна дія світла .....	78

<b>АТОМНА ФІЗИКА</b> .....	79
Атомне ядро .....	79
Квантові постулати Бора .....	79
Будова ядра .....	80
Ізотопи .....	80
Радіоактивність .....	81
Закон радіоактивного розпаду .....	82
Експериментальні методи реєстрації заряджених частинок .....	82
Біологічна дія радіоактивних випромінювань .....	82
Енергія зв'язку атомних ядер .....	83
Ядерні реакції .....	83
Схема процесів, що відбуваються у ядерному реакторі .....	84
Схема енергетичної установки з ядерним реактором .....	84
<b>ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ</b> .....	85
Класифікація елементарних частинок .....	85

<b>ДОВІДКОВИЙ МАТЕРІАЛ</b> .....	86
----------------------------------	----